



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería mecánica

**Diseño y prototipado de un mecanismo de
tres grados de libertad para el
posicionado de la articulación del tobillo.**

Autor:

García Soler, David

Tutor(es):

**Mansilla Gallo, Alberto
Área Ingeniería mecánica
Dpto. CMelM**

Valladolid, Julio 2021.



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

AGRADECIMIENTOS:

A mis padres y hermano, mis mejores compañeros, por dárme todo.

A Alberto, por la oportunidad brindada y el apoyo recibido.

A Nuria De La Fuente de TDV, por su ayuda desinteresada.

A Norelem por su confianza y apoyo en este proyecto.

A mis compañeros del edificio Lucía.

Y a ti Belén.



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



RESUMEN

El siguiente proyecto consiste en el diseño, cálculo y prototipado de un mecanismo con una movilidad de tres grados de libertad, cuyo fin último es el posicionado de tobillo de un paciente, el cual sufre una desalineación en las extremidades inferiores. El objetivo de este mecanismo es realizar un escáner de la articulación para la posterior fabricación de una ortesis a medida que ayude a corregir dicha desalineación. Planteando de esta manera un cambio de tendencia en la técnica actual de elaboración de este tipo de ortesis.

Se fabricará el prototipo mediante el método de impresión 3D FDM y se adquirirán diferentes elementos comerciales para completar el conjunto.

PALABRAS CLAVE

Ortopedia, posicionador, tobillo, impresión 3D, 3 gdl.

ABSTRACT

The following document deals with the design, calculus and prototyping of a three degrees of freedom mobility mechanism, whose purpose is the patient ankle´s positioning, who suffers from feet misalignment, leading to problems like clubfoot. The target of this project is to perform a scan of the joint for the subsequent fabrication of a custom orthosis as it helps to correct that misalignment. Proposing a game changer in the current technique of manufacturing this type of orthosis.

The mechanism will be manufactured using the FDM 3D printing method and acquiring different comercial parts in order to complete de ensemble.

KEY WORDS

Orthopedics, positioner, ankle, 3D printing, 3 dof.



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Organización de la memoria	2
1.4. Justificación del proyecto	3
2. ESTADO DE LA TÉCNICA	5
2.1. Biomecánica.....	5
2.2. Estudio de mecanismos	10
2.3. Normativa para dispositivos médicos	17
5. DISEÑO, DESARROLLO Y PROTOTIPADO	23
5.1. Selección de actuadores y accesorios	23
5.2. Programación.....	30
5.3. Diseño mecánico del posicionador	35
5.4. Cálculo de fallo estático	67
5.5. Prototipado.....	78
5.6. Prueba del mecanismo.....	91
6. ANÁLISIS DE COSTES.....	94
7. CONCLUSIONES	97
8. LINEAS FUTURAS	98
9. BIBLIOGRAFÍA.....	99
10. ANEXOS	103
10.1. ANEXO I: Planos técnicos.....	103
10.2. ANEXO II: Especificaciones de los elementos.....	110



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Ortesis DAFO de tobillo. (Ortosur, 2021).....	1
Ilustración 2: Molde de tobillo. (López, 2021).....	1
Ilustración 3: Ortesis impresa.	1
Ilustración 4: EinScan Pro 2x	1
Ilustración 5: Proceso de fabricación de una ortesis	2
Ilustración 6: Estructura ósea del tobillo. (Zuo S, 2020)	5
Ilustración 7: Movimientos del tobillo. (A. Blanco Ortega, 2013).....	5
Ilustración 8: Dorsiflexión / plantar flexión. (Cifuentes, 2021)	6
Ilustración 9: eversión / Eversión. (Fisioterapia Granada , 2021).....	6
Ilustración 10: Abducción / Aducción. (Kapandji, 2002).....	6
Ilustración 11: Dimensiones del pie. (Yuting Du, 2017)	8
Ilustración 12: Rodilla. (POSNA, 2021)	9
Ilustración 13: Composición rodilla (Hurtado, 2021).....	9
Ilustración 14: Movimientos de la rodilla. (Kapandji, 2002)	10
Ilustración 15: Mecanismo esférico de 3 gdl. (Matteo Malosio, 2012).....	11
Ilustración 16: Unión universal. (Gang Wang, 2017)	12
Ilustración 17: Rutgers ankle triangular y su esquema de uniones. (Marian G. Alvarez-Perez, 2019).....	12
Ilustración 18: Conjunto de diferentes formatos del "rutgers ankle". (Marian G. Alvarez-Perez, 2019).....	13
Ilustración 19: Rehabilitador de tobillo paralelo. (Zuo S, 2020)	14
Ilustración 20: Rehabilitador de tobillo UPV. (Rafael J. Escarabajal, 2020)....	15
Ilustración 21: Robot de rehabilitación UPV y preparación del ejercicio. (Rafael J. Escarabajal, 2020).....	16
Ilustración 22: Servomotor Bekchhoff. (Beckhoff, BECKHOFF New Automation Technology, 2021)	25
Ilustración 23: Dimensiones Servomotor. (Beckhoff, BECKHOFF New Automation Technology, 2021).....	26
Ilustración 24: Reductora AG2250. (Beckhoff, BECKHOFF New Automation Technology , 2021)	28
Ilustración 25: Driver EL7201-9014. (BECKHOFF, 2021).....	28
Ilustración 26: Propuesta conexiones eléctricas.....	29
Ilustración 27: Interfaz TW3	30
Ilustración 28: Árbol TWC3	31
Ilustración 29: Añadir nuevo item en motion control	31
Ilustración 30: Creación de una configuración NC/PTP NCI.....	31
Ilustración 31: Creación de ejes virtual.....	32
Ilustración 32: Creación de 3 ejes	32
Ilustración 33: Ejes creados y listos para programar	32
Ilustración 34: configuración del servomotor	33
Ilustración 35: Conexión física - virtual.....	33



Ilustración 36: control remoto del servomotor	33
Ilustración 37: Rehabilitador de tobillo vertical. (Zuo S, 2020).....	35
Ilustración 38: Transmisión de potencia ab-ad	36
Ilustración 39:Transmisión de potencia para el movimiento de Dorsiflexión- Plantar flexión.....	37
Ilustración 40: Transmisión de potencia inversión-eversión	38
Ilustración 41: Caja inferior y tapa inferior.....	39
Ilustración 42: Cilindro inferior.....	40
Ilustración 43: Corona y rueda helicoidal inferior.....	41
Ilustración 44: Rodamientos inferiores	42
Ilustración 45: Plataforma principal	43
Ilustración 46: Eje medio.....	44
Ilustración 47: Rodamientos medios.....	44
Ilustración 48: Transmisión de potencia media. Motor	45
Ilustración 49: Rueda media y tornillo helicoidal medio	46
Ilustración 50: soportes medios	47
Ilustración 51. Guías y deslizadoras medias	48
Ilustración 52: soporte superior.....	48
Ilustración 53: Ejes y tren superiores	49
Ilustración 54: Rueda superior.....	51
Ilustración 55: Inmovilizador	52
Ilustración 56: Pedal.....	52
Ilustración 57: Casquillos medios.....	53
Ilustración 58: Soporte y eje inferiores.....	53
Ilustración 59: Vista de conjunto renderizada	54
Ilustración 60: Vista de conjunto con motores 1.....	55
Ilustración 61: Vista de conjunto con motores 2.....	56
Ilustración 62: CIR del mecanismo	57
Ilustración 63: Esquema general del proceso de modelizado. (Bachiller, 2018)	68
Ilustración 64: Configuración del análisis 1.....	68
Ilustración 65: Configuración del análisis 2.....	69
Ilustración 66: Configuración del análisis 3.....	69
Ilustración 67: Mallado del ensamblaje	70
Ilustración 68: Caracterización de la carga.....	70
Ilustración 69: Criterio de V-M. (Bachiller, 2018).....	71
Ilustración 70: Representación del criterio de V-M. (Bachiller, 2018).....	71
Ilustración 71: Resultado análisis tensión V-M 1	72
Ilustración 72.Resultado análisis tensión V-M 2	73
Ilustración 73.Resultado análisis tensión V-M 3	74
Ilustración 74: Desplazamiento barra empotrada - libre (Beléndez T., 2002)	75



Ilustración 75:Resultado análisis desplazamiento.....	76
Ilustración 76:Resultado análisis coeficiente de seguridad	77
Ilustración 77: Creality ender 3 y CR 10 (CREALITY, 2021).....	78
Ilustración 78: Software Cura 4.9.0	79
Ilustración 79: Vista previa segmentación soporte superior	82
Ilustración 80. Soporte superior a 45° respecto de la vertical	82
Ilustración 81: Resultado impresión última rueda media.....	83
Ilustración 82: Resultado impresión cilindro inferior	83
Ilustración 83. Resultado impresión pedal y rueda superior.....	83
Ilustración 84: resultado impresión soportes medios.....	84
Ilustración 85: Resultado impresión primera rueda media	84
Ilustración 86: Rodamiento medio	85
Ilustración 87: Rueda y tornillo helicoidales ya montados en la caja inferior .85	
Ilustración 88: Sin fin acero templado	86
Ilustración 89: Comparación corona impresa y corona Norelem taladrada....	86
Ilustración 90: Corona y piñón superiores taladrados	87
Ilustración 91: Accionamiento manual con bola para giro	87
Ilustración 92: Alojamiento superiores para rodamientos.....	87
Ilustración 93: Montaje transmisión de potencia media	88
Ilustración 94: Primer prototipo	88
Ilustración 95: Transmisión de potencia inferior del primer prototipo.....	89
Ilustración 96: Prototipo final.....	90
Ilustración 97: Ensayo en varón de 23 años.	91
Ilustración 98: Pie equino. (Álvarez, 2021).....	92
Ilustración 99: Ensayo en infante de 9 años	92



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Parámetros del movimiento del tobillo de un paciente sano. (Tongyang Sun, 2017).....	7
Tabla 2: Pares de resistencia del tobillo	7
Tabla 3: Elementos necesarios para la motorización y automatización del mecanismo	25
Tabla 4: Características principales del AM8111-wFyz.....	27
Tabla 5: Características principales reductora AG2250+PLE40-M01-10	28
Tabla 6: Características AG2250+PLE40-M01.....	28
Tabla 7: Especificaciones rodamientos inferiores. (SKF, 2021)	43
Tabla 8: Especificaciones rodamientos medios. (NMB, RS components , 2021)	45
Tabla 9: Características rueda media.....	47
Tabla 10: Especificaciones rodamientos piñón superior. (NMB, RS components , 2021)	50
Tabla 11: Especificaciones rodamientos corona superior. (PRO, 2021)	50
Tabla 12: Características rueda media	51
Tabla 13: Ajustes de asientos de ejes. (SFK, 2021)	60
Tabla 14: Ajustes de asientos de soporte. (SFK, 2021)	61
Tabla 15: Lista de materiales.....	66
Tabla 16: Resultados del análisis de tensiones de V-M.....	75
Tabla 17: Parámetros de impresión	81
Tabla 18: Desglose de los costes del proyecto.....	94



ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Par frente a velocidad del servomotor. (Beckhoff, BECKHOFF New Automation Technology, 2021).....	26
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

ÍNDICE DE ECUACIONES

$P = V \times I = \omega \times M$ Ecuación 1: Cálculo de par.....	34
--------------------------------------------------------------------	----

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Introducción

La impresión 3D es una nueva tecnología que ofrece múltiples ventajas a la hora de fabricar diferentes componentes, su versatilidad a la hora de obtener piezas que presentan geometrías complejas difícilmente fabricables mediante otros métodos convencionales nos permite innovar en múltiples aplicaciones. Este proyecto trata de cambiar el método de fabricación de las ortesis DAFO (dynamic ankle-foot orthosis) de tobillo, destinadas a corregir los desalineamientos del pie respecto de la pierna. Actualmente estas se obtienen colocando el pie del paciente sobre una plantilla plástica gracias a la que se tomará un molde de yeso, mediante dicho molde se consigue fabricar la ortesis a medida.



Ilustración 1: Ortesis DAFO de tobillo. (Ortosur, 2021)



Ilustración 2: Molde de tobillo. (López, 2021)

La propuesta es cambiar radicalmente este método, para que el proceso resulte más cómodo tanto para paciente como para técnico, además de agilizar la toma de medidas y fabricación de la ortesis. Todo esto gracias al uso de un mecanismo capaz de posicionar el tobillo en sus tres grados de libertad y que permita el escáner de este en la posición deseada, para lo que es necesario la ausencia de barreras físicas que impidan el escáner. De esta manera, se obtiene una imagen del tobillo del paciente, sobre la que vía software se diseñará una ortesis a medida, que se fabricará gracias a la tecnología de impresión 3D. Es importante que el tobillo gire solidario al mecanismo y que la tibia este inmobilizada.



Ilustración 3: Ortesis impresa.



Ilustración 4: EinScan Pro 2x



Ilustración 5: Proceso de fabricación de una ortesis

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es cambiar el método de fabricación de las ortesis de tobillo, para ello es necesario diseñar, calcular y prototipar un mecanismo capaz de posicionar el tobillo en sus tres grados de libertad, que sea compatible con el posterior escáner de la articulación, para conseguir esto es necesario que el tobillo quede libre y que no presente ningún tipo de barreras que dificulten el escáner. El mecanismo debe de ser capaz de conseguir estos movimientos de una manera segura, certificando que los pares de aplicación sobre la articulación no superen unos límites previamente establecidos, su uso debe de ser intuitivo, cómodo y sencillo para el técnico especialista que se encargue de usarlo.

Para poder cumplir los objetivos antes descritos, es necesario en primer lugar conocer las articulaciones a movilizar, de lo contrario es posible que no se prototipe un mecanismo seguro. Es necesario investigar los trabajos más relevantes realizados en materia de movilización del tobillo publicados en las bases de datos a las que esta suscrita la Uva, obteniendo de esta manera conocimientos de lo que se quiere proyectar. También se debe estudiar la norma a cumplir, de lo contrario no será posible la comercialización del producto final.

El propósito de este documento es que el mecanismo final pueda llegar a ser implementado en el día a día de una ortopedia, se deben establecer las bases para una segunda fase del proyecto en la que se fabrique el diseño final y pueda implementarse adecuadamente.

1.3. Organización de la memoria

La memoria se organiza de tal forma que:

- En primer lugar, se comprenden las articulaciones que se van a movilizar y cómo hacerlo de una manera segura.
- Continuando con un estudio de los diferentes trabajos realizados acerca de la movilización de las extremidades inferiores y su respectiva comparación con las necesidades particulares del proyecto.
- Seguido de un análisis del reglamento europeo que nuestro mecanismo debe cumplir, ya que de lo contrario no será posible comercializarlo.
- Se establecerán las bases para una segunda fase en la que se automatice el mecanismo mediante el uso de actuadores, se



seleccionarán estos, sus accesorios y se darán bases de su correspondiente programación.

- Tras esto se continua con la fase de diseño mecánico del posicionador, con una descripción técnica de cada componente y su función en el conjunto final.
- Previa fabricación es necesario corroborar la seguridad del conjunto, por lo que se realizará un análisis del fallo estático de este.
- Una vez asegurado que el mecanismo soporta las cargas establecidas, se pasará a la fase de prototipado, con la correspondiente prueba del prototipo final.
- Se analizarán los costes derivados de la fabricación del prototipo, con todos sus conceptos desglosados.
- Finalmente se analizará el cumplimiento de los objetivos descritos y se propondrán las líneas futuras del proyecto.
- En los anexos se encontrarán los planos técnicos de todos los componentes del ensamblaje y las hojas de especificaciones proporcionadas por los fabricantes de los elementos comerciales adquiridos.

1.4. Justificación del proyecto

La realización de este proyecto surge de la necesidad de cambio en el método de fabricación de las ortesis de tobillo, tratando de agilizarlo y que resulte más cómodo para paciente y técnico.



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

2. ESTADO DE LA TÉCNICA

2.1. Biomecánica

Para conseguir diseñar un mecanismo seguro para el paciente, es necesario conocer el funcionamiento de las articulaciones a movilizar.

2.1.1 Tobillo

El tobillo o articulación tibioperonea-astragalina está formada por dos articulaciones principales:

- Por un lado, tenemos la articulación superior, cuya función es la conexión de la tibia y el peroné con el astrágalo. Su función es conseguir el movimiento de dorsiflexión y plantar flexión del tobillo, movimientos que analizaremos más adelante.
- Por otro lado, nos encontramos con la articulación inferior, la cual se encuentra entre el astrágalo y el calcáneo. Su función es conseguir los movimientos de inversión e inversión.

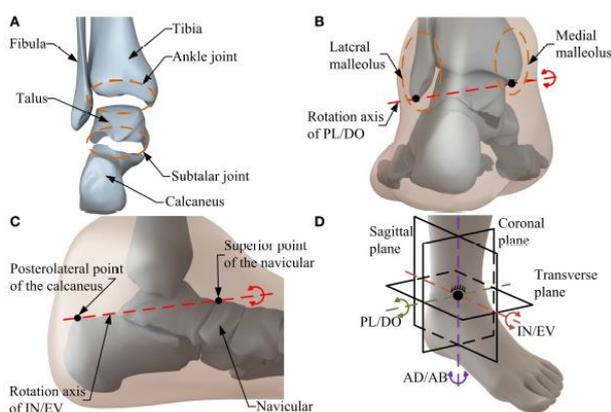


Ilustración 6: Estructura ósea del tobillo. (Zuo S, 2020)

El tobillo es una articulación muy conflictiva, ya que soporta todo el peso del usuario, presentando limitaciones muy acusadas, de ahí que en múltiples pacientes se presenten deformidades y lesiones. Gracias a la ayuda de la rotación de la rodilla en su sentido axial, el tobillo consigue presentar 3 grados de libertad de movimiento, en la siguiente imagen se pueden ver los ejes de actuación de esta articulación y los movimientos que se producen en cada uno de ellos:

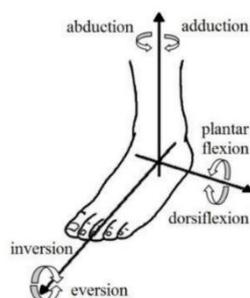


Ilustración 7: Movimientos del tobillo. (A. Blanco Ortega, 2013)

A continuación, se analizan estos pares de movimientos:

- Dorsiflexión – plantar flexión: Estos movimientos reducen o aumentan el ángulo que se forma entre el pie y la pierna, y hace que los dedos del pie se acerquen o se alejen de la espinilla.



Ilustración 8: Dorsiflexión / plantar flexión. (Cifuentes, 2021)

- Inversión – eversión: La eversión es la rotación externa del pie, elevándose el borde externo del mismo. Por contraparte, la inversión es la rotación interna del pie con la correspondiente elevación del borde interno del pie.

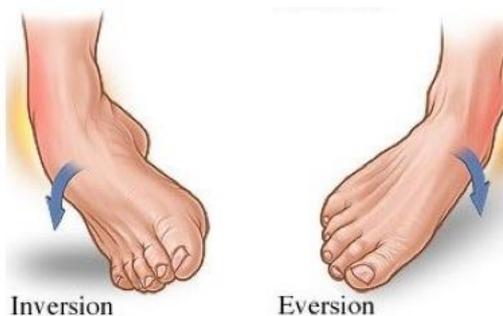


Ilustración 9: eversión / Eversión. (Fisioterapia Granada , 2021)

- Abducción – aducción: Rotación interna y externa del tobillo sin elevación del borde.



Ilustración 10: Abducción / Aducción. (Kapandji, 2002)

Comúnmente se realiza una similitud del tobillo como una rótula esférica, ya que presenta los mismos 3 grados de libertad, el objetivo del mecanismo es conseguir dichos movimientos. A continuación, se analiza la fisiología de los movimientos del tobillo en un paciente sano, como medida de orientación en los pares y velocidades de movimiento límites en el mecanismo tema de este proyecto:

Eje	Movimiento	Amplitud de movimiento [°]	Par [N.m]	Velocidad angular [°/s]	Velocidad [rpm]
x	Inversión	0-30	10	≤100	≤16,67
	Eversión	-20-0			
y	Dorsiflexión	0-30	45	≤80	≤13,33
	Plantar flexión	-40-0			
z	Abducción	0-20	20	≤80	≤13,33
	Aducción	-30-0			

Tabla 1: Parámetros del movimiento del tobillo de un paciente sano. (Tongyang Sun, 2017)

Para el caso de estudio no es necesario conseguir toda la amplitud de movimiento de las articulaciones ni una alta velocidad, ya que son necesarios pequeños movimientos y velocidades muy bajas, debido a que las malformaciones que presentan los pacientes no alcanzan amplitudes como las de un paciente sano.

Se realiza una dinamometría particular para conocer los pares de resistencia que presenta el tobillo de un paciente sano, con la ayuda de un dinamómetro y un banco que presenta los mismos tres grados de libertad que la articulación, los resultados obtenidos son:

Movimiento	Par [N.m]
Inversión Eversión	2,55
Dorsiflexión Plantar flexión	5
Abducción Aducción	2,64

Tabla 2: Pares de resistencia del tobillo

Se llega a la conclusión de que los pares resistivos del tobillo son muy pequeños en un paciente sano. Conocidos los límites inferiores de par necesario para movilizar la articulación y los valores normales de marcha, se

advierte cual es el límite a superar para conseguir mover la articulación, y cuál es el límite máximo para conseguir un movimiento seguro.

Se debe conseguir un movimiento natural de la articulación, por lo que es necesario que el centro instantáneo de rotación del mecanismo coincida con la articulación superior del tobillo. En la siguiente imagen se pueden observar las medidas estándar del pie y la posición del centro de giro del tobillo.

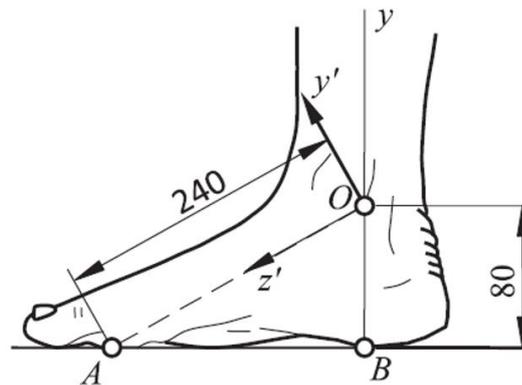


Ilustración 11: Dimensiones del pie. (Yuting Du, 2017)

El punto “O” de la figura corresponde con la unión del talus con la tibia, lo que se entiende como el centro de rotación del tobillo, una consideración muy importante es conseguir que el CIR del mecanismo coincida con el punto “O” del paciente.

2.1.2. Rodilla

Tras inmovilizar la tibia, los movimientos de la rodilla quedan restringidos, y un mal diseño del mecanismo podría ser lesivo para la misma. En este apartado se analizan los movimientos que realiza esta articulación y como se ven afectados por la inmovilización de la tibia.

La rodilla es una compleja articulación del cuerpo humano, en la siguiente figura se pueden observar las diferentes uniones con músculos, tendones y estructuras óseas (fémur, tibia y rótula):

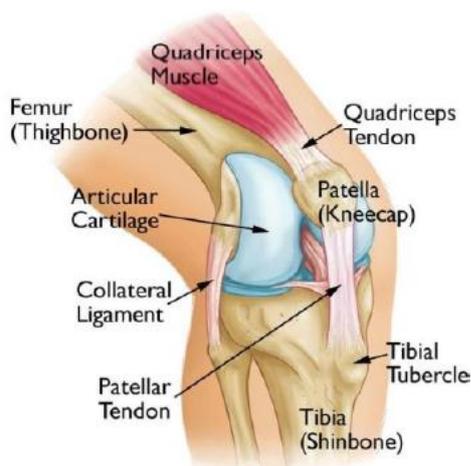


Ilustración 12: Rodilla. (POSNA, 2021)

La rodilla está formada por el fémur, la tibia, el peroné y la rótula. La rótula se articula con el fémur.

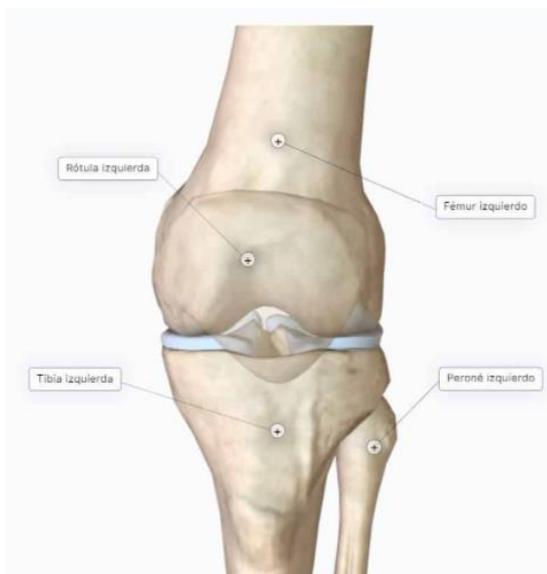


Ilustración 13: Composición rodilla (Hurtado, 2021)

La conexión entre el fémur y la tibia es realizada por la rodilla, la cual permite dos movimientos, uno de translación (flexión y extensión) y rotación (interior y exterior), aunque este último solo se puede realizar si la rodilla se encuentra en flexión, siendo estos movimientos bastante limitados. Estudiemos estos movimientos:

- " La flexo-extensión se trata del movimiento principal de la rodilla. La extensión se define como el movimiento que aleja la cara posterior de la pierna de la cara posterior del muslo. La flexión, por el contrario, puede definirse como el movimiento que aproxima la cara posterior de la pierna a la cara posterior del muslo. Estos movimientos se realizan

en el plano sagital, condicionado por el eje transversal de la rodilla” (Kapandji, 2002)

- “La rotación de la rodilla tiene lugar sobre el eje vertical de la misma y sólo es posible si la rodilla se encuentra flexionada. Los movimientos rotacionales son internos y externos. La rotación interna se da cuando la punta del pie se dirige hacia adentro y por el contrario la rotación externa se da cuando la punta del pie se dirige hacia afuera. Los grados de rotación externa son de 40 frente a los 30 grados de rotación interna.” (Kapandji, 2002)

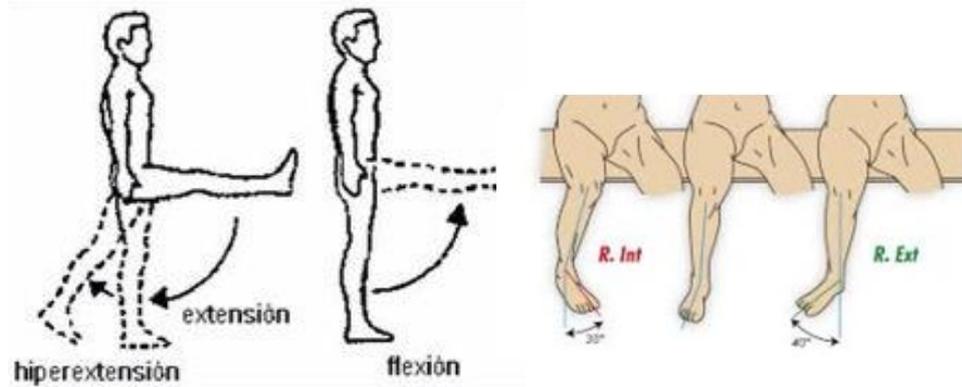


Ilustración 14: Movimientos de la rodilla. (Kapandji, 2002)

En el caso de estudio, la rodilla se encuentra en flexión de 90 grados y la tibia inmovilizada, impidiendo los dos movimientos de la articulación. Esto es debido a que se quiere conseguir un movimiento puramente de la articulación del tobillo, y de no inmovilizar la tibia, sería la rodilla la que presentaría los dos movimientos anteriormente descritos.

2.2. Estudio de mecanismos

Multitud de investigadores y diseñadores han estudiado diferentes soluciones para la movilización asistida de las extremidades inferiores, en su gran mayoría en términos de rehabilitación, aunque es extrapolable a la aplicación de este proyecto. A continuación, se analizan los artículos más relevantes publicados en las bases de datos a las que tiene acceso la UVa. Para poder evaluar la adecuación de las propuestas de los diferentes investigadores, es necesario en primer lugar comprender cuales son las necesidades del mecanismo en cuestión, a continuación, se enumeran:

- Debe de ser compacto, ya que se va a instalar en una ortopedia, por lo que es las limitaciones de espacio son acusadas.
- El centro instantáneo de rotación del mecanismo debe de coincidir con la articulación del paciente, por lo que debe de estar diseñado de tal manera que sea flexible y se adapte a todo tipo de pacientes.

- Debe de poseer al menos los 3 grados de libertad de rotación presentes en el tobillo, como añadido podría ser interesante también introducir 3 desplazamientos, es decir un mecanismo que presente los 6 grados de libertad de un sólido rígido.
- El presupuesto es reducido, para que su coste sea asumible por pequeñas clínicas de ortopedia.
- El mecanismo debe de dejar libre el tobillo, ya la existencia de barreras físicas, impide un correcto escáner.

2.2.1. “Spherical parallel three degrees-of-freedom robot for ankle-foot neuro-rehabilitation”. (Matteo Malosio, 2012)

Este grupo de investigadores propone un robot esférico basado en el diseño del ojo de Gosselin que permite la rehabilitación del tobillo del paciente en sus tres grados de libertad mediante el mecanismo que podemos ver en la siguiente ilustración:

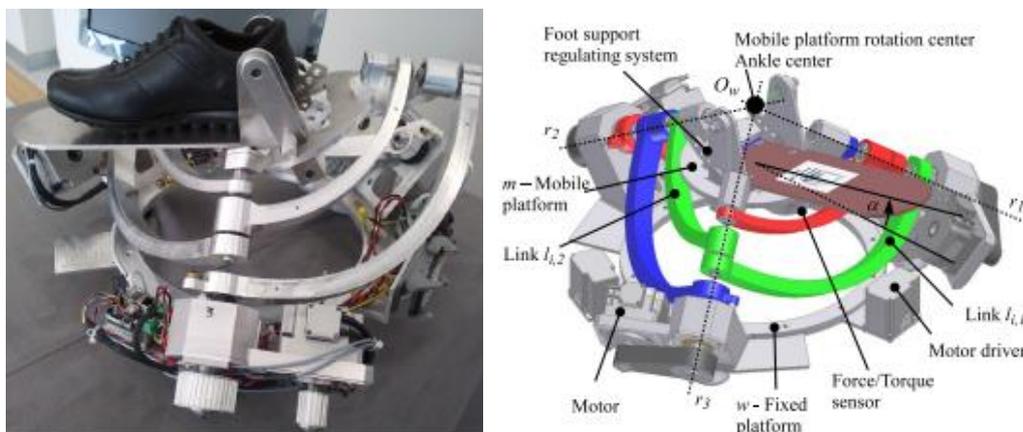


Ilustración 15: Mecanismo esférico de 3 gdl. (Matteo Malosio, 2012)

El mecanismo consiste en 6 brazos esféricos unidos entre sí y a su vez a la bancada, todo esto mediante el uso de rótulas esféricas, estos brazos están accionados por servomotores, cuyos ejes de giro convergen en un punto del espacio que se aproxima al punto “O” (ver [2.1.1](#)) de la articulación superior del tobillo del paciente. Este mecanismo permite la variación de la posición del tobillo del paciente, gracias a la presencia de un pasador que varía la posición de la plataforma móvil, consiguiendo que el punto de convergencia de los ejes de giro siempre coincida con el punto “O” del paciente. Este mecanismo cumple con los requisitos presentados con anterioridad, el problema surge en el gran tamaño que presenta, la dificultad para escanear el tobillo debido a los soportes metálicos, y el coste de fabricación de los brazos, el mecanizado de este tipo de geometrías es complejo y costoso.

2.2.2. “Rutgers ankle”. (Marian G. Alvarez-Perez, 2019)

Multitud de sistemas de rehabilitación de tobillo están inspirados en este diseño de 1999 creado por la universidad de Rutgers, el cual consiste en el uso de una plataforma Stewart accionada por al menos 3 actuadores lineales, los cuales están unidos en sus extremos mediante rótulas esféricas o uniones universales como las de la ilustración 15, y que gracias a una buena programación del movimiento de estos, es capaz de conseguir en su plataforma móvil hasta 6 grados de libertad, siendo esta una buena solución para la rehabilitación de tobillo. En las siguientes imágenes podemos ver diferentes soluciones aplicando esta idea.

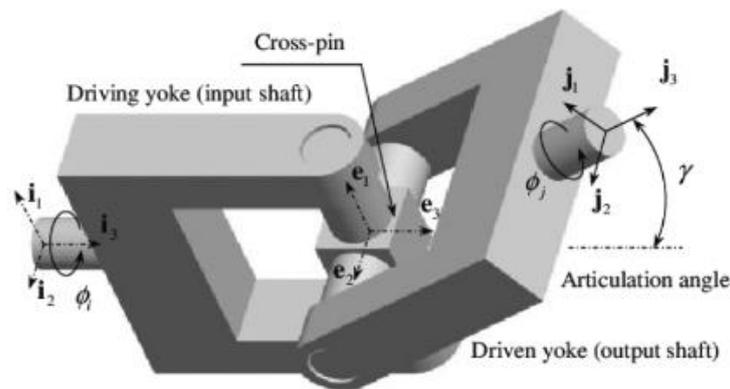


Ilustración 16: Unión universal. (Gang Wang, 2017)

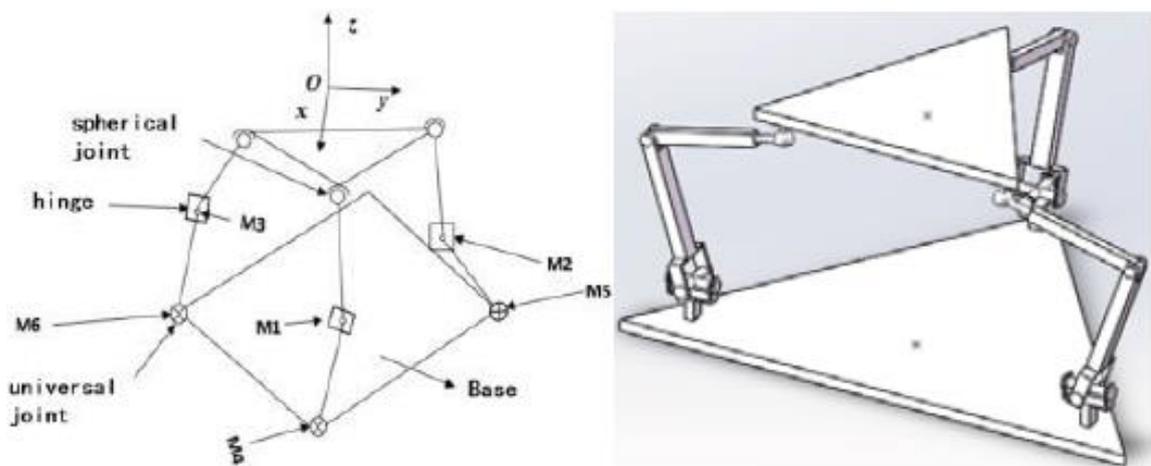


Ilustración 17: Rutgers ankle triangular y su esquema de uniones. (Marian G. Alvarez-Perez, 2019)

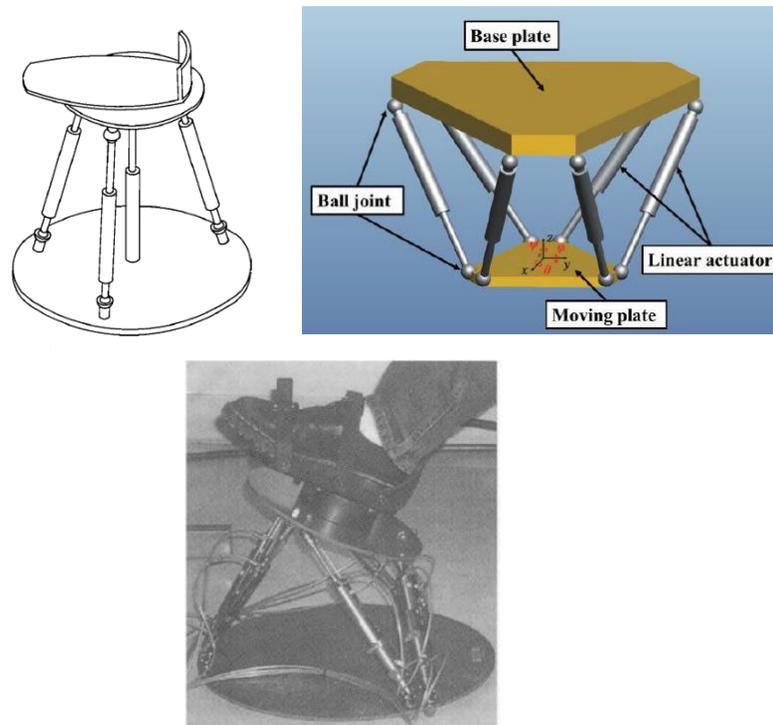


Ilustración 18: Conjunto de diferentes formatos del "rutgers ankle". (Marian G. Alvarez-Perez, 2019)

En definitiva, el mecanismo consiste en una base fija a bancada y una base móvil en la que reposa el pie del paciente, mediante el movimiento programado de los diferentes actuadores, ya sea individualmente o coordinado, podemos conseguir de 3 a 6 grados de libertad, dependiendo del número de actuadores que usemos, una plataforma con 6 actuadores lineales es capaz de conseguir 3 grados de libertad rotacionales y 3 desplazamientos en el espacio.

Las principales desventajas que presenta esta solución es la complejidad de programación y análisis de la cinemática del mecanismo. La razón principal por la que se descarta este tipo de diseño es que el centro instantáneo de rotación es variable, por lo que conseguimos un movimiento desnaturalizado de la articulación, existiendo la posibilidad de lesión, el punto de convergencia de los axoides generados por los elementos móviles varía durante todo el movimiento, por lo que el CIR también es variable.

2.2.3." Design and performance evaluation of a novel wearable parallel mechanism for ankle rehabilitation ". (Zuo S, 2020)

Este grupo de investigadores de nacionalidad china proponen una novedosa solución para la rehabilitación de tobillo. Mediante el uso de dos actuadores lineales (P1 y P2) conectados en un extremo a la base móvil mediante rótulas esféricas (S1 y S2), y en el otro extremo de este conectado a bancada mediante una junta universal (U1 y U2) y el uso de un motor rotativo (R1), consiguen los 3 grados de libertad de movimiento del mecanismo, cuyo centro instantáneo

de rotación coincide con el del paciente, como se puede ver en la ilustración 19.

A continuación, se analizan los movimientos del mecanismo:

- Movimiento de dorsiflexión – plantar flexión: Se consigue con el movimiento simultaneo a la misma velocidad de los actuadores lineales (P1 y P2).
- Movimiento de abducción – aducción: Se consigue con el motor rotativo R1, es el más sencillo.
- Movimiento de inversión – eversión: Lo conseguimos moviendo independientemente cada actuador lineal, si es P1 el que se mueve y P2 queda fijo, tendremos inversión, y en el caso contrario eversión. En el caso de que la unión entre base móvil y actuador no fuse mediante una rótula, este movimiento dañaría el cilindro.

De lo anterior se infiere que es necesario una adecuada programación y la aplicación de un PID para el control de los actuadores y sus respuestas frente a diferentes variable, tales como impulsos eléctricos generados por botones, o limitaciones de par por seguridad.

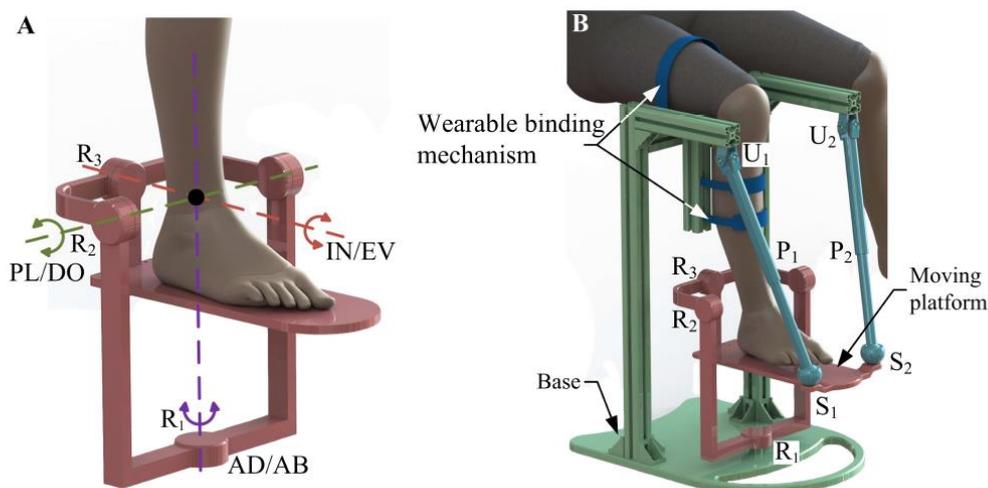


Ilustración 19: Rehabilitador de tobillo paralelo. (Zuo S, 2020)

La dificultad para escanear el tobillo es acusada, debido a la presencia de la base principal y los actuadores lineales, los cuales generan interferencias en la obtención de la imagen del tobillo, la principal desventaja que presenta este mecanismo enfocada a la aplicación particular de este documento.

2.2.4. “Development of lower-limb rehabilitation exercises using 3-PRS Parallel Robot and Dynamic Movement Primitives”. (Rafael J. Escarabajal, 2020)

Desde la Universidad politécnica de Valencia, plantean el uso de un robot paralelo 3-PRS (como el que podemos ver en la ilustración 20) para su uso en la rehabilitación de tobillo, aplicando diferentes movimientos programados cuidadosamente para conseguir la recuperación de la amplitud de movimiento de la articulación.

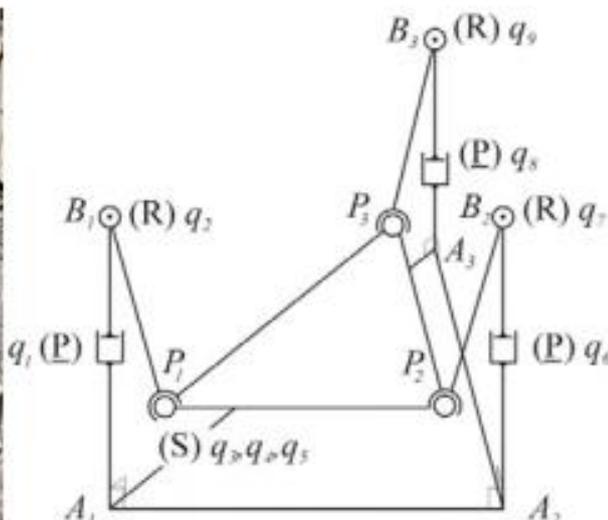


Ilustración 20: Rehabilitador de tobillo UPV. (Rafael J. Escarabajal, 2020)

El mecanismo consiste en 3 actuadores lineales dispuestos en una configuración de triángulo equilátero, conectados por uno de sus extremos a la bancada con una unión prismática (permite el movimiento longitudinal) y por el otro extremo conectado a un cilindro con una unión de revolución, el cual se une a la base móvil (donde descansará el pie del paciente) a través de una unión esférica (una rótula). Esta cadena cinemática permite 2 rotaciones (dorsiflexión – plantar flexión e inversión – eversión) y un movimiento longitudinal en el eje Z (subir o bajar la plataforma).

Una adecuada programación de los actuadores permite controlar de una manera muy precisa los movimientos del tobillo y gracias a poder monitorizar la intensidad consumida por cada actuador, se pueden realizar paradas de emergencia cuando el par (el cálculo de par en función de la intensidad se tratará con posterioridad) ejercido sobre el tobillo excede los límites establecidos, evitando de esta manera posible lesiones por el uso no adecuado del mecanismo.

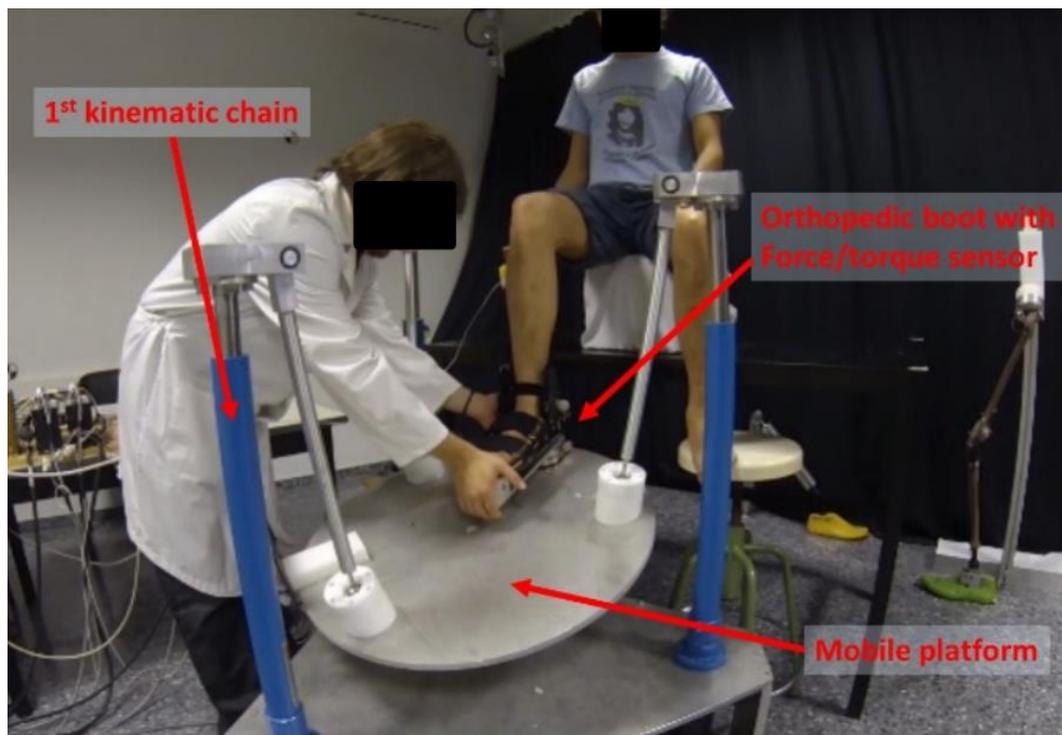


Ilustración 21: Robot de rehabilitación UPV y preparación del ejercicio. (Rafael J. Escarabajal, 2020)

Los principales inconvenientes que presenta este tipo de dispositivo son:

- Sus excesivas dimensiones y la dificultad que presenta su implementación en una ortopedia.
- Aunque presenta 3 grados de libertad, uno de ellos es longitudinal, no presenta los tres grados de libertad rotacionales que buscamos.
- El coste de fabricar una plataforma similar es elevado, ya que son necesarios tres actuadores lineales de gran tamaño, grandes células de carga y plataformas de dimensiones excesivas.

El principal objetivo de incluir este mecanismo en el documento es enseñar como con un control adecuado de los actuadores, implementado un PID conveniente, nos permite conseguir movimientos seguros, precisos y a velocidad controlada, efectuando paradas de emergencia programadas cuando las condiciones del experimento superan los límites establecidos, características a implementar en el mecanismo tema de este proyecto.

2.2.5. Conclusiones tras el análisis

Tras este estudio se han llegado a diferentes

- Del subcapítulo [2.2.1](#) se recoge la idea de implementar algún tipo de dispositivo mecánico que nos permita regular la altura a la que se encuentra el tobillo respecto del CIR del mecanismo, además de una forma de fijar el tobillo a la base móvil.

- En el subcapítulo [2.2.2](#) se recogen ideas de diferentes tipos de uniones articuladas entre elementos y que cadenas cinemáticas aplicar para conseguir distintos grados de libertad.
- El mecanismo presentado en [2.2.3](#) muestra una geometría en disposición vertical que se ajusta perfectamente a la aplicación final de este proyecto, tanto la posición del paciente respecto del mecanismo, como una manera de inmovilizar la tibia respecto del tobillo.
- Los investigadores de la Universidad politécnica de Valencia estudiados en el [2.2.4](#) muestran todas las ventajas que ofrece el uso de actuadores programables y la aplicación de un PID, características que se aplicarán en un futuro en el posicionador de tobillo.

2.3. Normativa para dispositivos médicos

2.3.1. Introducción

Debido a la responsabilidad que supone el uso de este tipo de mecanismos en el cuerpo humano, están sujetos a una normativa muy estricta que se encarga de regular la trazabilidad, etiquetado, documentación, seguridad constructiva, diseño, fabricación ... Dicha normativa de ámbito europeo es la conocida como “medical device regulation “(MDR) o REGLAMENTO (UE) 2017/745 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 5 de abril de 2017.

Su implementación es una tarea compleja, y es por ello que la mayoría de empresas que se dedican a la fabricación de dispositivos médicos, subcontratan este servicio a consultoras externas, tras contactar con TDV, una consultora especializada en el sector de las ciencias de la salud, que se dedica al asesoramiento de empresas en el cumplimiento de la normativa europea para dispositivos médicos e implementación de sistemas de gestión de calidad, se han conseguido conocer los términos básicos a cumplir para estar bajo norma, a continuación se analizan:

2.3.2. Clasificación del producto

En primer lugar, se deben conocer ciertas definiciones y clasificaciones para saber cuáles son las especificaciones a las que debe de estar sujeto el producto. La clase condicionará el diseño, las exigencias reglamentarias y la documentación necesaria para que el producto se pueda sacar a mercado.

- El reglamento 2017/745 define un producto sanitario como “*todo instrumento, dispositivo, equipo, programa informático, implante, reactivo, material u otro artículo destinado por el fabricante a ser utilizado en personas, por separado o en combinación, con alguno de los siguientes fines médicos específicos: – diagnóstico, prevención, seguimiento, predicción, pronóstico, tratamiento o alivio de una enfermedad, – diagnóstico, seguimiento, tratamiento, alivio o compensación de una lesión o de una discapacidad, – investigación,*

sustitución o modificación de la anatomía o de un proceso o estado fisiológico o patológico, – obtención de información mediante el examen in vitro de muestras procedentes del cuerpo humano, incluyendo donaciones de órganos, sangre y tejidos.“ (europea, 2017)(REGLAMENTO (UE) 2017/745 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 5 de abril de 2017, capítulo I, artículo II) .

- Por lo tanto, efectivamente el posicionador de tobillo es un producto sanitario.
- A continuación, se analiza la clasificación de producto.
 - *“Uso pasajero: el del producto destinado normalmente a utilizarse de forma continua durante menos de sesenta minutos”* (REGLAMENTO (UE) 2017/745 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 5 de abril de 2017, Anexo VIII, Cap I).
 - Atendiendo al Anexo VIII, capítulo I del reglamento, el producto es **NO INVASIVO**.
 - - Atendiendo al capítulo III Regla I, *“Todos los productos no invasivos se clasifican en la clase I, salvo que sea aplicable alguna de las reglas siguientes.”* (europea, 2017) (REGLAMENTO (UE) 2017/745 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 5 de abril de 2017, ANEXO VIII, capítulo III). Es aplicable la regla 4, que dicta que *“Todos los productos no invasivos que entren en contacto con la piel o la membrana mucosa lesionadas se clasifican en la clase I si están destinados a ser utilizados como barrera mecánica, para la compresión o para la absorción de exudados”* (europea, 2017) (REGLAMENTO (UE) 2017/745 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 5 de abril de 2017, ANEXO VIII, Capítulo III). El producto en cuestión es de clase I, algo muy ventajoso, ya que en este caso el producto es auto certificable, asumiendo una persona dicha certificación y los problemas que pueda causar al paciente, tema a tratar más adelante. En el caso de que el producto se clasificase en la clase Ila o superior, es necesario que un organismo notificado y autorizado por la AEMPS (Agencia Española de Medicamentos y Productos Sanitarios) revise el producto y certifique que es seguro.

En definitiva, se trata con un producto sanitario no invasivo de clase I, simplificando mucho la tarea de normalización, ya que como se ha comentado con anterioridad, el producto es auto certificable.

Destacar que en este apartado solo se trata con la norma sujeta al posicionador y no a la ortesis, la cual esta sujeta a una norma más estricta por ser un producto fabricado a medida para el paciente.

2.3.3. Documentación técnica

Se exige redactar una documentación técnica que “se presentará de forma clara, organizada, fácil de buscar e inequívoca, e incluirá, en particular, los elementos enumerados en el presente anexo.” (europea, 2017) (REGLAMENTO (UE) 2017/745 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 5 de abril de 2017, ANEXO II). La documentación técnica que revisará posteriormente el organismo acreditado por la AEMPS se presenta a continuación.

Descripción y especificaciones del producto

A continuación, se recogen todos los elementos que se nos requieren en el Anexo II del reglamento:

a) Denominación o nombre comercial y descripción general del producto, incluida su finalidad y los usuarios previstos:

Posicionador de tobillo (PDT): Mecanismo para posicionado de la articulación del tobillo en sus tres grados de libertad, mediante motores eléctricos o manualmente, para su posterior escáner. Su uso está destinado a pacientes con problemas en las extremidades inferiores que acudan al ortopeda para la fabricación de una ortesis.

- b) En este apartado del reglamento nos requieren especificar el nº de etiqueta o de catálogo que se asocia a nuestro producto, algo que no compete por estar aún en la fase de prototipado.**
- c) grupo de pacientes destinatario, afecciones que se pretende diagnosticar, tratar o controlar y otras consideraciones, como los criterios de selección de los pacientes, indicaciones, contraindicaciones, advertencias:**

El grupo de pacientes destinatarios son aquellos con problemas de alineación en las extremidades inferiores, los cuales necesitan del uso de una ortesis para tratar su dolencia.

d) principios de funcionamiento del producto y su modo de acción demostrado científicamente, si procede:

El principio de funcionamiento consiste en el movimiento motorizado o manual de una plataforma sobre la que se encuentra inmovilizado el tobillo, consiguiendo posicionarle en su lugar natural, para con posterioridad realizar un escáner de este.

e) justificación de que el producto se considere un producto sanitario:

Se considera un producto sanitario ya que es un instrumento que se encuentra en contacto con el paciente y cuyo fin es el diagnóstico y tratamiento de una patología.



f) la clase de riesgo del producto y la justificación de la o las reglas de clasificación aplicables de conformidad con el anexo VIII:

Las reglas de clasificación se han tratado con anterioridad y el análisis de riesgos se tratará en una segunda fase del proyecto.

g) explicación de las posibles características novedosas:

Las características novedosas que ofrece la propuesta es una mejora en el método de obtención de ortesis, evitando enyesar al paciente y fabricando las ortesis en un tiempo más reducido y de una manera más cómoda para técnico y paciente.

h) una descripción de los accesorios del producto, de otros productos y de otros productos distintos de los considerados que estén destinados a utilizarse en combinación con él:

Todos los accesorios y componentes de este proyecto se tratan con posterioridad en esta memoria.

i) una descripción o lista completa de las distintas configuraciones o variantes del producto que se tenga intención de comercializar:

El proyecto aún se encuentra en fase de prototipo, por lo que no compete hablar de comercialización.

j) descripción general de los principales elementos funcionales, por ejemplo, sus piezas o componentes (incluido el programa informático si procede), su formulación, su composición, su funcionalidad y, en su caso, su composición cualitativa y cuantitativa. Si procede, se incluirán representaciones visuales rotuladas (como diagramas, fotografías y dibujos) que indiquen claramente las piezas o los componentes clave, con explicaciones suficientes para comprender los dibujos y diagramas;

A lo largo de esta memoria, se dan representaciones, planos técnicos y explicaciones de todos y cada uno de los componentes parte de este diseño.

k) descripción de las materias primas incorporadas a los elementos funcionales clave y de las que estén en contacto directo con el cuerpo humano o en contacto indirecto con el mismo, por ejemplo, durante la circulación extracorpórea de líquidos corporales:

En contacto directo con el pie desnudo del paciente tenemos el pedal, fabricado en PETG, material del cual en el [ANEXO II](#) se encuentra una ficha de seguridad que asegura que está biomédicamente testado y que cumple el Reglamento (CE) 1272/2008 [SGA] que afirma que no es un material peligroso al contacto con el cuerpo humano.

- l) especificaciones técnicas, como las características, dimensiones y atributos de funcionamiento, del producto sanitario y, en su caso, sus variantes o configuraciones y accesorios, que normalmente figurarían en las especificaciones facilitadas al usuario como, por ejemplo, folletos, catálogos y publicaciones similares.

A lo largo de la memoria, todas estas especificaciones son resueltas.

Información a facilitar

- a) información que permita comprender las etapas de diseño aplicadas al producto:

A lo largo de la memoria, todas estas especificaciones son resueltas.

- b) información y características completas, incluidos los procesos de fabricación y su validación, sus adyuvantes, el examen continuo y el ensayo final del producto. En la documentación técnica deberá incluirse la totalidad de los datos:

A lo largo de la memoria, todas estas especificaciones son resueltas.

- c) identificación de todos los lugares, incluidos los de proveedores y subcontratistas, donde se lleven a cabo las actividades de diseño y fabricación.

A lo largo de la memoria, todas estas especificaciones son resueltas.

Información sobre diseño y fabricación

A lo largo de la memoria, todas estas especificaciones son resueltas.

Requisitos generales de seguridad y funcionamiento

Las medidas de seguridad adoptadas son limitaciones vía software de la velocidad y par ejercidos por los motores (trabajo para el futuro), topes mecánicos de seguridad para los tres movimientos ejercidos sobre el tobillo y la existencia de paradas de emergencia auxiliares.

2.3.4. PRFRC (persona responsable del cumplimiento de la normativa)

Es necesario que *“en la organización del fabricante tendrá que haber al menos una persona responsable del cumplimiento de la normativa que cuente con la pericia necesaria en el ámbito de los productos sanitarios.”* (europea, 2017) (REGLAMENTO (UE) 2017/745 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 5 de abril de 2017, artículo 15, capítulo I).

Dicha pericia puede ser demostrada con un año de experiencia profesional en el ámbito reglamentario o en sistemas de calidad de productos sanitarios y la posesión de estudios reconocidos por el estado pertinentes al desarrollo del producto. Al tratarse de una pequeña empresa no está obligada a tener en nómina a dicha persona, pero si debe disponer de ella de forma permanente y



continua. Esta persona en el ámbito español debe de estar reconocida y registrada en una base de datos de la AEMPS.

A la hora de comercializar el producto, se debe seleccionar a dicha persona, que será la encargada de revisar el mecanismo y hacerse responsable del mismo.

2.3.5. Conclusiones

Tras la reunión con la consultora TPV, se llegó a la conclusión que cumpliendo adecuadamente los anteriores apartados y asegurando la trazabilidad de todo el proceso de diseño, adquisición de componentes, seguridad, ensayos clínicos... El producto cumpliría el reglamento europeo, aunque se recomendó que en sí la intención final era la puesta en mercado del producto, lo ideal sería subcontratar a una consultora que nos asesorase en aspectos más técnicos de la norma.

La extensión de la cantidad de documentación a cumplimentar y entregar a AEMPS es inmensa y no compete su inclusión en este documento, pero a título informativo se han expuesto los aspectos básicos a cumplir para seguir el Reglamento 2017/745, el cumplimiento de este reglamento supone un desembolso económico importante, ya que es necesario pagar a la consultora, a la PRDRF, a la AEMPS por revisar la documentación aportada y valorarla...

5. DISEÑO, DESARROLLO Y PROTOTIPADO

5.1. Selección de actuadores y accesorios

5.1.1. Introducción

Aunque la primera versión del mecanismo se accionará manualmente, los actuadores y sus correspondientes accesorios han sido seleccionados y el mecanismo ha sido diseñado para que el uso de estos sea perfectamente compatible. De esta manera se encamina el proyecto a una segunda fase en la que se automatice el proceso.

Es necesario el uso de tres actuadores, uno por cada grado de libertad del tobillo.

Una correcta selección de los actuadores permite:

- Conseguir los pares necesarios para que el mecanismo sea seguro.
- Conseguir una limitación del propio par mediante el control de la intensidad consumida por el actuador.
- Un diseño compacto.
- Un control adecuado y preciso de velocidad y posición.
- Abaratar costes.

Atendiendo a las necesidades anteriormente descritas, se ha decidido el uso de servomotores, ya que su precio es “reducido”, permiten un control preciso y son capaces de suministrar un par nominal constante en un rango de revoluciones muy amplio.

Previamente a la etapa de diseño, es necesario saber que actuadores se van a implementar, de esta manera se dimensionará el conjunto en consecuencia y se podrán elegir los trenes de engranajes y relaciones de reducción necesarias para el mecanismo.

Tras contactar con diferentes empresas suministradoras de actuadores, como SMC, Linak, Hiwing... Se ha decidido tramitar el pedido con la empresa alemana Beckhoff, por las buenas condiciones y el soporte técnico ofrecido. A continuación, se analizan los componentes necesarios:

Elemento	Unidades	Nombre comercial	Notas
Servomotor	3	AM8111-wFyz Servomotor 0.20 Nm	Suministran el par a bajas vueltas.
Reductora (i=10)	1	1X AG2250-+PLE40- M01-10 (i=10).	Planetaria 1 etapa.

Reductora (i=7)	1	1X AG2250-+PLE40-M01-7 (i=7).	Planetaria 1 etapa.
Drivers	3	EL7201-9014	Estandarizados para los 3 servomotores.
PLC	1	CX1010	Intel Pentium 1 núcleo.
Fuente de alimentación 24V - 4A	1	PS1021-2405-0000	Compatible con PLC.
Unidad de entradas analógicas	1	EI3064	Para control joystick.
Unidad de salidas digitales	1	EL2024-0010	Para parada programada por software.
Unidad de potencia PLC	1	CX1100-0004	Necesaria para alimentar PLC y tarjetas.
Joystick 3 ejes analógico	1	Joystick profesional de 3 ejes	Control de los 3 servomotores.
Botón parado de emergencia	1		Medida de seguridad.
Elemento	Unidades	Nombre comercial	Notas
Servomotor	3	AM8111-wFyz Servomotor 0.20 Nm	Suministran el par a bajas vueltas.
Reductora (i=10)	1	1X AG2250-+PLE40-M01-10 (i=10).	Planetaria 1 etapa.
Reductora (i=7)	1	1X AG2250-+PLE40-M01-7 (i=7).	Planetaria 1 etapa.
Drivers	3	EL7201-9014	Estandarizados para los 3 servomotores.
PLC	1	CX1010	Intel Pentium 1 núcleo.

Fuente de alimentación 24V - 4A	1	PS1021-2405-0000	Compatible con PLC.
Unidad de entradas analógicas	1	EI3064	Para control joystick.
Unidad de salidas digitales	1	EL2024-0010	Para parada programada por software.
Unidad de potencia PLC	1	CX1100-0004	Necesaria para alimentar PLC y tarjetas.
Joystick de 3 ejes	1		Control de los 3 servomotores.
Botón parada de emergencia	X2		Medida de seguridad.
Interruptor de control N.C	1		Medida de seguridad software
Resistencia eléctrica	1		Divisor de tensión para poder conectar el joystick a nuestro sistema.
Cableado			
Software	1	TwinCat3	Software de programación con motor visual Studio personal de Beckhoff.

Tabla 3: Elementos necesarios para la motorización y automatización del mecanismo

5.1.2. AM8111-wFyz | Servomotor 0.20 Nm



Ilustración 22: Servomotor Bekchoff. (Beckhoff, BECKHOFF New Automation Technology, 2021)

Este servomotor pertenece a la serie “compact drive” de Beckhoff, ofrece un par de 0,2 N.m en un amplio rango de revoluciones (0-5500 rpm), como se puede ver en el gráfico adjunto. Dispone de un encoder absoluto que permitire medir la velocidad, con este valor y la intensidad consumida, se puede calcular y limitar el par suministrado por el motor.

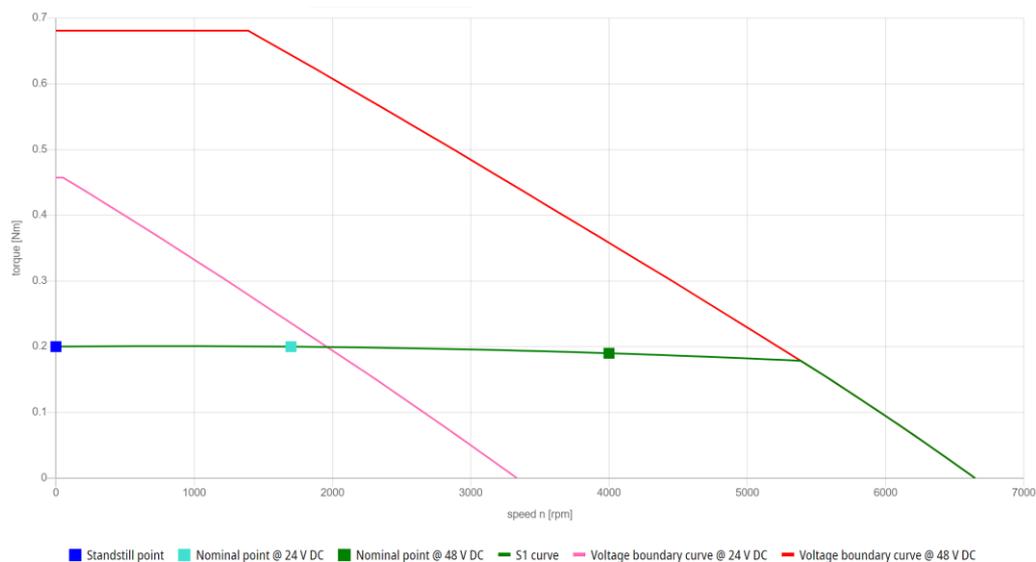
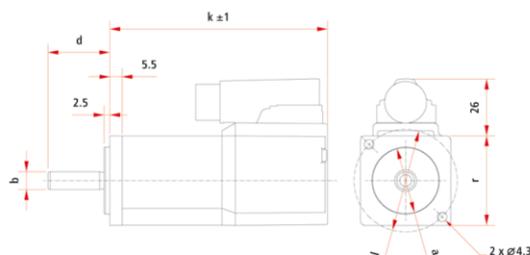


Gráfico 1: Par frente a velocidad del servomotor. (Beckhoff, BECKHOFF New Automation Technology, 2021)



Dimensions	AM8111-wFyz
a	30 h7
b	8 h7
d	25 mm
l	46 mm
r	40 mm
k (without brake)	97 mm
k (with brake)	129 mm

Ilustración 23: Dimensiones Servomotor. (Beckhoff, BECKHOFF New Automation Technology, 2021)

Las características más relevantes quedan reflejadas en la siguiente tabla:

Datos	AM8111-wFyz
Voltaje nominal [V DC]	24...48
Par estático [N.m]	0,20
Par medio nominal [N.m]	0,19
Velocidad media [rpm]	4000
Potencia [Kw]	0,08
Corriente en estático [A]	2,85
Corriente máxima [A]	8,60

Tabla 4: Características principales del AM8111-wFyz

Acudiendo al catálogo de Beckhoff (consultar [bibliografía](#)), se dispone de un análisis más detallado de las características, peso, momento de inercia, potencia...

5.1.3. Reductoras

Para conseguir el par final en el elemento útil, se consideraron dos opciones, o bien usar motores que suministrasen más par (más grandes y caros) o usar reductoras, se optó por la segunda opción, ya que son compactas y nos ofrecen una gama muy variada de relaciones de reducción, mediante el uso de trenes de engranajes planetarios. Es necesario el uso de 2 reductoras, que, aunque con diferentes relaciones de reducción (7 y 10) pertenecen a la misma serie de Beckhoff “Reductoras planetarias estándar para servomotores de tipo F1”. Necesitamos:

- AG2250-+PLE40-M01-10: Reductora planetaria de una etapa con relación de reducción de 10, permite altos pares de salida, una instalación flexible y que es adaptable a la serie de motores elegidos. Sus características principales son:

Datos	AG2250- +PLE40- M01-10
Par nominal de salida [N.m]	5
Par máximo de aceleración [N.m]	8
Relación de reducción	10

Tabla 5: Características principales reductora AG2250+PLE40-M01-10

*Par nominal de salida: Este parámetro es el par máximo de salida que el fabricante recomienda para una vida útil prolongada.

- AG2250+PLE40-M01-7

Datos	AG2250- +PLE40- M01-7
Par nominal de salida [N.m]	8,5
Par máximo de aceleración [N.m]	13,5
Relación de reducción	7



Ilustración 24: Reductora AG2250. (Beckhoff, BECKHOFF New Automation Technology, 2021)

Tabla 6: Características AG2250+PLE40-M01

5.1.4. Drivers

Para poder controlar los servomotores es necesario el uso de drivers. Desde el departamento de soluciones de Beckhoff nos ofrecen los “EL7201-9014”, drivers de diseño compacto con tecnología de control en tiempo real que permiten rápidas y dinámicas tareas de posicionamiento, permiten a su vez la lectura de voltaje, intensidad, velocidad y temperatura, parámetros controlables que permiten el adecuado control del sistema.

Ofrecen la posibilidad e implementar en la oferta la función “STO, safe torque off” que se corresponde con una parada CAT de tipo 3, característica importante para cumplir las medidas de seguridad impuestas por el reglamento europeo.

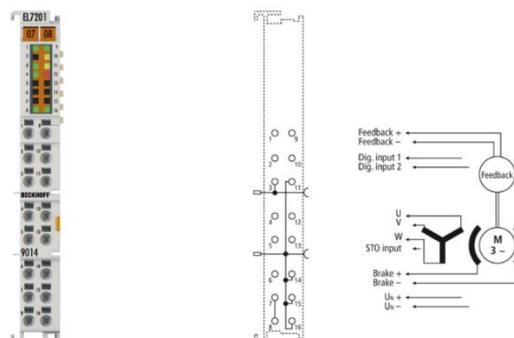


Ilustración 25: Driver EL7201-9014. (BECKHOFF, 2021)

Se conecta al PLC y al resto de tarjetas y drivers con sus pines laterales, permitiendo un montaje compacto

5.1.5. PLC

Para poder controlar los servomotores, drivers, tarjetas... Es necesario poder de computación, desde Beckhoff ofrecen el uso de una CPU de uso industrial destinada solamente al sistema en particular, en el caso de utilizar un control con un ordenador doméstico, las exigencias serían demasiado altas y la respuesta no sería a tiempo real. Se implementará la serie “m” de CPU´s más básica de Beckhoff, equipada con un procesador Intel Atom® x5-E3930.

5.1.6. Tarjetas de entradas y salidas digitales y analógicas

Serán las encargadas de suministrar las señales de control que se emitirán al PLC, y este a los drivers, que emitirán la orden a los servomotores. Es necesario:

- Una unidad de entradas analógicas: Será la encargada de transmitir las señales analógicas enviadas por el joystick de control, hasta el PLC, haciendo este mover los servomotores en consecuencia a la acción realizada por el técnico.
- Una unidad de salidas digitales: Será la encargada de realizar la parada de emergencia, cuando vía software se detecte una limitación, como puede ser un par excesivo, el PLC enviará la señal de corte de suministro eléctrico a la seta de emergencia, que parará el mecanismo.

5.1.7. Fuente de alimentación

Es necesario una fuente de alimentación que sea capaz de suministrar al PLC los 24 V y la intensidad que necesita, esta se conecta a red, y mediante un transformador es capaz de suministrar dicha potencia.

5.1.8. Propuesta de conexiones eléctricas

A modo de posible orientación para el encargado de motorizar en un futuro el mecanismo, a continuación, se propone un esquema eléctrico de los diferentes componentes:

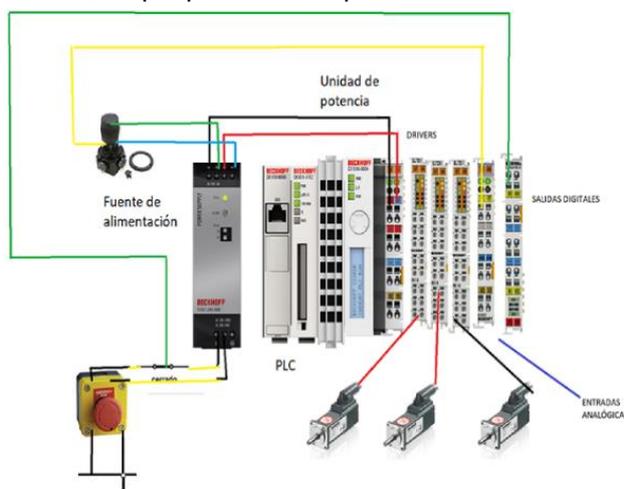


Ilustración 26: Propuesta conexiones eléctricas

En definitiva, el control de los servomotores se realizará por medio de un joystick analógico de 3 ejes preciso, que enviará señales a la unidad de entradas analógicas, esta al PLC y este a los drivers de los servomotores. Se implementarán limitaciones de par vía software como elemento de seguridad.

5.2. Programación

A título informativo y lectivo para la persona que realice las líneas futuras de este proyecto, en este capítulo se dan conceptos básicos para la programación de los servomotores:

- Hardware

Es necesario a mayores de los elementos expuestos en el [capítulo 5.1](#), disponer de un monitor compatible con el PLC, es decir, con puerto DVI (que no es muy común).

- Software

El software para programar el hardware de Beckhoff es TwinCat3, un software con base en Visual Estudio desarrollado por esta empresa alemana. Se debe descargar desde su página web la última versión de “Twin Cat Xae Shell” que es el software de desarrollo. Su interfaz es la siguiente:

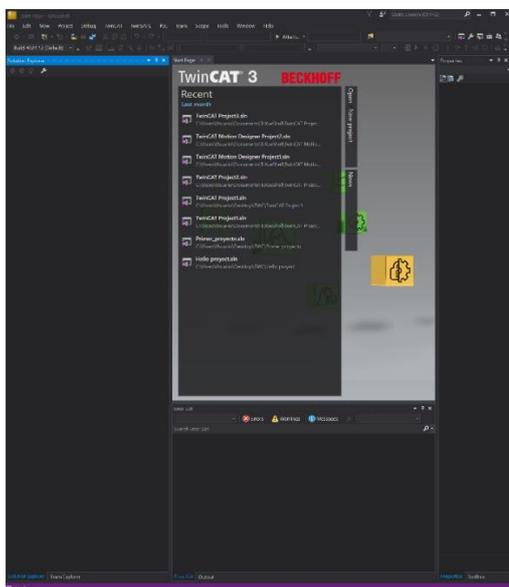


Ilustración 27: Interfaz TW3

- Programación

Se debe crear un nuevo proyecto: file > New project > TwinCAT Projects

En el árbol izquierdo al expandirlo se puede ver lo siguiente:

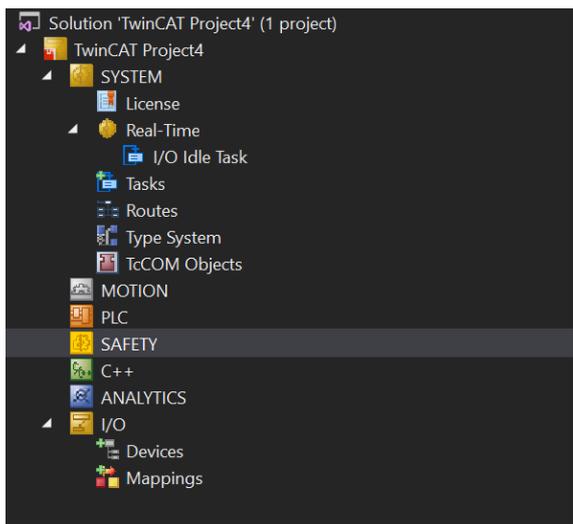


Ilustración 28: Árbol TWC3

Se validan las licencias necesarias para “motion control” que en el pedido realizado deben de estar presupuestadas.

En “I/O”, click derecho y “Scan”, esto detectará y añadirá automáticamente todo el hardware conectado al PLC, servomotores, drivers y tarjetas de entradas.

Crear el eje del PLC variable:

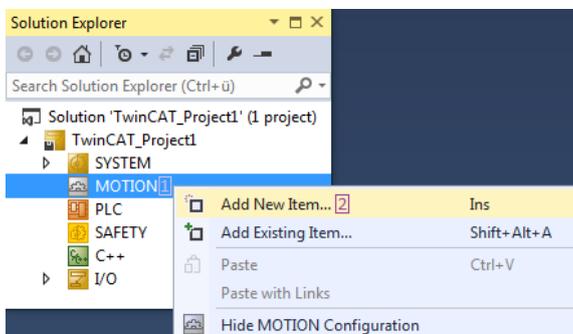


Ilustración 29: Añadir nuevo ítem en motion control

Añadir un nuevo ítem, y se abre el siguiente cuadro de diálogo:

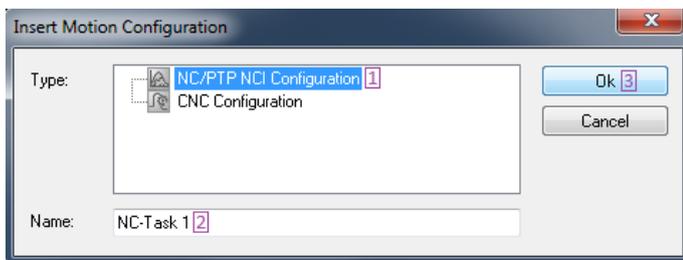


Ilustración 30: Creación de una configuración NC/PTP NCI

Se añade una nueva configuración NC:

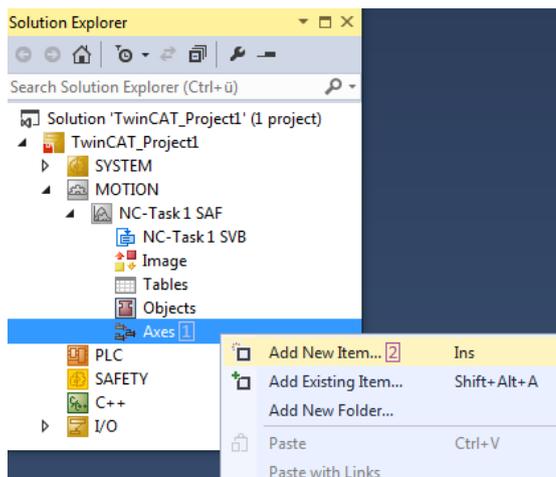


Ilustración 31: Creación de ejes virtual

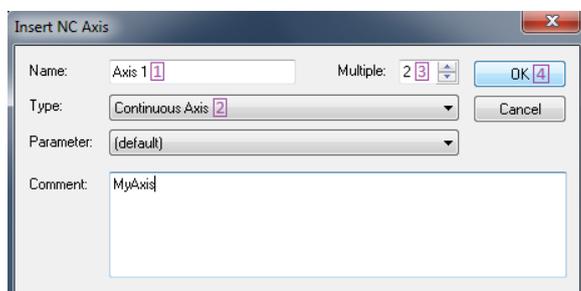


Ilustración 32: Creación de 3 ejes

A continuación, se añaden los 3 ejes correspondientes a los 3 servomotores y se identifican correctamente.

Este es el nuevo árbol conseguido.

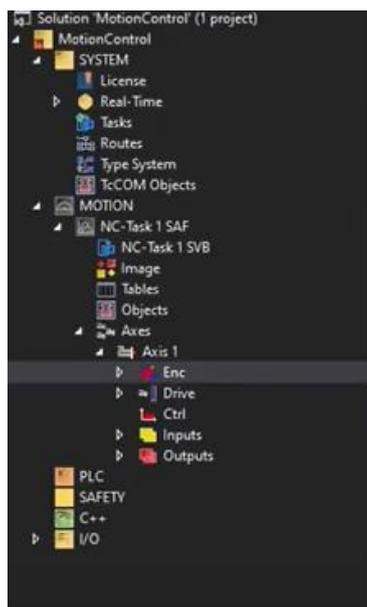


Ilustración 33: Ejes creados y listos para programar

En “Axis 1, 2, 3” se definen las características de los actuadores:

Parameter	Offline Value	Online Value	Type	Unit
Maximum Dynamics:				
Reference Velocity	500.0		F	mm/s
Maximum Velocity	300.0		F	mm/s
Maximum Acceleration	15000.0		F	mm/s ²
Maximum Deceleration	15000.0		F	mm/s ²
Default Dynamics:				
Default Acceleration	120.0		F	mm/s ²
Default Deceleration	120.0		F	mm/s ²
Default Jerk	1000.0		F	mm/s ³
Manual Motion and Homing:				
Homing Velocity (towards plc cam)	30.0		F	mm/s
Homing Velocity (off plc cam)	30.0		F	mm/s
Manual Velocity (Fast)	200.0		F	mm/s
Manual Velocity (Slow)	100.0		F	mm/s
Jog Increment (Forward)	10		F	mm
Jog Increment (Backward)	5.0		F	mm
Fast Axis Stop:				
Limit Switches:				
Monitoring:				
Setpoint Generator:				
NCI Parameter:				
Other Settings:				

Ilustración 34: configuración del servomotor

Aceleración máxima, velocidad, deceleración, inercias ...

Se debe de “linkear” los actuadores virtuales con el I/O, es decir, con los servomotores físicos. Para ello, se declaran 3 variables “AXIS_REF” en el entorno de programación del PLC (PLC en el árbol de la izquierda) y clicando en el eje deseado se comunica con el actuador físico en “link to I/O”.

Ilustración 35: Conexión física - virtual

Con todos los pasos anteriores clicando en el árbol en “Axis 1” por ejemplo, se es capaz de controlar de manera remota a través del siguiente panel el servomotor 1.

Ilustración 36: control remoto del servomotor

Siguiendo todos los pasos anteriores se ha conseguido conectar el hardware al software, y se tienen los servomotores asociados a unos ejes virtuales, ahora quedaría pasar al entorno de programación en sí, y crear un nuevo código, que debería de cumplir al menos las siguientes funciones:

- Vía código, a través de la intensidad y voltaje consumidos y la velocidad de giro, calcular el par que está ofreciendo el servomotor, a través de la siguiente expresión:

$$P = V \times I = \omega \times M \quad \text{Ecuación 1: Cálculo de par}$$

Con: P = potencia [W]

V= Voltaje [V]

I= Intensidad [A]

ω = Velocidad angular [rad/s]

M= Par [N.m]

- Limitar dicho par por cogido, de manera que si supera los límites establecidos active una parada de emergencia.
- Movimiento de los 3 servomotores a una velocidad específica en sus 2 sentidos a través o bien de un joystick de 3 ejes o bien de 6 botones.

Grosso modo este sería un resumen del trabajo de segunda fase en lo que a programación en TW3 se refiere, el objetivo de este capítulo no es otro que el de hacer más ameno el comienzo en la programación a la persona que se encargue de realizarla en un futuro, exponiendo los conocimientos que han adquirido en este corto tiempo. A continuación, se citan diferentes tutoriales y documentos técnicos de Beckhoff que puede ayudar en la programación, se pueden encontrar en la bibliografía:

- Hilo de videos con un curso de TC3: (S.A., Youtube , 2021).
- Página de “infosis” de Beckhoff con mucha información: (S.A., infosys Beckhoff , 2021).
- Serie de información y tutoriales de TC3 no oficiales: (Sagatowski, 2021)

5.3. Diseño mecánico del posicionador

5.3.1. Introducción

El uso final del mecanismo es el posicionamiento del tobillo en su lugar natural, encontrándose el paciente sentado con la rodilla en flexión a 90° , es decir, que no presente rotación externa o interna, quedando el fémur la tibia y el tobillo inmovilizados mediante cinchas. En la siguiente ilustración se muestra la posición del paciente:



Ilustración 37: Rehabilitador de tobillo vertical. (Zuo S, 2020)

Las ideas claves que se deben de tener en cuenta para el correcto y seguro funcionamiento del mecanismo quedan recogidas a continuación:

- El conjunto debe de ser compacto.
- Debe de dejar el pie libre y listo para el escaneo de este, es decir, no deben de existir barreras físicas entre el tobillo y el escáner.
- El centro instantáneo de rotación del mecanismo debe de coincidir con el del tobillo del paciente.
- El mecanismo debe de ser seguro, moviéndose a las velocidades y pares analizados en el [capítulo 2, apartado 2.1.1](#). Además de limitar el movimiento de la extremidad imponiendo barreas mecánicas y vía software.
- Tanto los pares aplicados como los desplazamientos realizados deben de ser recogidos y analizados vía software. (trabajo futuro).
- La utilización del posicionador debe de ser intuitiva y sencilla para el técnico, quedando todas las limitaciones realizadas en la fase de fabricación y programación, evitando posibles errores humanos durante la utilización del mecanismo.
- El mecanismo debe de ser capaz de soportar el peso ejercido por diferentes tipos de pacientes y adaptarse a ellos.

5.3.2. Cálculo de las relaciones de reducción necesarias

Para conseguir un movimiento seguro del tobillo, se deben suministrar unos pares específicos a la articulación, por eso es tan importante un correcto diseño de los trenes de engranajes y sus correspondientes relaciones de reducción. Antes de pasar a la etapa de diseño, se deben conocer las relaciones de reducción necesarias. A continuación, se analizan los pares aplicados para los diferentes movimientos:

- Movimiento de abducción/aducción:

Para conseguir este movimiento, se transmite la potencia suministrada por el motor (o manualmente en primera instancia) a través de un sistema de tornillo sin fin – corona, consiguiendo una alta relación de reducción:

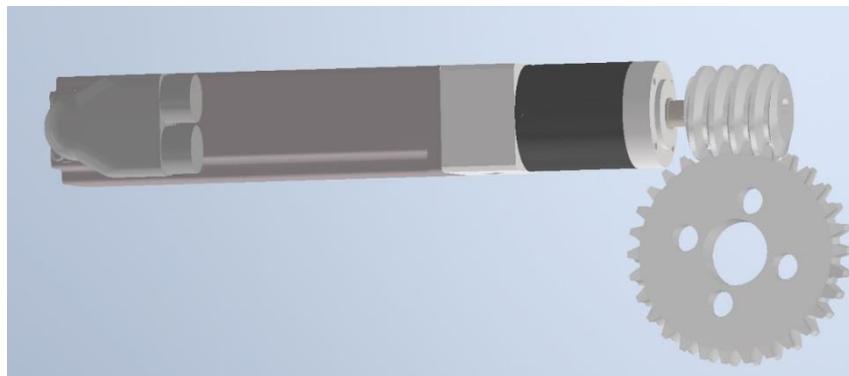


Ilustración 38: Transmisión de potencia ab-ad

- Tornillo sin fin: 1 entrada; $\eta=0,7$ (aproximada)
- Corona: 30 dientes
- Reductora: $i=10$;
- Motor: Par en estático de 0,2 N.m

Por lo tanto, se consigue el siguiente par a la salida de la corona:

$$T_{ab-ad} = \frac{30}{1} \times 0,7 \times 10 \times 0,2 = 29,4 \text{ N.m}$$

- Movimiento de dorsiflexión/plantar flexión

En este caso se transmite la potencia del motor a un piñón, que mediante el uso de una correa trapezoidal se transmite la potencia a una corona solidaria al eje alojado en un tornillo sin fin mediante dos prisioneros, el cual engrana a una rueda dentada de altas dimensiones, a continuación, se muestra el mecanismo de transmisión:

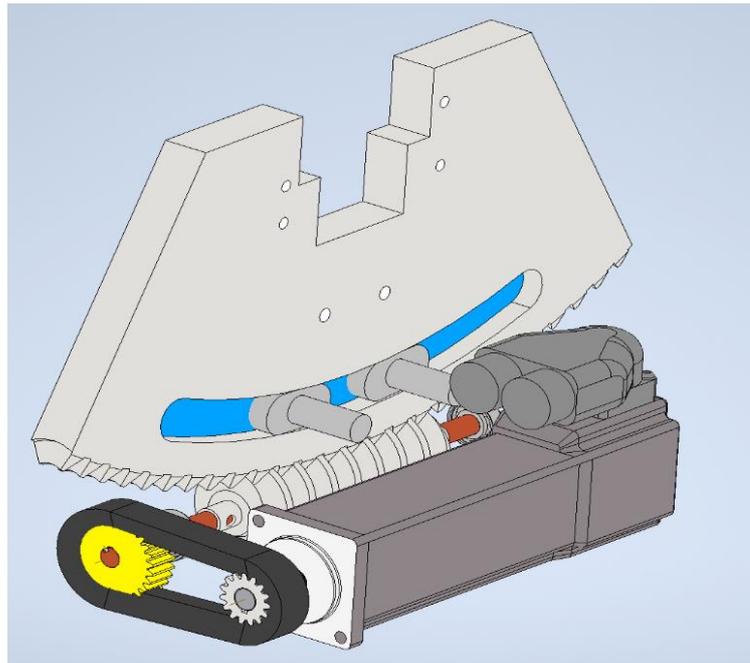


Ilustración 39: Transmisión de potencia para el movimiento de Dorsiflexión-Plantar flexión

- Tornillo sin fin: 1 entrada; $\eta=0,7$ (aproximada)
- Rueda dentada helicoidal: 150 dientes
- Corona: 30 dientes
- Piñón: 20 dientes
- Pérdidas en correa: $\eta=0,9$ (aproximada)
- Motor: Par en estático de 0,2 N.m

Por lo tanto, se obtiene el siguiente par a la salida de la rueda helicoidal:

$$T_{\text{dor-plant}} = \frac{150}{1} \times 0,7 \times \frac{30}{20} \times 0,9 \times 0,2 = 28,35 \text{ N.m}$$

- Movimiento de inversión/eversión

En este caso se transmite la potencia con una rueda dentada recta y un tren de engranajes simple, como se puede ver en la siguiente figura:

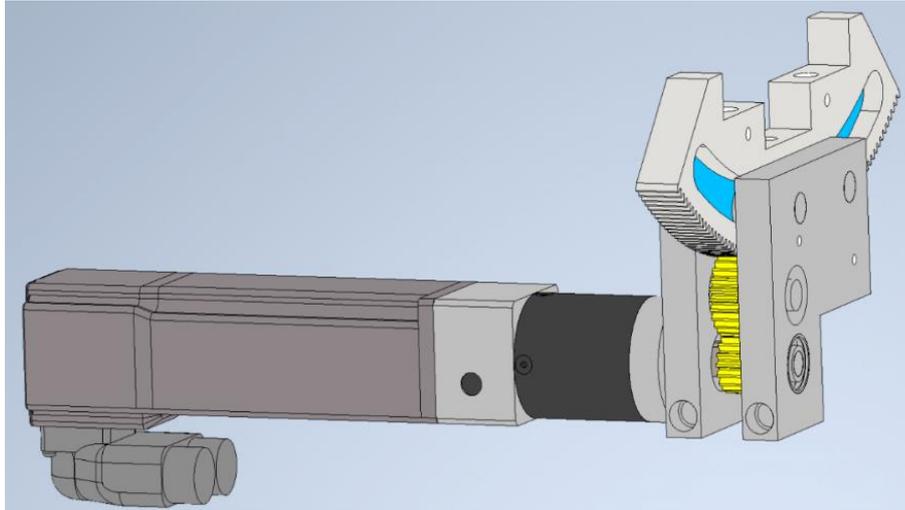


Ilustración 40: Transmisión de potencia inversión-eversión

- Rueda dentada recta: 300 dientes
- Corona: 26 dientes
- Pérdidas rueda – corona: $\eta=0,9$ (aproximada)
- Piñón: 18 dientes
- Pérdidas corona – piñón: $\eta=0,9$ (aproximada)
- Reductora: $i=10$

$$T_{\text{inv-ever}} = \frac{300}{26} \times 0,9 \times \frac{26}{18} \times 0,9 \times 10 \times 0,2 = 27 \text{ N.m}$$

5.3.3. Despiece

En este subcapítulo, se analizan todos los componentes del diseño, el material de fabricación, la justificación de su uso y geometría y su función en el conjunto final.

Para conocer las dimensiones específicas de cada componente consultar el [ANEXO I](#).

Caja inferior y tapa caja inferior

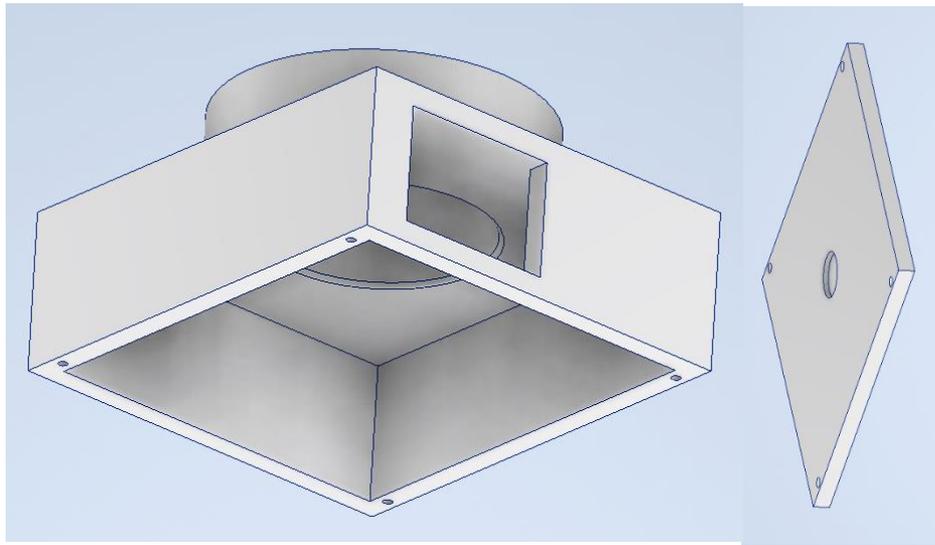


Ilustración 41: Caja inferior y tapa inferior

La función de la caja es la de alojar tanto el cilindro inferior, como el conjunto de corona inferior más tornillo helicoidal, así como los rodamientos inferiores, que son los encargados de soportar toda la carga del paciente, además del soporte para el eje del tornillo helicoidal inferior, que se inserta en un lateral de la caja.

El material de fabricación es acero galvanizado, ya que se disponía de él, aunque este parámetro no es crítico, debido a las bajas tensiones soportadas por este componente.

Cilindro inferior

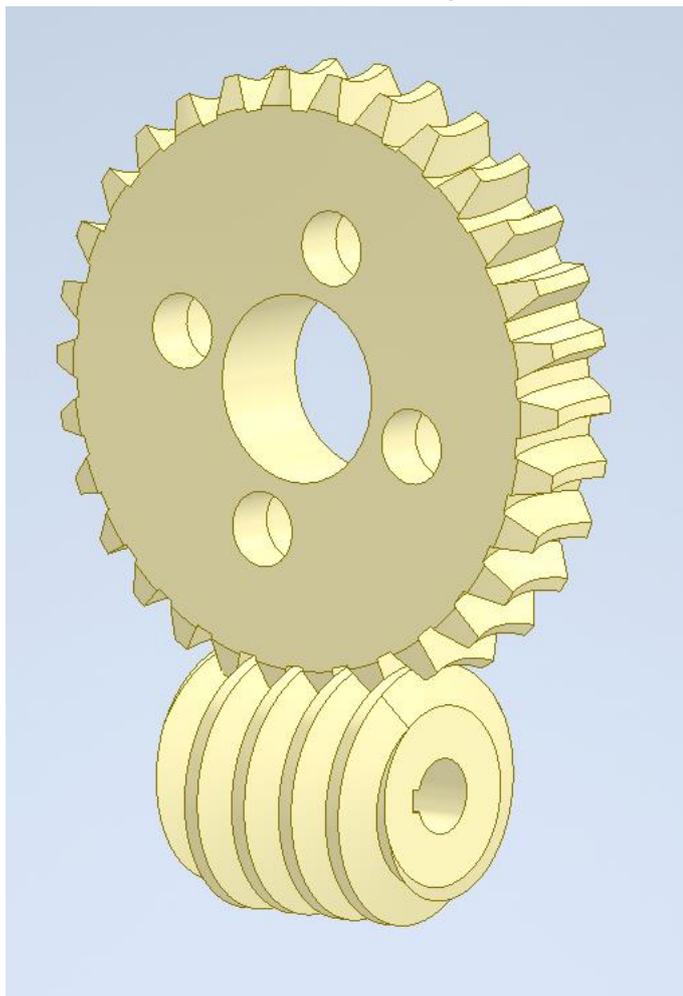


Ilustración 42: Cilindro inferior

El cilindro inferior se aloja en la caja inferior, se ajusta con los rodamientos inferiores, y a él se atornilla la plataforma principal. Es el encargado de transmitir el movimiento de abducción-aducción al pie del paciente, guiado por los rodamientos inferiores y potenciado por la corona y el tornillo helicoidales inferior.

El material de fabricación será PETG.

Corona helicoidal inferior y tornillo sin fin inferior



Corona:

-módulo 1

-30 dientes

Tornillo helicoidal:

-1 entrada

Ilustración 43: Corona y rueda helicoidal inferior

La corona helicoidal inferior se atornilla al cilindro inferior, y le transmite potencia mediante un mecanismo de corona-tornillo sin fin, cuyos ejes son perpendiculares, dicho mecanismo nos proporciona una relación de reducción de 30, para que la corona de una vuelta, el tornillo debe de dar 30, consiguiendo un alto par a la salida de la corona.

Este conjunto es el encargado de proporcionar el movimiento de abducción-aducción al mecanismo, gracias a un eje alojado en el tornillo helicoidal, inmovilizado con chaveta, y que al girar hace girar el tornillo.

Este subconjunto ha sido adquirido a la empresa NORELEM, el material de la corona es latón, y el del tornillo es acero cementado.

Para más información consultar el ANEXO [2.4](#) y [2.5](#).

Rodamientos inferiores

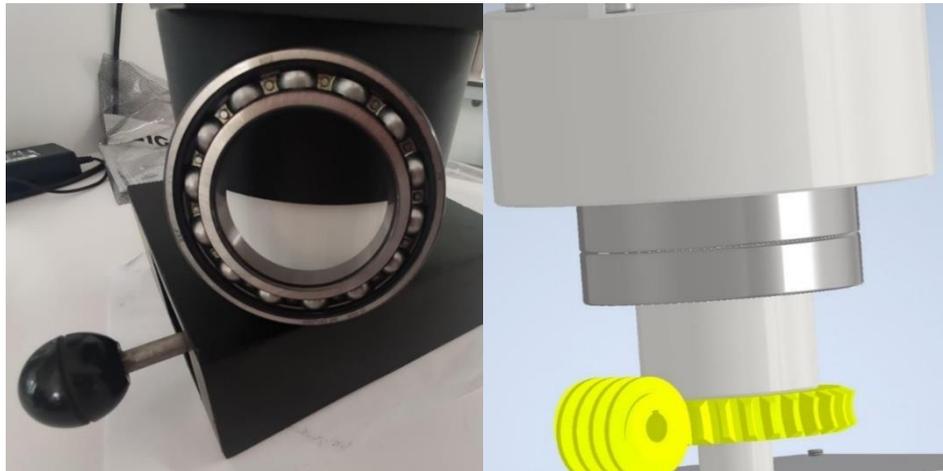


Ilustración 44: Rodamientos inferiores

Estos dos rodamientos son los encargados de soportar todo el peso del conjunto, de ahí su tamaño, se alojan en el cilindro inferior y en la caja inferior.

Hablamos de “rodamientos de bolas métricos de ranura profunda con un extremo abierto muy versátiles para una amplia gama de aplicaciones.” (SKF, 2021)

Que no esté sellado no es crítico, ya que no va a estar expuesto a condiciones dañinas que limiten su vida útil, tales como polvo o agua.

” Este tipo de rodamiento de bolas suele ser el más popular debido a su versatilidad. Son ideales para altas velocidades y pueden manejar una buena capacidad de carga radial, todo ello requiere muy poco mantenimiento.

Ranura Profunda se refiere a la pista (la ranura donde descansan las bolas). Por lo tanto, hay un espacio más grande entre los anillos interior y exterior, que el diámetro de la bola. Esto deja espacio para las juntas de goma. El acero es el material perfecto para rodamientos de bolas, ya que proporciona resistencia y fiabilidad al tiempo que es resistente a la corrosión. Los rodamientos de bolas de acero son adecuados para instalar, ya que requieren muy poco mantenimiento y están diseñados para durar.” (SKF, 2021)

Sus especificaciones son:

Atributo	Valor
Diámetro de Entrada	60mm
Diámetro de Salida	95mm
Tipo de Rodamiento de Bola	Ranura Profunda
Anchura del Anillo	18mm
Tipo de Extremo	Abierto
Número de Filas	1
Valor Nominal de Carga Estática	23.2kN
Material	Acero
Material de la Rejilla	Acero
Tipo de anillo	Plano
Valor Nominal de Carga Dinámico	30.7kN
Tipo de Calibre	Paralelo

Tabla 7: Especificaciones rodamientos inferiores. (SKF, 2021)

Plataforma principal

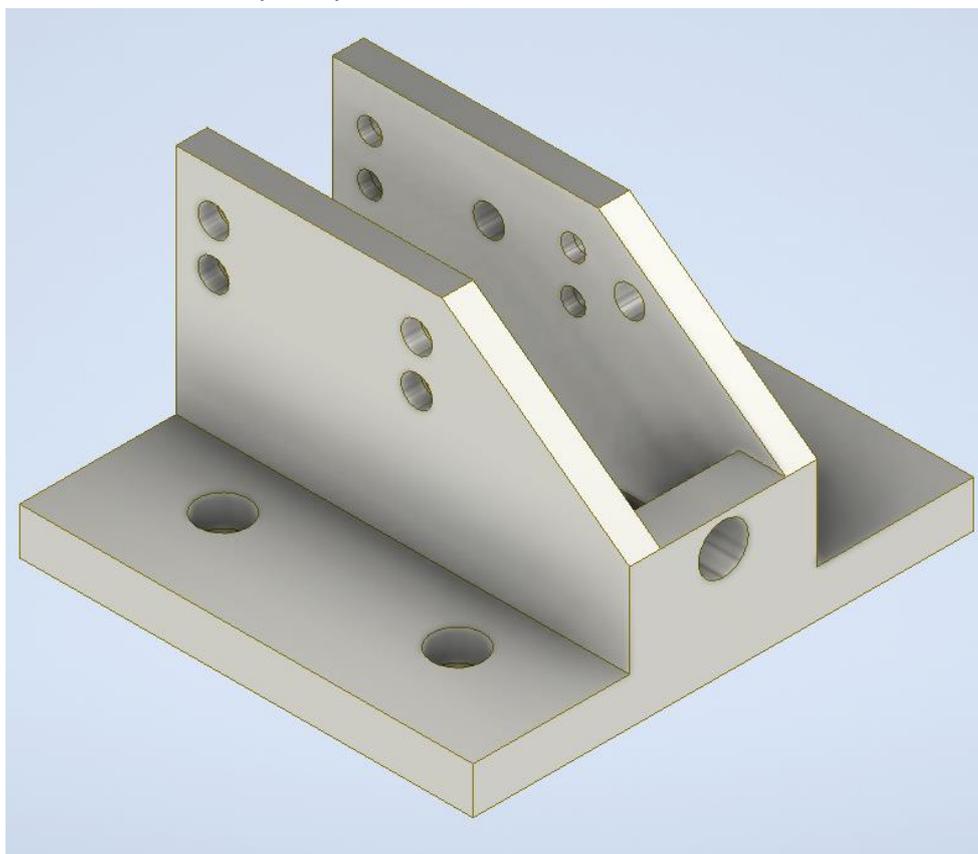


Ilustración 45: Plataforma principal

Esta plataforma se atornilla al cilindro inferior, y sus funciones son múltiples:

- Alojar rodamientos medios.
- Alojar eje medio
- Alojar Rueda helicoidal media y sin fin medio
- Alojar las guías medias con sus deslizadoras
- Alojar los soportes medios que ajustan la rueda helicoidal medio, permitiendo su movimiento sin holguras.

El material de fabricación será PETG.

Eje medio, casquillos y prisioneros

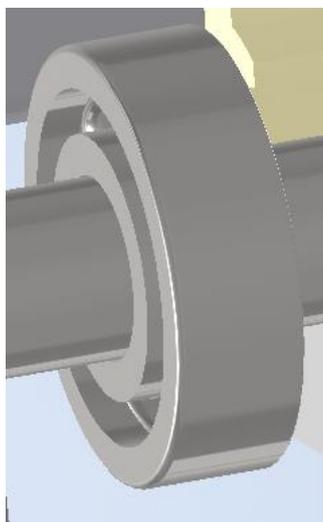


Ilustración 46: Eje medio

Este eje es el encargado de transmitir el movimiento del motor o del ortopedista al tornillo sin fin que mueve la rueda helicoidal, tiene practicado un chavetero normalizado para que en el caso de estar motorizado alojar una corona dentada.

Este eje se adquirirá en acero al carbono común, en concepto de barra calibrada de diámetro 8mm y se cortará a la medida deseada.

Rodamientos medios



Diámetro interior: 8 mm

Diámetro exterior: 16 mm

Ilustración 47: Rodamientos medios

“Rodamientos NMB métricos e imperiales fabricados conforme a ABEC 5. Los rodamientos son adecuados para usar con instrumentos de precisión, registradores de gráficos, etc. Fabricados de acero resistente a la corrosión, los rodamientos están disponibles en dos diseños: Plano y con brida. Los rodamientos métricos e imperiales incorporan protecciones metálicas dobles

y los rodamientos lisos métricos también están disponibles en acero de cromo.” (NMB, RS components , 2021)

Sus especificaciones son:

Atributo	Valor
Diámetro de Entrada	8mm
Diámetro de Salida	16mm
Tipo de Rodamiento de Bola	Radial
Anchura del Anillo	5mm
Tipo de Extremo	Apantallado
Número de Filas	1
Valor Nominal de Carga Estática	712No
Material	Acero
Material de Bola	Acero Inoxidable Martensítico
Material de la Rejilla	Acero con Cinta Metálica
Material del Anillo	Acero Inoxidable Martensítico
Tipo de anillo	Plano
Valor Nominal de Carga Dinámico	1.606kN
Tipo de Calibre	Paralelo

Tabla 8: Especificaciones rodamientos medios. (NMB, RS components , 2021)

Corona y piñón medios; Correa trapezoidal

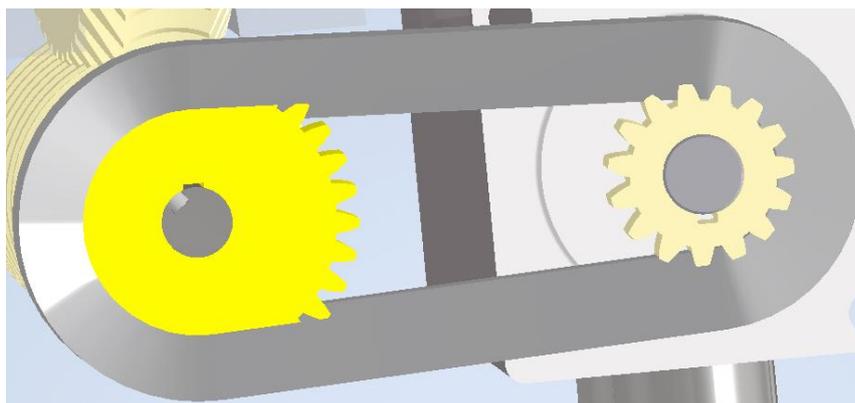


Ilustración 48: Transmisión de potencia media. Motor

Parte de la segunda fase del proyecto, este conjunto es el encargado de transmitir la potencia de salida del motor al eje medio, y este al conjunto tornillo helicoidal medio – rueda media, consiguiendo el movimiento de dorsiflexión – plantar flexión.

- Relación de reducción: 2
- Dientes de la corona: 30
- Dientes del piñón: 15
- Módulo: 1

Correa trapezoidal estándar de caucho.

Rueda dentada helicoidal media y tornillo sin fin medio

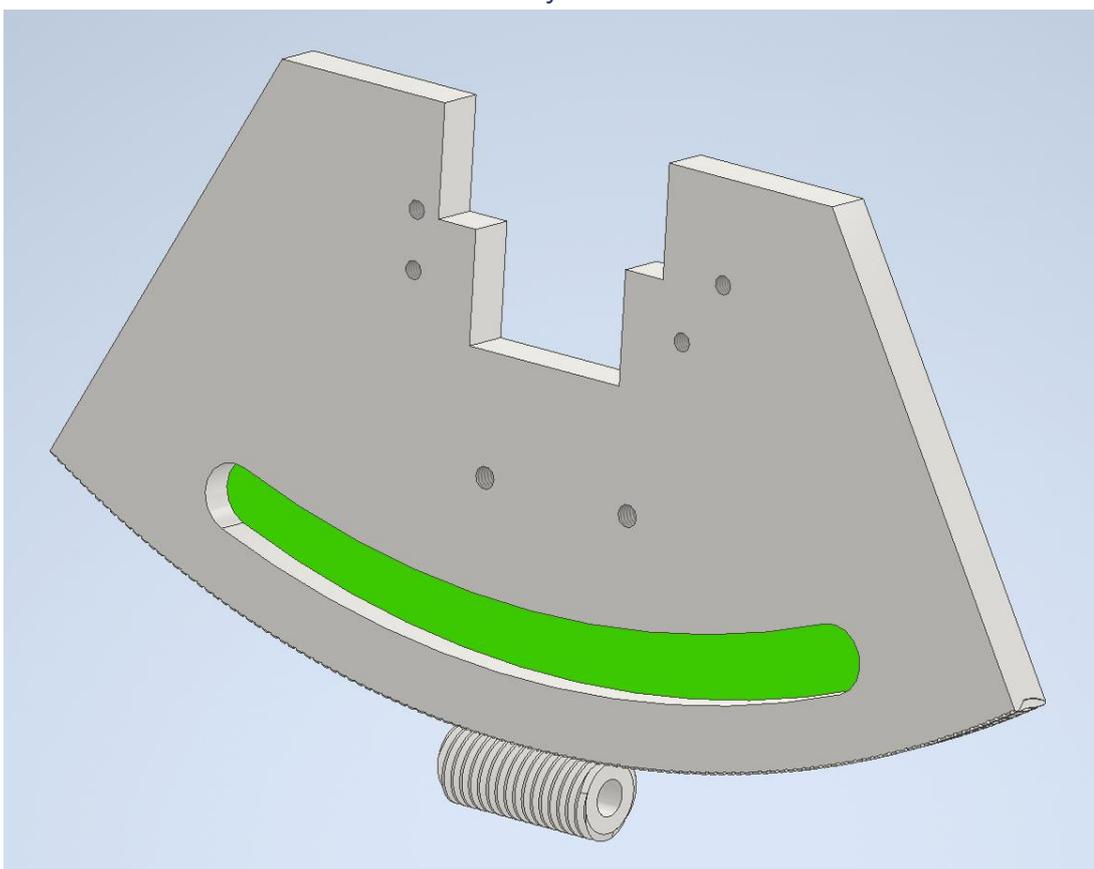


Ilustración 49: Rueda media y tornillo helicoidal medio

Este conjunto de tornillo helicoidal y corona, serán los encargados de transmitir el movimiento de dorsiflexión – plantar flexión, alojando en el primero el eje medio mediante el uso de un prisionero y transmitiendo el movimiento del eje a la corona y esta al pedal.

Otra función de la rueda media es la de alojar el soporte de la rueda superior, mediante el uso de tornillería, consiguiendo un conjunto robusto y rígido.

Esta es una pieza crítica en el diseño, ya que una correcta elección de su geometría nos permite que el CIR del mecanismo se sitúe por encima del pedal a la distancia deseada, a continuación, se muestran sus características más críticas:

TABLA RUEDA MEDIA (13)		
MÓDULO	m	0,75
Nº DE DIENTES	Z	667
CREMALLERA TIPO	UNE 18016	
DIÁMETRO PRIMITIVO	Dp	500
ÁNGULO DE HÉLICE	alpha	7,49
SENTIDO DE HÉLICE	DRCHA/IZQ	DRCHA
DISTANCIA ENTRE EJES	C	254
RUEDA CONJUGADA (MARCA)	Nº DE DIENTES	3
	PLANO Nº	ANEXO 2.3

Tabla 9: Características rueda media

El tornillo helicoidal medio debe de ser compatible con las especificaciones de la rueda, por eso en su diseño y fabricación debemos de ser muy cuidadosos.

El material de fabricación de la rueda será NOVAMID 1030 y el tornillo se adquirirá en la empresa “NORELEM” y estará fabricado en acero cementado.

Por cada vuelta del tornillo helicoidal se avanza un diente de la rueda media, y por cada diente de la rueda media, el pedal se mueve en su eje de dorsiflexión – plantar flexión 0,53 °.

Soportes plataforma media

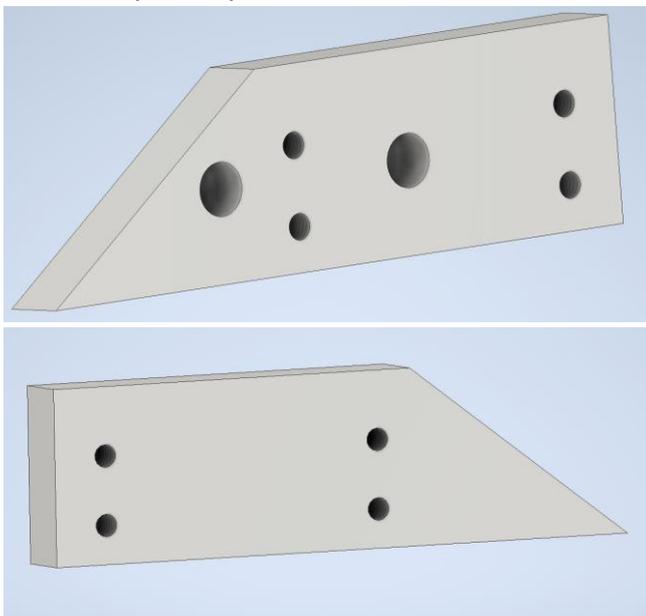


Ilustración 50: soportes medios

Se fabricarán dos soportes, uno para el flanco de la rueda media donde irán las guías y deslizadoras, y otro para su homónimo. La función de estos soportes es la de ajustar la rueda media a la plataforma principal, permitiendo el giro de la primera, además de alojar las guías medias.

Se fabricarán en PETG.

Deslizadoras y guías medias

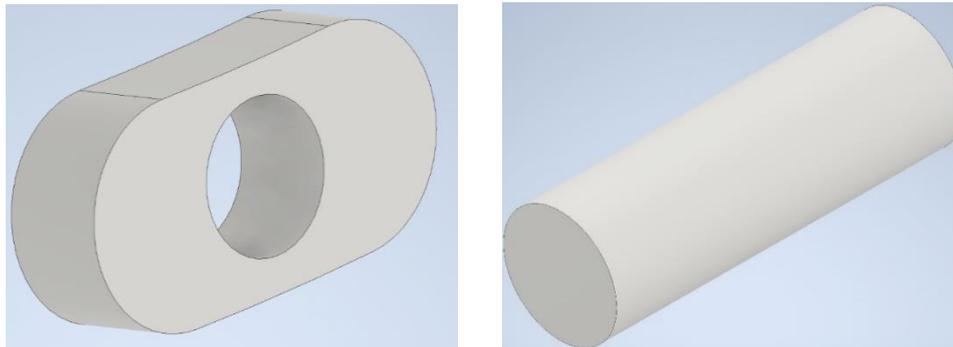


Ilustración 51. Guías y deslizadoras medias

Se fabricarán dos deslizadoras y dos guías respectivamente, las deslizadoras se alojan en los ejes y a su vez en la ranura oblonga practicada en la rueda media. Su función es la de guiar en su movimiento a la rueda media y además limitar su movimiento. Es muy importante conseguir un buen ajuste de las deslizadoras con la ranura, de lo contrario las holguras generadas impedirán el correcto uso del mecanismo.

Ambos se fabricarán en PETG.

Soporte plataforma superior

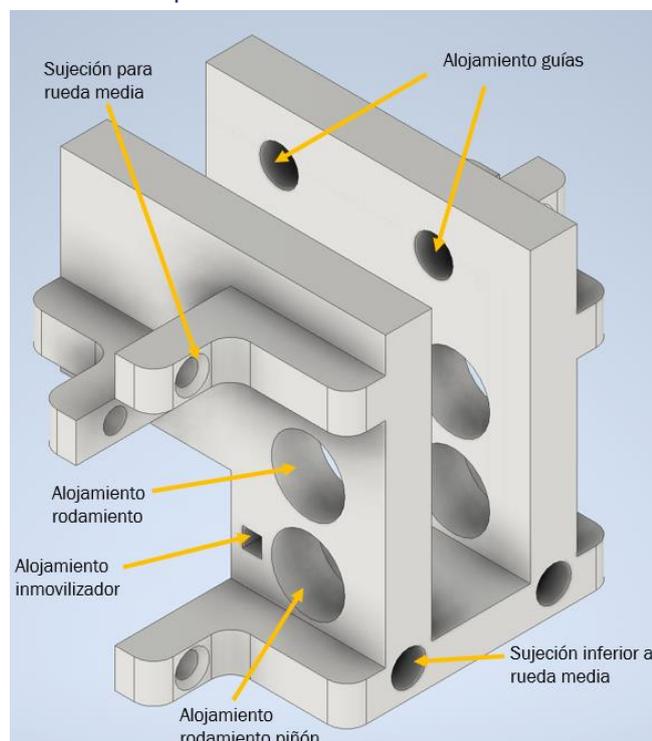


Ilustración 52: soporte superior

Una de las piezas más complejas de fabricar, sus funciones son múltiples, a continuación, se enumeran:

- Mediante el uso de las escuadras, los dos taladros inferiores y tornillería, practicar la unión de este soporte con la rueda media.
- Alojamiento de los rodamientos superiores, tanto de piñón como de corona, será importante un ajuste según fabricante, ver [5.3.5](#).
- Alojamiento del inmovilizador.
- Alojamiento de las guías superiores.
- Alojamiento de la rueda superior.

Tren de engranajes, rodamientos y ejes superiores



Ilustración 53: Ejes y tren superiores

Este tren de engranajes junto con sus ejes son los encargados de transmitir el movimiento que se aplica al eje del piñón hasta la rueda superior, consiguiendo de esta manera el movimiento de inversión – eversión.

Los trenes de engranajes serán de acero, al igual que los ejes, para más información, consultar el [ANEXO II](#).

Alojados externamente en el soporte superior se encuentran 2 rodamientos en cada extremo del eje de la corona y 2 rodamientos en cada extremo del eje del piñón, sus especificaciones son:

Atributo	Valor
Diámetro de Entrada	8mm
Diámetro de Salida	19mm
Tipo de Rodamiento de Bola	Radial
Anchura del Anillo	6mm
Tipo de Extremo	Apantallado
Número de Filas	1
Valor Nominal de Carga Estática	1.059kN
Material	Acero
Material de Bola	Acero Inoxidable Martensítico
Material de la Rejilla	Acero con Cinta Metálica
Material del Anillo	Acero Inoxidable Martensítico
Tipo de anillo	Plano
Valor Nominal de Carga Dinámico	2.463kN
Tipo de Calibre	Paralelo

Tabla 10: Especificaciones rodamientos piñón superior. (NMB, RS components , 2021)

Atributo	Valor
Diámetro de Entrada	10mm
Diámetro de Salida	19mm
Tipo de Rodamiento de Bola	Ranura Profunda
Anchura del Anillo	5mm
Tipo de Extremo	Sellado
Número de Filas	1
Valor Nominal de Carga Estática	585No
Material	Acero
Tipo de anillo	Plano
Valor Nominal de Carga Dinámico	1.38kN
Tipo de Calibre	Paralelo

Tabla 11: Especificaciones rodamientos corona superior. (PRO, 2021)

Rueda superior

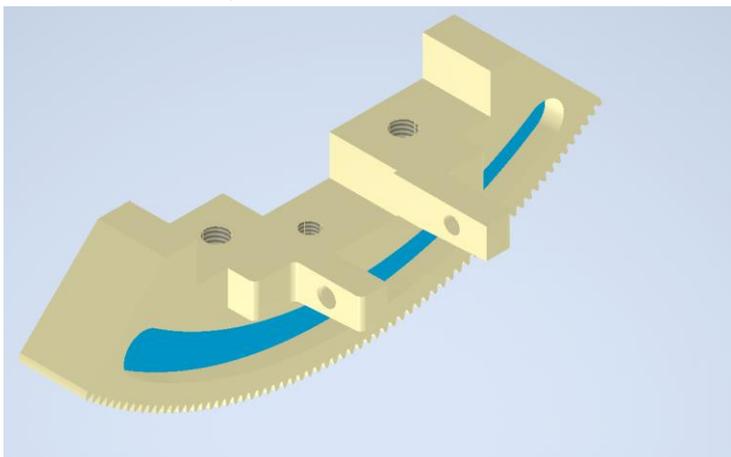


Ilustración 54: Rueda superior

Esta rueda dentada de módulo 1 tiene muchas funciones, a continuación, se enumeran:

- Una unión rígida entre el pedal y la rueda, que se practicará mediante el uso de dos tornillos de métrica 10, uno de M8 y dos de M5 con cabeza avellana que se atornillarán mediante las escuadras de la rueda superior, de la misma manera que se hizo con el soporte superior.
- Engranar con la corona superior, consiguiendo de esta manera el movimiento de inversión – eversión.
- Conseguir el contacto de las deslizadoras superiores, las cuales se encargarán de guiar el movimiento.
- Por cada diente avanzado, el pedal se moverá $1,2^\circ$.

En una segunda iteración del diseño se aumentó su sección, para conseguir una mayor superficie de contacto y minimizar las tensiones sufridas por la misma.

El material de fabricación final será nylon (poliamida), en este caso comercialmente conocido como NOVAMID 1030.

En la tabla adjunta, podemos ver las características principales de esta rueda.

DATOS DE LA RUEDA (3)		
MÓDULO	m	1
Nº DE DIENTES	Z	300
CREMALLERA TIPO	UNE 18016	
DIÁMETRO PRIMITIVO	Dp	300
DISTANCIA ENTRE EJES	C	163
RUEDA CONJUGADA (MARCA)	Nº DE DIENTES	26
	PLANO Nº	ANEXO 2.2

Tabla 12: Características rueda media

Deslizadoras y guías superiores

Su función es exactamente la misma que la de las guías medias, pero aplicándose en la rueda superior, por lo que cambiarán su radio y dimensiones.

Se fabricarán en PETG.

Inmovilizador

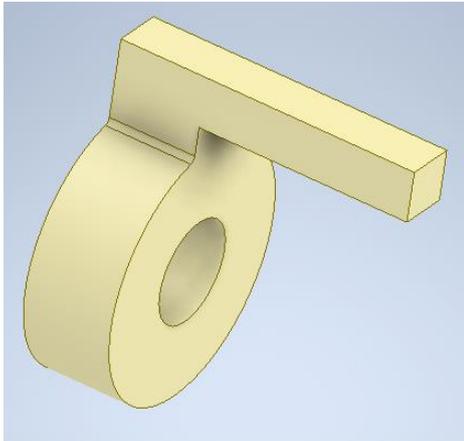


Ilustración 55: Inmovilizador

Aunque simple, su función es clave, el eje del piñón superior se aloja en ella por ajuste, una vez posicionado el tobillo en su posición deseada el ortopeda introduce el saliente del inmovilizador en la cajera rectangular del soporte superior, impidiendo así el movimiento del pedal debido al peso del pie del paciente.

Se fabricará en PETG.

Pedal

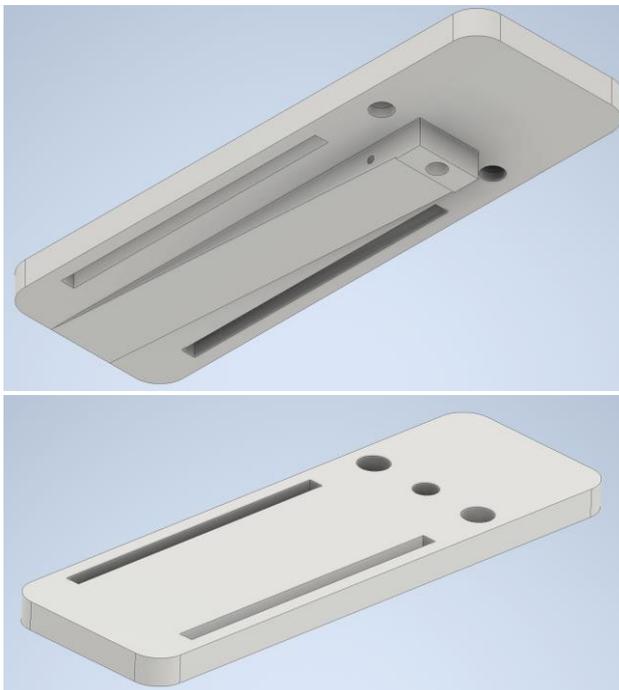


Ilustración 56: Pedal

Es el encargado de transmitir los 3 movimientos a la articulación del paciente. Es muy importante para cumplir el Real decreto 2017/745 que vimos en el

capítulo 2, que el material final de fabricación sea biocompatible con la piel humana, ya que el pie desnudo toca la superficie del pedal.

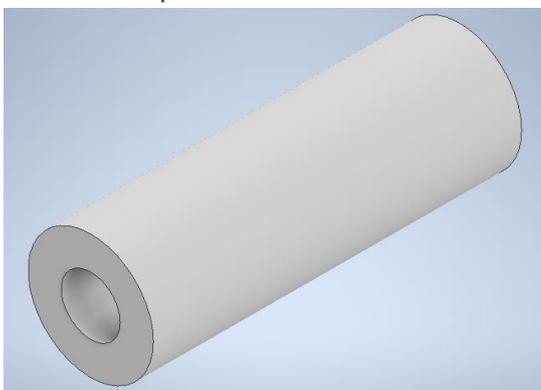
Las ranuras practicadas tienen la función de atar el pie al pedal mediante el uso de cinchas.

Tiene practicados diferentes agujeros y roscas compatibles con los de la rueda superior, para conseguir una unión rígida.

En una segunda iteración del diseño se le añadió el nervio inferior, para de esta manera reducir el desplazamiento del voladizo durante la aplicación de la carga.

El material de fabricación será PETG.

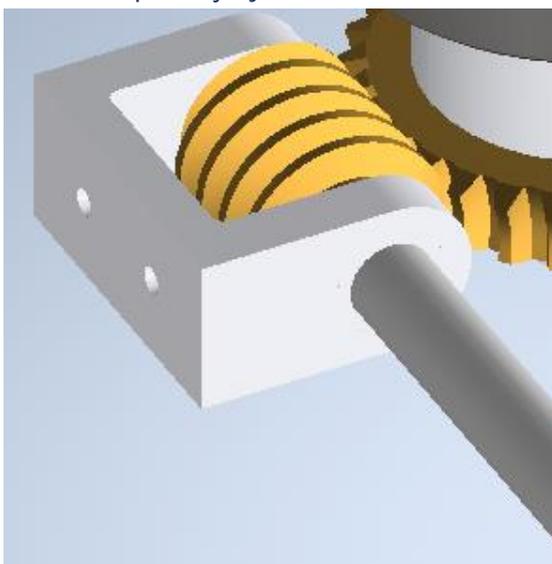
Casquillos medios



En él se inserta el eje medio, su función es la de evitar el desplazamiento longitudinal del tornillo sin fin y de los rodamientos medios. Fabricados en acero común.

Ilustración 57: Casquillos medios

Soporte y eje inferiores



El soporte se inserta mediante uniones roscadas a un lateral de la caja inferior, el eje inferior es el encargado de transmitir el movimiento al tornillo helicoidal inferior, y para ello, se aloja en el soporte.

El soporte se fabricará en PETG y el eje de acero común.

Ilustración 58: Soporte y eje inferiores

Este sistema de transmisión de potencia es el encargado de conseguir el movimiento de abducción – aducción.

Tornillería

El principal método de unión de este mecanismo han sido las uniones roscadas, es por ello por lo que necesitamos variedad de tornillos de diferentes clases y tamaños. Para consultar la lista de materiales ver “CONJUNTO EXPLOSIONADO” en [ANEXO I](#).

Vista de conjunto

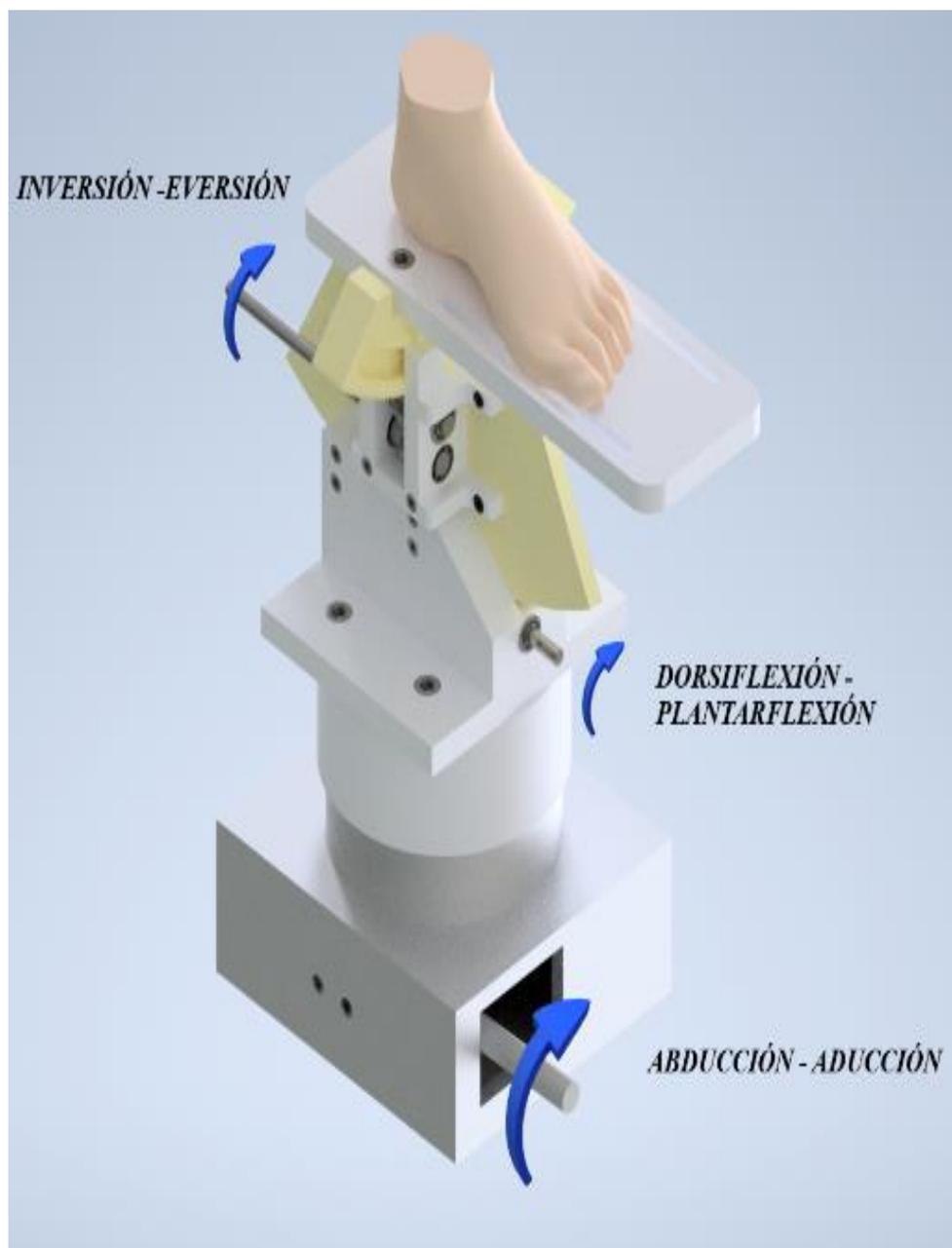


Ilustración 59: Vista de conjunto renderizada

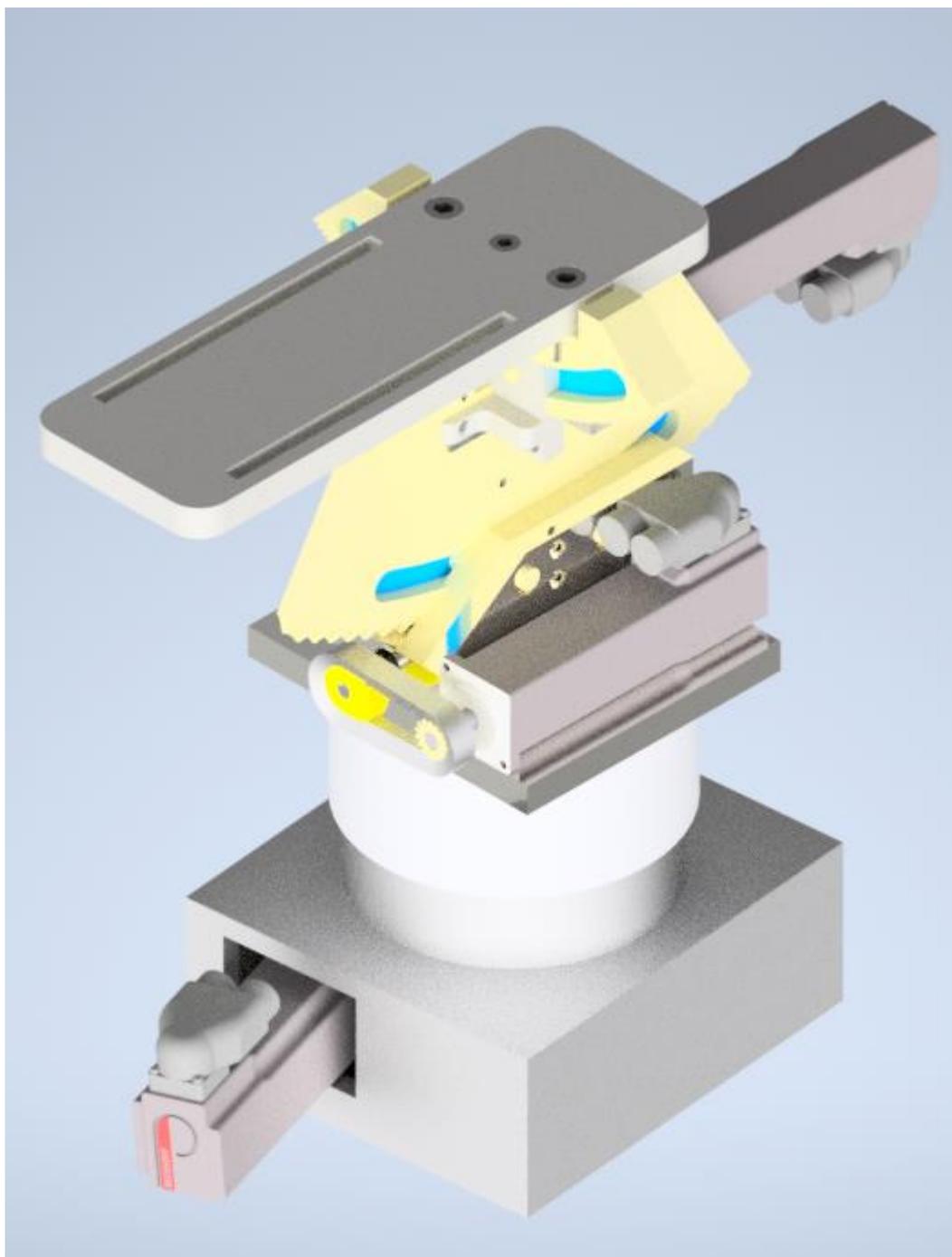


Ilustración 60: Vista de conjunto con motores 1

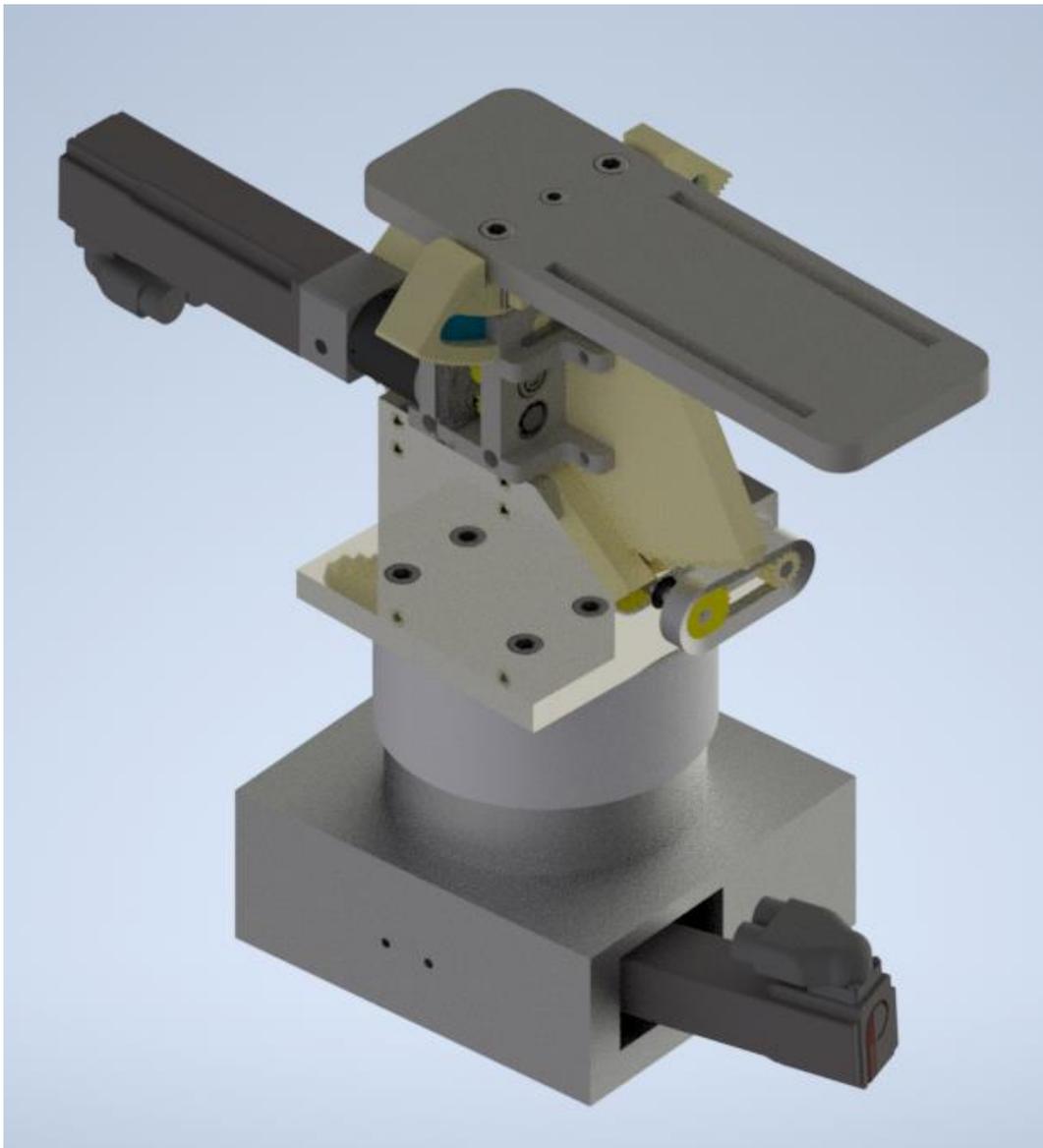


Ilustración 61: Vista de conjunto con motores 2

A título informativo para la persona encargada de continuar con este proyecto, se representan dos vistas que muestran la posición de los servomotores y las estrategias de transmisión de potencia proyectadas.

5.3.4 Cálculo del centro instantáneo de rotación del mecanismo

Es de vital importancia que el CIR del mecanismo se encuentre a unos 80 mm de la base del pie, ya que es la distancia estándar donde se localiza la articulación del tobillo, para adecuarse a diferentes pacientes, se calzará con un añadido adecuado seleccionado por el técnico especialista.

Identificando los axoides de cada elemento móvil y su punto de convergencia, se calcula el CIR del mecanismo:

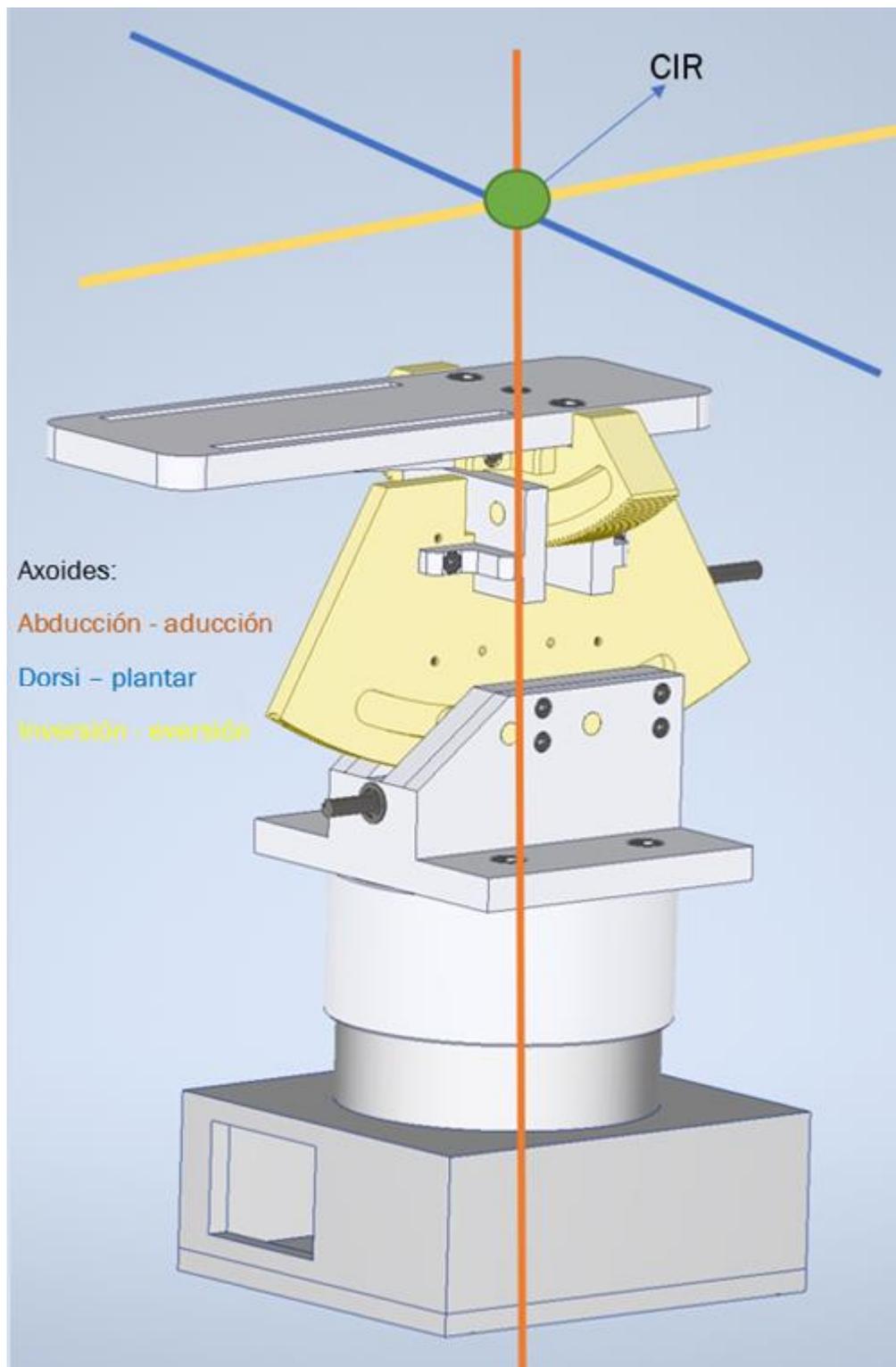


Ilustración 62: CIR del mecanismo

Gracias al diseño del conjunto, se ha conseguido que los tres axoides converjan en un punto por encima del pedal, esto es gracias a que tanto la rueda media como la superior están dispuestas perpendicularmente entre sí, y el centro de

dichas ruedas (ficticio, pero aun así su centro de giro) coinciden entre sí, y se cortan con el eje de giro del movimiento de abducción – aducción.

Para conseguir esto, se han aplicado varias iteraciones en el diseño, variando el diámetro de las ruedas, ya que, aunque no sea determinante su diámetro primitivo en lo que a interferencias se refiere, debido a que no son ruedas completas, sí que determina su centro de giro, las dimensiones finales son:

Rueda media: Diámetro primitivo 500 mm

Rueda superior: Diámetro primitivo 300 mm

CIR a 85 mm de la base del pedal, obteniendo así un margen amplio para que el mecanismo sea capaz de adaptarse a diferentes pacientes, siendo el técnico el encargado de valorar las necesidades del paciente y alzar en consecuencia la base.

5.3.5 Cálculo de ajustes

En este apartado se calculan los diferentes ajustes de ejes y alojamientos para los rodamientos adquiridos, atendiendo a las recomendaciones de los fabricantes:

“Las tolerancias dimensionales de los asientos de rodamientos vienen determinadas por el ajuste requerido. Los requisitos de precisión de la aplicación le indicarán la clase de tolerancia que debe usar para el rodamiento (Versión del rodamiento) y, en consecuencia, la tolerancia de variación necesaria del asiento. La variación del asiento se especifica mediante la variación radial total de la superficie del asiento y la variación axial total del resalte (ISO 1101, 18.16).

Para los rodamientos con tolerancias normales en aplicaciones industriales generales, los asientos se suelen mecanizar con las siguientes tolerancias:

- *asientos de eje con tolerancias dimensionales hasta grado IT6 y tolerancias de variación total hasta grado IT5*
- *asientos de soporte con tolerancias dimensionales hasta grado IT7 y tolerancias de variación total hasta grado IT6*

Los valores adecuados de los asientos del eje se indican para las siguientes clases de tolerancia:

- *f5, f6, g5, g6, h5 (tabla 1)*
- *h6, h8, h9, j5, j6 (tabla 2)*
- *js4, js5, js6, js7, k4 (tabla 3)*
- *k5, k6, m5, m6, n5 (tabla 4)*
- *n6, p6, p7, r6, r7 (tabla 5)*
- *r6+IT6, r7+IT7 (tabla 6)*



Los valores adecuados de los asientos del soporte se indican para las siguientes clases de tolerancia:

- F7, G6, G7, H5, H6 (tabla 7)
- H7, H8, H9, H10, J6 (tabla 8)
- J7, JS5, JS6, JS7, K5 (tabla 9)
- K6, K7, M5, M6, M7 (tabla 10)
- N6, N7, P6, P7 (tabla 11)

“

(SFK, 2021)

Se utilizarán las tablas 1 y 7, adjuntadas a continuación:

tabla 1 - Tolerancias del eje y ajustes resultantes

Eje Diámetro nominal	Rodamiento Tolerancia del diámetro del agujero		Desviaciones del diámetro del eje, ajustes resultantes ¹⁾											
			Clases de tolerancia											
d	t Δdmp		f5(E)		f6(E)		g5(E)		g6(E)		h5(E)			
			Desviaciones (diámetro del eje)											
			Interferencia (-)/juego (+) teóricos											
más de	hasta incl.	inf.	sup.	Interferencia (-)/juego (+) probables										
mm		μm		μm										
3	6	-8	0	-10	-15	-10	-18	-4	-9	-4	-12	0	-5	
				+2	+15	+2	+18	-4	+9	-4	+12	-8	+5	
				+3	+14	+4	+16	-3	+8	-2	+10	-7	+4	
6	10	-8	0	-13	-19	-13	-22	-5	-11	-5	-14	0	-6	
				+5	+19	+5	+22	-3	+11	-3	+14	-8	+6	
				+7	+17	+7	+20	-1	+9	-1	+12	-6	+4	
10	18	-8	0	-16	-24	-16	-27	-6	-14	-6	-17	0	-8	
				+8	+24	+8	+27	-2	+14	-2	+17	-8	+8	
				+10	+22	+10	+25	0	+12	0	+15	-6	+6	
18	30	-10	0	-20	-29	-20	-33	-7	-16	-7	-20	0	-9	
				+10	+29	+10	+33	-3	+16	-3	+20	-10	+9	
30	50	-12	0	-25	-36	-25	-41	-9	-20	-9	-25	0	-11	
				+13	+36	+13	+41	-3	+20	-3	+25	-12	+11	
				+16	+33	+17	+37	0	+17	+1	+21	-9	+8	
50	80	-15	0	-30	-43	-30	-49	-10	-23	-10	-29	0	-13	
				+15	+43	+15	+49	-5	+23	-5	+29	-15	+13	
				+19	+39	+19	+45	-1	+19	-1	+25	-11	+9	
80	120	-20	0	-36	-51	-36	-58	-12	-27	-12	-34	0	-15	
				+16	+51	+16	+58	-8	+27	-8	+34	-20	+15	
				+21	+46	+22	+52	-3	+22	-2	+28	-15	+10	

Tabla 13: Ajustes de asientos de ejes. (SFK, 2021)

tabla 7 - Tolerancias del soporte y ajustes resultantes

Soporte Diámetro nominal del agujero		Rodamiento Tolerancia del diámetro exterior		Desviaciones del diámetro del agujero del soporte, ajustes resultantes ¹⁾ Clases de tolerancia									
D	f ΔDmp			F7E		G6E		G7E		H5E		H6E	
				Desviaciones (diámetro del agujero del soporte)									
				Juego teórico (+)									
más de	hasta incl.	inf.	sup.	Juego probable (+)									
mm		μm		μm									
6	10	0	-8	+13	+28	+5	+14	+5	+20	0	+6	0	+9
				+13	+36	+5	+22	+5	+28	0	+14	0	+17
				+16	+33	+7	+20	+8	+25	+2	+12	+2	+15
10	18	0	-8	+16	+34	+6	+17	+6	+24	0	+8	0	+11
				+16	+42	+6	+25	+6	+32	0	+16	0	+19
				+19	+39	+8	+23	+9	+29	+2	+14	+2	+17
18	30	0	-9	+20	+41	+7	+20	+7	+28	0	+9	+0	+13
				+20	+50	+7	+29	+7	+37	0	+18	0	+22
				+23	+47	+10	+26	+10	+34	+2	+16	+3	+19
30	50	0	-11	+25	+50	+9	+25	+9	+34	0	+11	0	+16
				+25	+61	+9	+36	+9	+45	0	+22	0	+27
				+29	+57	+12	+33	+13	+41	+3	+19	+3	+24
50	80	0	-13	+30	+60	+10	+29	+10	+40	0	+13	0	+19
				+30	+73	+10	+42	+10	+53	0	+26	0	+32
				+35	+68	+14	+38	+15	+48	+3	+23	+4	+28
80	120	0	-15	+36	+71	+12	+34	+12	+47	0	+15	0	+22
				+36	+86	+12	+49	+12	+62	0	+30	0	+37
				+41	+81	+17	+44	+17	+57	+4	+26	+5	+32

Tabla 14: Ajustes de asientos de soporte. (SFK, 2021)

Ajuste rodamientos inferiores $d = 60$ mm, $D = 95$ mm

- Se procede a calcular el ajuste del diámetro 60 mm del cilindro inferior, en el cual se alojarán los rodamientos de diámetro interior 60 mm.

Atendiendo a la tabla 13, fila = diámetro de eje de 50 mm a 80 mm, y tolerancia de eje IT5 con posición h, obtenemos:

Desviaciones (diámetro del eje)
Interferencia (-)/juego (+) teóricos
Interferencia (-)/juego (+) probables

Es decir, se debe de fabricar el eje de manera que quede en el siguiente intervalo:

[59,987; 60,000] mm

μm

0	-13
-15	+13
-11	+9

- Se procede a calcular el ajuste del alojamiento para el diámetro exterior del rodamiento de 95 mm en la caja inferior, atendiendo a la tabla 14 se elige una calidad IT6 con posición del alojamiento H, acudiendo a la fila 80 -120, se obtiene:

Desviaciones (diámetro del eje)
Interferencia (-)/juego (+) teóricos
Interferencia (-)/juego (+) probables

Es decir, se debe de fabricar el alojamiento para el rodamiento de la caja inferior de manera que quede en el siguiente intervalo:

[95; 95,022] mm

μm

0	+22
0	+37
+5	+32

Ajuste rodamientos medios

- Se procede a calcular la tolerancia que debe de presentar el eje calibrado a comprar para accionar el tornillo helicoidal medio:

El diámetro de eje es de 8 mm, eligiendo una calidad IT5 con una posición de eje h, se obtiene:

Desviaciones (diámetro del eje)	
Interferencia (-)/juego (+) teóricos	
Interferencia (-)/juego (+) probables	
μm	
0	-6
-8	+6
-6	+4

Es decir, se debe comprar un eje cuyas dimensiones estén en el intervalo:

[7,994; 8,000] mm

- Se procede al cálculo del alojamiento de diámetro 16 mm.

Para una calidad IT6 y una posición de agujero H, se obtiene:

Desviaciones (diámetro del eje)	
Interferencia (-)/juego (+) teóricos	
Interferencia (-)/juego (+) probables	
μm	
0	+11
0	+19
+2	+17

Se debe fabricar el alojamiento de la plataforma principal de manera que quede en el siguiente intervalo:

[16,000; 16,011] mm

Ajuste rodamientos superiores del piñón

- Ajuste de eje diámetro 8 mm.

Para una calidad IT5 y una posición de eje h, se obtiene:

Desviaciones (diámetro del eje)	
Interferencia (-)/juego (+) teóricos	
Interferencia (-)/juego (+) probables	
0	-6
-8	+6
-6	+4

Es decir, se debe de comprar un eje cuyas dimensiones estén en el intervalo:

[7,994; 8,000] mm

- Ajuste alojamiento soporte superior diámetro 19 mm.

Para una calidad IT6 y una posición de agujero H, se obtiene:

Desviaciones (diámetro del eje)	
Interferencia (-)/juego (+) teóricos	
Interferencia (-)/juego (+) probables	
+0	+13
0	+22
+3	+19

Es decir, se debe fabricar los agujeros de la plataforma de manera que quede en el intervalo:

[19; 19,013] mm

Ajuste rodamientos superiores de la corona

- Ajuste eje diámetro 10 mm.

Para una calidad IT5 y una posición de eje h y usando el intervalo superior, se obtiene:

Desviaciones (diámetro del eje)	
Interferencia (-)/juego (+) teóricos	
Interferencia (-)/juego (+) probables	

μm

0	-8
-8	+8
-6	+6

Es decir, se debe comprar un eje cuya dimensión este en el intervalo:

[9,992; 10,000] mm

- Ajuste alojamiento diámetro 19 mm.

Para una calidad IT6 y una posición de agujero H, se obtiene:

Desviaciones (diámetro del eje)	
Interferencia (-)/juego (+) teóricos	
Interferencia (-)/juego (+) probables	

μm

+0	+13
0	+22
+3	+19

Es decir, se deben fabricar los agujeros del soporte de manera que queden en el intervalo:

[19; 19,013] mm

5.3.6. Lista de materiales

Elemento	Unidades	Material
Tapa caja inf	1	F114 o galvanizado
Caja inf	1	F114 o galvanizado
Cilindro inf	1	PETG
Corona inf	1	Latón
Tornillo helicoidal inferior	1	Acero templado de cementación (comercial)
Rodamientos inf	2	Acero (comercial)
Plataforma pcpal	1	PETG
Eje medio	1	Eje calibrado acero carbono (comercial)
Rodamiento medio	2	Acero (comercial)
Soporte medio no ranura	1	PETG
Soporte medio	1	PETG
Guías medias	2	PETG
Deslizadoras medias	2	PETG
Tornillo helicoidal medio	1	Acero templado de cementación (comercial)
Rueda helicoidal media	1	Novamid 1030 (nylon impresión 3d FDM)
Soporte superior	1	PETG
Corona sup	1	Acero acabado natural (comercial)
Piñón sup	1	Acero acabado natural (comercial)
Eje piñón sup	1	Acero al carbono calibrado (comercial)
Eje corona sup	1	Acero al carbono calibrado (comercial)
Rodamientos sup piñón	2	Acero (comercial)
Rodamientos sup corona	2	Acero (comercial)
Rueda sup	1	Novamid 1030 (nylon impresión 3d FDM)
Pedal	1	PETG
Inmovilizador	1	PETG
Soporte inferior	1	PETG
Eje inferior	1	Acero al carbono calibrado (comercial)

Tabla 15: Lista de materiales

Las ruedas dentadas se fabricarán en Novamid 1030, una poliamida de alta resistencia creada por la empresa DSM, que nos ofrece muy buenas propiedades mecánicas y resistencia al desgaste, cualidades óptimas para la impresión de un engranaje. Para más información de este material consultar el [ANEXO II](#).

El resto de las piezas impresas se han fabricado en PETG, un plástico técnico, con muy buenas prestaciones, aprobado para el uso médico y alimentario.

Para más información acerca de los diferentes materiales de impresión y componentes comerciales adquiridos, consulta el [ANEXO II](#).

5.4. Cálculo de fallo estático

5.4.1. Introducción

Es necesario que el diseño y el material de fabricación sean capaces de soportar las cargas a las que el mecanismo va a estar sometido. La variedad de las condiciones físicas de los pacientes a tratar hace necesario proponer un caso de estudio límite que considere las condiciones más críticas a las que va a estar sometido el dispositivo.

Para el análisis se usará el módulo CEF del software de diseño Inventor. Este módulo permite el análisis mediante el método de elementos finitos de una forma informatizada, dándonos datos de fuerzas vibración, calor, flujo de líquidos ... Tras el análisis debemos de conocer:

- Secciones críticas.
- Análisis de tensiones y comparación con las especificaciones límites del material.
- Análisis de desplazamientos del mecanismo.
- Valoración de la integridad del mecanismo en el periodo de uso, y en el caso de que dicha valoración sea negativa, plantear otra interacción en el diseño, tanto cambios en geometría como en materiales de fabricación.
- Coeficientes de seguridad de las diferentes secciones y comprobar que estos son al menos mayores que 1,5.

A título informativo, el procedimiento general que se va a seguir a la hora de simular por el método de elementos finitos es el siguiente:

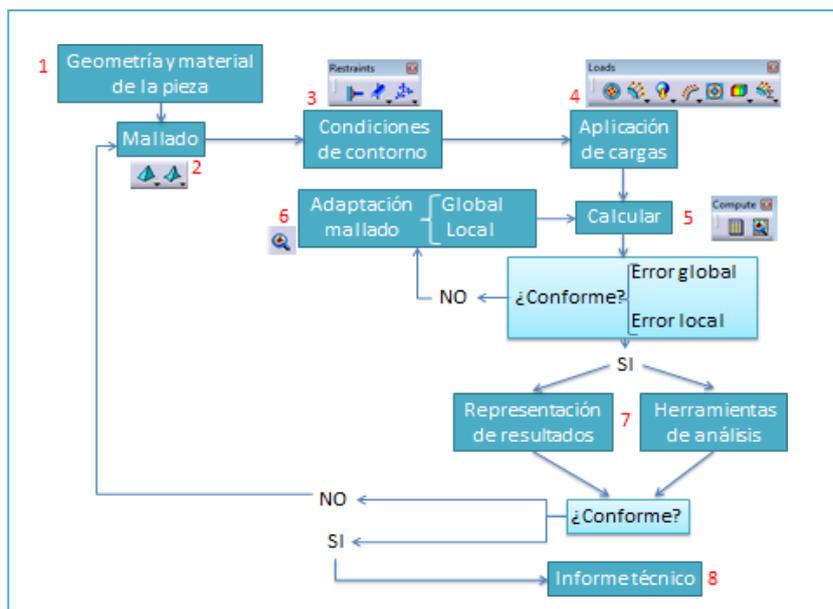


Ilustración 63: Esquema general del proceso de modelizado. (Bachiller, 2018)

5.4.2. Configuración del análisis

Tras estar todas las restricciones del ensamblaje perfectamente definidas, tarea realizada en la fase de diseño, se debe de configurar el análisis, de manera que este se adapte a la geometría planteada y a la calidad de los resultados deseados:

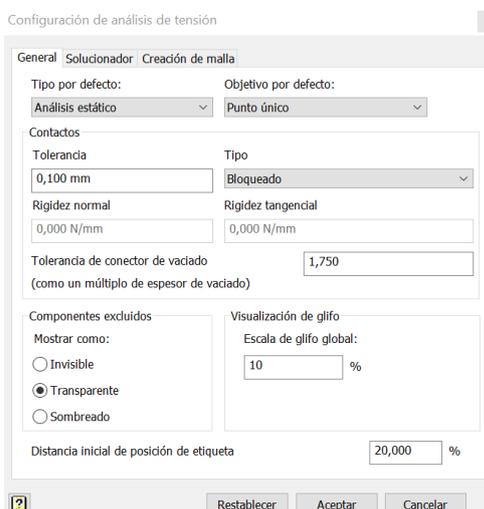


Ilustración 64: Configuración del análisis 1

Se selecciona análisis estático, que el objetivo sea el conjunto completo, la tolerancia (permite especificar la distancia máxima entre las caras o las aristas que se deban tener en cuenta en la detección automática) es decir, cuanta precisión se desea en el mallado. Y por último la escala de glifo, que permite especificar el tamaño de malla perceptible. Los cambios en la distancia de

posición de etiqueta no alteran el análisis final, solo a la visualización del identificador.

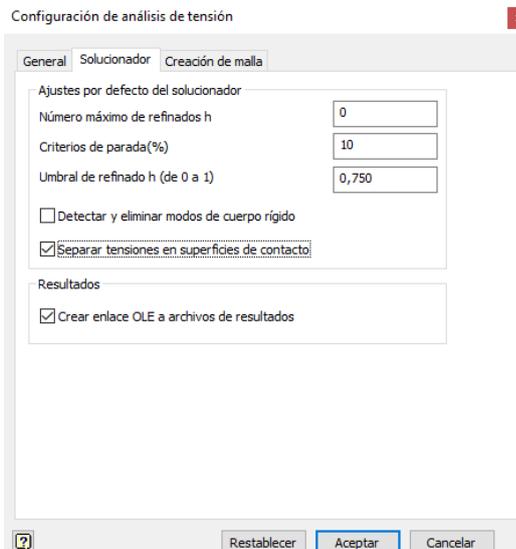


Ilustración 65: Configuración del análisis 2

Con el número máximo de refinados, se define el número máximo de pasos para la convergencia del análisis, lo ideal es dejar el valor por defecto, que es 0, para que el análisis siempre converja. El criterio de parada es similar a lo anterior, simplemente define unos valores de porcentaje, que en el caso de que el análisis devuelva valores dentro de este porcentaje, se detiene el proceso, el valor por defecto es el seleccionado. El umbral de refinado va de 0 a 1, e indica cuantos elementos de la pieza o conjunto se desean simular, siendo 0 todas y 1 ninguna, no habría refinado. La casilla “Separa tensiones en superficies de contacto” es muy importante, en caso de seleccionarla, obtenemos una representación explícita de la tensión en las superficies de contacto, se debe activar, ya que presentamos múltiples secciones de contacto en engranajes, deslizadoras, ejes – rodamientos ...

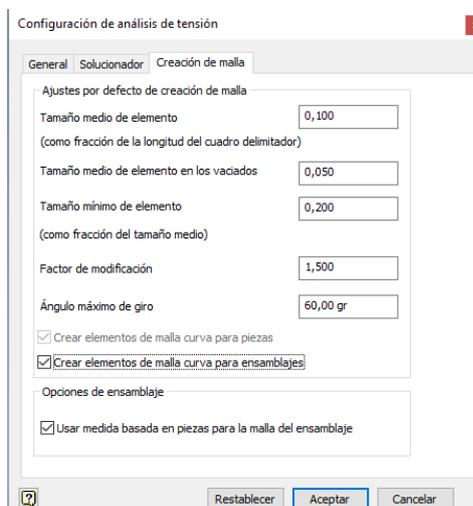


Ilustración 66: Configuración del análisis 3

Esta configuración define el tamaño de malla, a menor valor de “tamaño medio de elemento” elementos de malla más pequeños (más precisión), a menor “ángulo máximo de giro” elementos de malla más pequeños. La opción “Crear elementos de malla curva para ensamblajes” es muy importante, de no seleccionarla el mallado en las zonas curvas (como pueden ser las hélices de la rueda media) será recto, consiguiendo una representación menos precisa del modelo.

Las configuraciones que no han sido explícitamente detalladas es debido a que no son tan críticas para el análisis y no compete su explicación en este documento.

Tras haber configurado el análisis, el mallado obtenido, es el representado en la siguiente ilustración:



Una opción muy interesante para geometrías complejas es realizar un control de malla local por elemento, en este análisis en particular se ha seleccionado un control de malla local en las hélices de los engranajes, por presentar geometrías complejas y cambiantes en pequeños tramos, obteniendo un análisis más refinado.

Ilustración 67: Mallado del ensamblaje

Se procede a caracterizar las cargas aplicadas:

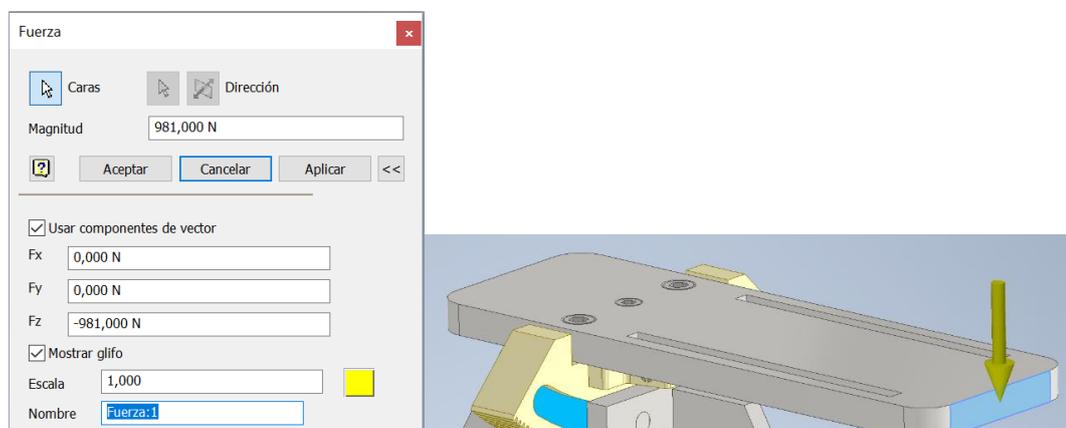


Ilustración 68: Caracterización de la carga

Se ha supuesto el caso más crítico, una fuerza de 981 N (100 kg) aplicados sobre el pedal en su punto de voladizo máximo.

Tras fijar la caja inferior como fija (bancada), se procede a la computación del análisis.

5.4.3. Análisis de los resultados

Para determinar la aceptación o no del mecanismo y de los materiales seleccionados, se aplicará el criterio de Von Mises, relatado a continuación:

- Tensión de Von Mises

Este criterio también conocido como la hipótesis de la energía de deformación, determina que “*el fallo por fluencia se dará cuando la energía de deformación total en un volumen unitario alcanza o excede la energía de deformación en el mismo volumen correspondiente a la resistencia de fluencia en tensión o en compresión. El material comienza a fluir cuando*”: (Roberto, 2021)

$$\sigma' \geq S_y$$
$$\sigma' = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}}$$
$$\sigma' = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)}{2}}$$

Ilustración 69: Criterio de V-M. (Bachiller, 2018)

Siendo:

- S_y : la resistencia de fluencia en tensión del material.
- σ' : la tensión a fluencia máxima alcanzada en la sección
- σ_x ; σ_y ; σ_z : Las tensiones en las 3 direcciones del sólido rígido.
- T_{xy} ; T_{yz} ; T_{xz} : Las tensiones tangenciales en las 3 direcciones del sólido rígido.

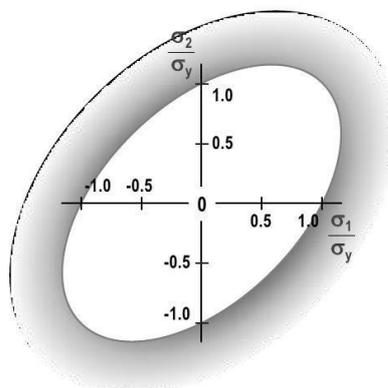


Ilustración 70: Representación del criterio de V-M. (Bachiller, 2018)

Es decir, una vez que la tensión de V-M calculada a partir de la ecuación de la ilustración 53, supere el valor de la tensión de fluencia del material, este falla.

A continuación, se analizan los resultados arrojados por nuestro estudio de elementos finitos:

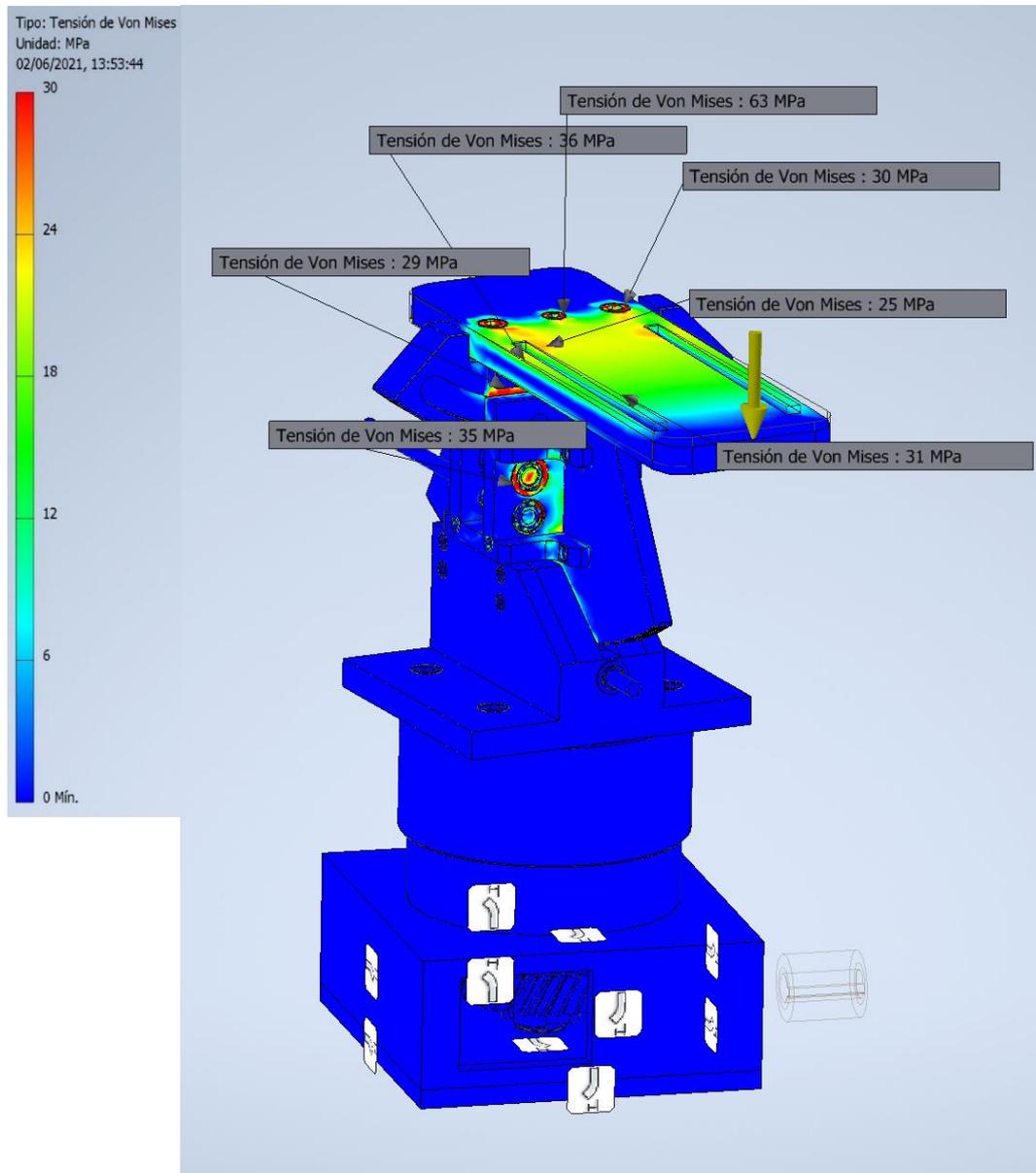


Ilustración 71: Resultado análisis tensión V-M 1

Se ve como las zonas que soportan mayor tensión son los rodamientos superiores, tornillos superiores, ranura oblonga de la rueda superior y la sección media del pedal.

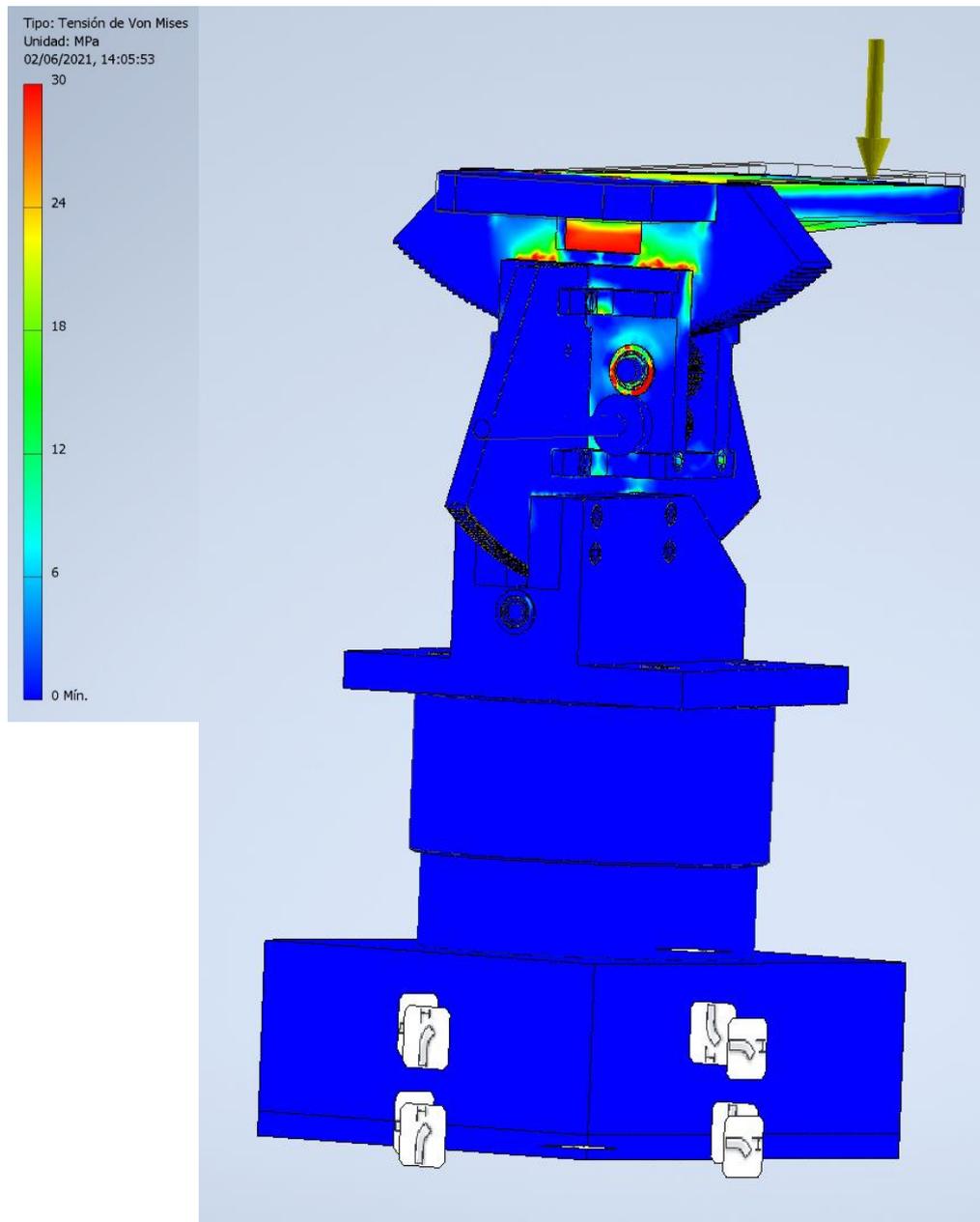


Ilustración 72. Resultado análisis tensión V-M 2

En este caso se aprecia que los rodamientos, rueda superior y la parte trasera del nervio del pedal son secciones críticas del ensamblaje.

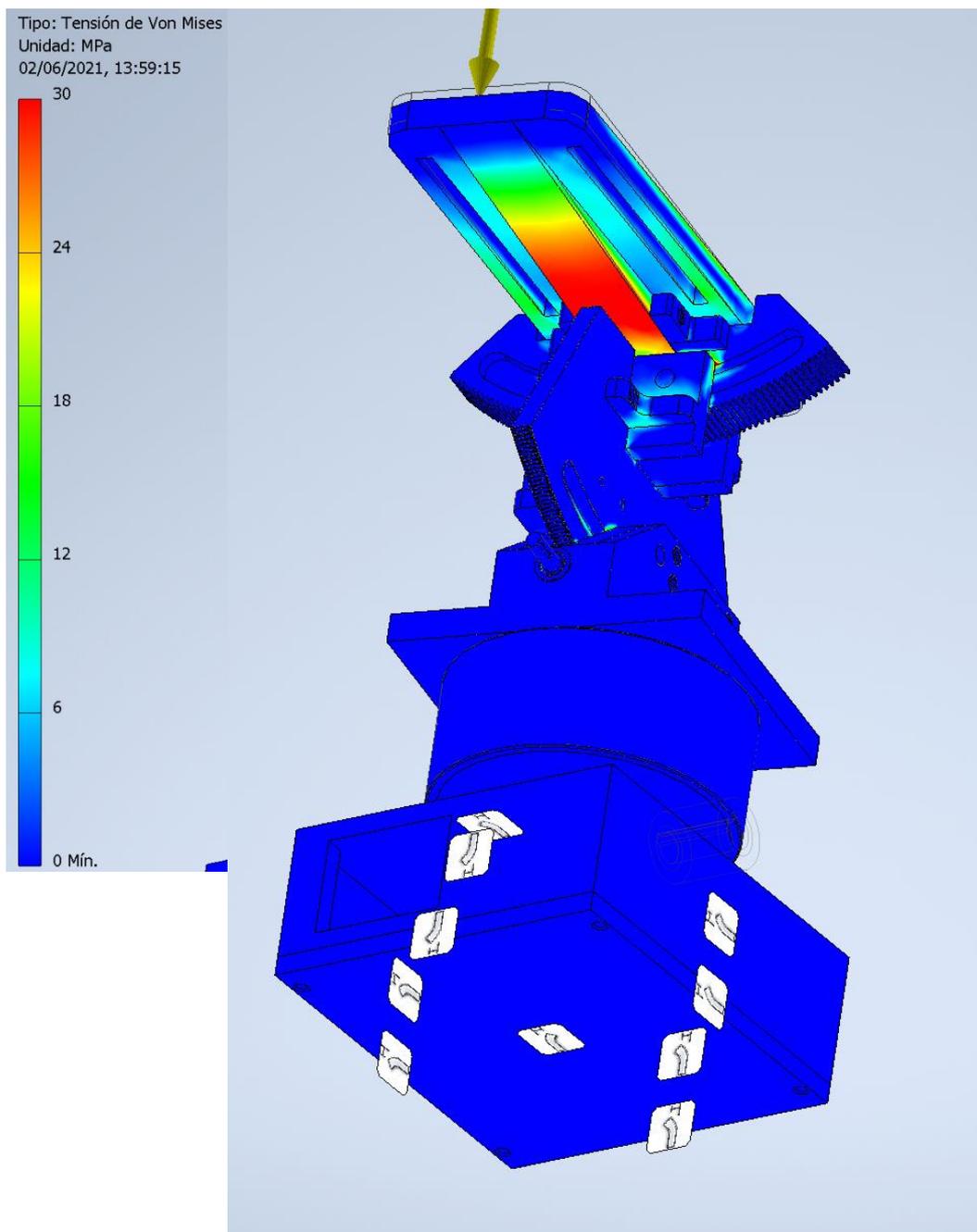


Ilustración 73. Resultado análisis tensión V-M 3

Por último, se aprecia como la sección del nervio el pedal más alejado del voladizo es la que más tensión soporta.

Tras un ajuste de la escala de colores para poder visualizar la magnitud de las tensiones correctamente, se aprecia como nuestro mecanismo no alcanza en ningún punto de este la tensión máxima de los diferentes materiales, por lo que no es necesario iterar en el diseño o en los materiales. Las secciones críticas son:

- Nervio del pedal
- Los rodamientos superiores
- Zona de contacto con las deslizadoras y alrededores de la rueda superior.
- Tornillos de sujeción pedal – rueda superior
- “Deslizadoras” tanto inferiores como superiores.

Como conclusión a este apartado, se han definido cuáles son las secciones críticas del diseño y con las que se debe tener especial precaución. Se ha asegurado la estabilidad al fallo estático del conjunto, la siguiente tabla refleja las tensiones tangenciales críticas, en que secciones se dan, el material final de dichas y si resiste, no existen secciones de rotura en el conjunto.

Componente	Material	Resistencia a la fluencia [MPa]	Tensión máx. [MPa]	¿Falla?
Tornillos superiores	Acero bajo carbono SAE 1010	648 (R.L, 2014)	63	No
Rueda superior	NOVAMID 1030	52. (DSM, 2021)	29	No
Deslizadoras superiores	PETG	59-72. (Smarfills, 2021)	23	No
Rodamientos superiores	Acero	648 (R.L, 2014)	35	No
Deslizadoras inferiores	PETG	59-72. (Smarfills, 2021)	19	No

Tabla 16: Resultados del análisis de tensiones de V-M

- Desplazamientos

A priori, se intuye que el desplazamiento máximo se va a encontrar en la punta del pedal, se podría simplificar como una barra empotrada con extremo libre y una fuerza aplicada en dicho extremo, cuyo diagrama de desplazamientos es el siguiente:

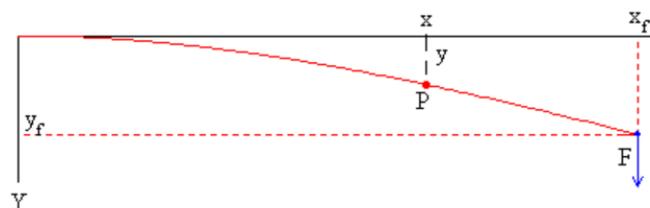


Ilustración 74: Desplazamiento barra empotrada – libre (Beléndez T., 2002)

Los resultados arrojados por el software son:

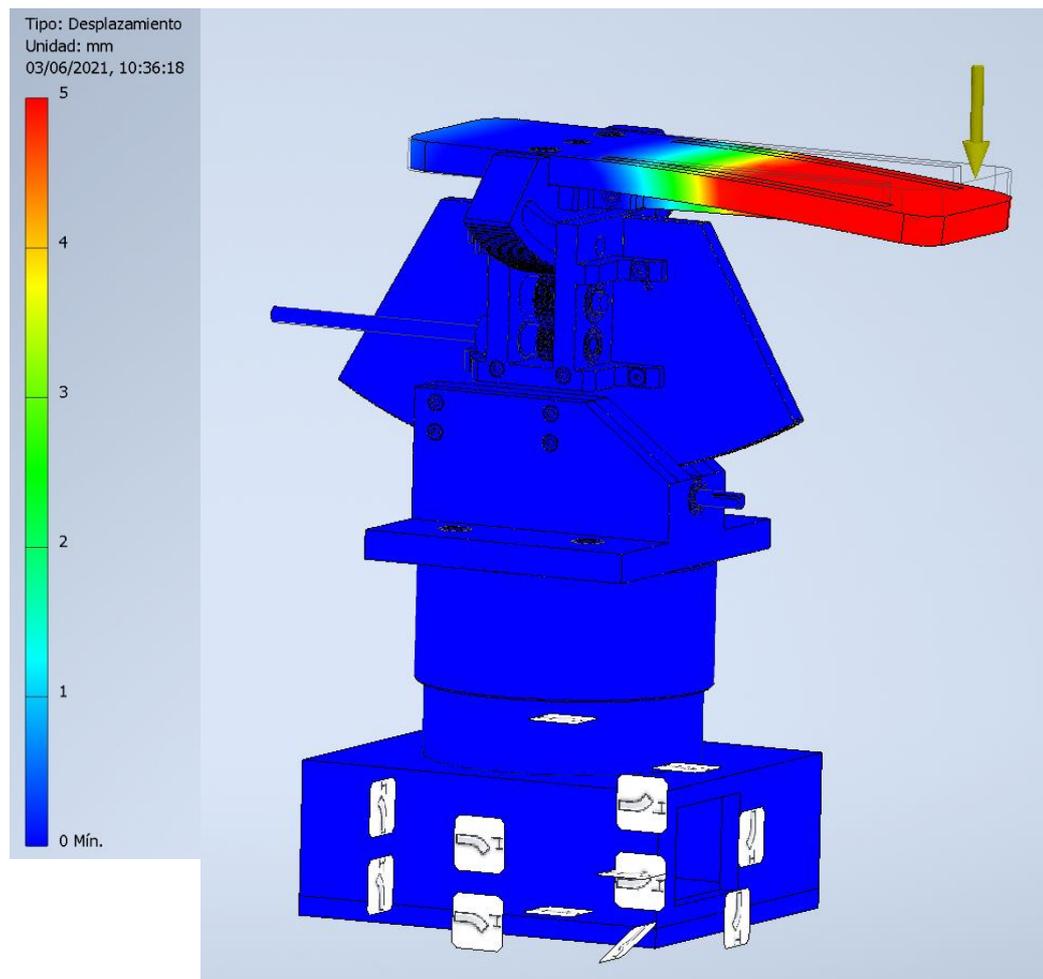


Ilustración 75: Resultado análisis desplazamiento

La primera aproximación era correcta, y el desplazamiento máximo se da en el extremo libre del pedal y su valor es de 5,31 mm, se asume como un desplazamiento aceptable dado el caso de estudio tan crítico aplicado.

- Coeficiente de seguridad

El término coeficiente de seguridad indica la relación entre la tensión máxima alcanzada y la tensión última del material. A continuación, se analizan los coeficientes de seguridad de las diferentes secciones:

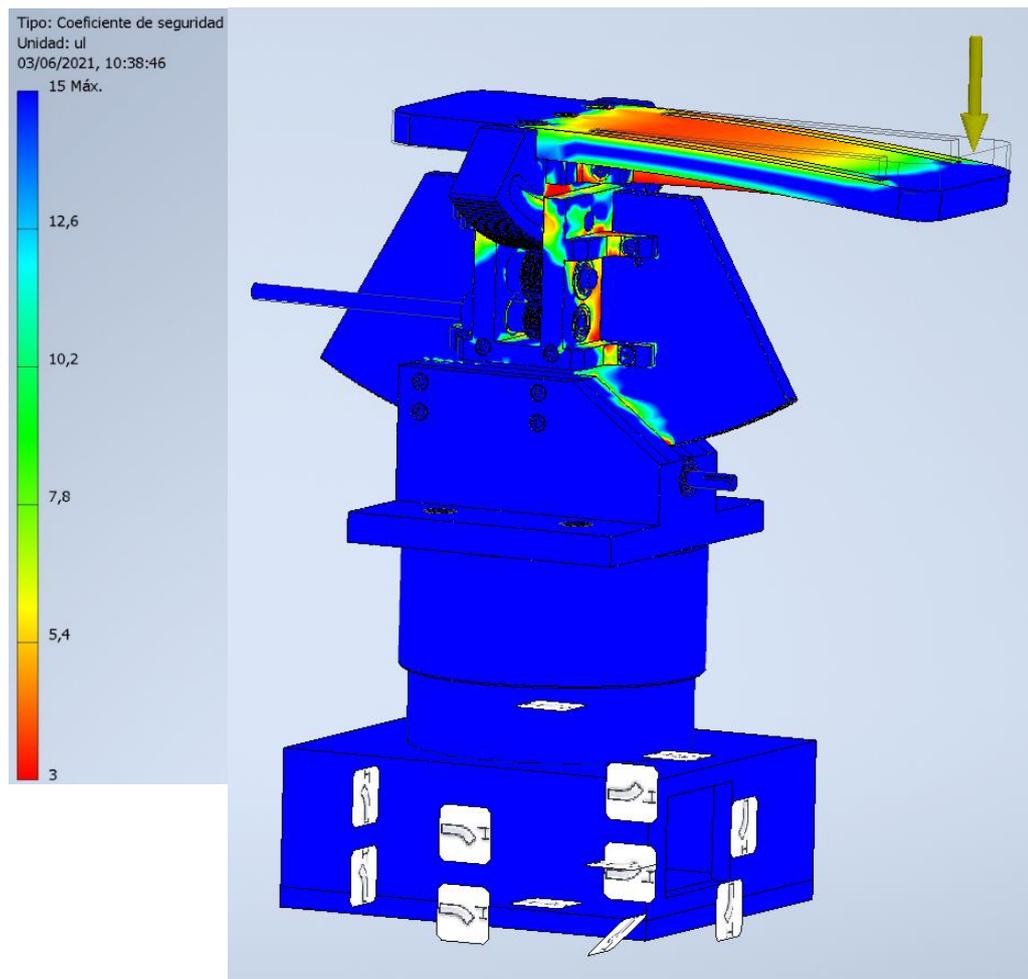


Ilustración 76: Resultado análisis coeficiente de seguridad

De este análisis se obtiene que en la mayor parte del mecanismo se cumple que el coeficiente de seguridad es mucho más grande que la unidad, del orden de 15, y en las zonas críticas es de alrededor de 3 unidades, valor más que suficiente para considerar el conjunto seguro en lo que a fallo estático se refiere. Lo que en términos generales significa, que, en la parte más crítica de nuestro mecanismo se tiene que aplicar una carga 3 veces mayor que la del caso crítico propuesto para que falle.

5.4.4. Conclusiones

Se concluye que después de varias iteraciones en el diseño para conseguir un diseño estable, seguro y sin fallo, lo hemos conseguido, las tensiones de Von-mises no son elevadas respecto a los límites de los materiales elegidos, los desplazamientos son pequeños y el coeficiente de seguridad mínimo es del orden de tres unidades, por lo tanto, podemos pasar a la parte de prototipado.

5.5. Prototipado

5.5.1. Introducción

Tras varias iteraciones en el diseño se avanza a la fase de prototipado, para de esta manera comprobar la existencia de interferencias no deseadas y la adecuación con las necesidades de la aplicación.

Un método muy común para abaratar costes de fabricación es fabricar un prototipo impreso en 3D, para ser capaces de analizar las dimensiones reales del conjunto, las interferencias entre componentes, la movilidad de este y ser capaces de analizar diferentes errores que se han podido obviar durante la etapa de diseño.

El prototipo ha sido impreso en PLA 850 por su facilidad de impresión y las buenas características que ofrece (consultar en [ANEXO II](#)), e impreso en una CREALITY CR 10 Y UNA ENDER 3.

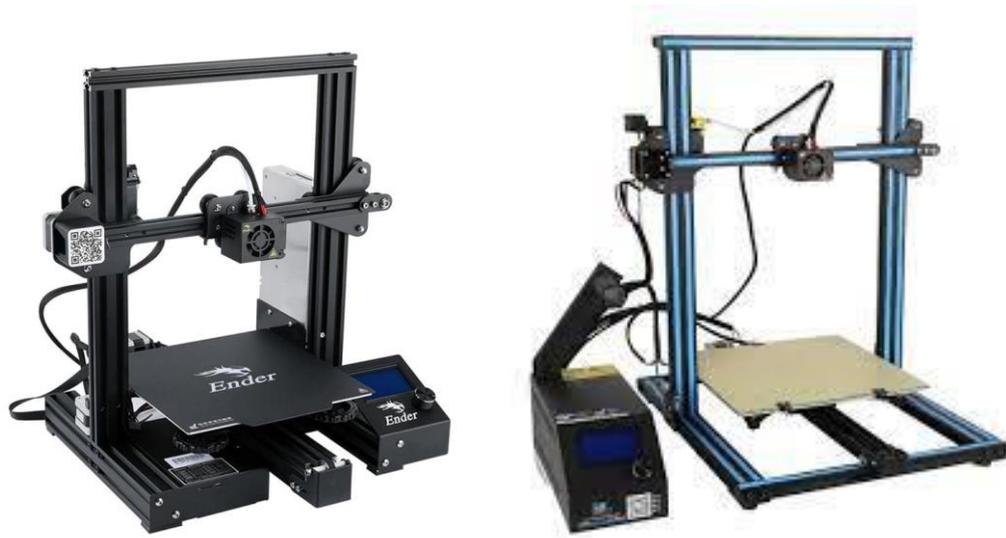


Ilustración 77: Creality ender 3 y CR 10 (CREALITY, 2021)

El software de segmentación empleado ha sido Ultimaker Cura en su versión 4.9.0.

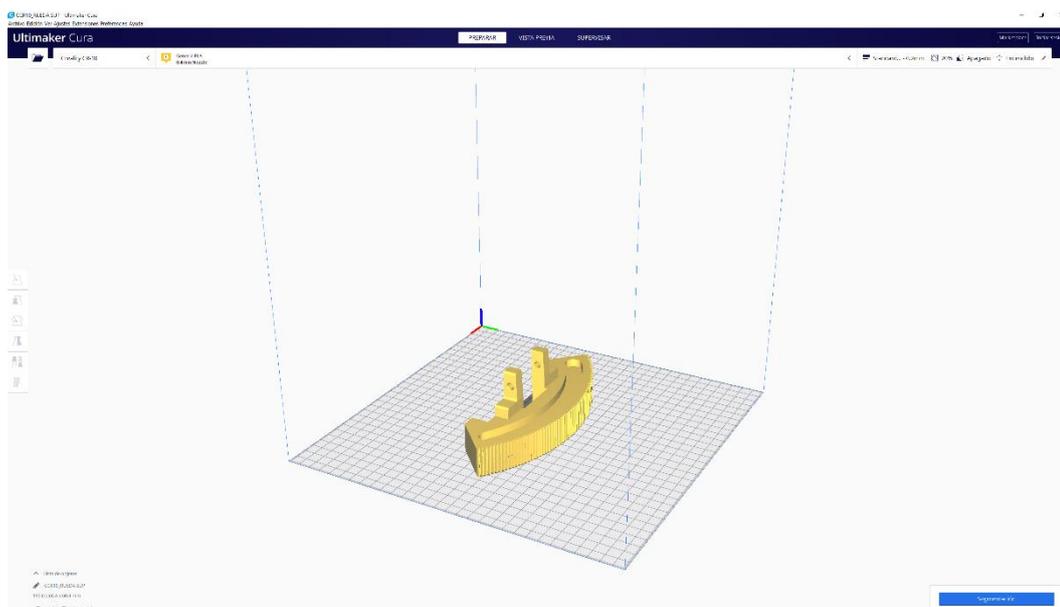


Ilustración 78: Software Cura 4.9.0

También hay ciertos componentes fabricados en acero al carbono común o adquiridos a diferentes empresas, por su dificultad o pérdida de recursos a la hora de imprimir.

5.5.2. Impresión de los componentes

Previa fabricación final en materiales técnicos (PETG y NOVAMID 1030), se realizará un primer prototipo en PLA 850, un material adquirido en “smartfills” que ofrece buenas características mecánicas, una muy buena calidad a un bajo precio y siendo fácilmente imprimible.

A título informativo, a continuación, se enumeran los parámetros clave generales característicos empleados:

PARÁMETRO	VALOR	Justificación
Altura de capa	0,1 – 0,2 mm	Con estos valores de calidad se consiguen impresiones funcionales sin altos tiempos de impresión.
Ancho de línea	0,4 mm	Del mismo tamaño que la boquilla de las impresoras.
Grosor de pared	0,8 mm	Ancho de línea x nº de líneas de pared deseadas.

Recuento de líneas de pared	2	Suficientes para conseguir impresiones rígidas.
Capas superiores	3	De esta manera se consigue una capa superior con un buen acabado.
Capas inferiores	3	Se consigue una capa inferior con un buen acabado, mejor que el de la superior al estar en contacto con la cama.
Relleno	15 - 25 %	Valores inferiores darían como resultado impresiones endebles y no funcionales, y superiores se traducirían en altos tiempos de impresión.
Patrón	Triángulo	Aunque aumenta el tiempo de impresión se consigue rigidez en el relleno.
Porcentaje de superposición de relleno	30 %	Con valores inferiores, el relleno no se adhiere bien a las paredes laterales, quedando las piezas impresas con huecos.
Tª de impresión	215°C	Recomendada por fabricante.
Tª de cama	60°C	Recomendada por fabricante.
Velocidad de impresión	60 mm/s	Recomendada por fabricante.

Velocidad de desplazamiento	150 mm/s	Recomendada por fabricante.
Retracción	Activada	De lo contrario quedan hilos en las impresiones.
Distancia de retracción	4,1 mm	Tras varias pruebas, este parámetro se ajustó para evitar hilos.
Velocidad de retracción	44 mm/s	Tras varias pruebas, este parámetro se ajustó para evitar hilos.
Salto en Z en la retracción	Activado	De lo contrario las impresiones presentan hilos.
Altura del salto en Z	0,2 mm	Tras varias pruebas, este parámetro se ajustó para evitar hilos.
Velocidad del ventilador	100%	Recomendada por fabricante.
Velocidad inicial del ventilador	0%	De lo contrario, es posible que la primera capa presente “warping” y la impresión resulte defectuosa.
Soportes	¿?	Dependiendo de la geometría serán necesarios o no.

Tabla 17: Parámetros de impresión

A modo de ejemplo, la siguiente es una de las piezas más complejas de imprimir y post procesar, debido a la necesidad de múltiples soportes en todos los voladizos (en los agujeros no es necesario el uso de soportes), a continuación, se muestra la segmentación realizada y el resultado de la impresión final:

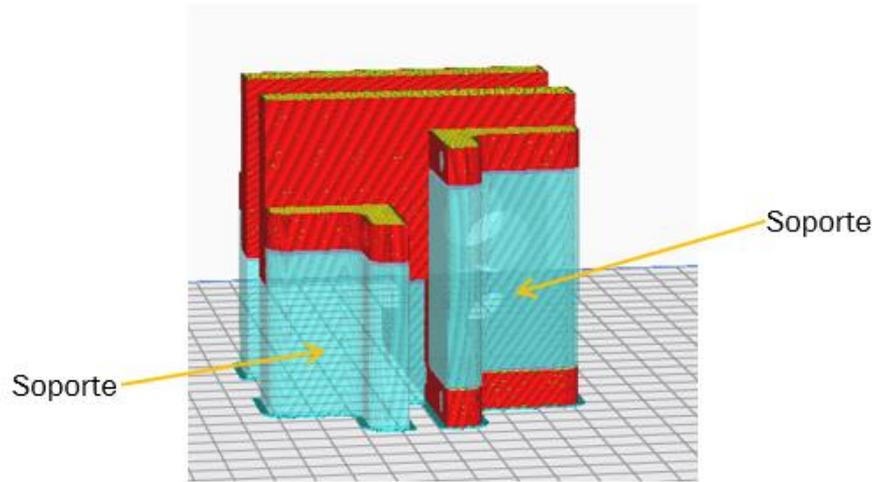


Ilustración 79: Vista previa segmentación soporte superior

A título informativo decir que esta pieza se intentó imprimir como en la siguiente imagen, ya que es posible imprimir voladizos hasta 45° con respecto de la vertical, evitando de esta manera el uso de excesivos soportes y el postprocesado que ellos requieren, pero el resultado fue una impresión defectuosa.

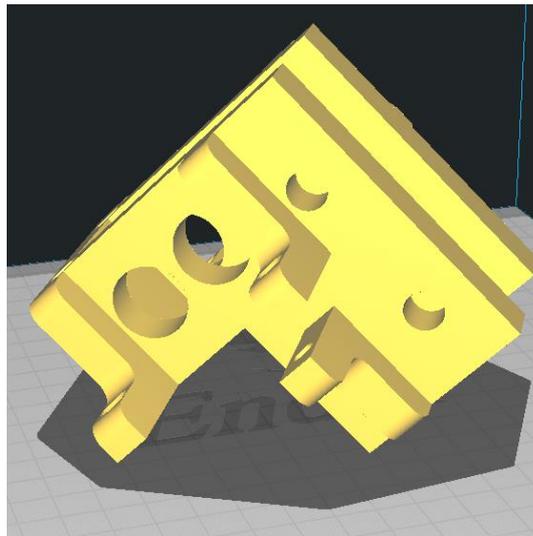


Ilustración 80. Soporte superior a 45° respecto de la vertical

Aquí podemos ver el resultado de algunas impresiones:

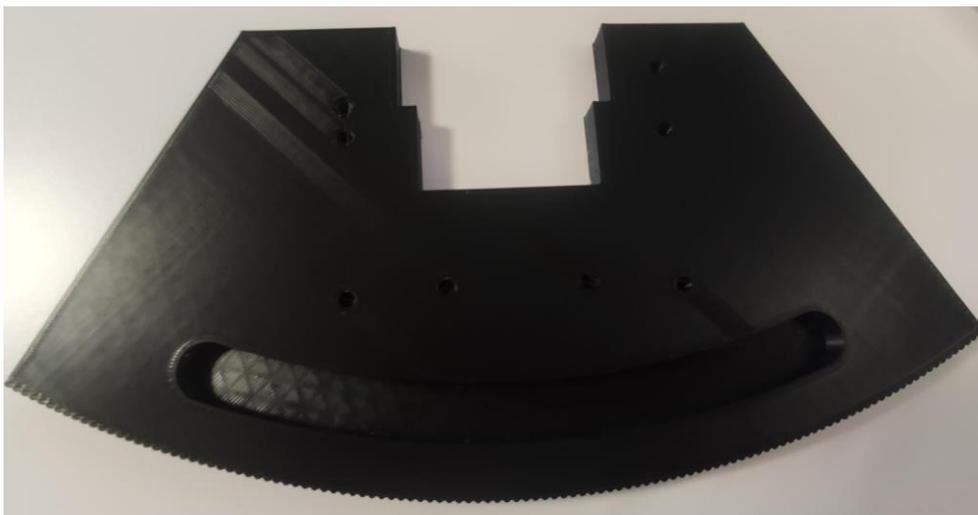


Ilustración 81: Resultado impresión última rueda media



Ilustración 82: Resultado impresión cilindro inferior



Ilustración 83. Resultado impresión pedal y rueda superior



Ilustración 84: resultado impresión soportes medios

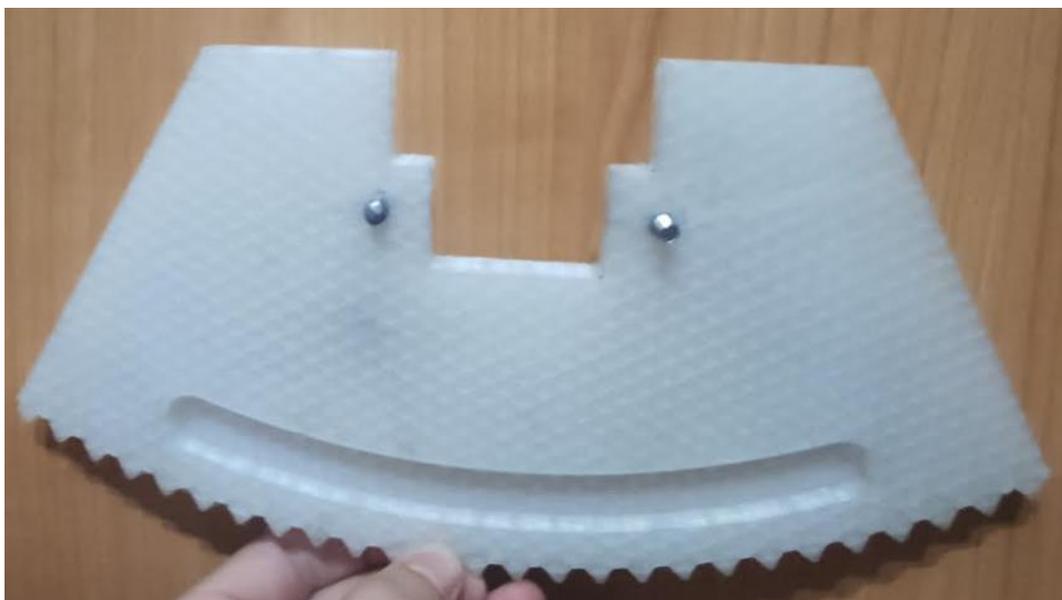


Ilustración 85: Resultado impresión primera rueda media

5.5.3. Adquisición de los componentes comerciales

Los componentes no imprimibles o cuyo uso final prolongado y seguro es incompatible con la impresión de la pieza, tales como engranajes, rodamientos, tornillería, sin fines... Han sido adquiridos a diferentes distribuidores.

Por un lado, con el distribuidor “RS componentes “se han adquirido:

- 2 rodamientos de bolas métricos de ranura profunda abiertos.
Diámetro interior= 65 mm
Diámetro exterior= 90 mm
Ancho= 18 mm



Ilustración 86: Rodamiento medio

- 2 rodamientos de bolas radiales NMB de acero
Diámetro interior= 8 mm
Diámetro exterior= 16 mm
Ancho= 5 mm
- 2 rodamientos de bolas radiales NMB de acero
Diámetro interior= 8 mm
Diámetro exterior= 19 mm
Ancho= 6 mm
- 2 rodamientos de bolas de ranura profunda RS pro de acero
Diámetro interior= 10 mm
Diámetro exterior= 19 mm
Ancho= 5 mm

Por otro lado, la empresa “NORELEM” ha subvencionado parte del proyecto proporcionando:

- Rueda helicoidal latón: referencia = 22500-532015
- Sin fin acero templado: referencia= 22500-531013

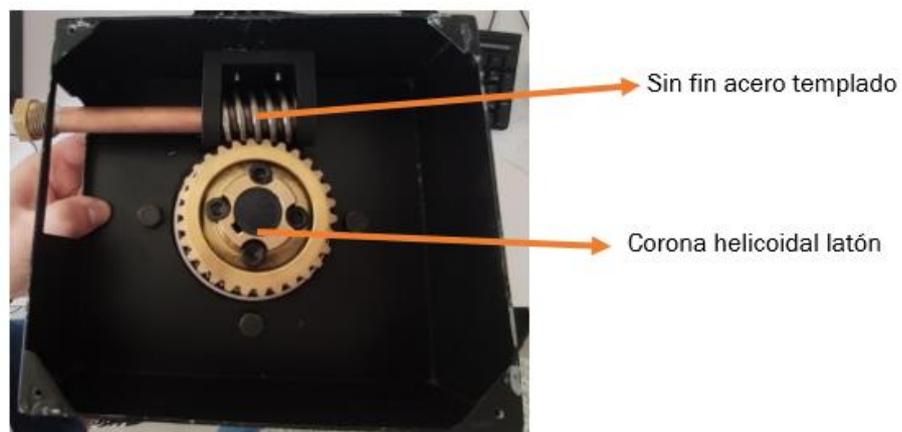


Ilustración 87: Rueda y tornillo helicoidales ya montados en la caja inferior

- Sin fin acero templado: referencia= 22500-311020



Ilustración 88: Sin fin acero templado

- Rueda dentada cilíndrica acero: referencia= 22400-0110150026
- Rueda dentada cilíndrica: referencia= 22400-0110150018

También ha sido necesario adquirir toda la tornillería, ejes y engranajes, para ver en detalle la lista de piezas del conjunto acudir al plano “CONJUNTO EXPLOSIONADO” del [ANEXO I](#).

5.5.4. Mecanizado

Antes del montaje, ha sido necesario practicar diferentes operaciones de mecanizado a los componentes adquiridos para su correcta adecuación al conjunto, se han realizado los siguientes mecanizados:

- Rueda helicoidal latón: 4 taladros en una circunferencia ficticia de diámetro 40 mm, ver plano 6 en [ANEXO I](#).

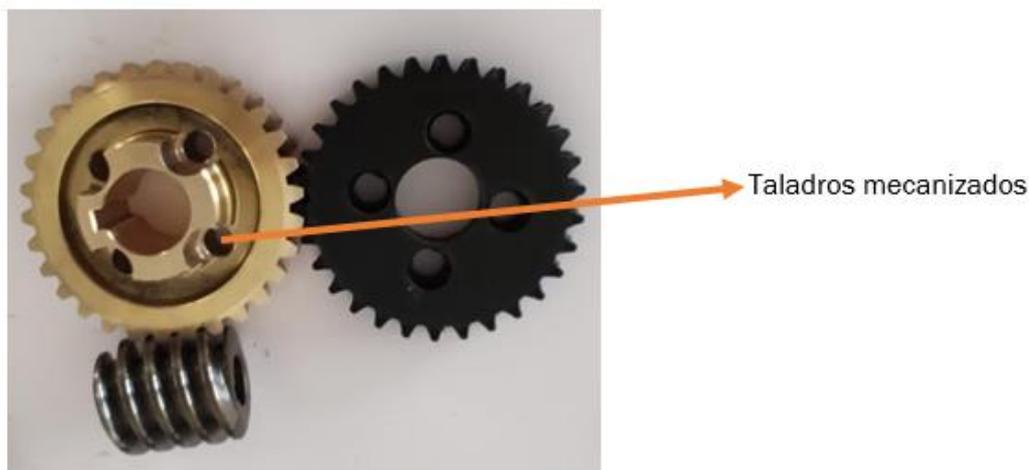


Ilustración 89: Comparación corona impresa y corona Norelem taladrada

- Taladros en corona y piñón superior, así como en ejes superior de corona y piñón para introducir un prisionero entre eje y ruedas dentadas.



Taladros realizados para inserto de prisioneros.

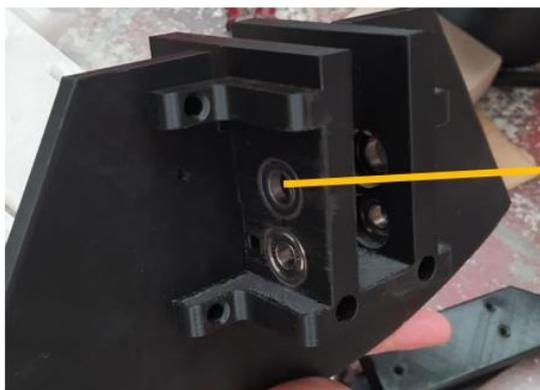
Ilustración 90: Corona y piñón superiores taladrados

- Fabricación de la caja inferior en chapa de 3 mm de acero galvanizado. Mediante soldadura por arco eléctrico de electrodo revestido, corte por radial con disco abrasivo, taladrado con taladro de columna y brocas de acero rápido (HSS), machos de roscar y pintado.
- Practicar roscas de diferentes métricas y tamaños en las piezas impresas usando machos de roscar directos de máquina.
- Roscado de extremos de ejes con terraja para introducir las esferas para asistir el accionamiento manual.



Ilustración 91: Accionamiento manual con bola para giro

- Diferentes retoques de ajustes para los alojamientos de los rodamientos, uso de lijas de grano fino para que los alojamientos queden en tolerancia.



Alojamientos de los rodamientos.

Ilustración 92: Alojamiento superiores para rodamientos

- Fabricación de los cojinetes medios para evitar el desplazamiento longitudinal del sin fin y rodamientos medios

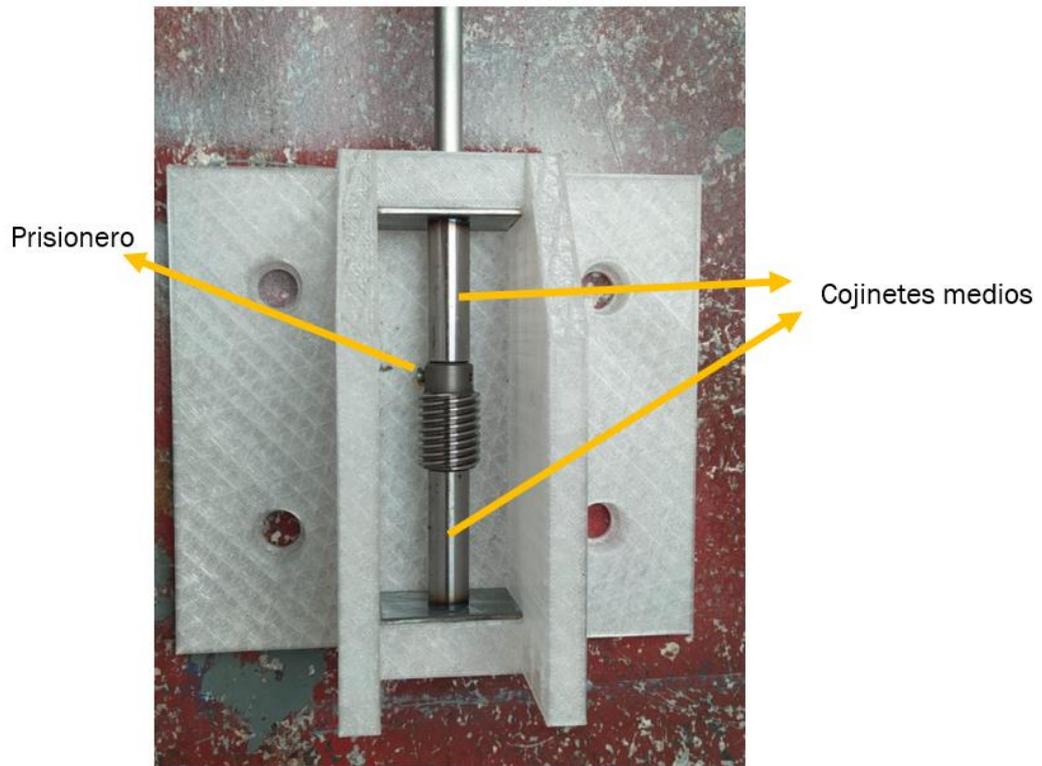


Ilustración 93: Montaje transmisión de potencia media

5.5.5. Resultado final

En la primera iteración de diseño y prototipado, antes de adquirir rodamientos y los productos de “NORELEM”, se simularon los rodamientos, engranajes y sin fines mediante modelos impresos en 3D, y se obtuvo el siguiente resultado:



Ilustración 94: Primer prototipo

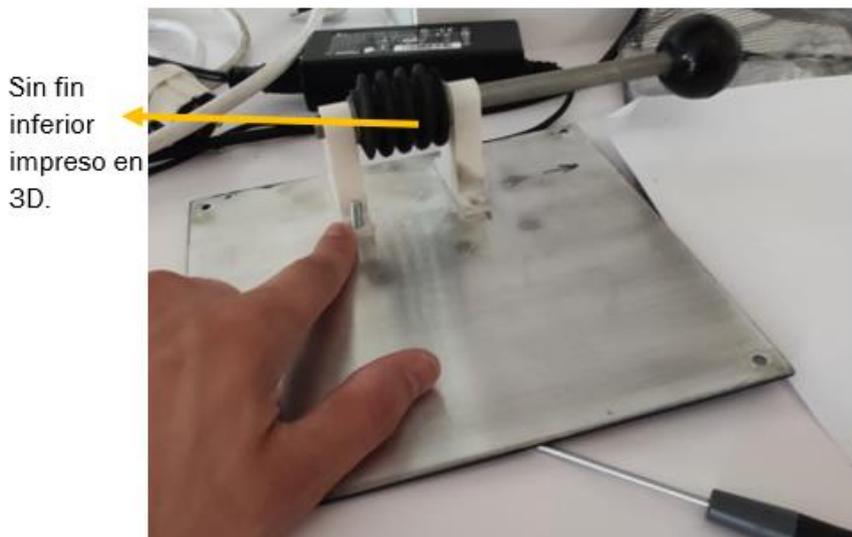


Ilustración 95: Transmisión de potencia inferior del primer prototipo

Las conclusiones tras analizar este primer prototipo fueron:

- Las holguras juegan un papel clave en la funcionalidad del mecanismo, se deben de ajustar las tolerancias para reducirlas al mínimo.
- El número de dientes de la rueda media debe de ser mayor, ya que de lo contrario el espacio entre dientes de rueda y tornillo es muy grande, lo que genera holguras críticas.
- Debemos conseguir un mecanismo más robusto.
- Los elementos de contacto y continuo rozamiento no pueden estar impresos en materiales como el PLA, el desgaste juega un papel fundamental y el mecanismo no sería funcional.

Las medidas adoptadas para solventar estos problemas han sido:

- Reducir las tolerancias de fabricación, de forma que los ajustes sean más pequeños.
- Cambiar completamente el diseño de la rueda media, de manera que el paso entre dientes sea menor, reduciendo las holguras.
- Añadir al pedal un nervio en su sección central (donde más tensiones surgen) de manera que se rigidice la unión.
- Aumentar la sección de la rueda superior, de manera que la superficie de contacto aumente, y se rigidice la estructura.
- Añadir escuadras a la rueda superior, para aumentar los elementos de unión con el pedal.
- Diseñar un soporte superior que sea solo una pieza, liberando las tensiones en las uniones.

- Adquirir fabricados en acero, coronas, ruedas helicoidales, tornillos sin fin y rodamientos, para mejorar la funcionalidad del conjunto y alargar su vida útil.

El resultado obtenido tras realizar todos los cambios ha sido el siguiente:

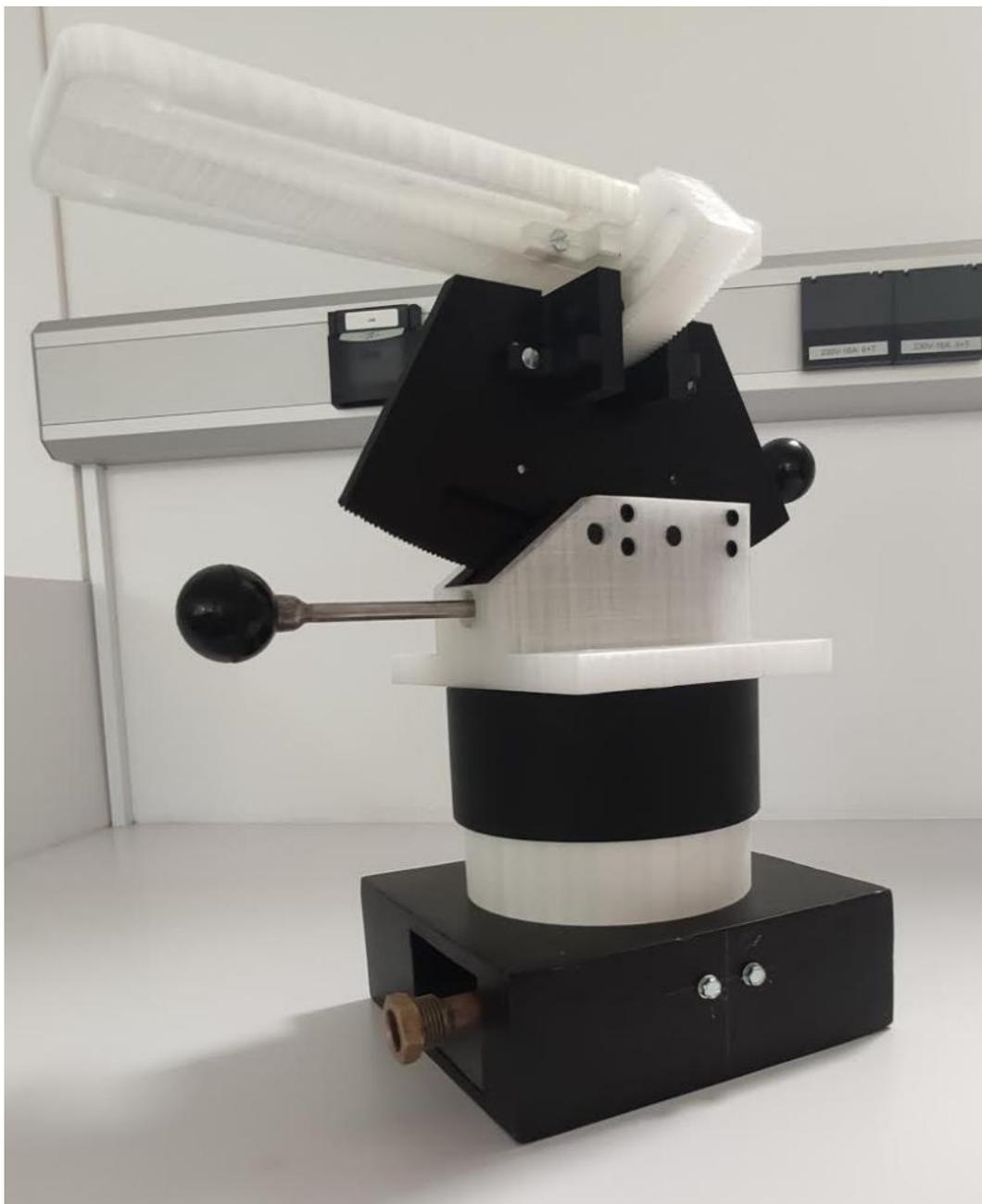


Ilustración 96: Prototipo final

Se ha conseguido un mecanismo más estable y robusto, que carece de holguras y los desplazamientos en uso son mínimos. Una vez impreso el producto final con los materiales técnicos seleccionados, nuestro mecanismo estará listo para usarse.

5.6. Prueba del mecanismo

Atendiendo a las limitaciones que presenta realizar un trabajo como este individualmente, la falta de tiempo y de pacientes potenciales disponibles, no se han podido realizar ensayos clínicos al uso, debido a la falta de volumen de pacientes, tanto sanos como con patologías. Pero en su defecto, ha sido posible realizar pruebas en el prototipo del mecanismo, para comprobar su conformidad con las necesidades existentes y la ausencia de dolores o molestias presentadas en el paciente.

Se ha probado el mecanismo en tres usuarios:

- Varón sano de 23 años y 80 kg.
- Dos infantes sanos de 9 y 12 años.



Ilustración 97: Ensayo en varón de 23 años.

Como se puede ver en la imagen, para la inmovilización del pie se han empleado dos cintas con velcro, una de ellas dispuesta de tal manera que evita la presencia del pie equino durante la realización del ensayo, el pie equino es una anomalía por la que el pie humano se encuentra en una posición flexión plantar, en aducción e inversión.



Ilustración 98: Pie equino. (Álvarez, 2021)

Por otro lado, se inmoviliza la tibia con una cincha a una de las patas de la estructura donde descansa el paciente.



Ilustración 99: Ensayo en infante de 9 años

En primera instancia, los resultados han sido muy satisfactorios, tanto en adultos sanos como en infantes sanos, el mecanismo responde correctamente en sus tres grados de libertad, es fácil de usar y no requiere de una fuerza excesiva en uso, gracias a las relaciones de reducción establecidas. El mecanismo presenta holguras, que deberán de ser ajustadas en una segunda fase del proyecto. La rigidez del mecanismo aumentará con el uso de materiales técnicos y aumentando la densidad de relleno a la hora de imprimir.



Los ensayados declaran que los movimientos no producen dolor y que la posición de aplicación es cómoda.

En un futuro, con el diseño final fabricado en plásticos técnicos, deberemos de realizar ensayos en una población muestral más amplia, de unos 70 individuos sanos, para más tarde pasar a una fase II del ensayo y probar el mecanismo en pacientes con anomalías en el tobillo, y ver si este responde como con los primeros ensayados.

6. ANÁLISIS DE COSTES

Los costes derivados del diseño, el prototipado y la fabricación están reflejados en la siguiente tabla resumen:

Concepto	Unidades	Precio/unidad [€]	Precio total [€]
Investigación y lectura	60 [h]	0	0
Diseño	200 [h]	0	0
Impresión 3D	110 [h] aprox	3	13,585
PLA	2 [Kg] aprox	20	40
Rodamiento de bolas de ranura profunda RS PRO de Acero, Ø int. 10mm, Ø ext. 19mm, ancho 5mm	2	3,86	7,72
Rodamiento de bolas radial NMB de Acero, Ø int. 8mm, Ø ext. 19mm, ancho 6mm	2	5,887	11,774
Rodamiento de bolas radial NMB de Acero, Ø int. 8mm, Ø ext. 16mm, ancho 5mm	2	7,66	15,32
Rodamiento de bolas de ranura profunda SKF de Acero, Ø int. 60mm, Ø ext. 95mm, ancho 18mm	2	28,62	57,24
Rueda helicoidal de paso derecho. 22500-532015	1	59,80	59,80
Sin fin de paso derecho acero templado cementación. 22500-531013	1	49,86	49,86
Sin fin de paso derecho acero templado cementación. 22500-311020	1	31,71	31,71
Rueda dentada cilíndrica recta. 22400-0110150026	1	6,19	6,19
Rueda dentada cilíndrica recta. 22400-0110150018	1	5,42	5,42
Portes de los elementos comerciales	1	25	25
Acero galvanizado laminado caja inferior	1,3 [Kg]	4,50	5,85
Soldadura y montaje caja inferior	3 [h]	7,43	22,29
Eje D15 mm	0,18 [m]	47,33	8,52
Eje calibrado D8 mm	0,35 [m]	47,33	16,57
Eje calibrado D10 mm	0,055 [m]	47,33	2,60315
Tornillo M10 x 20 DIN 912	6	1,37	8,22
Tornillo M8 x 30 DIN 912	5	1,30	6,5
Tornillo M5 x 40 DIN 912	2	0,41	0,82
Tornillo M5 x 20 ISO 7046-1	6	0,15	0,9
Tornillo M5 x 12 DIN 912	8	0,32	2,56
Tornillo M5 x 12 ISO 7046 - 1	6	0,13	0,78
Horas de montaje	10	7,43	74,3
TOTAL			751,08 €

Tabla 18: Desglose de los costes del proyecto

Para realizar el análisis de costes anterior, se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:



- Las horas de “investigación y lectura” y “diseño”, se han contabilizado como no computables ya que han sido realizadas por un becario sin sueldo.
- Para el precio por hora de impresión, se ha tenido en cuenta el precio del KW / h en España, que de media es de “0,247 €/kWh “ (Selectra, 2021) , el consumo medio en KW de nuestras impresoras, que es de 0,50 KW (resultando 0,1235 €/h de coste de electricidad), la rentabilidad de las máquinas, el coste de tiempo de preparación de segmentación y de máquina, así como de limpieza de esta tras impresión. Teniendo en cuenta estos factores y tras previa consulta con diferentes profesionales se llegó a que 3 euros/hora es un precio adecuado para España.
- Los precios de rodamientos, engranajes, tornillería, ejes, filamento y materiales se han obtenido directamente de las facturas recibidas, aunque las de NORELEM hayan sido subvencionadas se han computado.
- El precio hora de montaje y soldadura, es el salario mínimo hora de un trabajador español. Fuente: (Cuánto es el salario mínimo interprofesional, 2021)



7. CONCLUSIONES

Desde el inicio este proyecto se planteó como la solución a la necesidad de cambio del método de fabricación de las ortesis de tobillo. Tras varias iteraciones en el diseño, muchos cambios de ideas y múltiples horas de investigación de la biomecánica de las extremidades inferiores y de mecanismos propuestos, se ha conseguido diseñar y prototipar un mecanismo que cumple con los objetivos descritos al inicio del documento, presenta tres grados de libertad rotacionales, es compatible con el uso del escáner y su diseño resulta cómodo e intuitivo para el técnico y para el paciente, además de conseguir un movimiento seguro.

Las limitaciones de tiempo y el hecho de que el proyecto se haya realizado individualmente han limitado el punto final hasta el que se ha podido llegar, aunque se han sentado las bases para que una segunda fase del proyecto se lleve a cabo, en la que se automatice el diseño con los actuadores seleccionados y este se fabrique en los materiales técnicos seleccionados. Se dejan las puertas abiertas a la realización de ensayos clínicos completos y a el cumplimiento de todas las características que implica el cumplimiento del Reglamento europeo 2017/745.

En definitiva, se ha conseguido diseñar, prototipar y documentar todo el proceso para la fabricación de un posicionador de tobillo, obteniendo un diseño sencillo de usar, seguro y cómodo para el paciente.

Las repercusiones de seguridad, salud y ambientales son mínimas, el cumplimiento del reglamento 2017/745 reflejado en el subcapítulo [2.3](#) ha conseguido que el mecanismo sea seguro y no dañino para la salud, además se han usado materiales biodegradables y no tóxicos para el medio ambiente, como podemos ver en las fichas de datos y seguridad reflejadas en el [ANEXO II](#).

Económicamente hablando, la implementación de este mecanismo de posicionado del tobillo y el correspondiente escáner, en primera instancia supone un desembolso económico notable, pero a largo plazo ahorrará tiempos en la toma de medidas y fabricación, evitará el uso de yeso para conseguir los moldes y supondrá un beneficio económico para el usuario.

Aliento a cualquier persona que vaya a continuar con mi trabajo y que este leyendo esto a que no dude en contactarme si le surgen dudas o cree que le puedo ayudar en cualquier aspecto.



8. LINEAS FUTURAS

Como segunda fase de este proyecto que por problemas de distribución no se ha podido automatizar y actualmente su accionamiento es manual, se deja abierta la puerta a la implementación de los servomotores propuestos en el [capítulo 5.1](#), con los sistemas de transmisión planteados en las etapas de diseño y la programación del PLC mediante el software TwinCat3 propuesta en el [capítulo 5.2](#). Tanto, así como la fabricación de un modelo impreso en los plásticos técnicos (PETG y NOVAMID 1030) que se han propuesto a lo largo del documento.

Previa comercialización del modelo final se debe cumplimentar y entregar toda la documentación que exige el Real decreto europeo 2017/745.

9. BIBLIOGRAFÍA

- A. Blanco Ortega, H. R. (2013). Máquina de Rehabilitación de Tobillo: prototipo virtual y físico. *X Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico* (pág. 697). Cuernavaca Morelos, México.: CIINDET.
- Álvarez, J. (29 de Junio de 2021). *Julia Álvarez centro podológico* . Obtenido de <https://juliaalvarezcp.com/pie-equino-varo-espastico/>
- Bachiller, J. D. (2018). Análisis de uso de Catia basado en FEM para simular problemas de comportamiento mecánico. *Trabajos Fin de Grado UVA*, 21.
- Beckhoff. (Junio de 19 de 2021). *BECKHOFF New Automation Technology*. Obtenido de : <https://www.beckhoff.com/es-es/products/motion/rotary-servomotors/am8100-servomotors-for-compact-drive-technology/am8111-wfyz.html>
- Beckhoff. (19 de Junio de 2021). *BECKHOFF New Automation Technology* . Obtenido de <https://www.beckhoff.com/en-en/products/motion/planetary-gears/ag2250-planetary-gear-units-for-servo-and-stepper-motors/ag2250-ple40-m01-7.html>
- BECKHOFF. (19 de Junio de 2021). *Beckhoff New Automation Technology* . Obtenido de <https://www.beckhoff.com/en-en/products/i-o/ethercat-terminals/el7xxx-compact-drive-technology/el7201-9014.html>
- Beléndez T., N. C. (2002). lección de una barra delgada empotrada en un extremo: Aproximación para pequeñas pendientes. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 399.
- Cifuentes, E. C. (20 de Junio de 2021). *Trabaja tu salud*. Obtenido de <https://trabajatusalud.com/la-importancia-de-la-movilidad-del-tobillo-en-las-carreras-de-montana/>
- CREALITY. (23 de Junio de 2021). *Creality*. Obtenido de Creality. com
- Cuánto es el salario mínimo interprofesional. (8 de Junio de 2021). ABC.
- DSM. (24 de Junio de 2021). *DSM*. Obtenido de <https://plasticsfinder.com/datasheet/Novamid%C2%AE%20ID%201030/oX2rq>
- europaea, U. (2017). *REGLAMENTO (UE) 2017/745 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO*.



- FECICLA. (29 de Junio de 2021). *Wikipedia* . Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Ensayo_cl%C3%ADnico
- Fisioterapia Granada* . (20 de Junio de 2021). Obtenido de <https://www.fisioterapia-granada.es/que-debemos-tener-en-cuenta-ante-un-esguince-de-tobillo/>
- Gang Wang, Q. Z. (2017). Approximate determination of the joint reaction forces in the drive system with double universal joints. *Journal of Mechanical Engineering science*, 232.
- Hurtado, J. S. (20 de Junio de 2021). *Paradigma* . Obtenido de <https://paradigmia.com/curso/locomotor/modulos/artrologia-de-la-extremidad-inferior/temas/articulacion-de-la-rodilla/>
- Kapandji, A. I. (2002). *Fisiología articular Tomo II Miembro inferior* . Madrid, España: Editorial Médica Panamericana.
- López, O. (2 de Julio de 2021). @OROTOPEDIA_LOPEZ. Obtenido de https://twitter.com/ORTOPEDIA_LOPEZ/status/992011003511615489/photo/1
- Marian G. Alvarez-Perez, M. A.-M.-S. (2019). Robot-assisted ankle rehabilitation: a review, *Disability and Rehabilitation. Assistive Technology*.
- Matteo Malosio, M. C. (2012). A spherical parallel three degrees-of-freedom robot for ankle-foot neuro-rehabilitation. *34th Annual International Conference of the IEEE EMBS*, (pág. 3356). San Diego, California.
- NMB. (20 de Junio de 2021). *RS components* . Obtenido de <https://es.rs-online.com/web/p/rodamientos-de-bola/6125903/>
- NMB. (20 de Junio de 2021). *RS components* . Obtenido de <https://es.rs-online.com/web/p/rodamientos-de-bola/0747816/>
- Norelem. (25 de Junio de 2021). *Norelem* . Obtenido de <https://norelem.es/es/Construcci%C3%B3n-de-plantas-y-m%C3%A1quinas/22000/Tornillos-sinf%C3%ADn-ruedas-helicoidales/Rueda-Helicoidal-lat%C3%B3n/p/22500-532015>
- Norelem. (25 de Junio de 2021). *Norelem* . Obtenido de <https://norelem.es/es/Construcci%C3%B3n-de-plantas-y-m%C3%A1quinas/22000/Ruedas-dentadas-cil%C3%ADndricas-cremalleras/Rueda-Dentada-Cil%C3%ADndrica-recto-acero-acabado-natural/p/22400-0110150018>
- Norelem. (25 de Junio de 2021). *Norelem* . Obtenido de <https://norelem.es/es/Construcci%C3%B3n-de-plantas-y->



m%C3%A1quinas/22000/Ruedas-dentadas-cil%C3%ADndricas-cremalleras/Rueda-Dentada-Cil%C3%ADndrica-recto-acero-acabado-natural/p/22400-0110150026

Norelem. (25 de Junio de 2021). *Norelem* . Obtenido de <https://norelem.es/es/Construcci%C3%B3n-de-plantas-y-m%C3%A1quinas/22000/Tornillos-sinf%C3%ADn-ruedas-helicoidales/Sin-Fin-acero-templado-por-cementaci%C3%B3n/p/22500-311020>

Norelem. (25 de Junio de 2021). *Norelem* . Obtenido de <https://norelem.es/es/Construcci%C3%B3n-de-plantas-y-m%C3%A1quinas/22000/Tornillos-sinf%C3%ADn-ruedas-helicoidales/Engrenagem-sem-fim-sentido-hor%C3%A1rio-dist%C3%A2ncia-entre-centros-35-mm/p/agid.19972>

Norelem. (25 de Junio de 2021). *Norelem* . Obtenido de <https://norelem.es/es/Construcci%C3%B3n-de-plantas-y-m%C3%A1quinas/22000/Tornillos-sinf%C3%ADn-ruedas-helicoidales/Engrenagem-sem-fim-sentido-hor%C3%A1rio-dist%C3%A2ncia-entre-centros-35-mm/p/agid.19972>

Ortosur. (Junio de 28 de 2021). *ortosur.es*. Obtenido de <https://www.ortosur.es/catalogo-de-productos/ortesis/dafos/dafo-3-5/>

POSNA. (20 de Junio de 2021). *OrthoInfo*. Obtenido de <https://orthoinfo.aaos.org/en/diseases--conditions/osgood-schlatter-disease-knee-pain/>

PRO, R. (20 de Junio de 2021). *RS components*. Obtenido de <https://es.rs-online.com/web/p/rodamientos-de-bola/6189979/>

R. C. (15 de Junio de 2021). *ME56A Diseño de elementos de máquinas. Estado de esfuerzos y criterios de falla*. Obtenido de <https://es.scribd.com/presentation/424960244/Esfuerzos-diseno-de-elementos-de-maquinas>

R.L, N. (2014). *Machine Design: an integrates approach*. . Prentice Hall 5ª Ed.

Rafael J. Escarabajal, F. J.-D. (2020). Development of lower-limb rehabilitation exercises using. *Multidisciplinary Journal for Education, Social and Technological Sciences*.

S.A., B. a. (28 de Junio de 2021). *infosys Beckhoff* . Obtenido de https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/tf50x0_tc3_nc_ptp/2450042635.html&id=6208616517331308351



- S.A., B. a. (28 de Junio de 2021). *Youtube* . Obtenido de <https://www.youtube.com/channel/UCjBhTliz1ISxF3tjpGmykZw/playlists>
- Sagatowski, J. (28 de Junio de 2021). *alltwincat*. Obtenido de <https://alltwincat.com/twincat-3-tutorial/>
- Selectra. (21 de Junio de 2021). *Tarifasgasluz*. Obtenido de <https://tarifasgasluz.com/comparador/precio-kwh>
- SFK. (11 de Junio de 2021). *SKF.com*. Obtenido de <https://www.skf.com/es/products/rolling-bearings/principles-of-rolling-bearing-selection/bearing-selection-process/bearing-interfaces/seat-tolerances-for-standard-conditions>
- SKF. (20 de Junio de 2021). *RS components*. Obtenido de <https://es.rs-online.com/web/p/rodamientos-de-bola/7643496/>
- Smarfills. (24 de Junio de 2021). *Smarmaterials3d*. Obtenido de <https://www.smartmaterials3d.com/petg-filamento>
- Smartmaterials. (25 de Junio de 2021). *Smartmaterials3d*. Obtenido de https://www.smartmaterials3d.com/pla-3d850_
- Tongyang Sun, C. W. (2017). Development of a New Ankle Rehabilitation Robot MKA-IV. *The 7th Annual IEEE International Conference on*, (pág. 1479). Hawaii, USA.
- Yuting Du, R. L. (2017). An ankle rehabilitation robot based. *Advances in Mechanical Engineering* .
- Zuo S, L. J. (2020). Design and Performance Evaluation of a Novel Wearable Parallel Mechanism for Ankle Rehabilitation. *Front. Neurobot.*, 3-4.

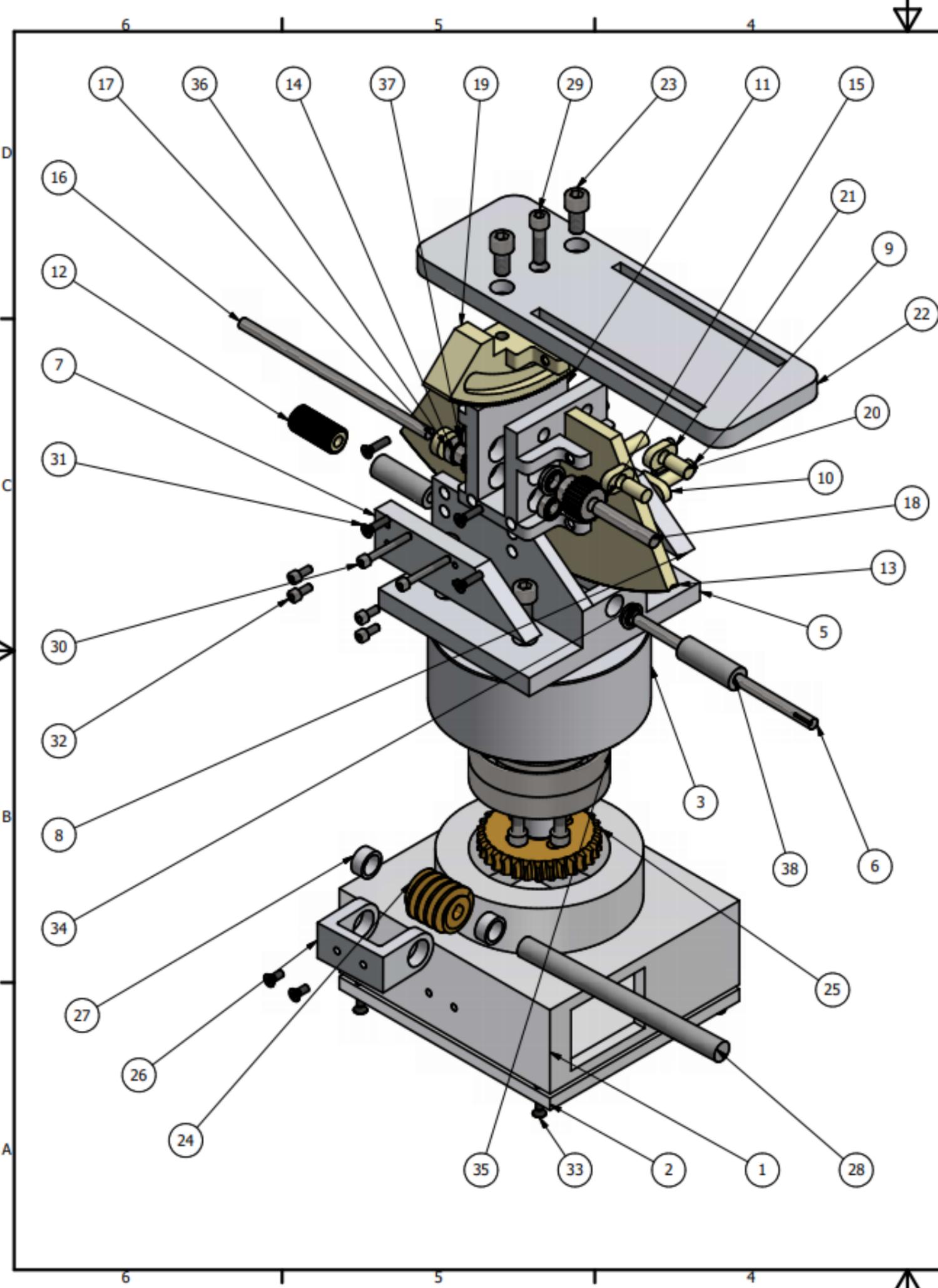


10. ANEXOS

10.1. ANEXO I: Planos técnicos

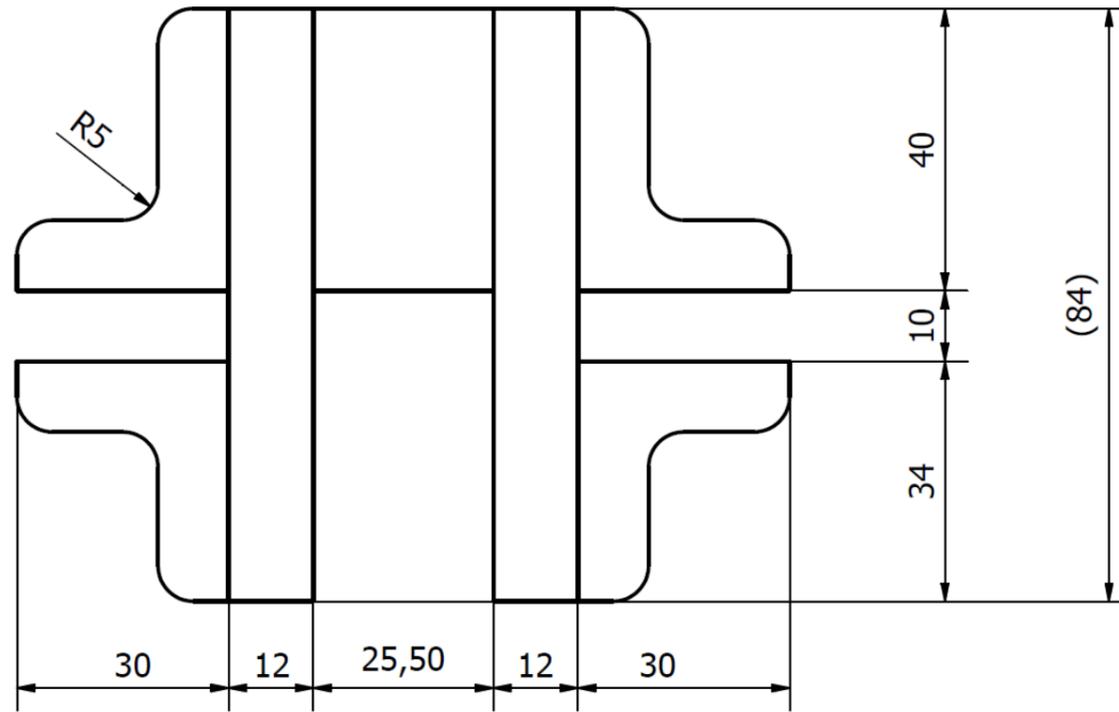
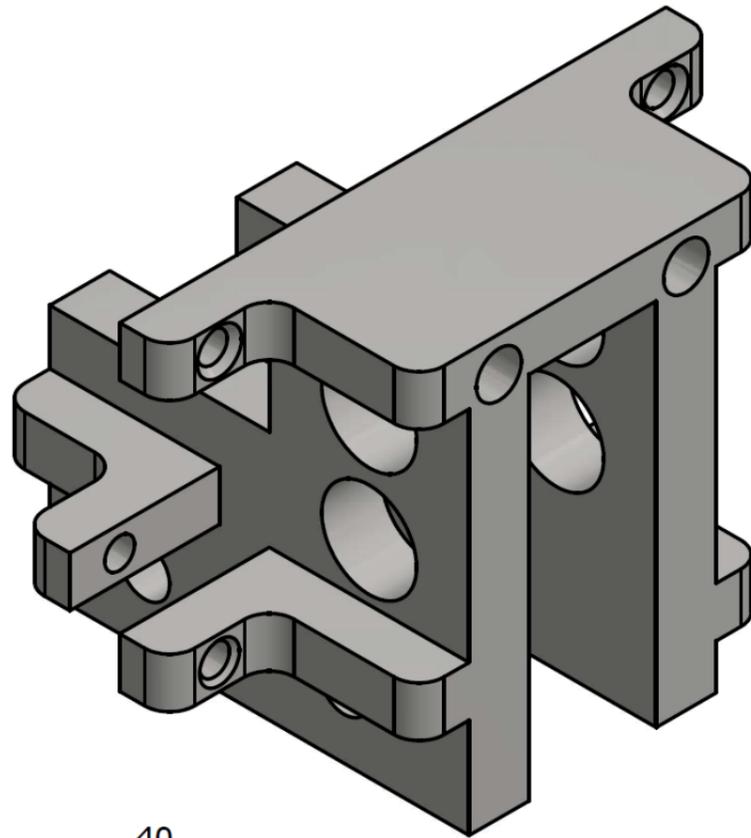
El siguiente anexo contiene todos los planos técnicos de los elementos no normalizados/comerciales que componen el conjunto. Se ha proyectado mediante el sistema europeo y el formato de las hojas es A3 y A4. El primer plano consiste en el conjunto con todos sus componentes explosionados y sus correspondientes marcas de referencia, para de esta manera conseguir una compresión completa del mecanismo.

El software con el que se han proyectado estos planos ha sido “Autodesk Inventor Professional 2021”.

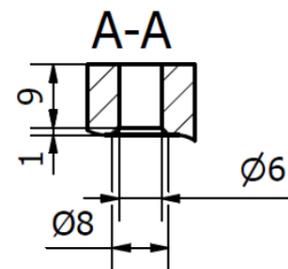
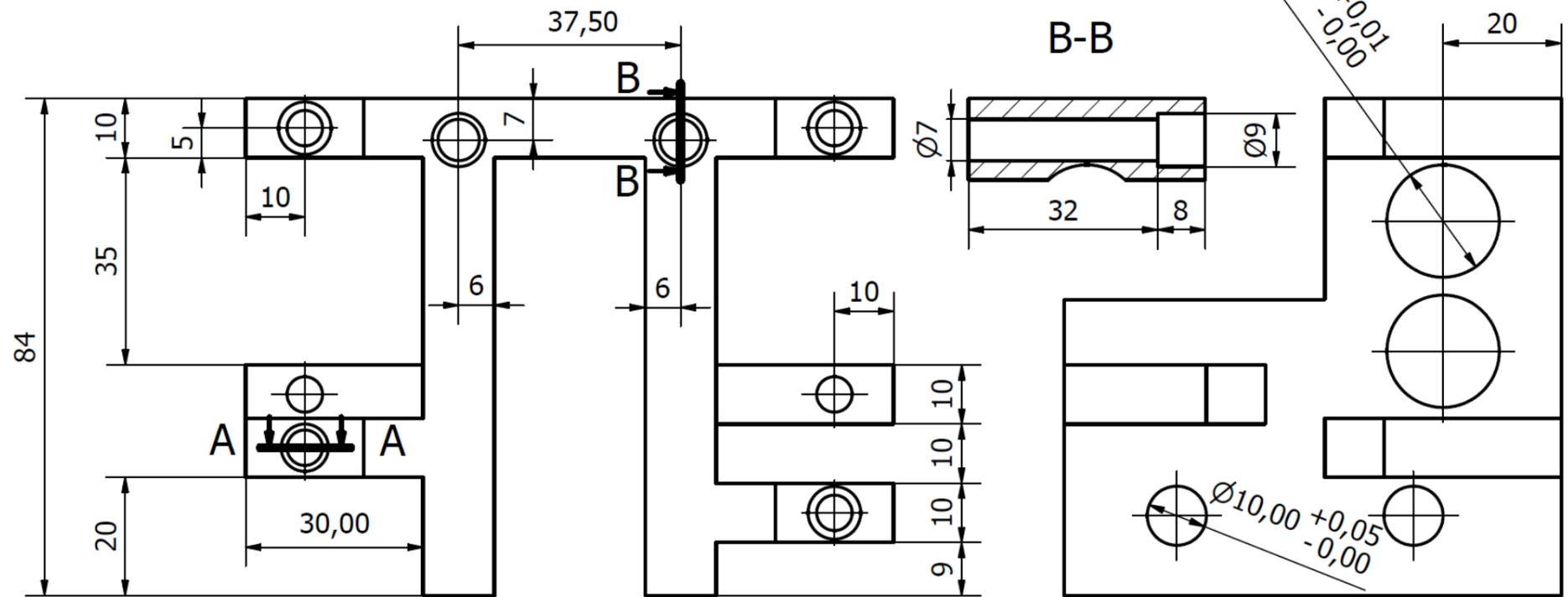
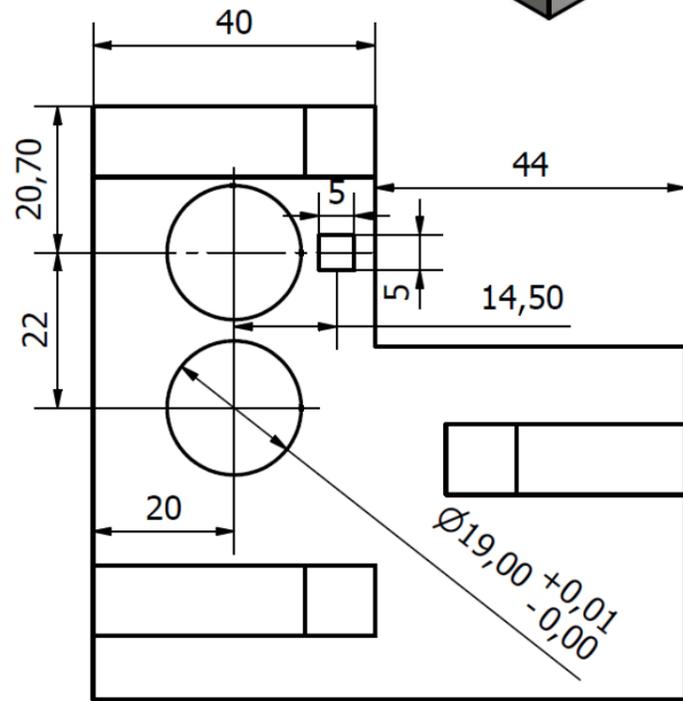


LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	CAJA INFERIOR	
2	1	TAPA CAJA INF	
3	1	CILINDRO INF	
5	1	PLATAFORMA PCPAL	
6	1	EJE MEDIO	
7	1	SOPORTE PLAT MEDIA NO RAN	
8	1	SOPORTE PLAT MEDIA	
9	2	GUÍA MEDIA	
10	2	DESILZADORA MEDIA	
11	1	SOPORTE PLAT SUP	
12	1	SIN FIN MEDIO	
13	1	RUEDA MEDIA	
14	1	CORONA SUP	22400-0110150026-NORELEM
15	1	PIÑÓN SUP	22400-0110150018-NORELEM
16	1	EJE SUP PIÑÓN	
17	1	INMOVILIZADOR SUP	
18	1	EJE SUP CORONA	
19	1	RUEDA SUP	
20	2	GUÍA SUP	
21	2	DESILZADOR SUP	
22	1	PEDAL	
23	6	AS 1420 - 1973 - M10 x 20	
24	1	CORONA INFERIOR	22500-5320152 NORELEM
25	1	SIN FIN INFERIOR	22500-5310132 NORELEM
26	1	SOPORTE INFERIOR	
27	2	CASQUILLO INFERIOR	
28	1	EJE INF	
29	5	TORNILLO M8 x 30, CLASE 5.6 DIN 912	CABEZA CILÍNDRICA CON HUECO HEXAGONAL
30	2	TORNILLO M5 x 40, CLASE 5.6 DIN 912	CABEZA CILÍNDRICA CON HUECO HEXAGONAL
31	6	ISO 7046-1 - M5 x 20 - 4.8 - H	CABEZA AVELLANADA
32	8	TORNILLO M5 x 12, CLASE 5.6 DIN 912	CABEZA CILÍNDRICA CON HUECO HEXAGONAL
33	6	ISO 7046-1 - M5 x 12 - 4.8 - H	CABEZA AVELLANADA
34	2	Bearing FSN 718/8 GB/T 7218-1995	
35	2	BS 292: Pieza 1 - 7012 - 60 x 95 x 18	
36	2	Rolling bearing 70000B S719/8 GB/T 292-94	
37	2	Bearing FSN 71800 GB/T 7218-1995	
38	2	CASQUILLO MEDIO	

	FECHA	FIRMA	  Universidad de Valladolid
DIBUJO	15/05/2021	D.GARCÍA	
COMPROBADO	15/05/2021	D.GARCÍA	
ESCALA	1:3		MATERIAL
	CONJUNTO EXPLOSIONADO		Nº DE PLANO:1
			Nº DE HOJA:1

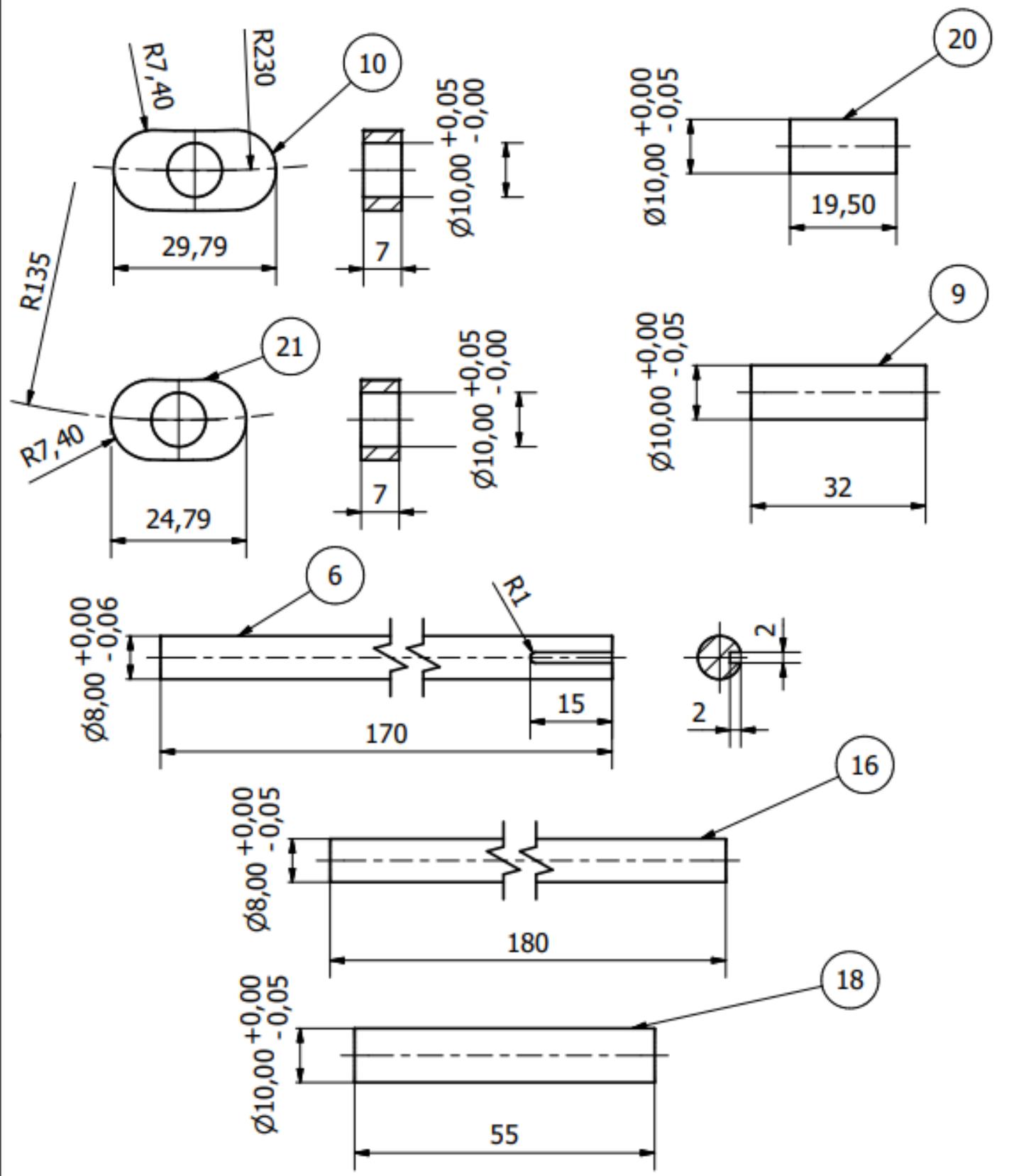


TODOS LOS
RADIOS DE
REDONDEO SON
DE 5mm

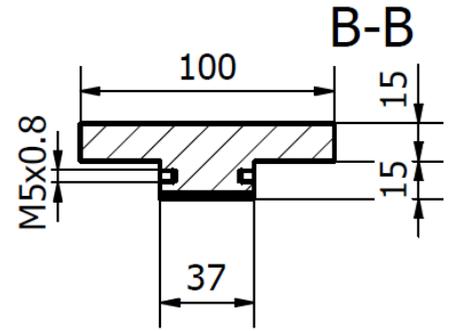
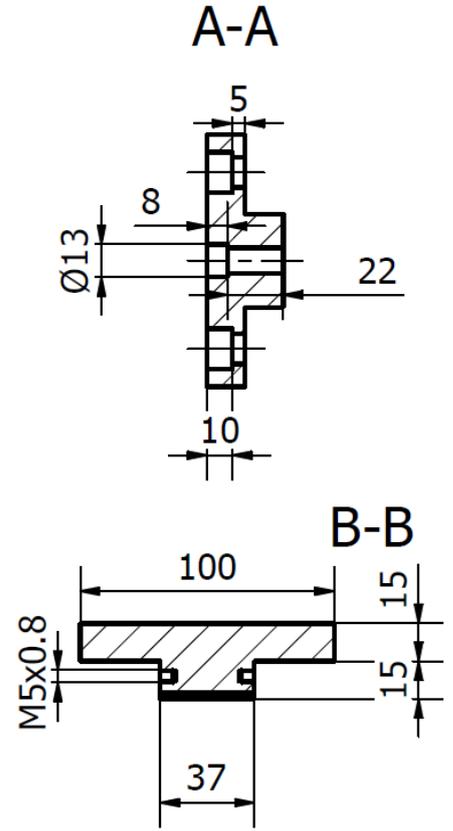
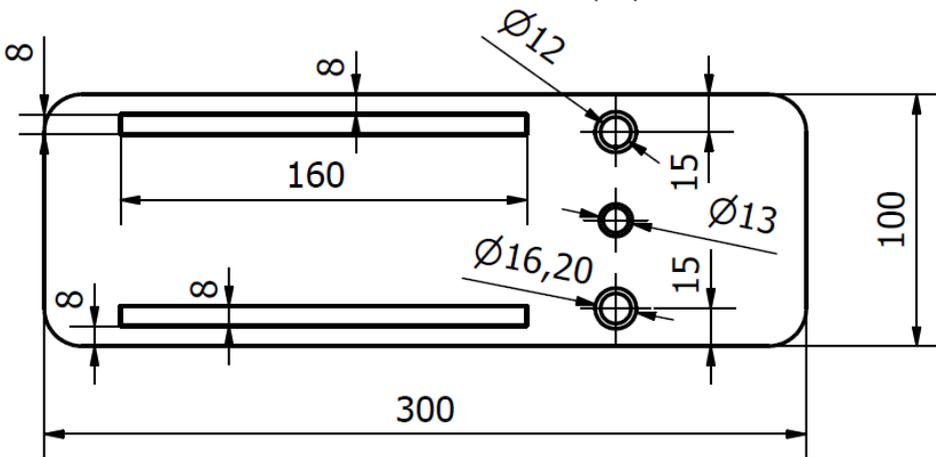
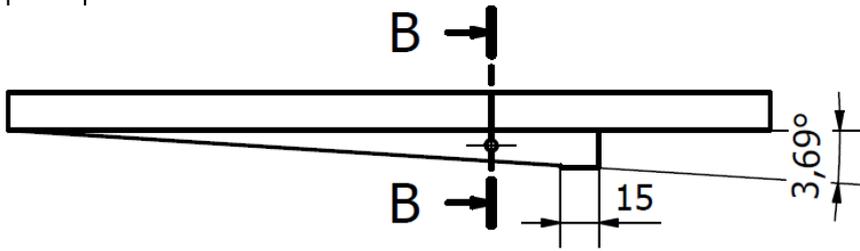
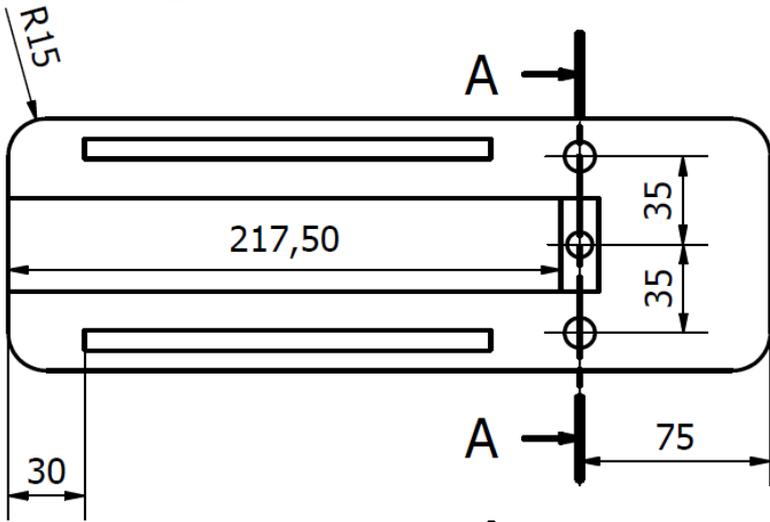
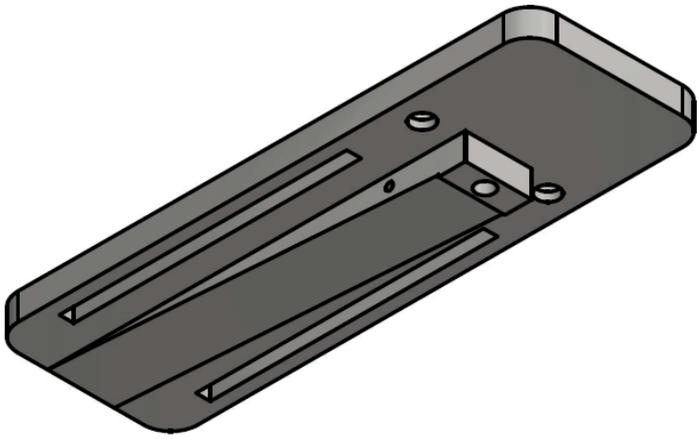


TANTO LOS TALADROS, COMO LOS ALOJAMIENTOS DE RODAMIENTOS E INMOVILIZADOR SON PASANTES.

	FECHA	FIRMA	  Universidad de Valladolid
DIBUJO	15/05/2021	D.GARCÍA	
COMPROBADO	15/05/2021	D.GARCÍA	
ESCALA	1:1		MATERIAL
	SOPORTE PLAT SUP		PETG
			Nº DE PLANO:2
			Nº DE HOJA:2



		FECHA	FIRMA	  Universidad de Valladolid
DIBUJO	15/05/2021	D.GARCÍA		
COMPROBADO	15/05/2021	D.GARCÍA		
ESCALA	DESPIECE GENERAL		MATERIAL	
1:1			Nº DE PLANO:3	
			Nº DE HOJA:3	

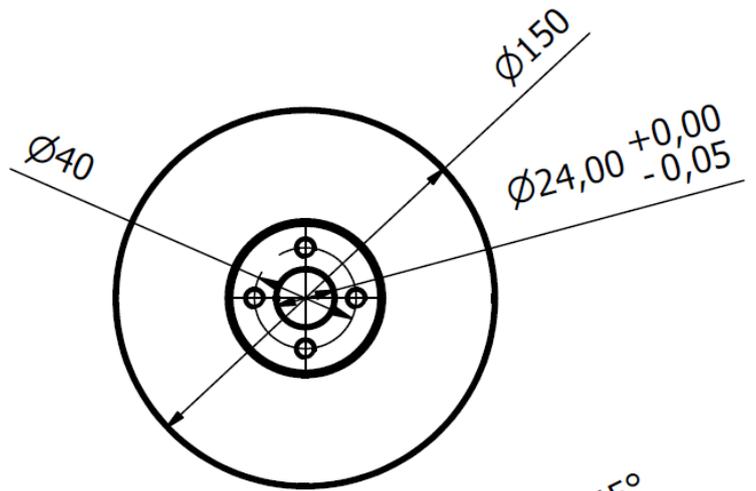
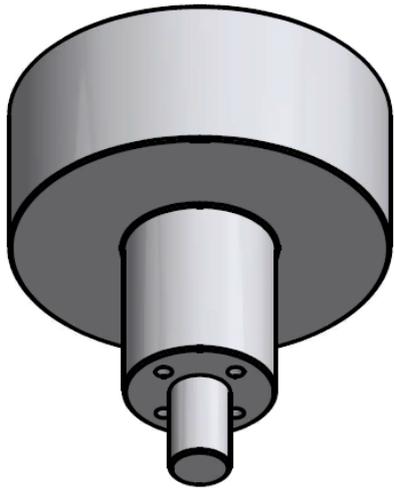


	FECHA	FIRMA
DIBUJO	15/05/2021	D.GARCÍA
COMPROBADO	15/05/2021	D.GARCÍA

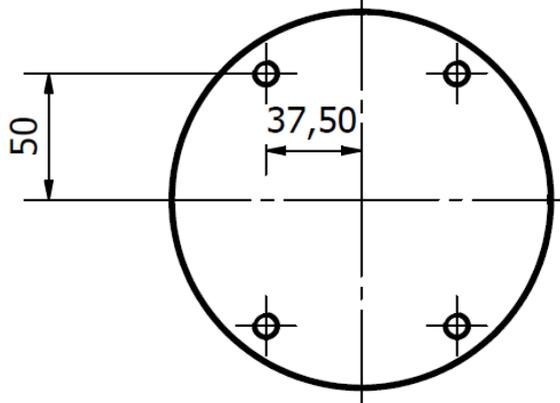
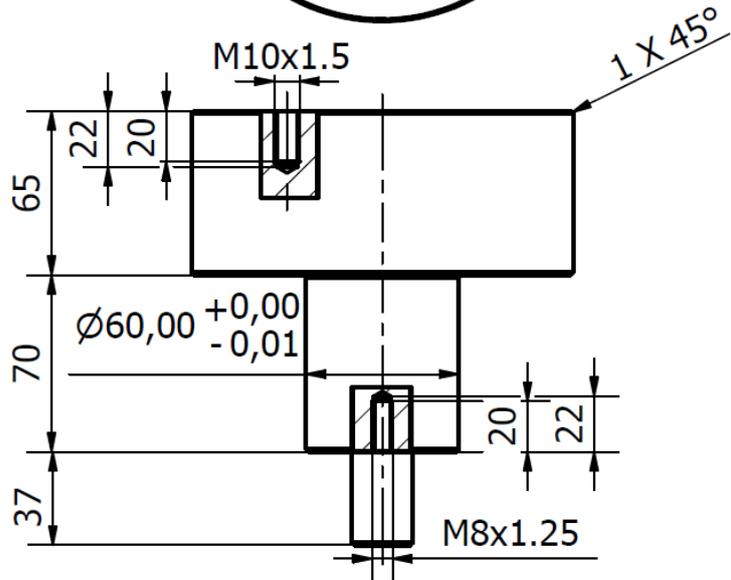


Universidad de Valladolid

ESCALA	PEDAL	MATERIAL
1:3		PETG
		Nº DE PLANO: 4
		Nº DE HOJA: 4



CHAFLANES DE 1 x 45°

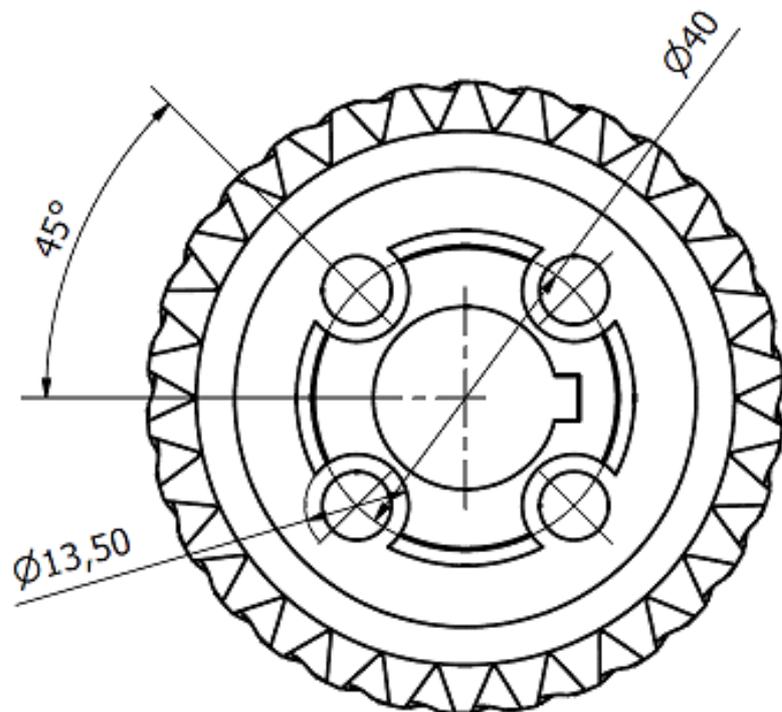
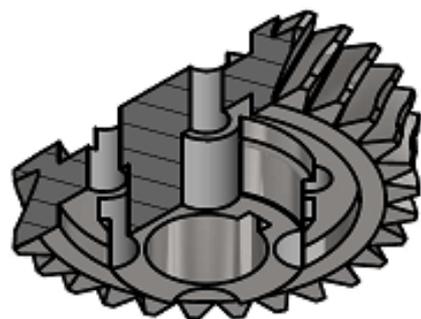


	FECHA	FIRMA
DIBUJO	15/05/2021	D.GARCÍA
COMPROBADO	15/05/2021	D.GARCÍA

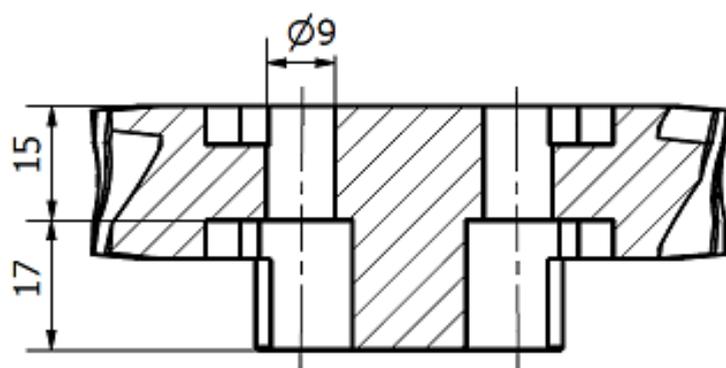


Universidad de Valladolid

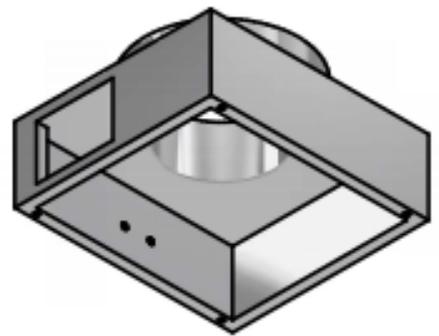
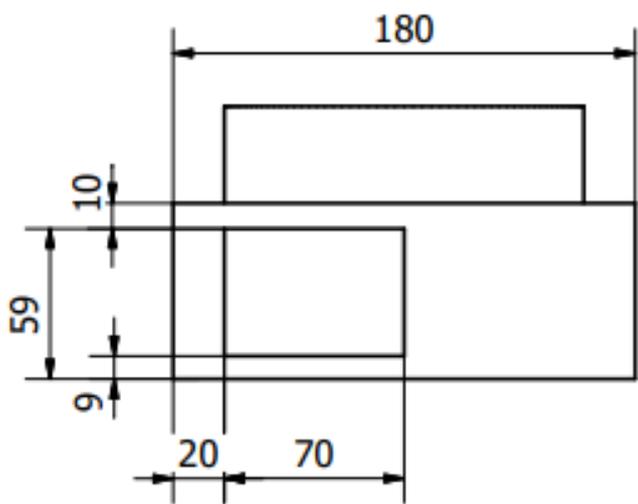
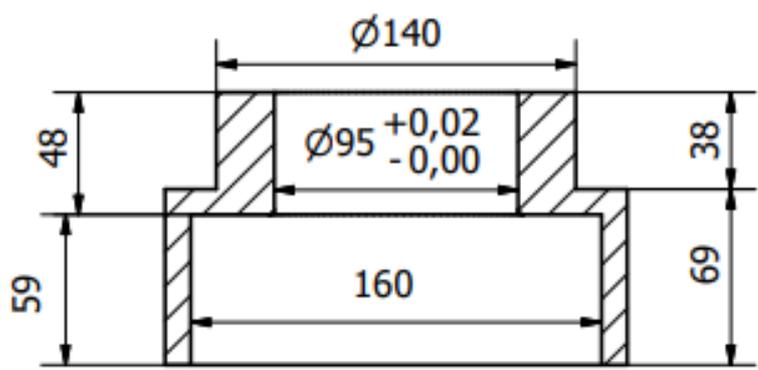
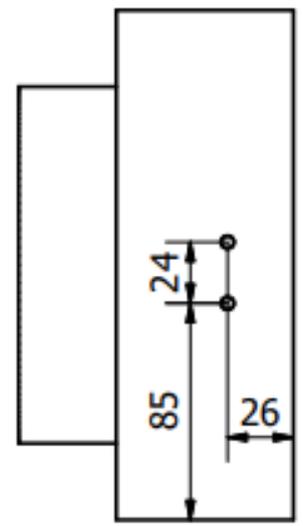
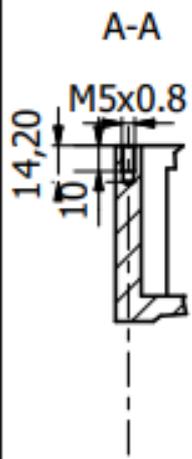
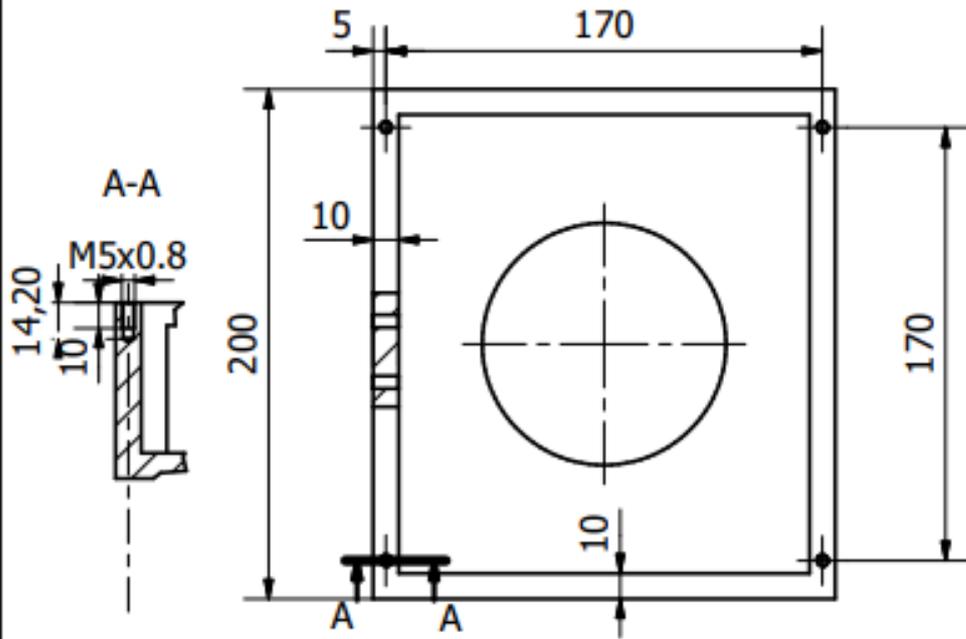
ESCALA	CILINDRO INFERIOR	MATERIAL
1:3		PETG
		Nº DE PLANO: 5
		Nº DE HOJA: 5



PARA CONSULTAR LAS DIMENSIONES DE LA CORONA, ACUDIR AL ANEXO 2.5.



		FECHA	FIRMA	  Universidad de Valladolid
DIBUJO	15/05/2021	D.GARCÍA		
COMPROBADO	15/05/2021	D.GARCÍA		
ESCALA	TALADROS CORONA INFERIOR		MATERIAL	
1:1			LATÓN	
			Nº DE PLANO:6	
			Nº DE HOJA :6	



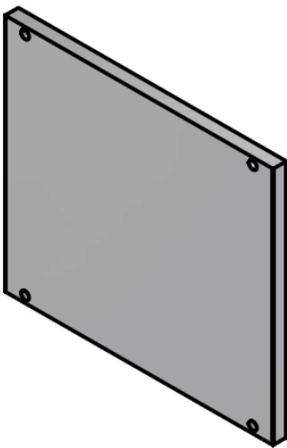
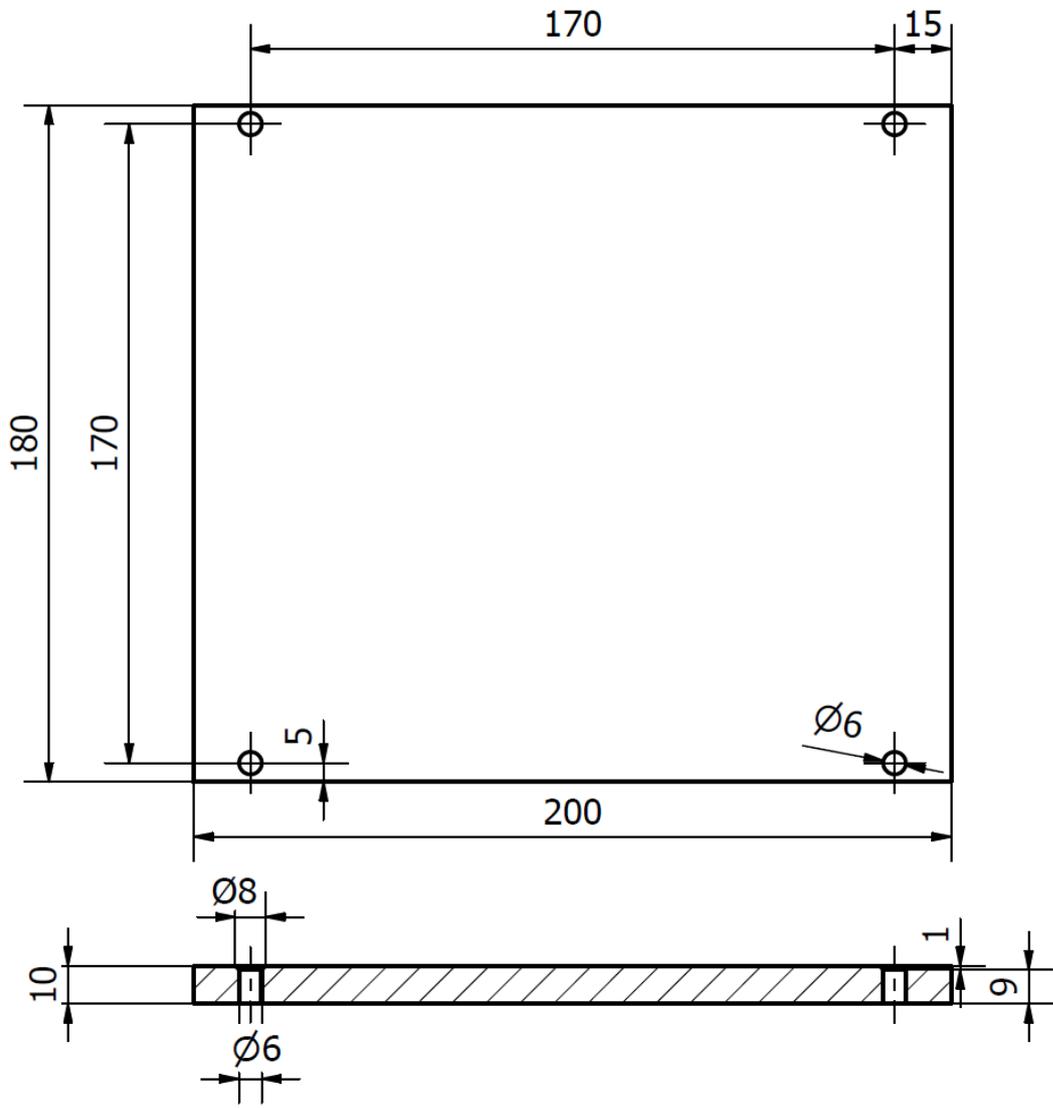
	FECHA	FIRMA
DIBUJO	15/05/2021	D.GARCÍA
COMPROBADO	15/05/2021	D.GARCÍA



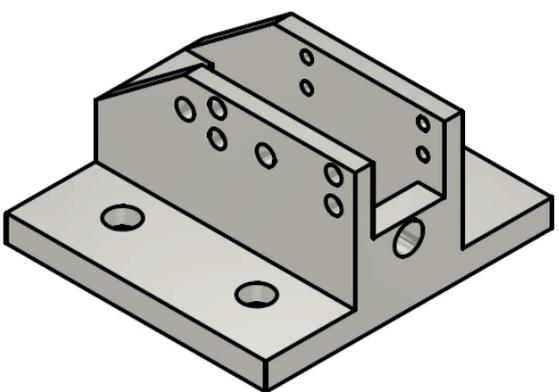
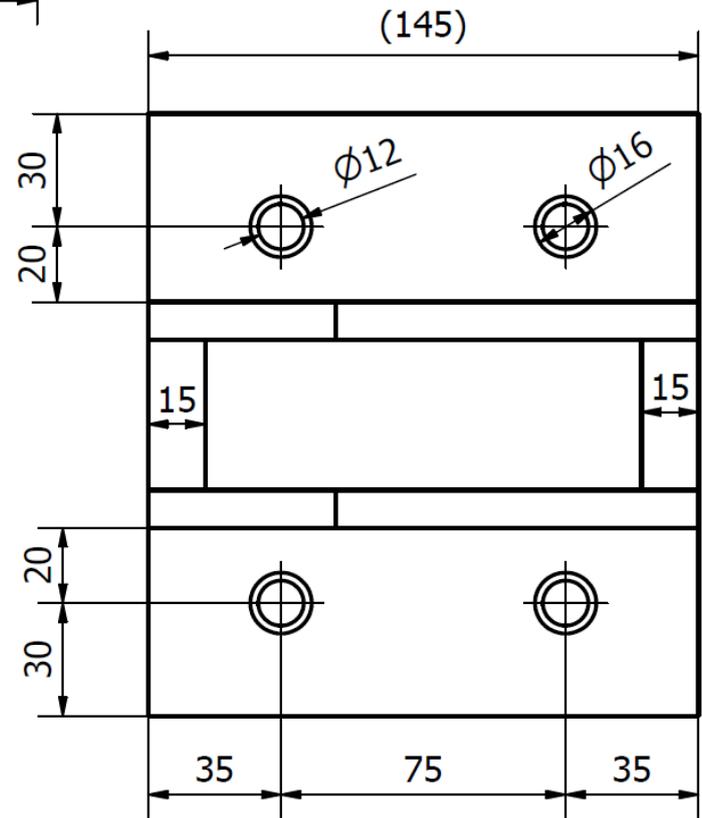
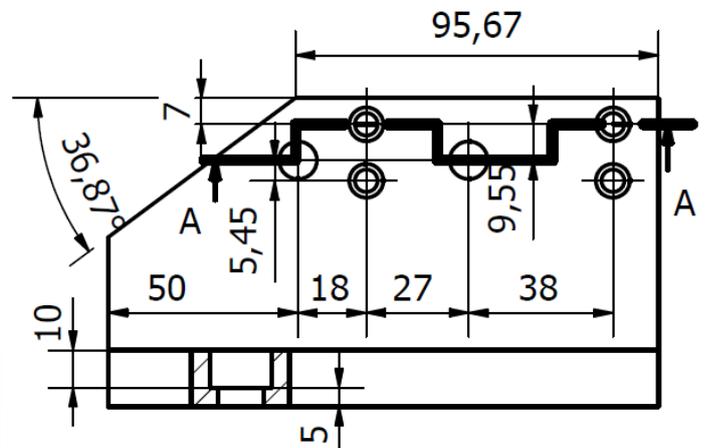
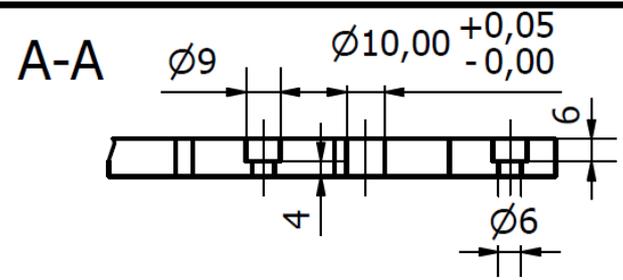
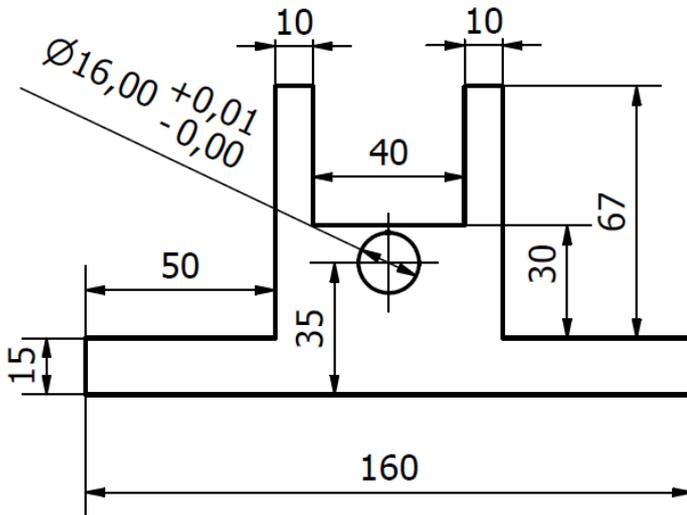
Universidad de Valladolid

ESCALA	CAJA INFERIOR
1:3	

MATERIAL
ACERO GALVANIZADO
Nº DE PLANO: 7
Nº DE HOJA: 7



		FECHA	FIRMA	  Universidad de Valladolid
DIBUJO		15/05/2021	D.GARCÍA	
COMPROBADO		15/05/2021	D.GARCÍA	
ESCALA	TAPA CAJA INFERIOR		MATERIAL	
1:2			ACERO GALVANIZADO	
			Nº DE PLANO:8	
			Nº DE HOJA:8	



	FECHA	FIRMA
DIBUJO	15/05/2021	D.GARCÍA
COMPROBADO	15/05/2021	D.GARCÍA

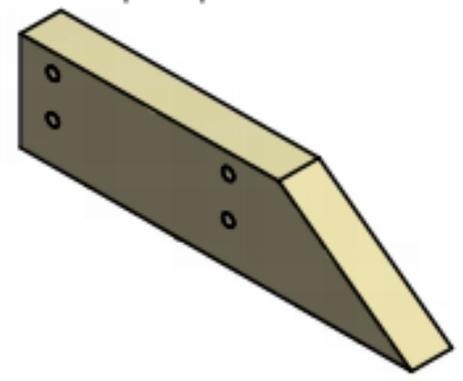
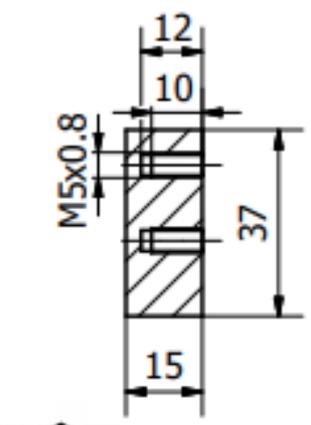
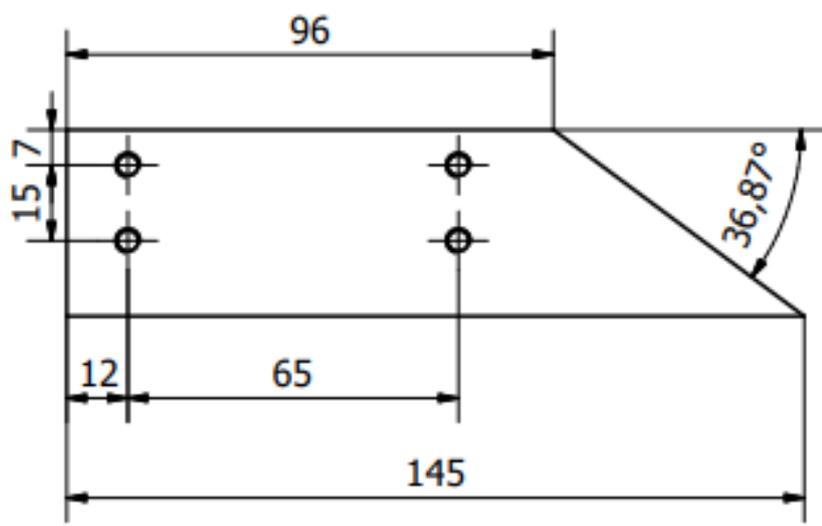


Universidad de Valladolid

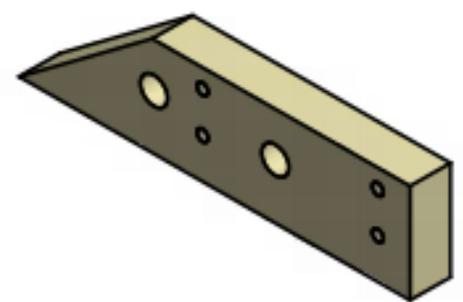
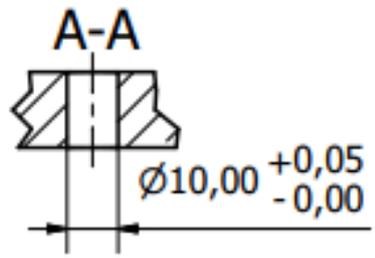
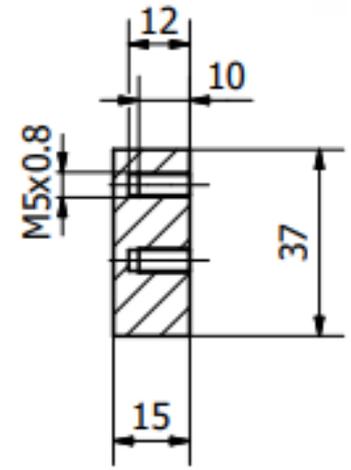
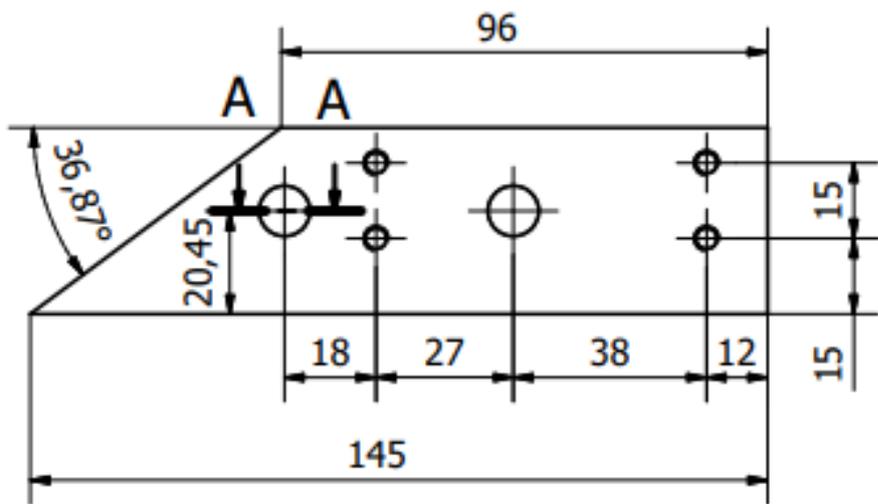
ESCALA	PLATAFORMA PCPAL	MATERIAL
1:2		PETG
		Nº DE PLANO:9
		Nº DE HOJA:9



7



8



		FECHA	FIRMA	  Universidad de Valladolid
DIBUJO	15/05/2021	D.GARCÍA		
COMPROBADO	15/05/2021	D.GARCÍA		
ESCALA	SOPORTES MEDIOS.		MATERIAL	
1:1.5			PETG	
			Nº DE PLANO:10	
			Nº DE HOJA:10	



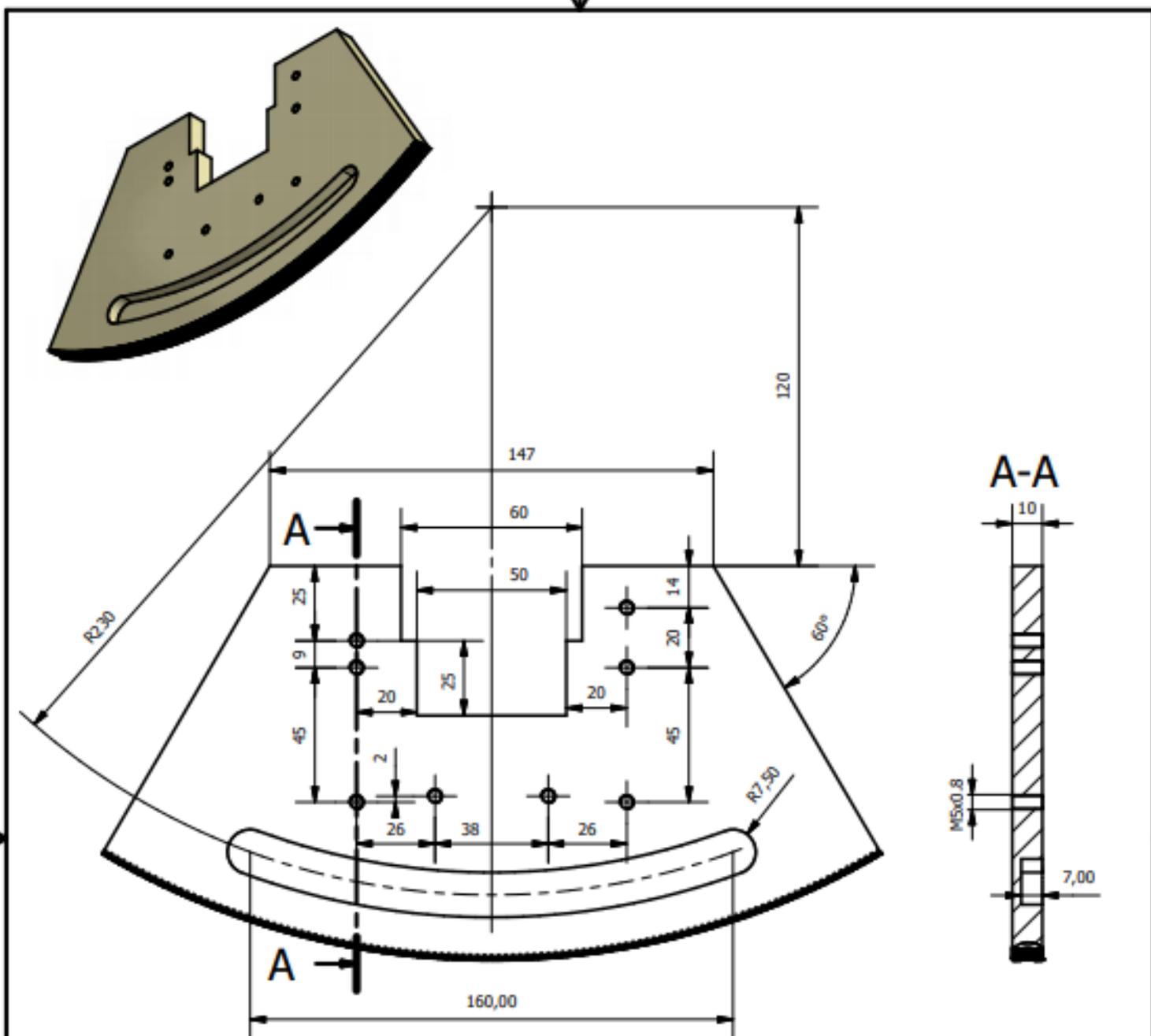


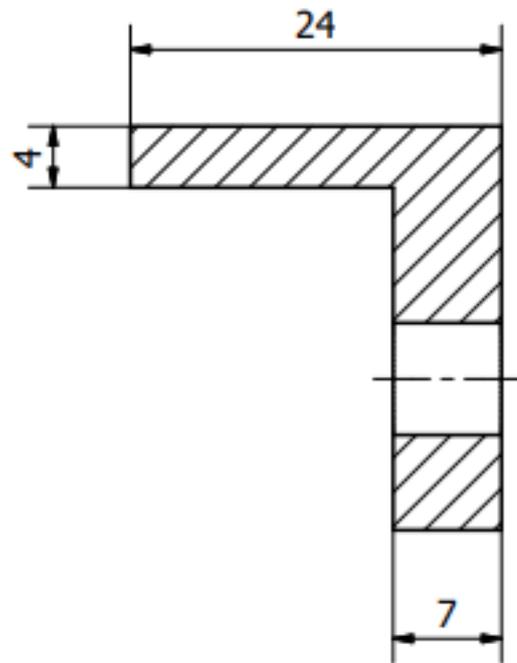
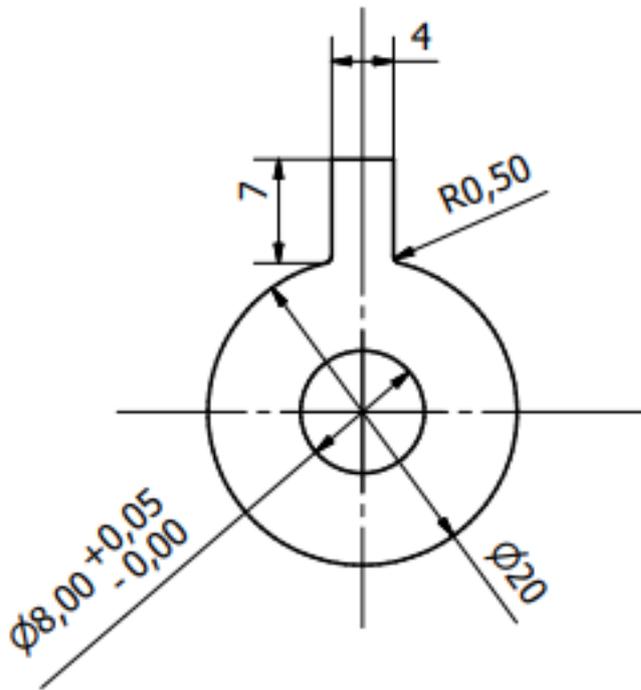
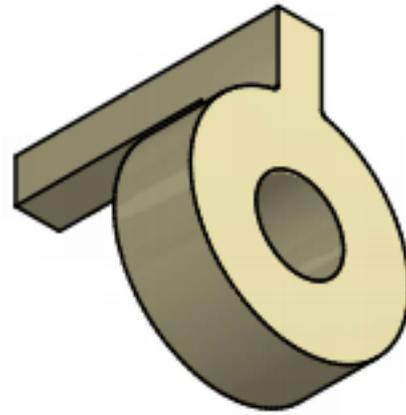
TABLA RUEDA MEDIA (13)		
MÓDULO	m	0,75
Nº DE DIENTES	Z	667
CREMALLERA TIPO	UNE 18016	
DIÁMETRO PRIMITIVO	Dp	500
ÁNGULO DE HÉLICE	alpha	7,49
SENTIDO DE HÉLICE	DRCHA/IZQ	DRCHA
DISTANCIA ENTRE EJES	C	254
RUEDA CONJUGADA (MARCA)	Nº DE DIENTES	3
	PLANO Nº	ANEXO 2.3

	FECHA	FIRMA
DIBUJO	15/05/2021	D.GARCÍA
COMPROBADO	15/05/2021	D.GARCÍA



Universidad de Valladolid

ESCALA 1:2	RUEDA MEDIA	MATERIAL NOVAMID 1030
		Nº DE PLANO: 11
		Nº DE HOJA: 11



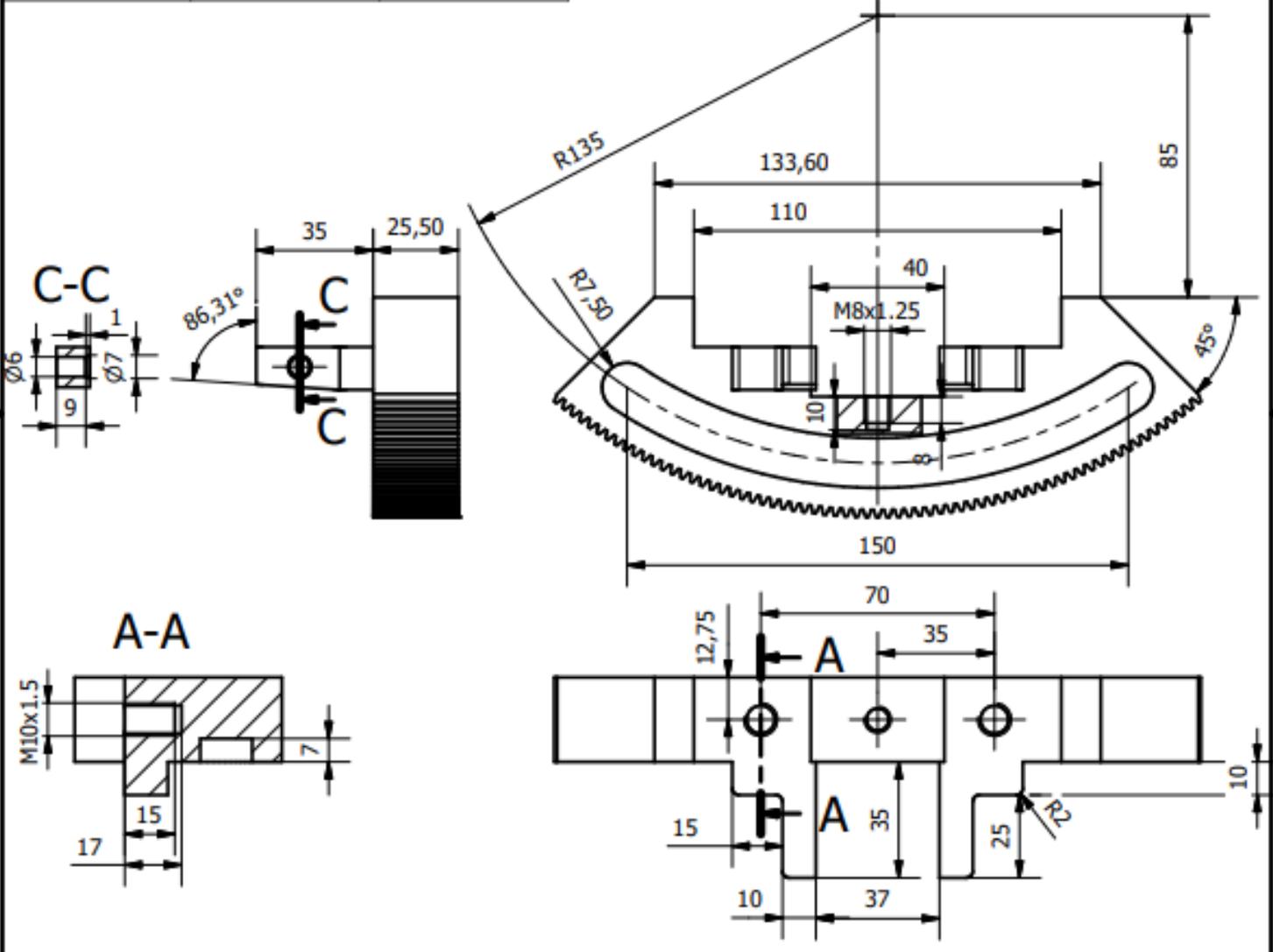
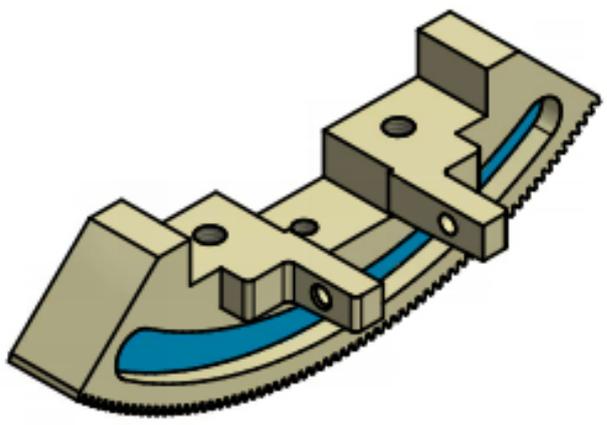
	FECHA	FIRMA
DIBUJO	15/05/2021	D.GARCÍA
COMPROBADO	15/05/2021	D.GARCÍA



Universidad de Valladolid

ESCALA	INMOVILIZADOR SUPERIOR	MATERIAL
1:1		PETG
		Nº DE PLANO: 12
		Nº DE HOJA: 12

DATOS DE LA RUEDA (3)		
MÓDULO	m	1
Nº DE DIENTES	Z	300
CREMALLERA TIPO	UNE 18016	
DIÁMETRO PRIMITIVO	Dp	300
DISTANCIA ENTRE EJES	C	163
RUEDA CONJUGADA (MARCA)	Nº DE DIENTES	26
	PLANO Nº	ANEXO 2.2

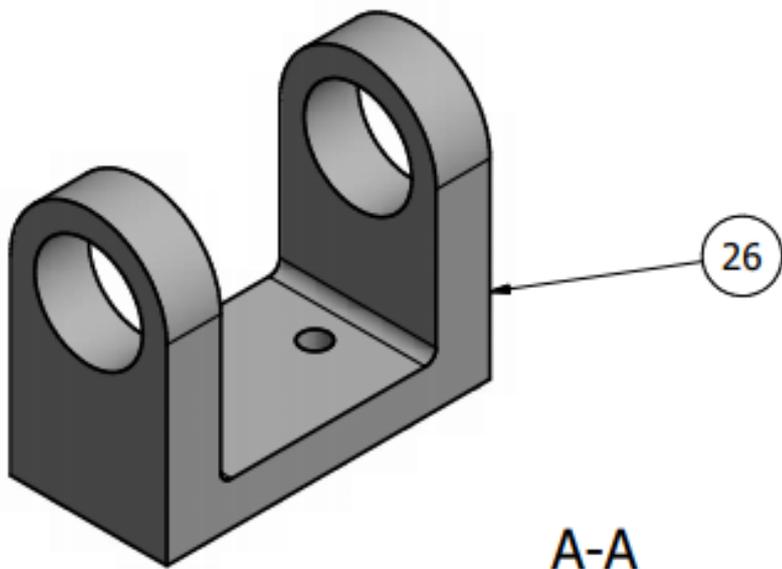


FECHA	FIRMA
DIBUJO 15/05/2021	D.GARCÍA
COMPROBADO 15/05/2021	D.GARCÍA

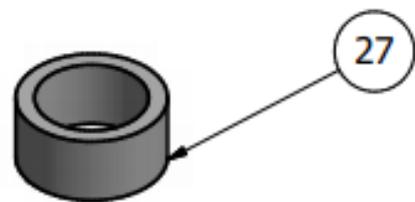
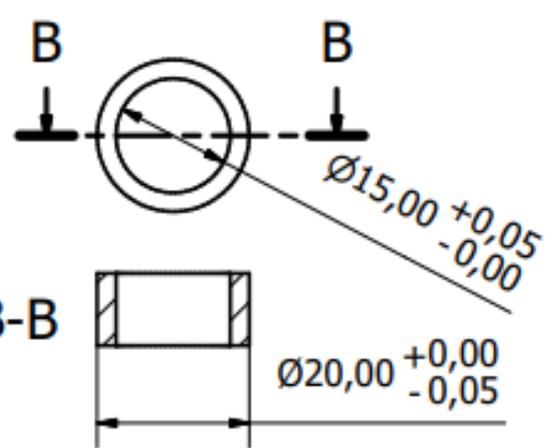
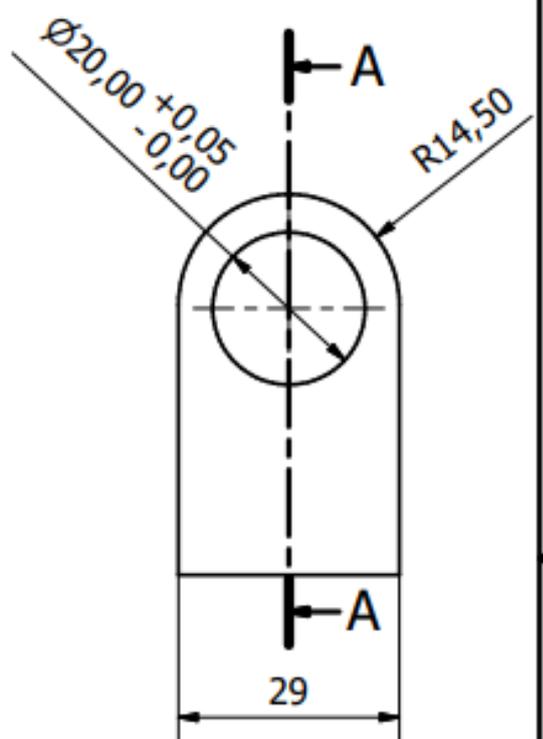
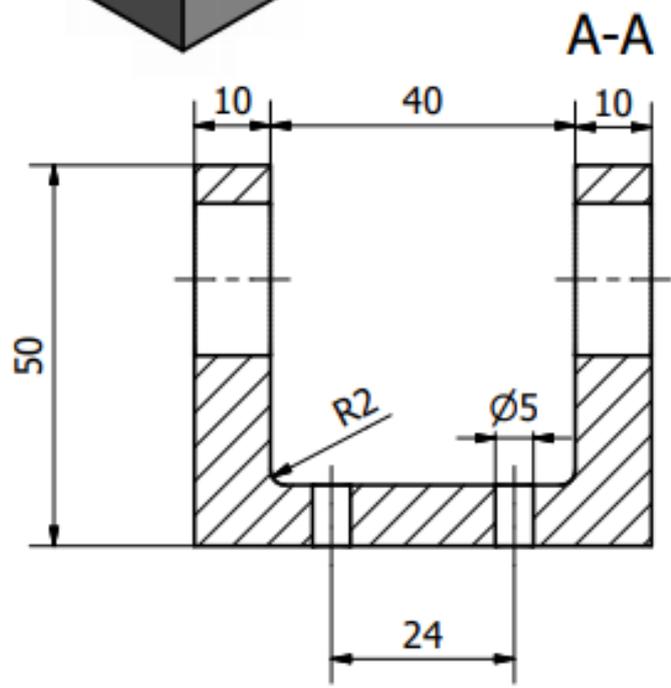


Universidad de Valladolid

ESCALA 1:2	RUEDA SUPERIOR	MATERIAL NOVAMID 1030
		Nº DE PLANO: 13
		Nº DE HOJA: 13

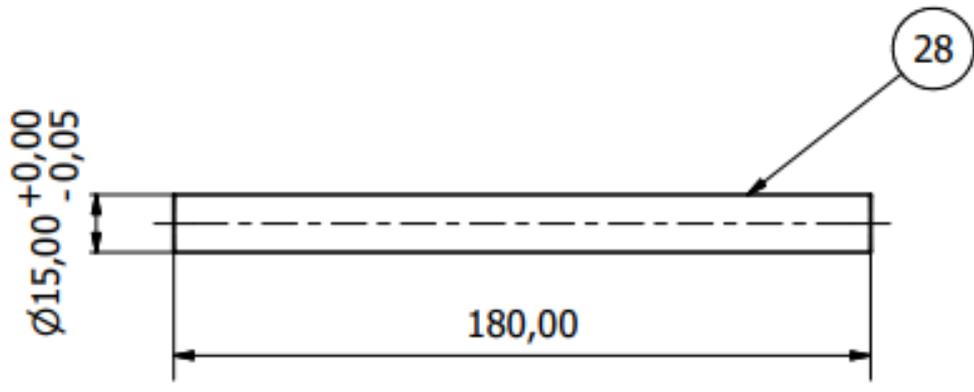
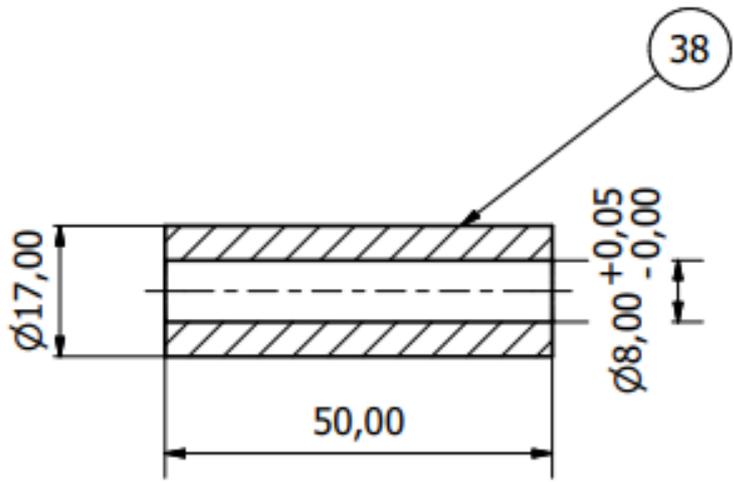


26



27

	FECHA	FIRMA		
	DIBUJO	15/05/2021		
	COMPROBADO	15/05/2021	D.GARCÍA	
ESCALA	SOPORTE INFERIOR Y CASQUILLOS INFERIORES			MATERIAL
1:1				PETG
				Nº DE PLANO:14
				Nº DE HOJA:14



		FECHA	FIRMA	  Universidad de Valladolid
DIBUJO		15/05/2021	D.GARCÍA	
COMPROBADO		15/05/2021	D.GARCÍA	
ESCALA	CASQUILLO MEDIO Y EJE INFERIOR			MATERIAL
1.1				PETG
				Nº DE PLANO:15
				Nº DE HOJA:15



10.2. ANEXO II: Especificaciones de los elementos

En el siguiente anexo se recogen las diferentes hojas de datos de los componentes comerciales, proporcionadas por fabricantes y proveedores.

Especificaciones piñón superior NORELEM 22400-0110150018. (Norelem, Norelem , 2021)

3D PDF DATASHEET				
Cree su hoja de datos 3D individual	Aprenda a crear su catálogo de productos mecánicos	Aprenda a crear su catálogo Bim de productos	Reduzca sus gastos en Ingeniería y Compras	

22400-0110150018

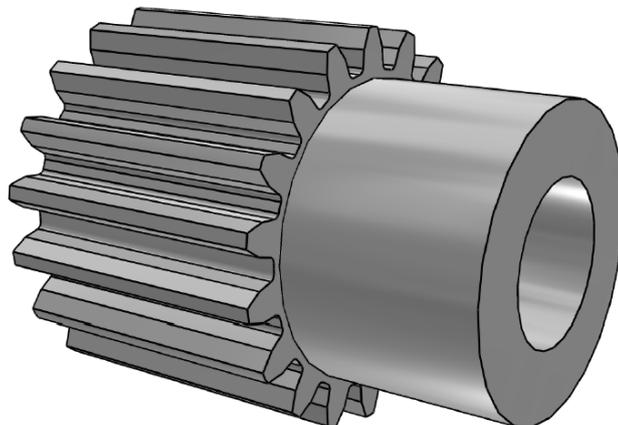
Ruedas dentadas cilíndricas de acero, módulo 1 Dentado fresado, dentado recto, ángulo de presión de 20°



Vista 3D



Click here in Adobe Acrobat to activate the interactive 3D View.



Zoom

Se mueve hacia objetos o se aleja de ellos en la pantalla cuando se mueve verticalmente. También puede hacer Zoom con la mano de las herramientas preseionando la recla Shift mientras arrastra el ratón.

Pan

El modelo se puede mover solo horizontal o verticalmente. También puede girar con la mano de herramientas: Ctrl-arrastrar.

Girar

Gira objetos 3D relativos a la pantalla. Cómo los objetos se mueven depende de la vista de comienzo, donde usted empieza a arrastrar y en la dirección en la que usted arrastra.

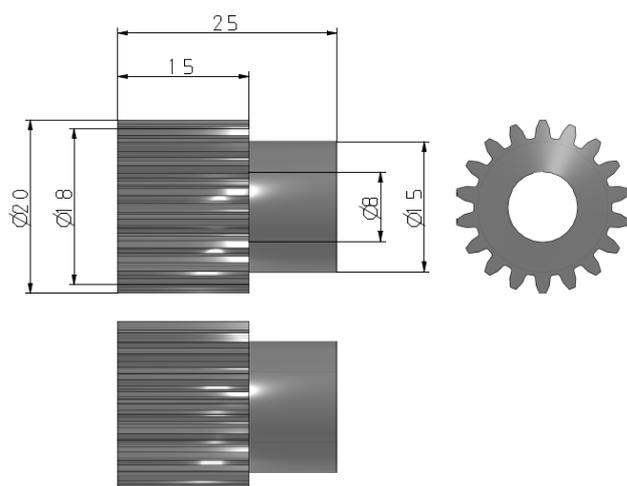
3D PDF DATASHEET				
Cree su hoja de datos 3D individual ▶	eCATALOGsolutions Aprenda a crear su catálogo de productos mecánicos ▶	BIM catalogs.net Aprenda a crear su catálogo Bim de productos ▶	PARTsolutions Reduzca sus gastos en Ingeniería y Compras ▶	

22400-0110150018

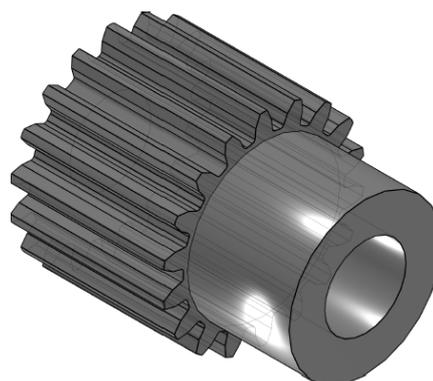
Ruedas dentadas cilíndricas de acero, módulo 1 Dentado fresado, dentado recto, ángulo de presión de 20°



Proyección 2D



Vista ISO



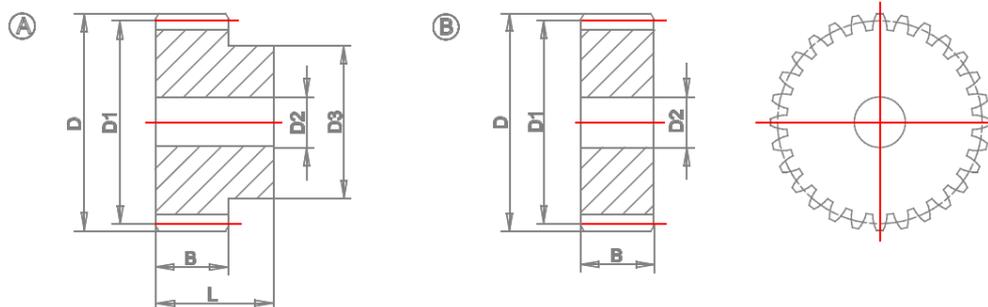
3D PDF DATASHEET	 eCATALOGsolutions	 BIM catalogs.net	 PARTsolutions	
Cree su hoja de datos 3D individual ▶	Aprenda a crear su catálogo de productos mecánicos ▶	Aprenda a crear su catálogo Bim de productos ▶	Reduzca sus gastos en Ingeniería y Compras ▶	

22400-0110150018

Ruedas dentadas cilíndricas de acero, módulo 1 Dentado fresado, dentado recto, ángulo de presión de 20°



Dibujos técnicos





3D PDF DATASHEET			
Cree su hoja de datos 3D individual ▶	Aprenda a crear su catálogo de productos mecánicos ▶	Aprenda a crear su catálogo Bim de productos ▶	Reduzca sus gastos en Ingeniería y Compras ▶



22400-0110150018

Ruedas dentadas cilíndricas de acero, módulo 1 Dentado fresado, dentado recto, ángulo de presión de 20°



Datos técnicos

BEST (Referencia)	22400-0110150018
FORM (Forma)	A
AUSF (Versión)	Con cubo
ZZ (Número de dientes)	18
D (Diámetro)	20
D1 (Diámetro / mm)	18
D2 (Ø D2 max.)	8
D3 (Diámetro)	15
B (Anchura / mm)	15
L (Longitud)	25
GEW (Peso aprox. kg / mm)	0.03
BS (Descripción)	Infotext
ZTN (Número de tarifa aduanera)	84839081
EAN (EAN-Nummer Norelem)	4059495232607
ROHS ()	Yes

Especificaciones corona superior NORELEM 22400-0110150026. (Norelem, Norelem , 2021)

3D PDF DATASHEET				
eCATALOGsolutions	BIM catalogs.net	PARTsolutions		
Cree su hoja de datos 3D individual ▶	Aprenda a crear su catálogo de productos mecánicos ▶	Aprenda a crear su catálogo Bim de productos ▶	Reduzca sus gastos en Ingeniería y Compras ▶	

22400-0110150026

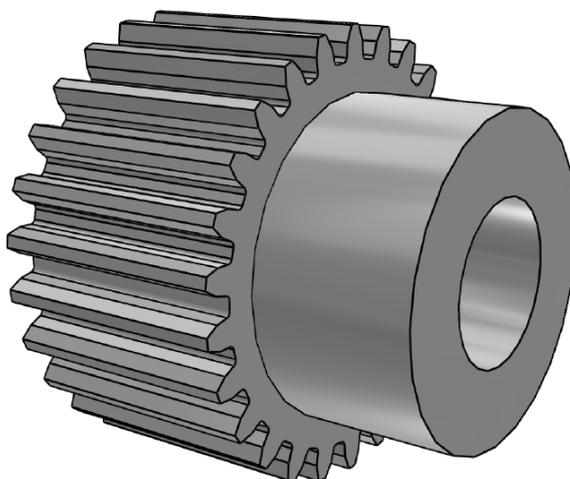
Ruedas dentadas cilíndricas de acero, módulo 1 Dentado fresado, dentado recto, ángulo de presión de 20°



Vista 3D



Click here in Adobe Acrobat to activate the interactive 3D View.



Zoom

Se mueve hacia objetos o se aleja de ellos en la pantalla cuando se mueve verticalmente. También puede hacer Zoom con la mano de las herramientas preseionando la recia Shift mientras arrastra el ratón.



Pan

El modelo se puede mover solo horizontal o verticalmente. También puede girar con la mano de herramientas: Ctrl-arrastrar.



Girar

Gira objetos 3D relativos a la pantalla. Cómo los objetos se mueven depende de la vista de comienzo, donde usted empieza a arrastrar y en la dirección en la que usted arrastra.

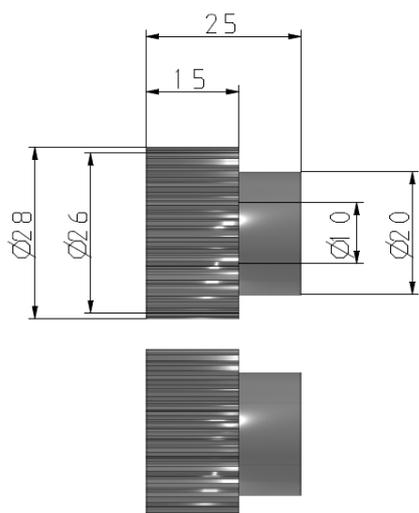
3D PDF DATASHEET				
Cree su hoja de datos 3D individual ▶	eCATALOGsolutions Aprenda a crear su catálogo de productos mecánicos ▶	BIM catalogs.net Aprenda a crear su catálogo Bim de productos ▶	PARTsolutions Reduzca sus gastos en Ingeniería y Compras ▶	

22400-0110150026

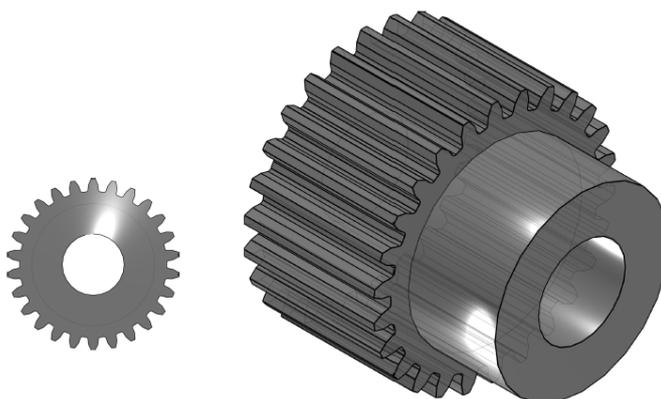
Ruedas dentadas cilíndricas de acero, módulo 1 Dentado fresado, dentado recto, ángulo de presión de 20°



Proyección 2D



Vista ISO



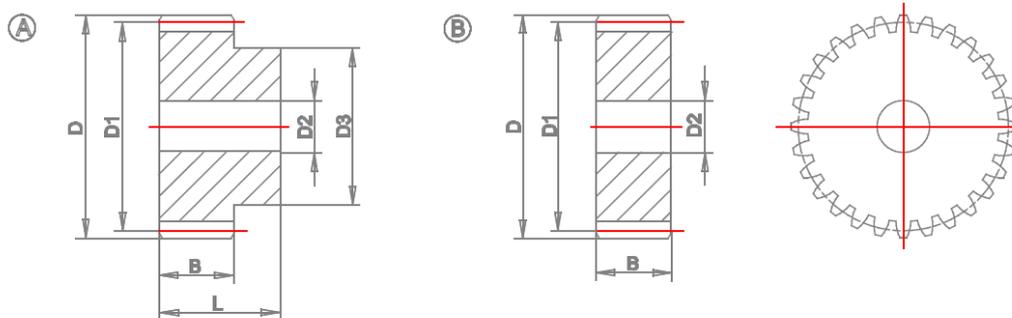
3D PDF DATASHEET	 eCATALOGsolutions	 BIMcatalogs.net	 PARTsolutions	
Cree su hoja de datos 3D individual ▶	Aprenda a crear su catálogo de productos mecánicos ▶	Aprenda a crear su catálogo Bim de productos ▶	Reduzca sus gastos en Ingeniería y Compras ▶	

22400-0110150026

Ruedas dentadas cilíndricas de acero, módulo 1 Dentado fresado, dentado recto, ángulo de presión de 20°



Dibujos técnicos





3D PDF DATASHEET			
Cree su hoja de datos 3D individual ▶	eCATALOGsolutions Aprenda a crear su catálogo de productos mecánicos ▶	BIM catalogs.net Aprenda a crear su catálogo Bim de productos ▶	PARTsolutions Reduzca sus gastos en Ingeniería y Compras ▶



22400-0110150026

Ruedas dentadas cilíndricas de acero, módulo 1 Dentado fresado, dentado recto, ángulo de presión de 20°



Datos técnicos

BEST (Referencia)	22400-0110150026
FORM (Forma)	A
AUSF (Versión)	Con cubo
ZZ (Número de dientes)	26
D (Diámetro)	28
D1 (Diámetro / mm)	26
D2 (Ø D2 max.)	10
D3 (Diámetro)	20
B (Anchura / mm)	15
L (Longitud)	25
GEW (Peso aprox. kg / mm)	0.07
BS (Descripción)	Infotext
ZTN (Número de tarifa aduanera)	84839081
EAN (EAN-Nummer Norelem)	4059495232683
ROHS ()	Yes

Especificaciones sin fin medio NORELEM 22500-311020. (Norelem, Norelem , 2021)

3D PDF DATASHEET				
Cree su hoja de datos 3D individual ▶	Aprenda a crear su catálogo de productos mecánicos ▶	Aprenda a crear su catálogo Bim de productos ▶	Reduzca sus gastos en Ingeniería y Compras ▶	

22500-311020

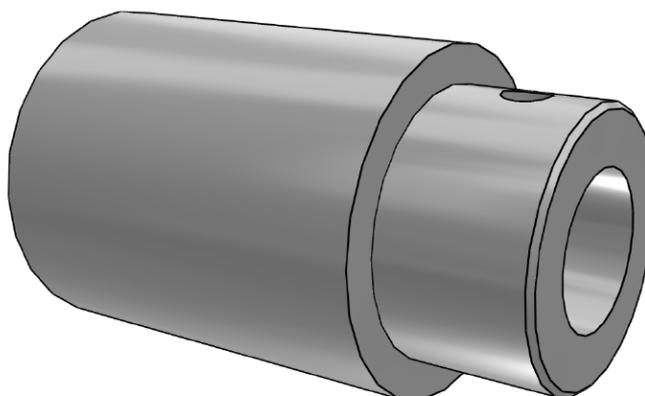
Conjuntos de rueda helicoidal de paso derecho distancia entre ejes de 31 mm



Vista 3D



Click here in Adobe Acrobat to activate the interactive 3D View.



Zoom

Se mueve hacia objetos o se aleja de ellos en la pantalla cuando se mueve verticalmente. También puede hacer Zoom con la mano de las herramientas preseionando la recla Shift mientras arrastra el ratón.

Pan

El modelo se puede mover solo horizontal o verticalmente. También puede girar con la mano de herramientas: Ctrl-arrastrar.

Girar

Gira objetos 3D relativos a la pantalla. Cómo los objetos se mueven depende de la vista de comienzo, donde usted empieza a arrastrar y en la dirección en la que usted arrastra.

3D PDF DATASHEET				
eCATALOGsolutions	BIM catalogs.net	PART-solutions		
Cree su hoja de datos 3D individual ▶	Aprenda a crear su catálogo de productos mecánicos ▶	Aprenda a crear su catálogo Bim de productos ▶	Reduzca sus gastos en Ingeniería y Compras ▶	



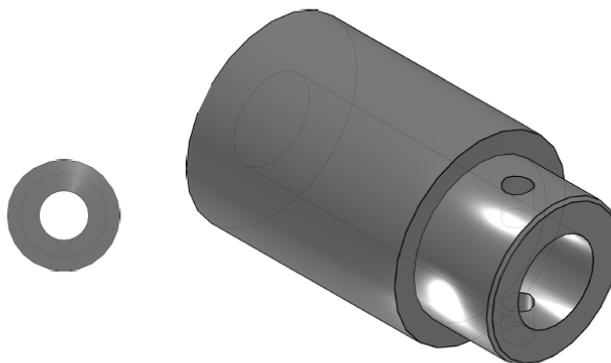
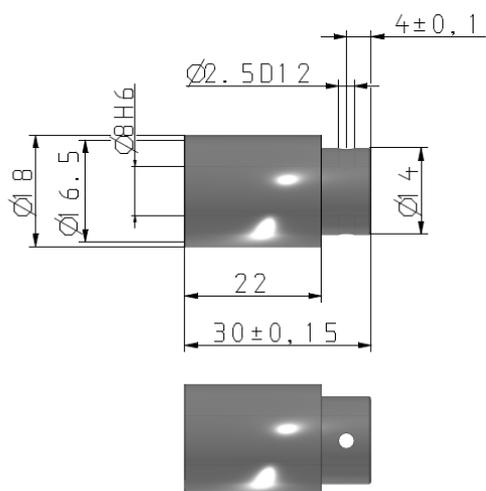
22500-311020

Conjuntos de rueda helicoidal de paso derecho distancia entre ejes de 31 mm



Proyección 2D

Vista ISO



3D PDF DATASHEET			
Cree su hoja de datos 3D individual ▶	eCATALOGsolutions Aprenda a crear su catálogo de productos mecánicos ▶	BIM catalogs.net Aprenda a crear su catálogo Bim de productos ▶	PARTsolutions Reduzca sus gastos en Ingeniería y Compras ▶

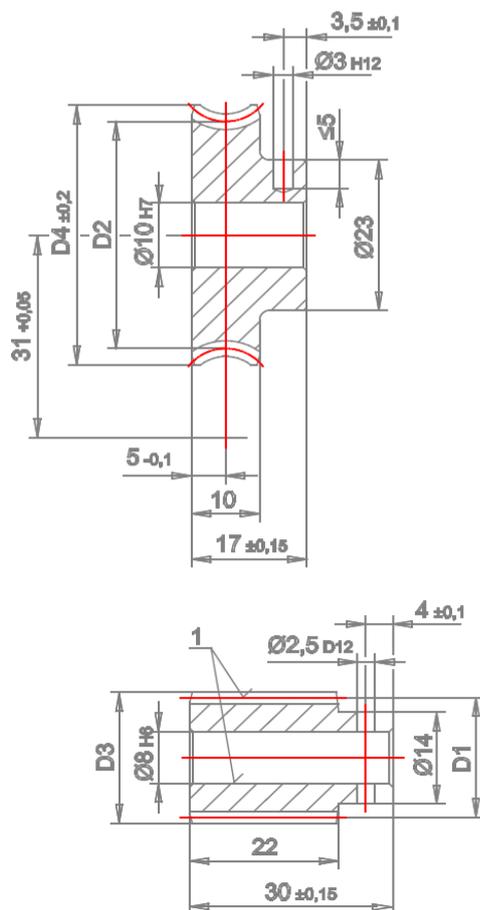


22500-311020

Conjuntos de rueda helicoidal de paso derecho distancia entre ejes de 31 mm



Dibujos técnicos





22500-311020

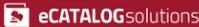
Conjuntos de rueda helicoidal de paso derecho distancia entre ejes de 31 mm



Datos técnicos

BEST (Referencia)	22500-311020
BENENNUNG (Descripción)	Schnecke
USV (Relación de transmisión)	-
STW (Ángulo de pendiente)	7° 49'
MODUL (Modul)	0,75
Z1 (Z1)	3
D1 (Diámetro / mm)	16,54
D3 (Diámetro / mm)	18,04
ZZ (Z2)	-
D2 (Diámetro / mm)	-
D4 (Diámetro / mm)	-
ABTMF (Par de salida T2 (Nm) Grasa mineral / Nm)	8,3
ABTMO (Par de salida T2 (Nm) Aceite mineral / Nm)	10
ABTMSO (Par de salida T2 (Nm) Aceite sintético / Nm)	12,4
BS (Descripción / -)	Infotext
INFO (Indicaciones técnicas)	Info
ZTN (Número de tarifa aduanera / -)	84839089
EAN (EAN-Nummer Norelem / -)	4059495407616
GEW (Peso / kg)	0,03356
ROHS ()	Yes

Especificaciones sin fin inferior NORELEM 22500-5310132. (Norelem, Norelem , 2021)

3D PDF DATASHEET				
				
Cree su hoja de datos 3D individual ▶	Aprenda a crear su catálogo de productos mecánicos ▶	Aprenda a crear su catálogo Bim de productos ▶	Reduzca sus gastos en Ingeniería y Compras ▶	

22500-5310132

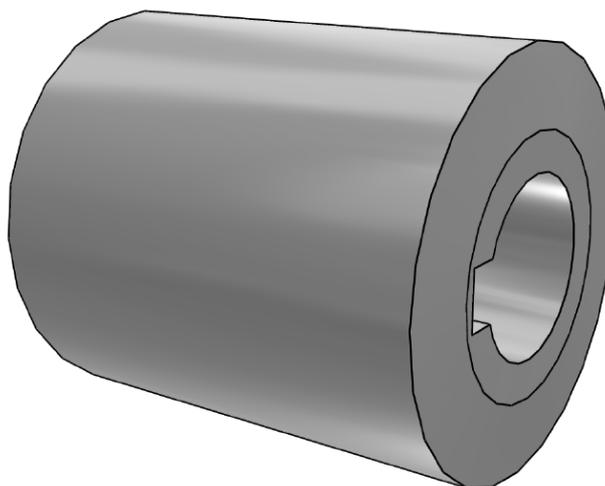
Conjuntos de rueda helicoidal de paso derecho distancia entre ejes de 53 mm



Vista 3D



Click here in Adobe Acrobat to activate the interactive 3D View.



Zoom

Se mueve hacia objetos o se aleja de ellos en la pantalla cuando se mueve verticalmente. También puede hacer Zoom con la mano de las herramientas preseionando la recla Shift mientras arrastra el ratón

Pan

El modelo se puede mover solo horizontal o verticalmente. También puede girar con la mano de herramientas: Ctrl-arrastrar.

Girar

Gira objetos 3D relativos a la pantalla. Cómo los objetos se mueven depende de la vista de comienzo, donde usted empieza a arrastar y en la dirección en la que usted arrastra.

3D PDF DATASHEET				
				
Cree su hoja de datos 3D individual	Aprenda a crear su catálogo de productos mecánicos	Aprenda a crear su catálogo Bim de productos	Reduzca sus gastos en Ingeniería y Compras	

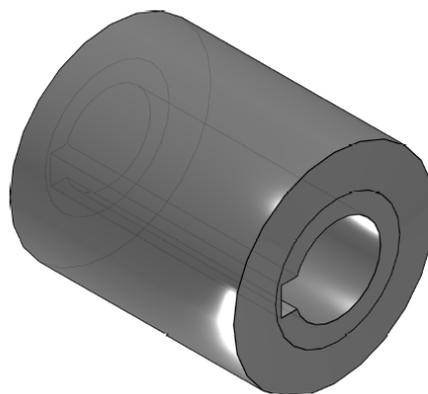
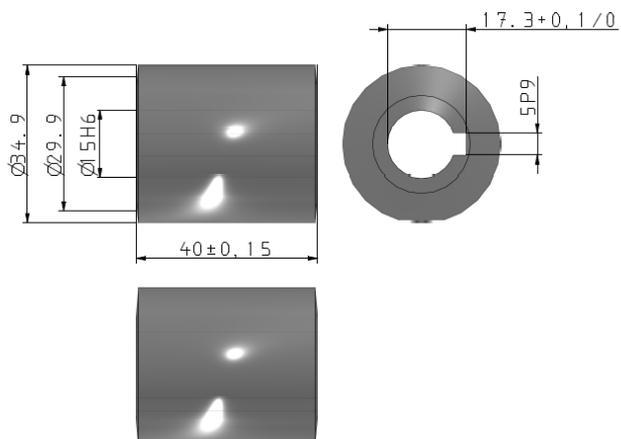
22500-5310132

Conjuntos de rueda helicoidal de paso derecho distancia entre ejes de 53 mm



Proyección 2D

Vista ISO



3D PDF DATASHEET	 eCATALOGsolutions	 BIM catalogs.net	 PARTsolutions
Cree su hoja de datos 3D individual	Aprenda a crear su catálogo de productos mecánicos	Aprenda a crear su catálogo Bim de productos	Reduzca sus gastos en Ingeniería y Compras

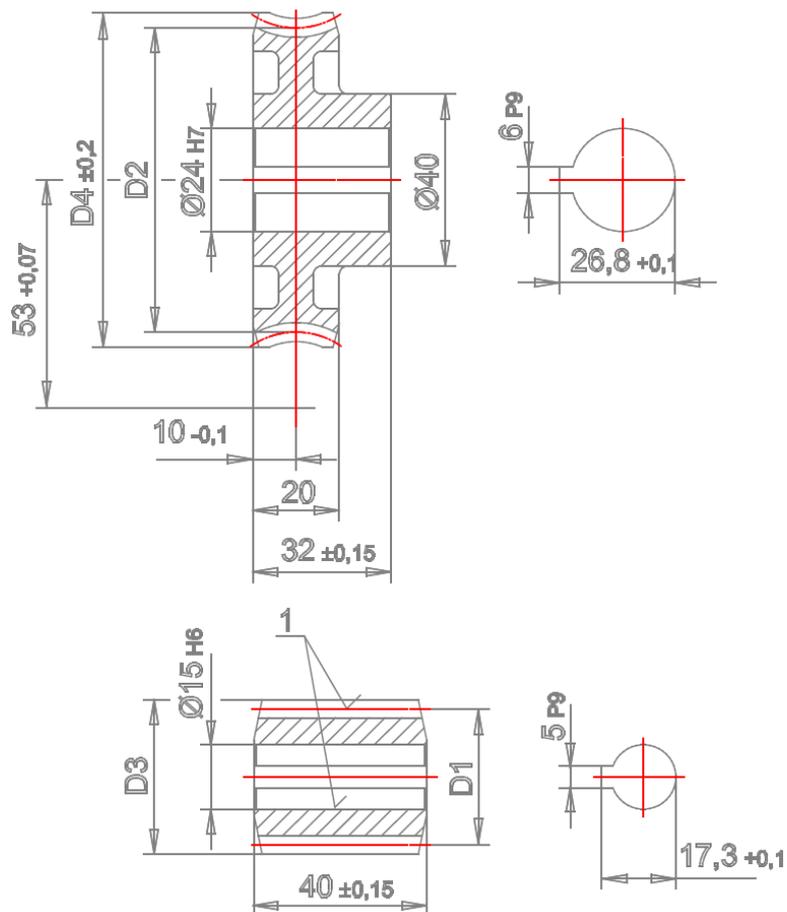


22500-5310132

Conjuntos de rueda helicoidal de paso derecho distancia entre ejes de 53 mm



Dibujos técnicos





3D PDF DATASHEET			
Cree su hoja de datos 3D individual	Aprenda a crear su catálogo de productos mecánicos	Aprenda a crear su catálogo Bim de productos	Reduzca sus gastos en Ingeniería y Compras



22500-5310132

Conjuntos de rueda helicoidal de paso derecho distancia entre ejes de 53 mm



Datos técnicos

BEST (Referencia)	22500-531013
BENENNUNG (Descripción)	Schnecke
USV (Relación de transmisión)	-
STW (Ángulo de pendiente)	9° 38
MODUL (Modul)	2,5
Z1 (Z1)	2
D1 (Diámetro / mm)	29,9
D3 (Diámetro / mm)	34,9
Z2 (Z2)	-
D2 (Diámetro / mm)	-
D4 (Diámetro / mm)	-
ABTMF (Par de salida T2 (Nm) Grasa mineral / Nm)	-
ABTMO (Par de salida T2 (Nm) Aceite mineral / Nm)	-
ABTMSO (Par de salida T2 (Nm) Aceite sintético / Nm)	113
BS (Descripción / -)	Infotext
INFO (Indicaciones técnicas)	Info
ZTN (Número de tarifa aduanera / -)	84839089
EAN (EAN-Nummer Norelem / -)	4059495409276
GEW (Peso / kg)	0,15452
ROHS (I)	Yes

Especificaciones corona helicoidal inferior NORELEM 22500-5320152. (Norelem, Norelem , 2021)

3D PDF DATASHEET				
Cree su hoja de datos 3D individual	eCATALOGsolutions	BIM catalogs.net	PARTsolutions	
▶	Aprenda a crear su catálogo de productos mecánicos	Aprenda a crear su catálogo Bim de productos	Reduzca sus gastos en Ingeniería y Compras	▶

22500-5320152

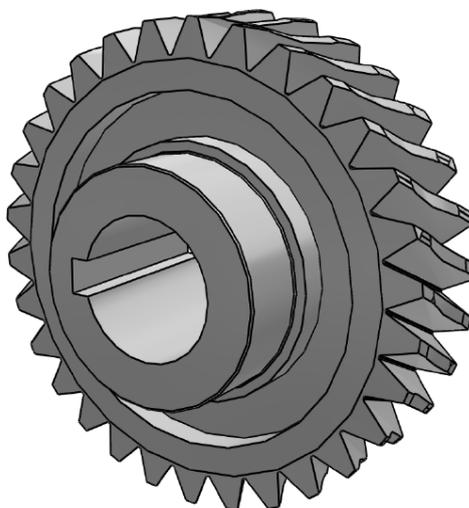
Conjuntos de rueda helicoidal de paso derecho distancia entre ejes de 53 mm



Vista 3D



Click here in Adobe Acrobat to activate the interactive 3D View.



Zoom

Se mueve hacia objetos o se aleja de ellos en la pantalla cuando se mueve verticalmente. También puede hacer Zoom con la mano de las herramientas preseionando la recla Shift mientras arrastra el ratón.

Pan

El modelo se puede mover solo horizontal o verticalmente. También puede girar con la mano de herramientas: Ctrl-arrastrar.

Girar

Gira objetos 3D relativos a la pantalla. Cómo los objetos se mueven depende de la vista de comienzo, donde usted empieza a arrastrar y en la dirección en la que usted arrastra.

<p>3D PDF DATASHEET</p>			
<p>Cree su hoja de datos 3D individual</p>	<p>eCATALOG solutions Aprenda a crear su catálogo de productos mecánicos</p>	<p>BIM catalogs.net Aprenda a crear su catálogo Bim de productos</p>	<p>PART solutions Reduzca sus gastos en Ingeniería y Compras</p>



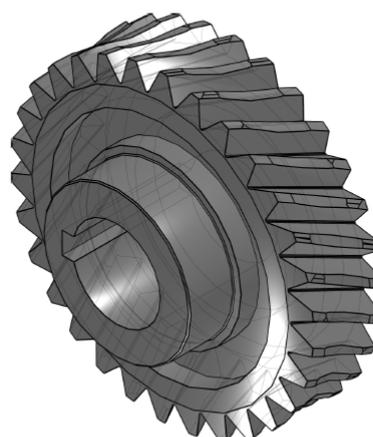
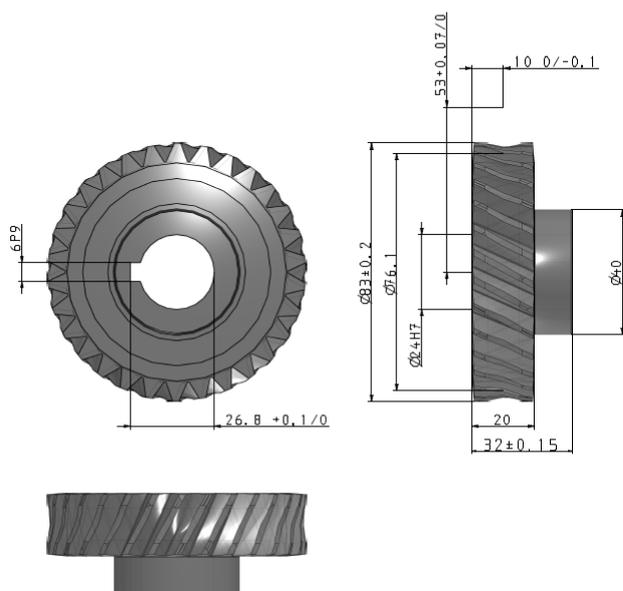
22500-5320152

Conjuntos de rueda helicoidal de paso derecho distancia entre ejes de 53 mm



Proyección 2D

Vista ISO



3D PDF DATASHEET	 eCATALOGsolutions	 BIM catalogs.net	 PARTsolutions
Cree su hoja de datos 3D individual	Aprenda a crear su catálogo de productos mecánicos	Aprenda a crear su catálogo Bim de productos	Reduzca sus gastos en Ingeniería y Compras

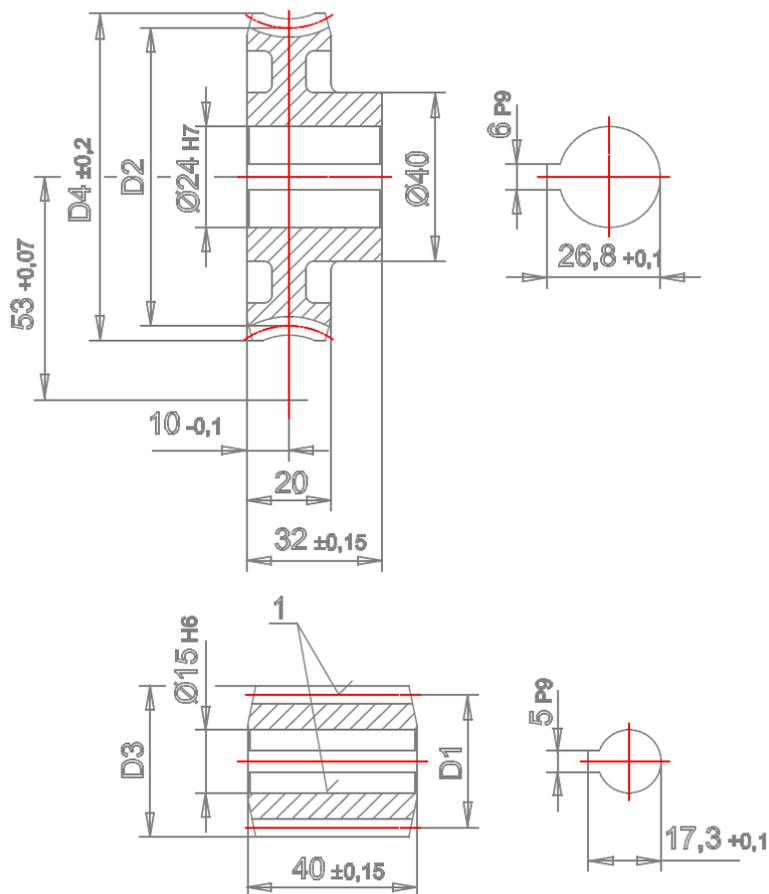


22500-5320152

Conjuntos de rueda helicoidal de paso derecho distancia entre ejes de 53 mm



Dibujos técnicos





3D PDF DATASHEET			
Cree su hoja de datos 3D individual	Aprenda a crear su catálogo de productos mecánicos	Aprenda a crear su catálogo Bim de productos	Reduzca sus gastos en Ingeniería y Compras



22500-5320152

Conjuntos de rueda helicoidal de paso derecho distancia entre ejes de 53 mm



Datos técnicos

BEST (Referencia)	22500-532015
BENENNUNG (Descripción)	Schneckenrad
USV (Relación de transmisión)	15:1
STW (Ángulo de pendiente)	9° 38
MODUL (Modul)	2,5
Z1 (Z1)	-
D1 (Diámetro / mm)	-
D3 (Diámetro / mm)	-
Z2 (Z2)	30
D2 (Diámetro / mm)	76,1
D4 (Diámetro / mm)	83
ABTMF (Par de salida TZ (Nm) Grasa mineral / Nm)	75
ABTMO (Par de salida TZ (Nm) Aceite mineral / Nm)	90
ABTMSO (Par de salida TZ (Nm) Aceite sintético / Nm)	113
BS (Descripción / -)	Infotext
INFO (Indicaciones técnicas)	Info
ZTN (Número de tarifa aduanera / -)	84839089
EAN (EAN-Nummer Norelem / -)	4059495409283
GEW (Peso / kg)	0,64
ROHS (I)	Yes

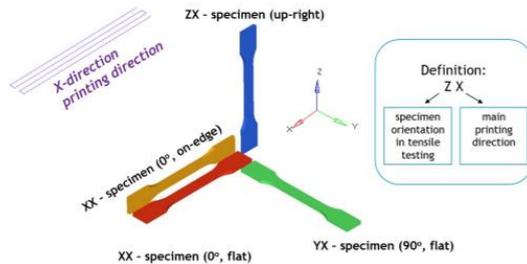
Especificaciones Novamid 1030. (DSM, 2021)

Property Data

Novamid®

Novamid® ID1030 (F)
PA6/66
3D printing grade

Print Date: 2021-04-07



Properties	Typical Data	Unit	Test Method
Mechanical properties (injection molded)			
	dry / cond		
Tensile modulus	2330 / 440	MPa	ISO 527-1/-2
Yield stress	72 / 31	MPa	ISO 527-1/-2
Yield strain	4.5 / 24	%	ISO 527-1/-2
Stress at break	42 / 46	MPa	ISO 527-1/-2
Strain at break	>50 / >50	%	ISO 527-1/-2
Charpy impact strength (+23°C)	N / -	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Thermal properties			
	dry / cond		
Melting temperature (10°C/min)	200 / *	°C	ISO 11357-1/-3
Thermal properties (injection molded)			
	dry / cond		
Temp. of deflection under load (1.80 MPa)	51 / *	°C	ISO 75-1/-2
Temp. of deflection under load (0.45 MPa)	84 / *	°C	ISO 75-1/-2

Akulon®, Arnite®, Arnitel®, EcoPaXX®, Fortii®, Novamid®, Stanyl® and Xytron™ are trademarks of DSM.
All information supplied by or on behalf of DSM in relation to its products, whether in the nature of data, recommendations or otherwise, is supported by research and, in good faith, believed reliable, but DSM assumes no liability and makes no warranties of any kind, express or implied, including, but not limited to, those of title, merchantability, fitness for a particular purpose or non-infringement or any warranty arising from a course of dealing, usage, or trade practice whatsoever in respect of application, processing or use made of the aforementioned information, or product. The user assumes all responsibility for the use of all information provided and shall verify quality and other properties or any consequences from the use of all such information.
Typical values are indicative only and are not to be construed as being binding specifications. Colorants in the product or other additives may cause significant variations in typical values. This document replaces all previous versions relating to this subject.
Copyright © DSM 2021. All rights reserved. No part of the information may be reproduced, distributed, or transmitted in any form or by any means, including photocopying, recording, or other electronic or mechanical methods, without the prior written permission of DSM.



Property Data

Novamid® ID1030 (F)

Print Date: 2021-04-07

Properties	Typical Data	Unit	Test Method
------------	--------------	------	-------------



Especificaciones PLA 850. (Smartmaterials, 2021)

PLA 3D850

TECHNICAL DATA SHEET VERSION 11



PLA 3D850

PLA Ingeo by Nature Works with very low thermal contraction, it is ideal for printing pieces with an incredible resolution, very precise and without deformation, with better mechanical and thermal properties than SMARTFIL PLA. Easy to use with great performance.



Reciclable
Recyclable
Recyclable



Apto para contacto
con alimentos
Food Approved
Aliments approuvés

	TYPICAL VALUE	UNITS	TEST METHOD		
PHYSICAL PROPERTIES					
Chemical Name	Polylactic Acid				
Material Density	1.24	g/cm ³	ISO 1183		
MECHANICAL PROPERTIES					
Tensile Yield Strength	65.5	MPa	ASTM D882		
Notched Izod Impact	40	J/m	ASTM D256		
Flexural Strength	126	MPa	ASTM D790		
Flexural Modulus	4357	MPa	ASTM D790		
THERMAL PROPERTIES					
Heat Distorsion Temperature	* 144	°C	ISO75		
<small>* Post-annealing in the range of 80-130°C can be used to promote crystallization and improve the heat deflection temperature of the 3D printed part.</small>					
PRINTING PROPERTIES					
Print Temperature	200-220	°C			
Hot Pad	0-60	°C			
Fan Layer	ON (100)	%			
SIZE	NET W.	GROSS W.	DIAMETERS	COLOR	PACKAGING
M	750 g	975 g	1.75 mm/2.85 mm	Various colors	SmartBag, security seal, desiccant bag

DISCLAIMER: The information provided in the data sheets is intended to be just a reference. It should not be used as design or quality control values. Actual values may differ significantly depending on the printing conditions. The final performance of the printed components does not only depend on the materials, also the design and printing conditions are important. Smart Materials assumes no responsibility for any damage, injury or loss produced by the use of its filaments in any particular application.

Especificaciones PETG. (Smarfills, 2021)

PETG

TECHNICAL DATA SHEET VERSION 11



PETG

Copolyester with 91% transparency in its natural state, it is very glass like, with high chemical resistance. Accepted for use with food products (FDA). It is very easy to print, as it has very low shrinkage and requires no warm bed.



Reciclable
Recycled
Recyclable



Apto para contacto
con alimentos
Food Approved
Food safe approved

	TYPICAL VALUE	UNITS	TEST METHOD		
PHYSICAL PROPERTIES					
Chemical Name	Polyethylene Terephthalate				
Material Density	1.27	g/cm ³	ASTM D792		
MECHANICAL PROPERTIES					
Tensile Yield Strength	50	MPa	ASTM D638		
Specific Gravity	1.27	g/cm ³	ASTM D1505		
Rockwell Hardness (R Scale)	108	R	ASTM D785		
Notched Izod Impact	105	J/m	ASTM D256		
Flexural Strength	69	MPa	ASTM D790		
Flexural Modulus	2100	MPa	ASTM D790		
THERMAL PROPERTIES					
Heat Distorsion Temperature (0.45 MPa)	70	°C	ASTM D648		
Vicat Softening Temperature	85	°C	ASTM D1525		
PRINTING PROPERTIES					
Print Temperature	225-245	°C			
Hot Pad	60-90	°C			
Fan Layer	ON (100)	%			
SIZE	NET W.	GROSS W.	DIAMETERS	COLOR	PACKAGING
M	750 g	975 g	1.75 mm/2.85 mm	Various colors	SmartBag, security seal, desiccant bag

DISCLAIMER: The information provided in the data sheets is intended to be just a reference. It should not be used as design or quality control values. Actual values may differ significantly depending on the printing conditions. The final performance of the printed components does not only depend on the materials, also the design and printing conditions are important. Smart Materials assumes no responsibility for any damage, injury or loss produced by the use of its filaments in any particular application.

Ficha de seguridad PETG. (Smarfills, 2021)



Versión 1.0/ES Fecha de revisión: 18/12/19

FICHA DE SEGURIDAD SMARTFIL® PETG

Según Reglamento (CE) 1907/2006

SECCIÓN 1. IDENTIFICACIÓN DE LA SUSTANCIA O DE LA MEZCLA Y DE LA EMPRESA

IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO

Nombre del producto:

SMARTFIL® PETG NATURAL
SMARTFIL® PETG IVORY WHITE
SMARTFIL® PETG ORINOCOSMARTFIL® PETG RUBY
SMARTFIL® PETG CHOROPHYLL
SMARTFIL® PETG COBALTSMARTFIL® PETG TRUE BLACK
SMARTFIL® PETG MIX

Tipo de producto: Termoplástico

USOS PERTINENTES IDENTIFICADOS DE LA SUSTANCIA O DE LA MEZCLA Y USOS DESACONSEJADOS

Uso recomendado Filamento para impresión 3d. Fabricación aditiva.

Usos desaconsejados No hay información disponible.

1.3 IDENTIFICACIÓN DE LA COMPAÑÍA

SMART MATERIALS 3D PRINTING SL
Polígono Industrial El Retamar - C/ Tomillo 7 - Vial G
23680 Alcalá la Real (Jaén) SPAIN

☎ +34 953 041 993

☎ +34 953 113 527

info@smartmaterials3d.comwww.smartmaterials3d.com

1.4 CONTACTO DE EMERGENCIAS

N.º Teléfono emergencia 112

SECCIÓN 2. IDENTIFICACIÓN DE LOS PELIGROS

2.1 CLASIFICACIÓN DE LA SUSTANCIA O MEZCLA

Reglamento (CE) N.º 1272/2008

Esta sustancia está clasificada como no peligrosa conforme al Reglamento (CE) 1272/2008 [SGA].

2.2 ELEMENTOS DE LA ETIQUETA

Símbolos/Pictogramas : Ninguno

Palabras de advertencia : Ninguno

Indicaciones de Peligro : Ninguno

Consejos de prudencia : Ninguno

2.3 OTROS PELIGROS

No se conocen/ No hay información disponible.

Especificaciones Rodamiento de bolas SKF, Ranura Profunda, 6012. (SKF, 2021)

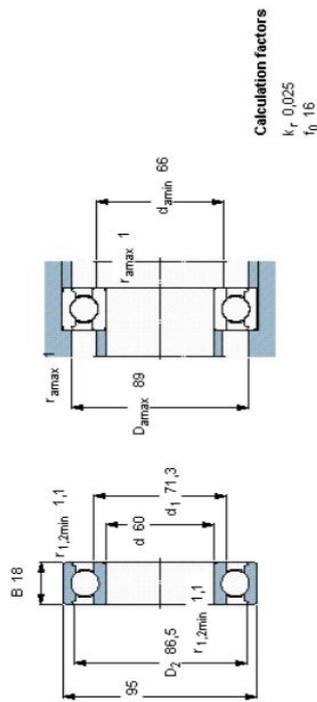


Deep groove ball bearings, single row, unsealed

Product information

Tolerances , see also text
 Radial internal clearance , see also text
 Recommended fits
 Shaft and housing tolerances

Principal dimensions			Basic load ratings		Fatigue load limit	Speed ratings	Mass	Designation
d	D	B	C	C ₀	P ₀	Reference speed	kg	
mm			kN	kN	kN	r/min		
60	95	18	30,7	23,2	0,98	15000	0,42	6012*
						Limiting speed		* - SKF Explorer bearing





Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES