



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Ingeniería Mecánica, Térmica y de Fluidos

Ingeniería Mecánica

TRABAJO FIN DE GRADO

**REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO
PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO**

Grado en

Ingeniería Mecánica

Autor: PALOMA REYES TEJEDOR

Tutor: ALEX BATALLER TORRAS

MÁLAGA, junio de 2023

AGRADECIMIENTOS

Este último año de carrera he tenido la oportunidad de combinar el doble grado de mecánica y diseño industrial para aplicarlo en el ámbito de la biomecánica, una de las ramas de la ingeniería que más me han llamado siempre la atención.

A pesar de que el avance tecnológico más visibilizado está muy deshumanizado, siempre he tenido en mente la búsqueda de aplicaciones tecnológicas enfocadas en la ayuda de personas discapacitadas o en plena recuperación de dolencias físicas. Este proyecto me ha permitido estar en contacto con personas especializadas en el sector de la medicina que me han guiado en todo el proceso y de las cuales he adquirido gran cantidad de conocimientos aplicables en mi futuro.

Agradezco enormemente la confianza que mi tutor Alex Bataller Torras ha depositado en mí desde un principio para el desarrollo de este amplio y ambicioso proyecto y el tiempo y atención que me ha dedicado siempre en todo el proceso de este Trabajo de Fin de Grado.

Llegar hasta aquí no hubiera sido posible sin el apoyo de mi familia, pareja y amigos los cuales me han estado acompañando en estos largos años traducibles en una montaña rusa de emociones y sensaciones, pero sin lugar a duda completamente satisfactorios.

RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Grado pretende ofrecer a los pacientes con lesiones de la mano tan importantes como puede llegar a ser una lesión en los tendones flexores, la oportunidad de tener acceso a un material de rehabilitación innovador como es un exoesqueleto, el cual será personalizado según sus características antropométricas. Este producto se trata de un material sanitario que a nivel económico no se encuentra disponible para un amplio marco de la población y cuyos materiales dificultan su uso.

Con este proyecto se pretende crear un exoesqueleto que se acoplará a una férula dinámica de muñeca ya prototipada. Esta combinación ofrecerá la posibilidad de conseguir la máxima recuperación en pacientes con problemas de movilidad, cognitivos, posibles fisuras y, especialmente, en pacientes con rotura de tendones flexores de los dedos de la mano. El motivo del enfoque centrado en esta última premisa es el elevado porcentaje de operaciones de tendones causados por cortes en el trabajo manual y es que, a pesar de esto, hoy en día todavía no hay disponible un sistema de ayuda y rehabilitación postoperatorio específico.

Además, este exoesqueleto está al alcance de toda la población gracias a su bajo coste, aportando gran calidad de comodidad gracias a su elevada ligereza conseguida por medio del uso de impresión aditiva y con un diseño muy sencillo que permite ser usado sin limitación alguna de conocimientos específicos.

Cabe destacar que su posibilidad de personalización mejorará la calidad del proceso de rehabilitación reflejándose, por consiguiente, en una mejora de la calidad de vida del paciente.

PALABRAS CLAVE

Exoesqueleto, rehabilitación, tendón, impresión 3D, mecanismo

ABSTRACT

This Final Degree Project aims to offer patients with hand injuries as important as a flexor tendon injury, the opportunity to have access to an innovative rehabilitation material such as an exoskeleton, which will be customized according to their anthropometric characteristics. This product is a medical device that is not economically available to a large part of the population and whose materials make its use difficult.

This project aims to create an exoskeleton that will be coupled to a dynamic wrist splint already prototyped. This combination will offer the possibility of achieving maximum recovery in patients with mobility problems, cognitive problems, possible fissures and, especially, in patients with ruptured flexor tendons of the fingers of the hand. The reason for the focus on this last premise is the high percentage of tendon operations caused by cuts in manual work and, despite this, there is still no specific postoperative support and rehabilitation system available today.

Moreover, this exoskeleton is within the reach of the entire population thanks to its low cost, providing great quality of comfort thanks to its high lightness achieved through the use of additive printing and with a very simple design that allows it to be used without any limitation of specific knowledge.

It should be noted that the possibility of personalization will improve the quality of the rehabilitation process, thus improving the patient's quality of life.

KEYWORDS

Exoskeleton, rehabilitation, tendon, 3D printing,

INDICE

DOCUMENTO N°1. MEMORIA

DOCUMENTO N°2. PLANOS

DOCUMENTO N°3 PRESUPUESTOS

DOCUMENTO N°1. MEMORIA

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

ÍNDICE

1.INTRODUCCIÓN.....	8
1.1 Objeto	8
1.2 Estado del arte y justificación.....	8
1.3 Alcance	12
2. NORMAS RECOMENDACIONES Y REFERENCIAS	13
2.1 Normativa y recomendaciones aplicadas.....	13
2.1.1 Normativa referente a la redacción del proyecto	13
2.1.2 Normativa referente al desarrollo del proyecto	13
2.2 Referencias a programas utilizados	14
3. METODOLOGÍA.....	15
4. DEFINICIONES Y ABREVIATURAS	17
5. ANTECEDENTES	19
5.1 Estudio de mercado.....	19
5.2 Síntesis aplicaciones médicas	25
5.2.1 Los dedos	25
5.3 Síntesis recopilación de datos	27
5.3.1 Softwares empleados	27
5.3.2 Síntesis de la toma de datos	30
5.4 Directrices estudio ergonómico	36
5.4.1 Estudio arquitectura de la mano	36
5.4.1 Análisis de movimiento	38
6. Concepción del mecanismo	42
6.1 Datos de entrada y variables de diseño.....	42
6.2 Selección del mecanismo.....	45
7. ESTUDIO ERGONÓMICO	48
7.1 Objetivos ergonómicos	48
7.2 Parametrización del diseño	48
8. SOLUCIONES Y PROCESO VIRTUAL.....	52
8.1 Prototipado virtual	52
9. SOLUCIONES Y PROCESO FÍSICO.....	54
9.1 Preparación para la impresión 3D.....	54
9.2 Pruebas prototipado	57

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

9.3 Rediseño y prototipo final	58
10. CONCLUSIONES	62
11. LÍNEAS DE FUTURO.....	63
12. ANEXOS	64
12.1 Materiales	64
13.1.1 Información y especificaciones de la Resina TR300 de Phrozen....	64
13.1.2 Información y especificaciones del plastazote autoadhesivo	66
13.1.3 Información y especificaciones del velcro	67
12.2 Ficha técnica del motor empleado	68
12.3 Fundamentos del campo de la medicina	71
12.3.1 Sistema esquelético.....	71
12.3.2 Sistema tendinoso y muscular	73
12.4 Toma y recopilación de medidas	74
12.4.1 Medidas antropométricas	75
12.4.2 Rangos de movilidad	79
12.5 Protocolo de rehabilitación	81
12.5.1 Objetivo terapéuticos	81
12.5.2 Fases del protocolo	81
13. Bibliografía.....	86

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO Nº1 MEMORIA

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Hombre caminando en secuencia en plano sagital y frontal. [1].....	9
Imagen 2. Exoesqueleto robótico de tren inferior. [4].....	10
Imagen 3. Exoesqueleto pasivo de tren superior. [5]	10
Imagen 4. Exoesqueleto militar. [6]	11
Imagen 5. Dispositivo de rehabilitación de mano. [7].....	20
Imagen 6. The HandSOME. [8]	21
Imagen 7. Prótesis para pacientes crónicos de AR. [9]	22
Imagen 8. Exoguante robótico. [10]	23
Imagen 9. In my Hand: Exoesqueleto biónico. [11].....	24
Imagen 10. Movimiento abducción-aducción de los dedos de la mano. [12]	25
Imagen 11. Movimiento de flexo-extensión de los dedos de la mano. [12].....	26
Imagen 12. Amplitud de flexión. [12]	26
Imagen 13. Amplitud de extensión. [12]	27
Imagen 14. Logotipo de Kinovea. [14].....	28
Imagen 15. Logotipo de Matlab. [15].....	29
Imagen 16. Proporción directa entre el dedo índice y la falange distal en población masculina. Elaboración propia	32
Imagen 17. Proporción directa entre el dedo índice y la falange media en población femenina. Elaboración propia.....	32
Imagen 18. Proporción directa entre el dedo índice y la falange proximal en población femenina. Elaboración propia.....	32

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

Imagen 19. Trayectoria angular articulación IFP. Elaboración propia.....	33
Imagen 20. Trayectoria angular articulación IFD. Elaboración propia.....	34
Imagen 21. Trayectoria angular de la yema del dedo. Elaboración propia	34
Imagen 22. Líneas de tendencia. Elaboración propia.....	35
Imagen 23. Visualización paralelismo dedos. Elaboración propia.....	37
Imagen 24. Visualización ubicación articulaciones del dedo. [17]	37
Imagen 25. Flexión interfalángica proximal: Posición 0 (1); flexión IFP (2); flexión máxima IFP (3). Elaboración propia	40
Imagen 26. Flexión articulación interfalángica distal (IFD). Elaboración propia.....	41
Imagen 27. Flexión articulación metacarpofalángica (MF). Elaboración propia.....	41
Imagen 28. Articulaciones IFP e IFD en estado de reposo. Elaboración propia.....	41
Imagen 29. Mecanismo propuesto con las variables de diseño definidas sobre el mismo. [20]	43
Imagen 30. Datos de entrada. Elaboración propia.....	44
Imagen 31. Esquema del mecanismo final del dedo índice. Elaboración propia	45
Imagen 32. Ángulos de la articulación MF medidos en Kinovea frente a los descritos por el mecanismo. Elaboración propia.....	46
Imagen 33. Ángulos de la articulación IFP medidos en Kinovea frente a los descritos por el mecanismo. Elaboración propia.....	46
Imagen 34. Ángulos de la articulación IFD medidos en Kinovea frente a los descritos por el mecanismo. Elaboración propia.....	47
Imagen 35. Parametrización apoyo sobre falange distal. Elaboración propia.....	49
Imagen 36. Vista curvatura y huecos libres para las articulaciones interfalángicas. Elaboración propia.....	50
Imagen 37. Parametrización barra 7. Elaboración propia.	51

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

Imagen 38. Vista 1 prototipo virtual. Elaboración propia.	52
Imagen 39. Vista 2 prototipo virtual. Elaboración propia.	53
Imagen 40. Vista 3 prototipo virtual. Elaboración propia.	53
Imagen 41. Preparación del archivo de impresión en Chitubox, posición del exoesqueleto ensamblado. Elaboración propia.....	55
Imagen 42. Preparación del archivo de impresión en Chitubox, posición del exoesqueleto por partes. Elaboración propia.....	55
Imagen 43. Procesos y accesorios para la impresión con resina. [21].....	56
Imagen 44. Primera impresión de prueba del prototipo físico. Elaboración propia.	57
Imagen 45. Vista de exceso de resina en el prototipo. Elaboración propia.	58
Imagen 46. Vista superior en detalle del espacio de ubicación del motor. Elaboración propia.....	59
Imagen 47. Ejemplo de posibilidad de uso de goma elástica para rehabilitaciones activas. Elaboración propia.....	60
Imagen 48. Ejemplo 2 de posibilidad de uso de goma elástica para rehabilitaciones activas. Elaboración propia.....	60
Imagen 49. Vista motor lineal encajado en el exoesqueleto. Elaboración propia.	61
Imagen 50. Resina empleada para la impresión 3D. [22].....	64
Imagen 51. Plastazote perforado color carne. [24].....	66
Imagen 52. Propiedades velcro. [25].....	67
Imagen 53. Velcro. [25].....	67
Imagen 54. Huesos y articulaciones dde la mano. [26].....	72
Imagen 55. Sistema tendinoso de la mano. [12].....	73
Imagen 56. Secuencia movimiento de flexión. [12].....	74

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

Imagen 57. Planos de referencia del cuerpo humano. [27]	75
Imagen 58. Marcas longitudes de la mano. [28].....	76
Imagen 59. Marcas longitudes de las falanges que se deben medir. Elaboración propia.	77
Imagen 60. Marcas anchura de los dedos. [28]	78
Imagen 61. Rangos de movilidad de las articulaciones interfalángicas en el movimiento de flexión. Elaboración propia.....	80
Imagen 62. Movimiento pasivo guiado por motor lineal. Elaboración propia.....	83
Imagen 63. Flexión activa de falanges y muñeca. Elaboración propia.	84
Imagen 64. Flexión activa de muñeca con falanges en reposo. Elaboración propia.	85
Imagen 65. Extensión activa de muñeca y falanges. Elaboración propia.....	85

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Relaciones longitudinales de las falanges del dedo índice. Elaboración propia.....	30
Tabla 2. Resumen por géneros. Elaboración propia.....	31
Tabla 3. Resumen promedio por géneros. Elaboración propia.....	31
Tabla 4. Resumen del ROM de las articulaciones interfalángicas. Elaboración propia.	41
Tabla 5. Variables de diseño del mecanismo. Elaboración propia.....	43
Tabla 6. Medidas de las 16 posiciones de las trayectorias angulares descritas por las líneas de tendencia. Elaboración propia.....	44
Tabla 7. Medidas tomadas de las longitudes de la mano. Elaboración propia.	76
Tabla 8. Medidas tomadas de los valores de las falanges. Elaboración propia.	77
Tabla 9. Valores de las medidas tomadas de la anchura de los dedos. Elaboración propia.....	79

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

1.INTRODUCCIÓN

1.1 Objeto

Las intervenciones quirúrgicas de lesiones de tendones de los dedos de la mano son unas de las más comunes en la población activa hoy en día, causando cambios bruscos en la vida cotidiana. Al tener una localización superficial se lesionan con gran frecuencia alterando el movimiento coordinado entre sus componentes, pudiendo ocasionar a largo plazo una deformidad opuesta en el resto de las articulaciones de la mano.

Es por esto, que el objetivo principal de este trabajo de fin de grado es el de poner al alcance de los pacientes un exoesqueleto cuyo diseño permita su parametrización en función de las características antropométricas de cada paciente, el cual servirá de ayuda en el proceso tanto activo como pasivo en la rehabilitación de dichos tendones. Permitirá, además, un movimiento controlado de las articulaciones interfalángicas para conseguir la completa recuperación de una extremidad tan importante en el día a día como es la mano.

Además de cumplir con las características técnicas, se diseñará un producto ligero gracias a su impresión en 3D, económico, fácil de usar y personalizado con la ayuda del estudio de su parametrización para cumplir con éxito el proceso de rehabilitación.

1.2 Estado del arte y justificación

El interés en los patrones del movimiento del cuerpo humano se remonta a tiempos pre-históricos en donde fueron representados dibujos en cavernas y levantadas estatuas de los sistemas de locomoción. Estas impresiones se realizaron desde la subjetividad y mera observación de los artistas de la época. No fue hasta hace poco más de un siglo, en el año 1882 donde Étienne Jules Marey diseña su tesis “estación fisiológica” donde equipado con instrumentos de cine y un fusil fotográfico plantea fotografías cronocíclicas del movimiento humano.

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

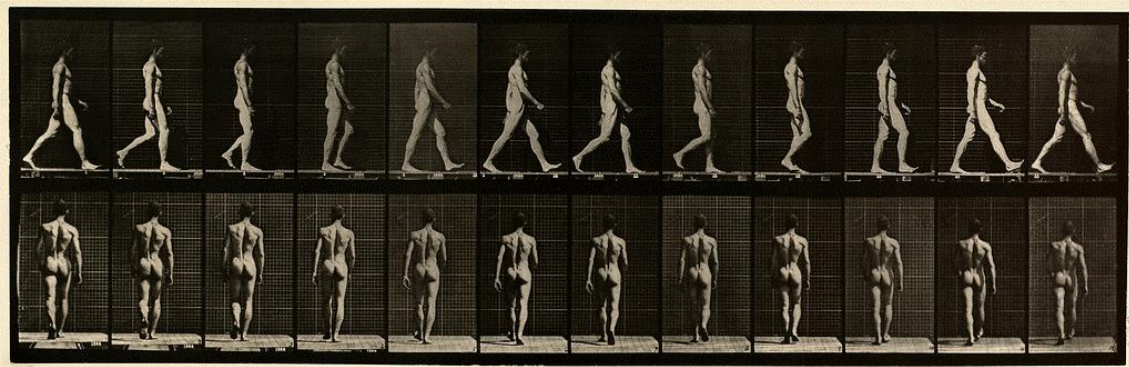


Imagen 1. Hombre caminando en secuencia en plano sagital y frontal. [1]

Posteriormente, gracias a la importancia del desarrollo tecnológico para la financiación de las guerras, la investigación y el deporte comienzan a tener mayor reconocimiento social. No fue hasta 1984 cuando Alley propuso la designación antropométrica para sustituir el término kinesiología, evolucionando en términos tales como: antropocinética, biodinámica, cineantropología y kinesiología mecánica hasta derivar finalmente en el término biomecánica empleado actualmente.

Para dar respuesta a los problemas descubiertos en estos estudios biomecánicos se ha desarrollado un nuevo tipo de dispositivo conocido con el nombre de exoesqueleto que puede describirse como un dispositivo externo portátil que se coloca sobre el cuerpo y son empleados con el objetivo de incrementar las capacidades osteomusculares del ser humano. Esta definición no es excesivamente precisa debido a la gran variedad de tipologías existentes actualmente gracias a su exponencial evolución.

Esta variedad puede clasificarse en los siguientes grupos en función de [3]:

- Forma de funcionamiento:
 - Exoesqueletos activos: cuentan con partes móviles accionadas por motores eléctricos o neumáticos para ayudar en los movimientos.

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA



Imagen 2. Exoesqueleto robótico de tren inferior. [4]

- Exoesqueletos pasivos: utilizan como aporte de energía, la generada por el propio usuario. Son los que tienen mayor implantación hoy en día.
- Parte del cuerpo que recibe ayuda:
 - Tren superior: ayudan a soportar pesos, especialmente cuando se trabaja con elevaciones por encima del hombro.



Imagen 3. Exoesqueleto pasivo de tren superior. [5]

- Tren inferior: mejoran el desempeño de las funciones de las piernas.
- Cuerpo entero: mejoran las capacidades de tanto el tren superior como el inferior.
- Espalda: ayuda a su protección.
- Finalidad de uso:
 - Médico: usado para paraplejias, cuyo objetivo es la recuperación de la movilidad de los miembros paralizados o en rehabilitaciones tras sufrir un trauma o accidente que afecte al sistema nervioso o muscular.

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

- No médico: con fines militares para mejorar el rendimiento de la persona o en el campo del envejecimiento para ayudar en las tareas físicas que requieran fuerza, agilidad, movilidad, etc.



Imagen 4. Exoesqueleto militar. [6]

Centrando el punto de mira en exoesqueletos médicos pasivos y/o activos enfocados en la rehabilitación de la extremidad superior de la mano y más específicamente en los dedos tal y como el desarrollado en este proyecto, es notable una evolución robótica de los mismos. Sea o no impulsado con ayuda de una energía externa, es de suma importancia destacar la necesidad de la presencia de un fisioterapeuta en las tareas de rehabilitación que requieran el seguimiento de ejercicios y movimientos que involucren la zona dañada. La finalidad de estos ejercicios es recuperar, en la medida de lo posible la completa movilidad del miembro afectado.

Es por ello que en este trabajo se aúnan conocimientos mecánicos y médicos para la obtención de un exoesqueleto económico, efectivo y de fácil comprensión de uso para que los profesionales médicos puedan ayudar en el proceso de recuperación del paciente.

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

1.3 Alcance

En el diseño y desarrollo del exoesqueleto se incluirán los siguientes puntos los cuales se desarrollarán a lo largo del presente documento.

Estudio del fundamento fisiopatológico del exoesqueleto. Conocimiento de la anatomía y función de los dedos, aspectos biomecánicos e identificación del déficit funcional.

- Estudio y valoración profesional del proceso de rehabilitación.
- Estudio cinemático del mecanismo.
- Diseño mediante CAD.
- Selección de materiales.
- Análisis teórico de las exigencias mecánicas.
- Fabricación física del prototipado mediante impresión 3D y prueba de este.
- Conclusiones.
- Líneas de futuro.

2. NORMAS RECOMENDACIONES Y REFERENCIAS

2.1 Normativa y recomendaciones aplicadas

2.1.1 Normativa referente a la redacción del proyecto

- UNE 157001:2014, *Criterios generales para la elaboración formal de los documentos que constituyen un proyecto técnico.*
- UNE-EN ISO 5455, *Dibujos técnicos. Escalas.*
- UNE 1027, *Dibujos técnicos. Plegado de planos.*
- UNE 1032, *Dibujos técnicos. Principios generales de representación.*
- UNE 1035, *Dibujos técnicos. Cuadros de rotulación.*
- UNE 1039, *Dibujos técnicos. Acotación. Principios generales, definiciones, métodos de ejecución e indicaciones especiales.*
- UNE 1135, *Dibujos técnicos. Lista de elementos.*

2.1.2 Normativa referente al desarrollo del proyecto

- UNE-EN ISO 7250-1:2008, *Definiciones de las medidas básicas del cuerpo humano para el diseño tecnológico.*
- UNE-EN ISO 22523:2006, *Prótesis de miembros externos y ortesis externas. Requisitos y métodos de ensayo.*
- UNE-EN ISO 14001:2015 *Sistemas de gestión ambiental. Requisitos con orientación para su uso.*
- UNE-EN ISO 22523:2007 *Prótesis de miembros externos y ortesis externas. Requisitos y métodos de ensayo (ISO 22523:2006).*
- UNE 111912:1990 *Prótesis y órtesis. Aspectos médicos. Descripción de las malformaciones congénitas de miembros.*

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO Nº1 MEMORIA

- UNE-EN ISO 17664:2018 Procesado de productos sanitarios. Información a suministrar por el fabricante del producto sanitario para el procesado de productos sanitarios.
- UNE-EN ISO 14971:2012 Productos sanitarios. Aplicación de la gestión de riesgos a los productos sanitarios.
- UNE-EN ISO 13485:2018 Productos sanitarios. Sistemas de gestión de la calidad. Requisitos para fines reglamentarios.
- Real Decreto 1591/2009 por el que se regulan los productos sanitarios.
- UNE-EN ISO/ASTM 52900:2017 Fabricación aditiva. Principios generales. Terminología (ISO/ASTM 52900:2015).
- ASTM F2971:2013 Práctica estándar para reportar datos para probetas preparadas por fabricación aditiva.

2.2 Referencias a programas utilizados

- Microsoft Word: procesamiento de texto (licencia UMA).
- Microsoft PowerPoint: presentación de diapositivas (licencia UMA).
- Microsoft Excel: hojas de cálculo (licencia UMA).
- AutoCAD: creación de planos (licencia UMA).
- SolidWorks: creación de planos y modelado 3D (licencia UMA).
- Kinovea: estudio ergonómico (*freeware*).
- Matlab: obtención parámetros de salida del mecanismo (licencia UMA).
- WinMecc: generación mecanismo (licencia UMA).
- Adobe Illustrator: edición (licencia UMA).
- Chitubox: impresión 3D (*freeware*).

3. METODOLOGÍA

Para poder definir y explicar la metodología empleada, es importante contextualizar el desarrollo evolutivo que ha tenido el proyecto. Se trata de un proyecto que pretende mejorar diseños anteriores de exoesqueletos y técnicas de estudio e impresión empleadas hasta el momento. Cabe destacar que no consiste en una mejora de un producto en concreto, sino que ha habido una constante evolución para poder ser acoplado a una órtesis de muñeca diseñada en un trabajo previo pero que va de la mano con el exoesqueleto que se va a exponer.

Tras el análisis de los exoesqueletos que se habían propuesto hasta el momento, un previo estudio de mercado y costes y una exhaustiva documentación de los aspectos relacionados en el sector de la medicina gracias a reuniones con expertos y búsquedas en libros y artículos de cirujanos y fisioterapeutas especialistas en las manos, se procede al diseño del producto mediante el empleo de métodos informáticos aplicado al diseño: CAD, CAM y CAE. Finalmente se obtiene un diseño el cual no necesita de herramienta alguna para su montaje y/o ensamblaje lo que lo simplifica lo suficiente como para poder estar al alcance de todo individuo que precise de su uso y carezca de conocimientos técnicos.

A pesar de la cantidad de información recopilada se han presentado momentos durante el proyecto en el que no se ha podido avanzar por desconocimiento de algunas necesidades específicas en ciertas fases del protocolo de rehabilitación. En esas situaciones se ha colaborado en persona con fisioterapeutas para un claro establecimiento de un diseño ajustable a la evolución del grado de inflamación del dedo en todo momento.

“Esta forma de trabajo simultánea entre conocimientos, experiencia y recursos podría relacionarse en cierto grado con la metodología de *Ingeniería Concurrente (IC)*. Al combinar ambos campos, el de la medicina y los métodos informáticos de diseño se ha ahorrado tiempo y se ha invertido esfuerzo en una mejora del diseño con el objetivo tanto de mejora de calidad como de reducción de costes”. [13]

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

Además de la IC se ha empleado una metodología orientada al *Diseño para Fabricación y Ensamblaje* (DFMA). Los principios que la comprenden están enfocados en la seguridad de fabricación, disminuyendo en la medida de lo posible su complejidad mediante la simplificación de las operaciones que componen el proceso de creación del producto.

Algunos principios básicos que lo conforman son [13]:

- Minimizar la complejidad: ensamblaje de manera directa y sin errores.
- Minimizar el número de piezas, con el máximo número de estas estandarizadas, multifuncionales, etc.
- Maximizar la compatibilidad entre el proceso de fabricación de piezas y subconjuntos aplicando la tecnología al alcance.
- Diseñar tolerancias de acuerdo con las capacidades del proceso.

En cuanto a las dimensiones a considerar en las distintas etapas de su diseño se ha establecido:

- Las piezas serán fabricadas y no subcontratadas.
- Eliminar el uso de tornillos y/o elementos no imprimibles en su ensamblaje.
- Eliminar el uso de herramientas.

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO Nº1 MEMORIA

4. DEFINICIONES Y ABREVIATURAS

- CAD: Computer-Aided Design, ‘Diseño Asistido por Ordenador’.
- CAM: Computer-Aided Manufacturing, ‘Fabricación Asistida por Ordenador’.
- CAE: Computer-Aided Engineering, Ingeniería Asistida por Ordenador’.
- DFMA: Diseño para Fabricación y Ensamblaje.
- IC: Ingeniería Concurrente.
- IFD: Interfalángica Distal.
- IFP: Interfalángica Proximal.
- LCD: Liquid Crystal Display. ‘Pantalla de cristal Líquido’.
- LED: Light Emitting Diode. ‘Diodo que Emite Luz’.
- MF: Metacarpofalángica.
- MUMSA:
- ROM: Rank Of Movement. ‘Rango de Movimiento’.
- UMA: Universidad de Málaga.
- USB: Universal Serial Bus. ‘Bus Universal en Serie’.

Unidades

- g: gramos
- kg: kilogramo
- °: grados
- °C: grados centígrados
- mm: milímetros
- cm: centímetros
- m: metros

Definiciones

- [...]: referencia a una cita bibliográfica.
- *Freeware*: software que se distribuye sin pago por licencia.
- Artrocinemática: movimiento de una superficie cóncava sobre una convexa donde rodamiento y deslizamiento se realiza en el mismo sentido.

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

- Trocleartrosis: articulación que ejecuta únicamente los movimientos de flexión y extensión.

5. ANTECEDENTES

5.1 Estudio de mercado

Tras el estudio de mercado realizado se concluye que el diseño de exoesqueletos de dedos de la mano está a la orden del día y se podría destacar la presencia de dos grandes grupos: robóticos y de impresión 3D. Ambos en auge exponencial en los últimos años, pero poco comercializados y probados en pacientes reales.

A pesar de tener componentes y sistemas de control totalmente diferentes, ambos grupos tienen numerosas características comunes: son voluminosos, poco ergonómicos, difíciles de usar debido a la complejidad de su sistema de funcionamiento (requiriendo para ello la presencia de profesionales del campo de la medicina con conocimientos de softwares nunca usados) y con precios bastante elevados, haciendo de ello un producto nada atractivo a los ojos del consumidor.

A continuación, se detallarán los criterios tomados para la clasificación de los exoesqueletos en función de las características que se estiman más importantes a poseer:

- **Movimiento regulable:** el exoesqueleto permite tanto la inmovilización de las falanges como el control regulado del movimiento en cada fase angular.
- **Robusto:** por el diseño y características mecánicas del material, se observa que el exoesqueleto es resistente.
- **Sencillo:** el motor/elemento que impulsa el movimiento del mecanismo es un sistema intuitivo.
- **Ligero:** el peso del exoesqueleto permitirá su uso durante largas horas sin fatigar la extremidad del paciente.
- **Económico:** se considerará económico aquel exoesqueleto cuyo precio se encuentre por debajo de los 200 euros.
- **Atractivo:** el conjunto es visualmente agradable al usuario.
- **Limpio:** los materiales que componen el exoesqueleto no dificultarán su cómoda limpieza.

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

Producto: **DISPOSITIVO DE REHABILITACIÓN DE MANO**

Fabricante: **Jeff Weiler**

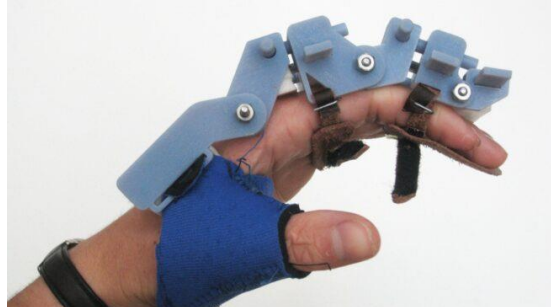


Imagen 5. Dispositivo de rehabilitación de mano. [7]

Movimiento regulable: sí, se realiza robóticamente por impulsos del sistema nervioso.

Robusto: sí.

Sencillo: no, a pesar de parecerlo a simple vista lo que se observa es una carcasa que cubre todo el sistema de control.

Ligero: sí

Económico: no.

Atractivo: no, hay demasiada variedad de materiales los cuales dan apariencia de “parches”.

Fácil montaje: no, por dentro tiene elementos electrónicos por lo que hay que ensamblar el conjunto.

Resistente a la intemperie: sí

Peso equilibrado: sí.

Limpio: no, ya que la parte de neopreno que envuelve el dedo pulgar acumula suciedad fácilmente y los velcros que se muestran en la imagen no dan sensación de limpieza.

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

Producto: **THE HANDSOME**

Fabricante: **UNIVERSIDAD CATÓLICA DE AMÉRICA**

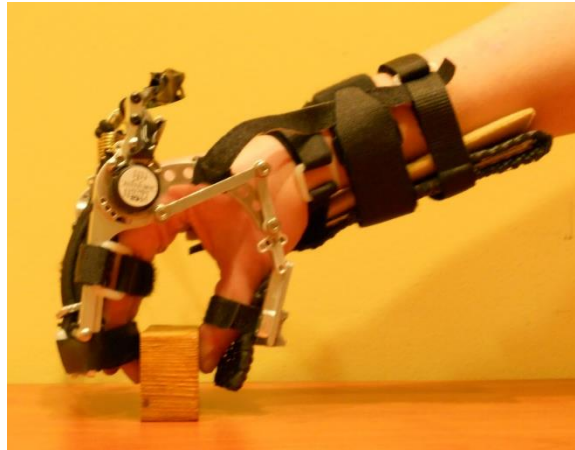


Imagen 6. The HandSOME. [8]

Movimiento regulable: sí, se realiza robóticamente.

Robusto: sí, pero el exoesqueleto y la órtesis de muñeca por separado no en conjunto.

Sencillo: no.

Ligero: no.

Económico: no.

Atractivo: no.

Fácil montaje: no el montaje requiere de un especialista.

Resistente a la intemperie: sí.

Peso equilibrado: no, el exoesqueleto se sustenta a un lado del dedo, no en su eje central.

Limpio: no, dependiendo de la calidad del material tenderá a corroerse.

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

Producto: **PRÓTESIS PARA PACIENTES CRÓNICOS DE AR**

Fabricante: **UNIVERSIDAD DE CUENCA, ECUADOR**

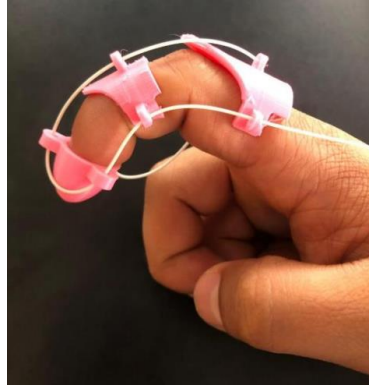


Imagen 7. Prótesis para pacientes crónicos de AR. [9]

Movimiento regulable: no, está enfocado como exoesqueleto pasivo.

Robusto: no.

Sencillo: sí.

Ligero: sí, está constituido por muy poca cantidad de material.

Económico: sí.

Atractivo: sí, es simple y visualmente agradable por los colores.

Fácil montaje: sí, no requiere ensamble alguno.

Resistente a la intemperie: sí.

Peso equilibrado: sí.

Limpio: sí, se puede limpiar cada pieza por separado.

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO Nº1 MEMORIA

Producto: **EXOQUANTE ROBÓTICO**

Fabricante: **ARTEFACTOSLAB**



Imagen 8. Exoguante robótico. [10]

Movimiento regulable: no, simplemente limita y ayuda.

Robusto: no.

Sencillo: sí.

Ligero: sí.

Económico: sí.

Atractivo: sí, se asemeja a un guante, un elemento muy común entre las personas por lo que aporta confianza y el color verde resulta agradable a la vista.

Fácil montaje: sí, se coloca como un guante sobre la mano y está constituido por un único elemento.

Resistente a la intemperie: no.

Peso equilibrado: sí, además es muy ligero.

Limpio: sí, se trata de un material impermeable.

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO Nº1 MEMORIA

Producto: **IN MY HAND: EXOESQUELETO BIÓNICO**

Fabricante: **UNIVERSIDAD DE SALAMANCA**

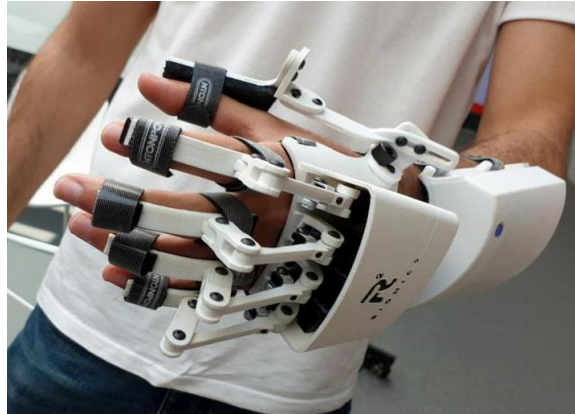


Imagen 9. In my Hand: Exoesqueleto biónico. [11]

Movimiento regulable: sí, se realiza robóticamente.

Robusto: sí.

Sencillo: no.

Ligero: no, es muy pesado para cumplir con los objetivos de la rehabilitación.

Económico: no.

Atractivo: no, es demasiado voluminoso y agresivo a la vista.

Fácil montaje: no.

Resistente a la intemperie: sí.

Peso equilibrado: sí.

Limpio: no, al haber tan poco espacio entre ensamblajes se puede acumular suciedad.

5.2 Síntesis aplicaciones médicas

Previo al estudio ergonómico se analizan las características cinemáticas y anatómicas de los dedos recopiladas en el Anexo 12.4.1 de este documento para estudiar los límites y consideraciones a tener en cuenta en el diseño del exoesqueleto del presente proyecto

5.2.1 Los dedos

El movimiento de las articulaciones de los dedos de la mano, excepto el pulgar, se realiza fundamentalmente en el plano de flexo-extensión. El movimiento abducción-aducción es muy limitado y solo se produce en las articulaciones MF.

La abducción y la aducción se mide a partir de la línea axial de la mano. En el primero, todos los dedos se separan entre sí aproximadamente 20° mientras que en el segundo se tocan totalmente entre ellos tal y como se observa en la Imagen 10.

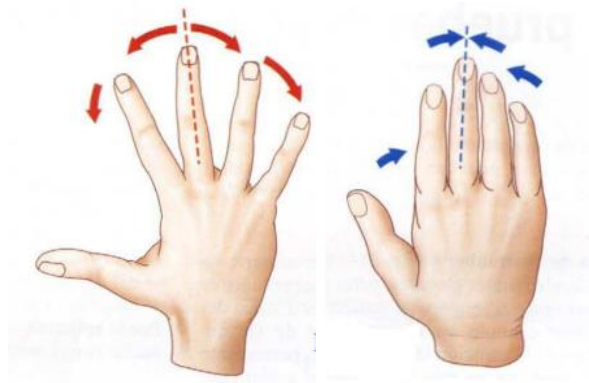


Imagen 10. Movimiento abducción-aducción de los dedos de la mano. [12]

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA



Imagen 11. Movimiento de flexo-extensión de los dedos de la mano. [12]

En el movimiento de flexión, a pesar de moverse de forma conjunta y tener un rango de movilidad promedio, debido a las diferencias anatómicas éste varía de forma individual entre dedos.

La amplitud de flexión de la que hablamos en la articulación metacarpofalángica es aproximadamente de 90° , aunque aumenta progresivamente hasta el quinto dedo (cuando se hable de primer dedo se hará referencia al meñique por lo que el quinto es el pulgar).

Este movimiento de los dedos se mide en términos de grado máximo de flexión hasta el de extensión. Se ha de tener en cuenta que la hiperextensión se mide en valores negativos, por lo que para la obtención del rango total del movimiento de cada uno de los dedos se resta este ángulo de hiperextensión al de flexión.

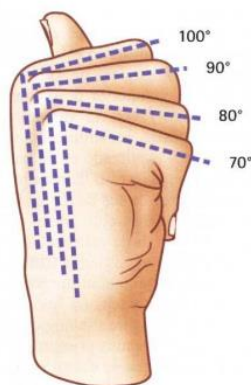


Imagen 12. Amplitud de flexión. [12]

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

En cambio, la amplitud de las articulaciones interfalángicas supera los 90°: en el caso de las interfalángicas proximales se pueden alcanzar los 135° y en las distales hasta 100°.

La amplitud de la flexión activa puede alcanzar de 30° a 40°:

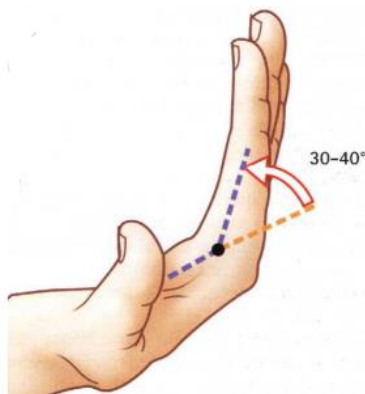


Imagen 13. Amplitud de extensión. [12]

5.3 Síntesis recopilación de datos

5.3.1 Softwares empleados

La obtención y calibración de todas las medidas y trayectorias de seguimiento de movimiento a lo largo del proyecto se ha realizado con la ayuda de un software denominado *Kinovea*. Este software, muy empleado en biomecánica, se organiza en torno a cuatro misiones principales relacionadas con el estudio del movimiento humano [13]:

- **Captura:** capacidad de grabación simultánea gracias a la posibilidad de sincronización del software con más de una cámara al mismo tiempo.
- **Observación:** regulación velocidad, rotación, zoom, superposición de vídeos y sincronización entre otros.

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

- **Anotación:** creación de notas, símbolos e incluso importación de imágenes externas a vídeos.
- **Medición:** tanto del tiempo como distancias y ángulos mediante herramientas tales como un cronómetro y goniómetro que pueden seguir en tiempo real la trayectoria de un punto deseado (normalmente una parte del cuerpo como la muñeca en este caso). Adición de sistema de coordenadas y cuadrículas de calibración.



Imagen 14. Logotipo de Kinovea. [14]

Una vez recopilados todos los datos de entrada pertinentes, se emplea el software *MATLAB*, una plataforma de programación y cálculo numérico. Con él se obtendrá a partir de un algoritmo que será mencionado más adelante, los parámetros de salida necesarios para la generación de un mecanismo que simule el movimiento de los dedos a partir del cual se podrá realizar el diseño del exoesqueleto.

MATLAB es capaz de diseñar sistemas y productos a partir de un lenguaje basado en matrices que permite la expresión más natural de las matemáticas computacionales.

De entre sus características principales destacan [15]:

- Entorno de escritorio optimizado para la exploración iterativa, diseño y solución de problemas.
- Gráficas para visualizar datos y herramientas para crear diagramas personalizados.
- Aplicaciones para ajustar curvas, clasificar datos, analizar señales, ajustar sistemas de control, etc.
- Herramientas para crear aplicaciones con interfaces de usuario personalizadas.
- Interfaces para C/C++, Java, .NET, Python, SQL, Hadoop y Microsoft Excel.

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO Nº1 MEMORIA



Imagen 15. Logotipo de Matlab. [15]

Con los parámetros de salida obtenidos, se generarán mecanismos en el Software *WinMecc* hasta encontrar el “ideal” para el diseño en cuanto a seguimiento de trayectoria y distancia entre puntos.

“WinMecC es un programa de simulación de mecanismos planos con un grado de libertad, que ha sido desarrollado por el Área de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Málaga con las últimas herramientas de programación orientadas a objetos y con un objetivo fundamentalmente docente. La aplicación realiza el análisis cinemático y dinámico de mecanismos planos con cualquier número de eslabones” [16].

De entre todas las características destacan:

- **Interfaz de Usuario:** Diseñado con el objetivo de facilitar y simplificar tanto la definición como la posterior edición y modificación de la geometría de los mecanismos.
- **Núcleo de Cálculo:** Capaz de analizar la cinemática y dinámica de un mecanismo con elevado número de eslabones en tiempo real.
- **Interfaz Gráfico:** Permite visualizar un gran volumen de información generada por el Núcleo de Cálculo en forma de capas. El usuario tiene control absoluto sobre la visibilidad de cada una de ellas, así como de los elementos que integran cada una.

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

5.3.2 Síntesis de la toma de datos

Además de cumplir con su función y estar dotada de todas las características definidas al inicio del proyecto, el principal objetivo consiste en conseguir un mecanismo de exoesqueleto parametrizable y para ello se han estudiado las relaciones proporcionales entre el dedo índice y las falanges que lo constituyen de cada individuo.

La información ha sido organizada por medio de tablas segmentando la información en función del género.

Paciente n°	Género	L3	Distal (mm)	% Distal	Medio (mm)	% Medio	Proximal (mm)	% Proximal
1	F	99	24	24,2	26	26,3	49	49,5
3	F	85	20	23,5	23	27,1	42	49,4
4	F	87	19	21,8	22	25,3	46	52,9
5	F	91	20	22,0	24	26,4	47	51,6
7	F	94	20	21,3	25	26,6	49	52,1
8	F	86	20	23,3	23	26,7	43	50,0
9	F	83	17	20,5	22	26,5	44	53,0
11	F	76	17	22,4	20	26,3	39	51,3
12	F	85	18	21,2	22	25,9	45	52,9
14	F	81	18	22,2	21	25,9	42	51,9
15	F	99	24	24,2	26	26,3	49	49,5
17	F	93	20	21,5	24	25,8	49	52,7
19	F	94	22	23,4	24	25,5	48	51,1
20	F	77	19	24,7	20	26,0	38	49,4
26	F	86	19	22,1	22	25,6	45	52,3
2	M	105	25	23,8	29	27,6	51	48,6
6	M	105	23	21,9	29	27,6	53	50,5
10	M	85	17	20,0	26	30,6	42	49,4
13	M	112	27	24,1	32	28,6	53	47,3
16	M	110	26	23,6	31	28,2	53	48,2
18	M	116	28	24,1	33	28,4	55	47,4
21	M	89	19	21,3	25	28,1	45	50,6
22	M	97	23	23,7	26	26,8	48	49,5
23	M	92	21	22,8	25	27,2	46	50,0
24	M	100	23	23,0	26	26,0	51	51,0
25	M	106	25	23,6	29	27,4	52	49,1

Tabla 1. Relaciones longitudinales de las falanges del dedo índice. Elaboración propia

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

Se resumen estos datos en tablas diferenciadas por género donde se recogen los valores límites, promedio y su desviación para facilitar el estudio de estos:

FEMENINO	L3 (mm)	Distal	Medio	Proximal
MÍNIMO	76	17	20	38
MÁXIMO	99	24	26	49
PROMEDIO	87,73	19,80	22,93	45,00
DESVIACIÓN	7,39	1,27	0,49	1,41
MASCULINO	L3 (mm)	Distal	Medio	Proximal
MÍNIMO	85	17	25	42
MÁXIMO	116	28	33	55
PROMEDIO	101,55	23,36	28,27	49,91
DESVIACIÓN	9,43	1,32	1,18	1,25

Tabla 2. Resumen por géneros. Elaboración propia

PROMEDIO %	FEMENINO	MASCULINO
DISTAL	22,6	22,9
MEDIA	26,1	27,9
PROXIMAL	51,3	49,2

Tabla 3. Resumen promedio por géneros. Elaboración propia

Se puede concluir entonces que, a la hora de realizar el diseño del exoesqueleto, a nivel geométrico es posible realizar un mismo diseño ajustable proporcionalmente a las medidas de cada uno de los individuos.

Se muestra también ejemplos de algunas gráficas de dispersión de proporcionalidad directa entre el dedo índice y alguna de sus falanges para su observación representativa:

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

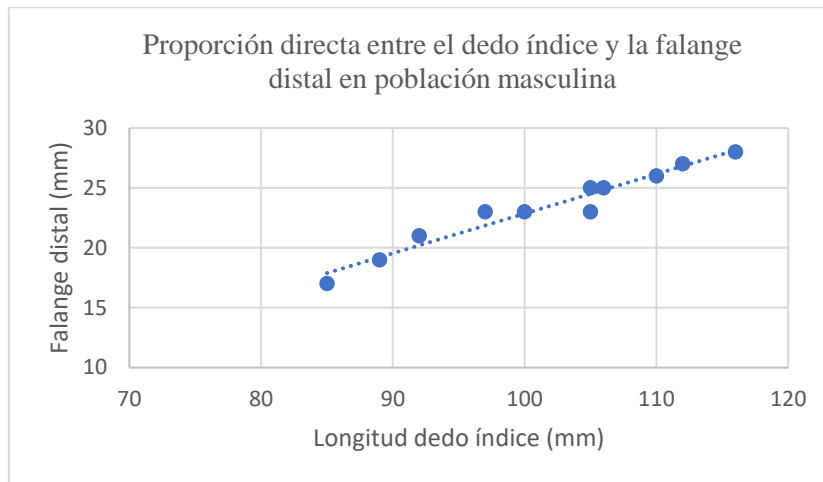


Imagen 16. Proporción directa entre el dedo índice y la falange distal en población masculina. Elaboración propia

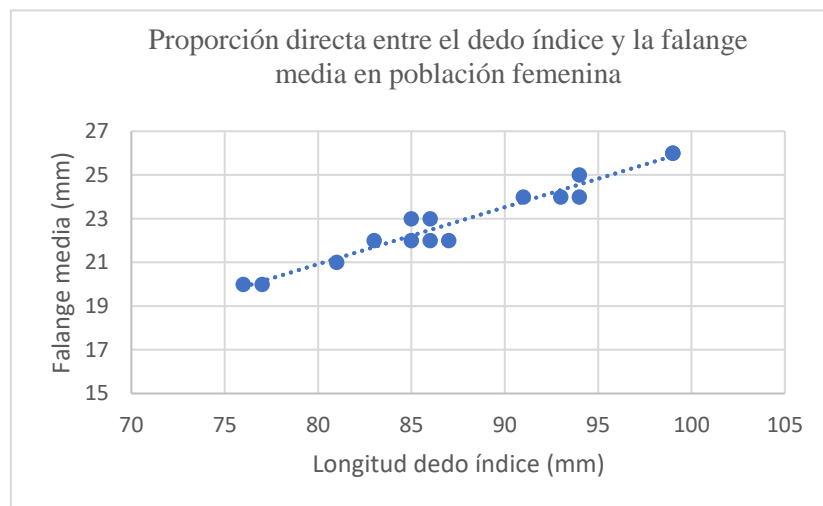


Imagen 17. Proporción directa entre el dedo índice y la falange media en población femenina. Elaboración propia

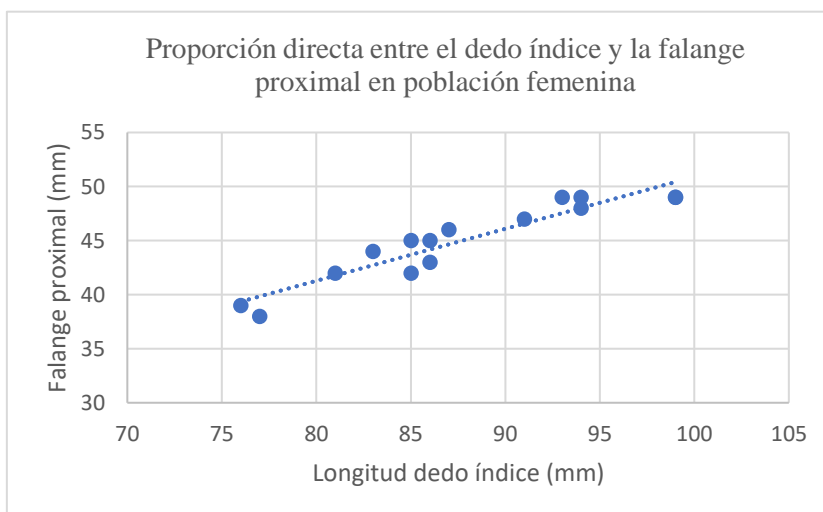


Imagen 18. Proporción directa entre el dedo índice y la falange proximal en población femenina. Elaboración propia

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

Es posible establecer una relación lineal entre las longitudes de las falanges y la medida total del dedo índice estudiado en cuestión. Tras esta conclusión y para agilizar el proceso de diseño, se consigue una relación porcentual entre la longitud total del dedo y cada una de las falanges en función del género.

Además de la comparación anatómica, se analizan mediante gráficas obtenidas con los datos medidos de la trayectoria angular, los rangos de movilidad de las articulaciones interfalángicas proximal y distal y la yema del dedo.

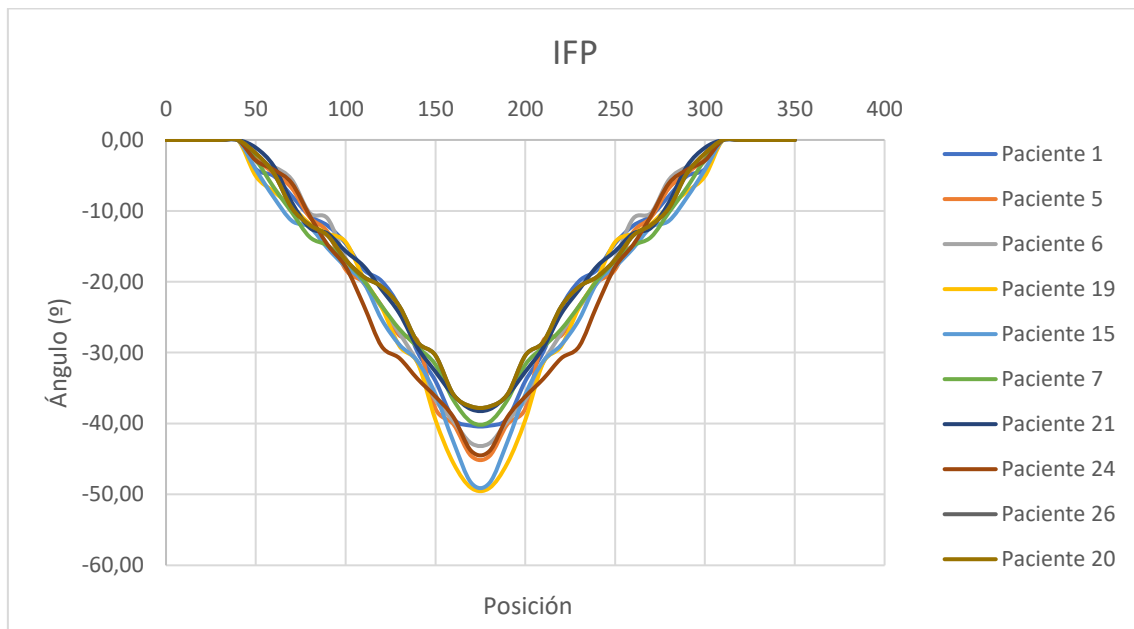


Imagen 19. Trayectoria angular articulación IFP. Elaboración propia

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

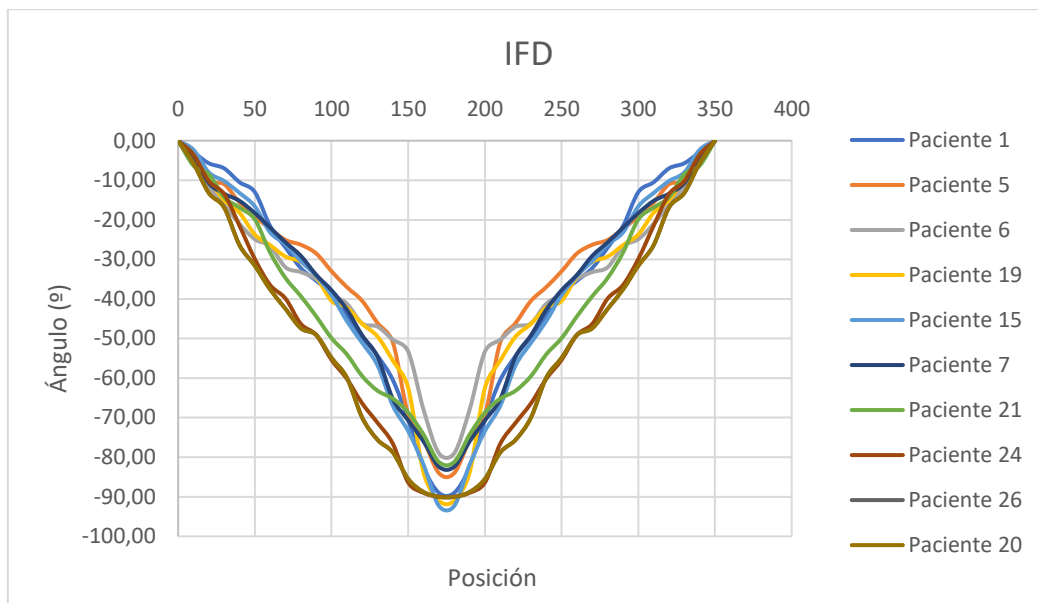


Imagen 20. Trayectoria angular articulación IFD. Elaboración propia

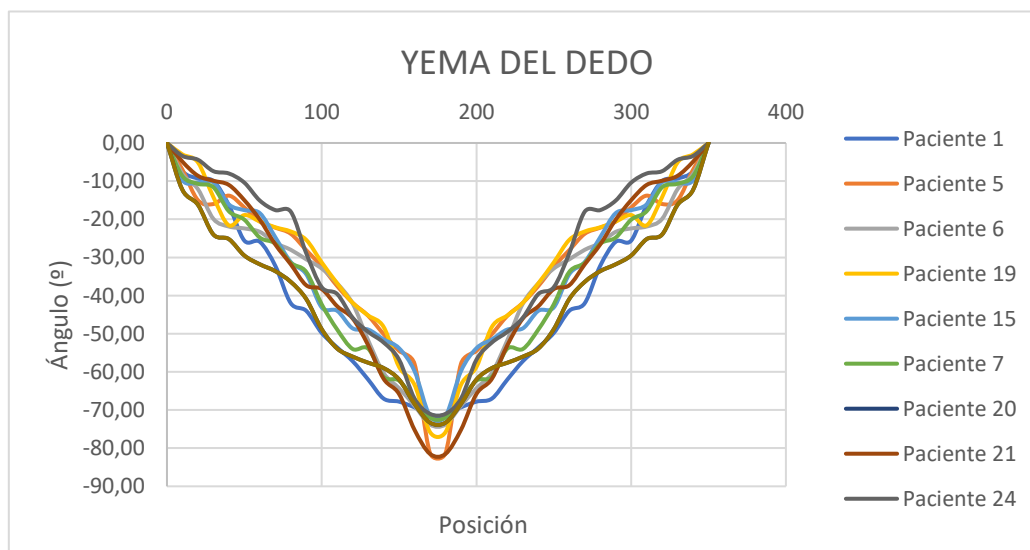


Imagen 21. Trayectoria angular de la yema del dedo. Elaboración propia

Se observa que independientemente del sexo, edad, peso o longitud de las falanges, la trayectoria descrita es exactamente igual en cada una de las situaciones, con la diferencia en la existencia de un ligero desfase en el comienzo del movimiento de la falange proximal por lo que se puede trabajar con seguridad sobre la línea de tendencia que describe cada una de ellas tal y como se observa en la siguiente gráfica:

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

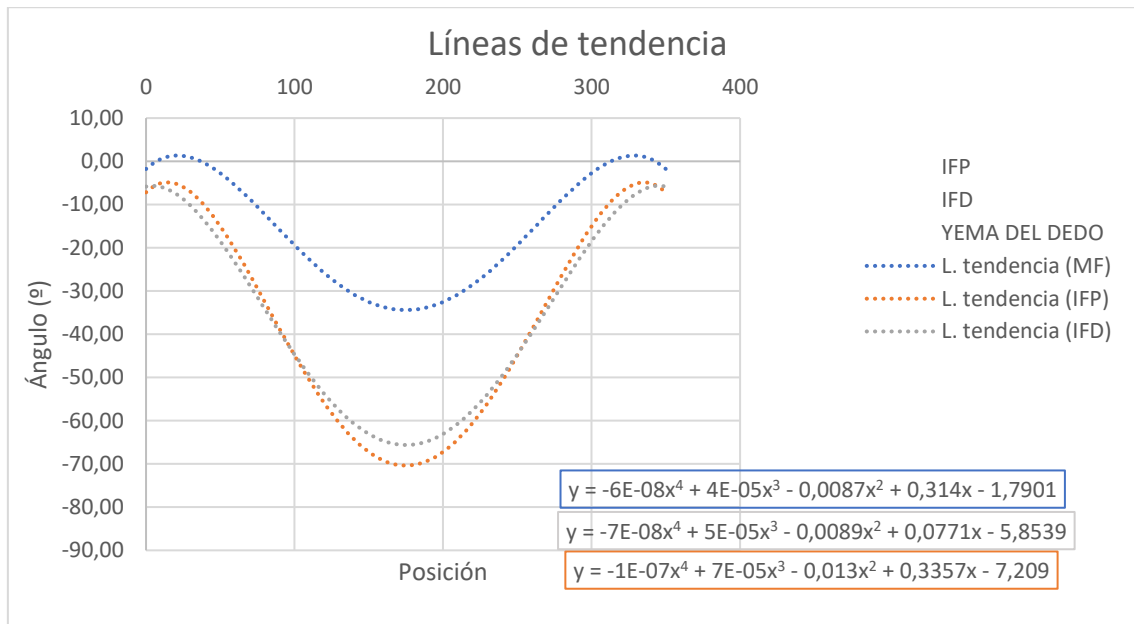


Imagen 22. Líneas de tendencia. Elaboración propia

Con esto se concluye que el diseño además de cumplir relaciones de proporcionalidad a nivel longitudinal también conserva relación en las trayectorias de movimientos por lo que un mismo exoesqueleto deberá servir para todo el rango de pacientes estudiado.

A partir de estas conclusiones, el siguiente paso consistirá en la búsqueda de un mecanismo válido para todos los individuos que cumpla con todos los análisis y resultados obtenidos en este estudio.

5.4 Directrices estudio ergonómico

En todo diseño basado en la biomecánica es de vital importancia el análisis del funcionamiento y limitaciones mecánicas de las estructuras con las que se va a trabajar para la obtención de un rendimiento máximo.

La ergonomía biomecánica además de fundamentarse en conocimientos de medicina, fisiología, antropometría y antropología se dedica al estudio del cuerpo humano por medio de la biología y medicina clásica.

En el presente proyecto se ha diseñado un exoesqueleto para el dedo índice de la mano capaz de satisfacer las tareas que componen las fases de rehabilitación del paciente sin riesgo de lesiones. Previo a dicho diseño, se ha realizado un exhaustivo del dedo y las articulaciones involucradas en su movimiento.

5.4.1 Estudio arquitectura de la mano

Al igual que los rangos de movilidad, las propiedades antropométricas de los dedos son necesarias para el análisis estático y dinámico de los mismos. Es importante el estudio de la arquitectura de la mano y situación de reposo para poder diseñar un exoesqueleto que, unido a la férula de la mano diseñada previamente no provoque ningún estado de tensión sobre los músculos tendinosos para asegurar una correcta recuperación de la movilidad del dedo lesionado.

Cuando los dedos se separan o aproximan voluntariamente, el eje de cada uno de ellos no es paralelo, sino que convergen en un mismo punto. En cambio, cuando se deja que los dedos adopten una posición natural estos están separados entre sí, pero sus ejes no convergen en el mismo punto. Los tres últimos dedos de la mano (corazón, anular y meñique) son paralelos mientras que el segundo dedo índice (dedo objeto de estudio en este proyecto) diverge ligeramente. Esta divergencia ha sido tomada en cuenta a la hora del diseño del soporte del exoesqueleto tal y como se muestra en la figura:

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

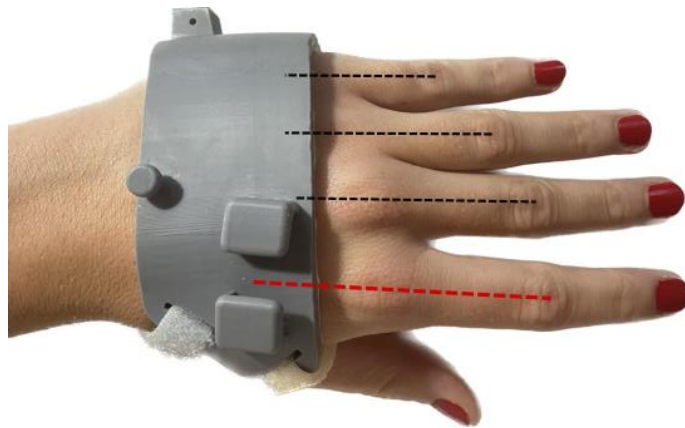


Imagen 23. Visualización paralelismo dedos. Elaboración propia

Debido a que el exoesqueleto se coloca apoyado sobre el dedo, es muy importante tener en cuenta que el centro de las articulaciones interfalángicas se encuentra en el plano medio de este. Esta distancia es importante tenerla en cuenta en el proceso de diseño ya que se restará en el eje Y a la distancia correspondiente de cada punto obtenido en el mecanismo de *WinMecc*.



Imagen 24. Visualización ubicación articulaciones del dedo. [17]

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

5.4.1 Análisis de movimiento

La goniometría es la disciplina que se encarga de la medición y en la medicina, la técnica empleada para la medición de los ángulos interfalángicos en los movimientos de flexo-extensión.

Su objetivo principal dentro de este proyecto es el de evaluar la posición en que se encuentra una articulación en el espacio. Permite valorar y cuantificar de manera objetiva tanto la pérdida de movilidad como la amplitud del arco del movimiento en todos los planos del espacio. Se trata de un procedimiento estático.

La función prensil de la mano es la que permite agarrar un objeto y también sostenerlo. Para realizar una correcta toma de medidas es importante definir el tipo de agarre ya que determinará la trayectoria seguida por el dedo. Existen dos tipos de agarre: agarre de fuerza y agarre de precisión [18].

El agarre de precisión se caracteriza por el uso casi exclusivo de los dedos índice y corazón que forman una pinza con el pulgar y se emplea para la manipulación de pequeños objetos. En cambio, el agarre de fuerza implica la palma de la mano y los dedos en la acción y será la estudiada para el proceso de rehabilitación.

Los tipos de agarre de fuerza son:

- Agarre simple: la mano se adapta a la forma del objeto los cuales son normalmente de tipo esférico. (Sujeción de objetos como una manzana o pelota).
- Agarre circular: la mano rodea al objeto y se cierra completamente a su alrededor con la ayuda de los dedos. (Manejo de martillo). Este será el tipo de agarre estudiado.

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

- Agarre transversal: aporta precisión al colocar el pulgar alineado con el eje longitudinal del objeto de forma que se tiene control sobre la dirección en que se aplica la fuerza.

Seleccionado ya el tipo de agarre, se procede a la toma de medidas angulares de las articulaciones interfalángicas. En este caso, en lugar de un goniómetro se empleará la ayuda del software *Kinovea*.

Se valorarán los datos de mediciones del ROM con la herramienta goniómetro para el diseño del exoesqueleto.

En primer lugar, se mide el ROM de la flexión de la articulación falángica proximal del dedo índice de la mano. Para su valoración, se coloca el antebrazo y la mano en posición neutra sobre una superficie plana. Se sitúa el fulcro del goniómetro sobre la cara dorsal de la cabeza de la primera falange (proximal) y el brazo fijo sobre su eje longitudinal, mientras el brazo móvil se sitúa en el eje longitudinal de la segunda falange (media) [19].

Como se observa en las siguientes capturas se parte de la posición 0 de extensión de la IFP en 0°. La flexión del dedo índice de la IFP a partir de esta posición es de 115° llegando a un máximo de 120° (ROM) cuando se ejerce una fuerza sobre éste.

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

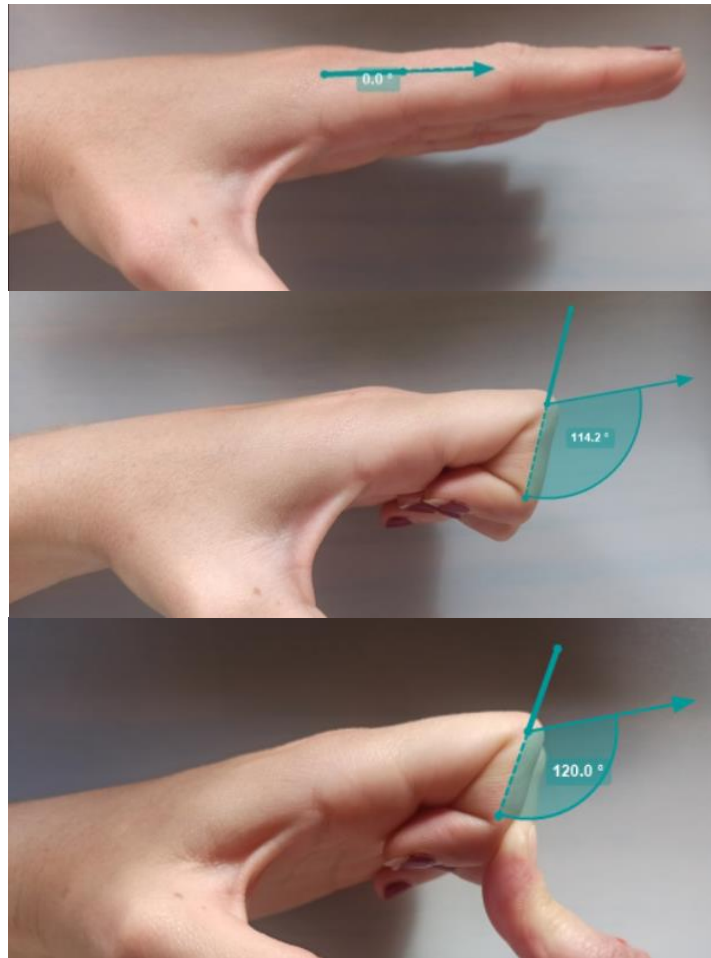


Imagen 25. Flexión interfalángica proximal: Posición 0 (1); flexión IFP (2); flexión máxima IFP (3). Elaboración propia

A continuación, valoramos el ROM de la flexión de las articulaciones falángicas distales y se comprueba si se cumple también en esta articulación. Para esta medición, el fulcro del goniómetro se coloca sobre la cara dorsal de la cabeza 2^a falange y el brazo fijo sobre su eje longitudinal mientras que el brazo móvil se coloca sobre la cara dorsal de la 3^a falange.

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

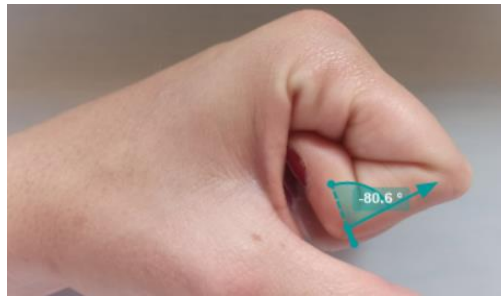


Imagen 26. Flexión articulación interfalángica distal (IFD). Elaboración propia



Imagen 27. Flexión articulación metacarpofalángica (MF). Elaboración propia

Hay que tener en cuenta para el paciente también las posiciones de las falanges estudiadas en situación de reposo.

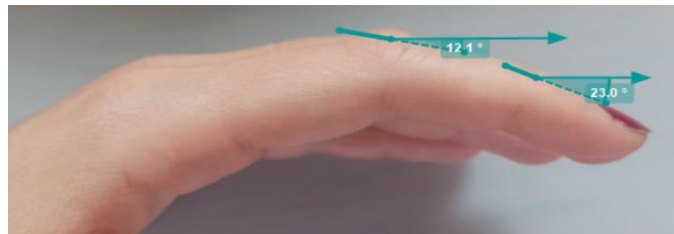


Imagen 28. Articulaciones IFP e IFD en estado de reposo. Elaboración propia

Resumen ROM:

	FLEXIÓN (°)	EXTENSIÓN (°)
Posición de partida	0	0
Reposo	10 ° - 25 °	0
Interfalángica proximal (IFP)	110 ° - 120 °	0
Interfalángica distal (IFD)	80 ° - 90 °	0
Metacarpofalángica (MF)	90 ° - 100 °	20°

Tabla 4. Resumen del ROM de las articulaciones interfalángicas. Elaboración propia

6. Concepción del mecanismo

Para la obtención de las variables de diseño que definen el mecanismo, se ha utilizado el algoritmo evolutivo MUMSA (Málaga University Mechanism Synthesis Algorithm, Algoritmo de Síntesis de Mecanismos de la Universidad de Málaga). Gracias a esta herramienta se podrán obtener las dimensiones y posiciones de las barras que constituyen el mecanismo.

Para empezar a trabajar con el algoritmo, se establecerán unos límites superior e inferior. Las cotas de dichos valores se encontrarán dentro de un amplio rango, el cual se irá estrechando una vez que se encuentre el primer mecanismo base. Este mecanismo deberá encajar con las características necesarias tanto para su correcto funcionamiento como para su posibilidad de ser diseñado físicamente. Se ha de tener en cuenta que estos son simplemente valores con los que trabaja el algoritmo, por lo que es posible la obtención de mecanismos no válidos.

6.1 Datos de entrada y variables de diseño

El mecanismo buscado está constituido por 8 eslabones que reproducirán el movimiento del dedo índice.

En la siguiente imagen se muestra un prototipo de mecanismo donde se señalan todas las variables de diseño obtenidas gracias al algoritmo definidas sobre el mismo:

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

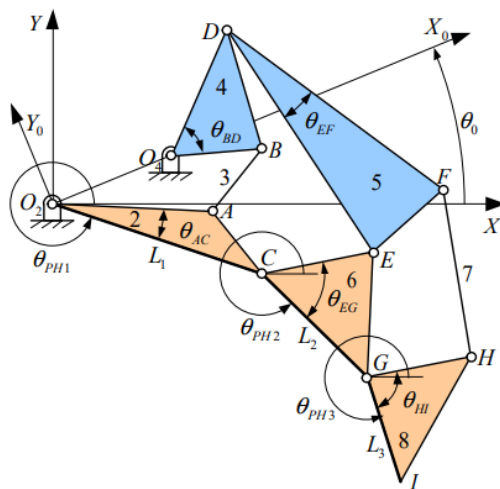


Imagen 29. Mecanismo propuesto con las variables de diseño definidas sobre el mismo. [20]

Las variables L_1 , L_2 y L_3 corresponden a las longitudes de las falanges proximal, media y distal respectivamente; el apoyo O_2 el centro de rotación de la articulación MF; y los puntos C y G a las articulaciones IFP e IFD respectivamente. El eslabón 2 se ha considerado como eslabón de entrada y junto con el 6 y 8 han de moverse de manera solidaria con las falanges.

Se recogen en una tabla las variables de diseño señaladas sobre la Imagen 29:

Variable	Descripción
θ_0	Posición angular del eslabón 1
r_1	Longitud del eslabón 1 (O_2O_4)
r_2	Longitud del eslabón 2 (O_2A)
r_3	Longitud del eslabón 3 (AB)
r_4	Longitud del eslabón 4 (O_4B)
θ_{AC}	Ángulo $\widehat{AO_2C}$
r_D	Longitud del segmento O_4D
θ_{BD}	Ángulo $\widehat{BO_4D}$
r_5	Longitud del eslabón 5 (DE)
r_6	Longitud del eslabón 6 (CE)
r_{DF}	Longitud del segmento DF
θ_{EF}	Ángulo \widehat{EDF}
θ_{EG}	Ángulo \widehat{ECG}
r_7	Longitud del eslabón 7 (FH)
r_8	Longitud del eslabón 8 (GH)
θ_{HI}	Ángulo \widehat{HGI}

Tabla 5. Variables de diseño del mecanismo. Elaboración propia

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

Para conseguir estas variables de diseño es necesario conocer tanto las longitudes de las falanges como los valores de la trayectoria angular de las articulaciones. Estos valores se han obtenido de 16 posiciones sacadas de la trayectoria que describen las líneas de tendencia obtenidas en la Imagen 22.

Variable	Descripción
θ_{PH1}	Posición angular de la falange proximal
θ_{PH2}	Posición angular de la falange media
θ_{PH3}	Posición angular de la falange distal
L_1	Longitud de la falange proximal
L_2	Longitud de la falange media
L_3	Longitud de la falange distal

Imagen 30. Datos de entrada. Elaboración propia

Los datos optimizados para el diseño del exoesqueleto se muestran a continuación:

MF	IFP	IFD
0,00	-10,70	-10,70
0,00	-13,40	-11,60
0,00	-15,20	-17,90
-2,80	-18,30	-20,10
-6,70	-22,00	-24,80
-10,20	-25,70	-26,40
-13,70	-29,10	-31,40
-14,90	-33,90	-33,80
-17,10	-37,80	-42,30
-19,80	-42,70	-48,90
-23,40	-49,20	-54,00
-26,70	-54,60	-53,90
-29,20	-65,30	-61,30
-31,70	-70,70	-62,30
-36,70	-76,00	-67,40
-39,8	-82,4	-72,00

Tabla 6. Medidas de las 16 posiciones de las trayectorias angulares descritas por las líneas de tendencia. Elaboración propia

Como el objetivo del exoesqueleto es el de ser viable para cualquier persona, es indiferente el valor de longitudes de las falanges con las que se trabaje como variable de entrada siempre y cuando se encuentre dentro los límites máximos y mínimos recogidos en la Tabla 2.

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

6.2 Selección del mecanismo

Se generaron una serie de mecanismos con un número de 10000 iteraciones y admitiendo únicamente valores de errores por debajo de 0.5. Con las variables de salida obtenidas con el algoritmo se han ido presentando gran variedad de mecanismos, pero con distintas soluciones no viables: algunos no describían correctamente la trayectoria definida dentro del rango de ROM necesario; otros rompían en determinadas posiciones dentro del rango de movimiento; en la mayoría se cruzaban eslabones entre O_2 y O_4 por lo que a nivel de diseño no era posible, etc.

El mecanismo final obtenido con un error de 0,338713 es el que se muestra a continuación:

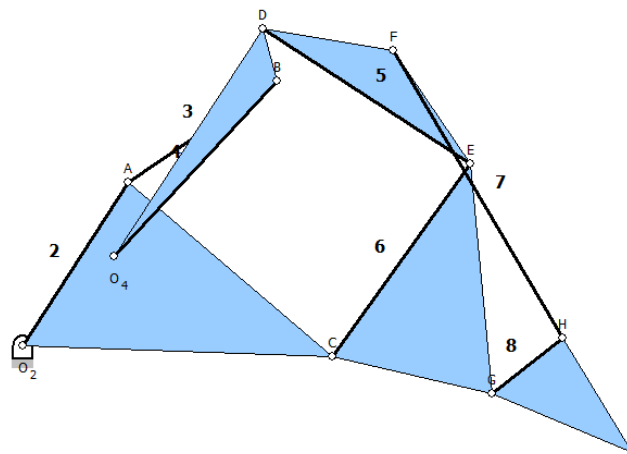


Imagen 31. Esquema del mecanismo final del dedo índice. Elaboración propia

Para comprobar que efectivamente el mecanismo se puede utilizar para ser parametrizado, se han comparado las diferencias entre las posiciones angulares de las falanges de los dedos de varios pacientes durante el movimiento de flexión del dedo y las posiciones angulares equivalentes del mecanismo.

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

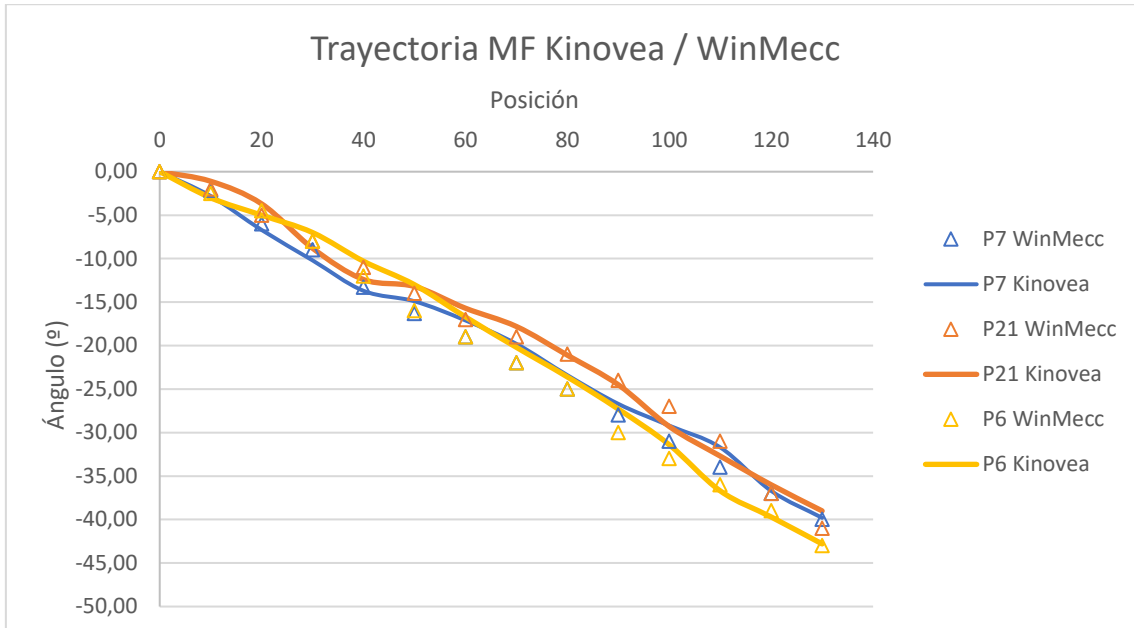


Imagen 32. Ángulos de la articulación MF medidos en Kinovea frente a los descritos por el mecanismo. Elaboración propia

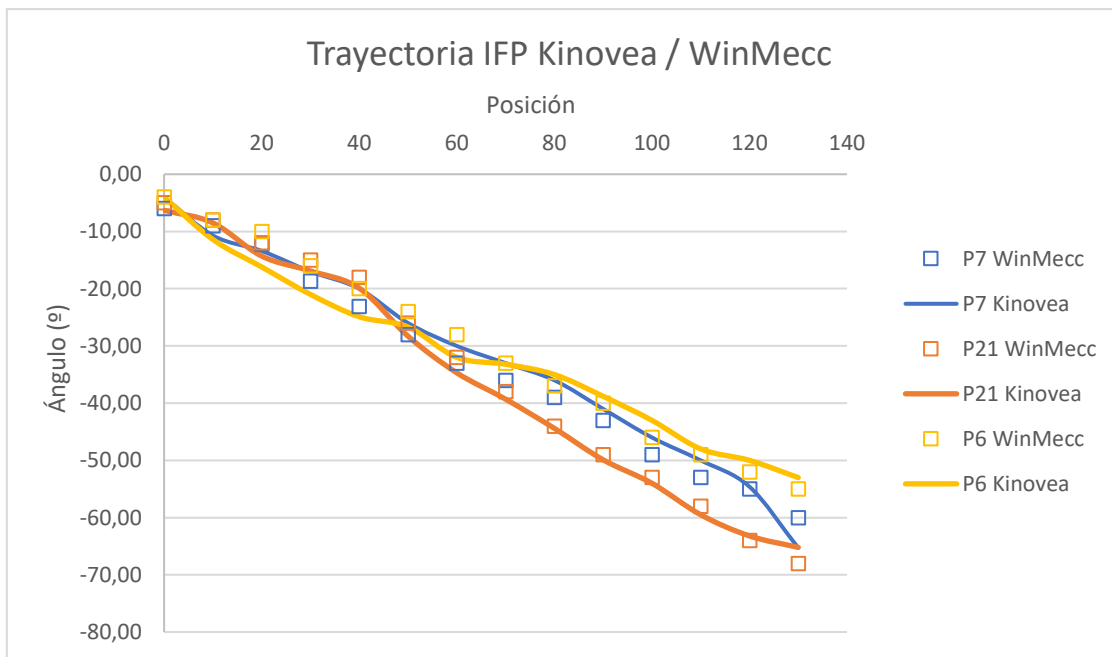


Imagen 33. Ángulos de la articulación IFP medidos en Kinovea frente a los descritos por el mecanismo. Elaboración propia

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

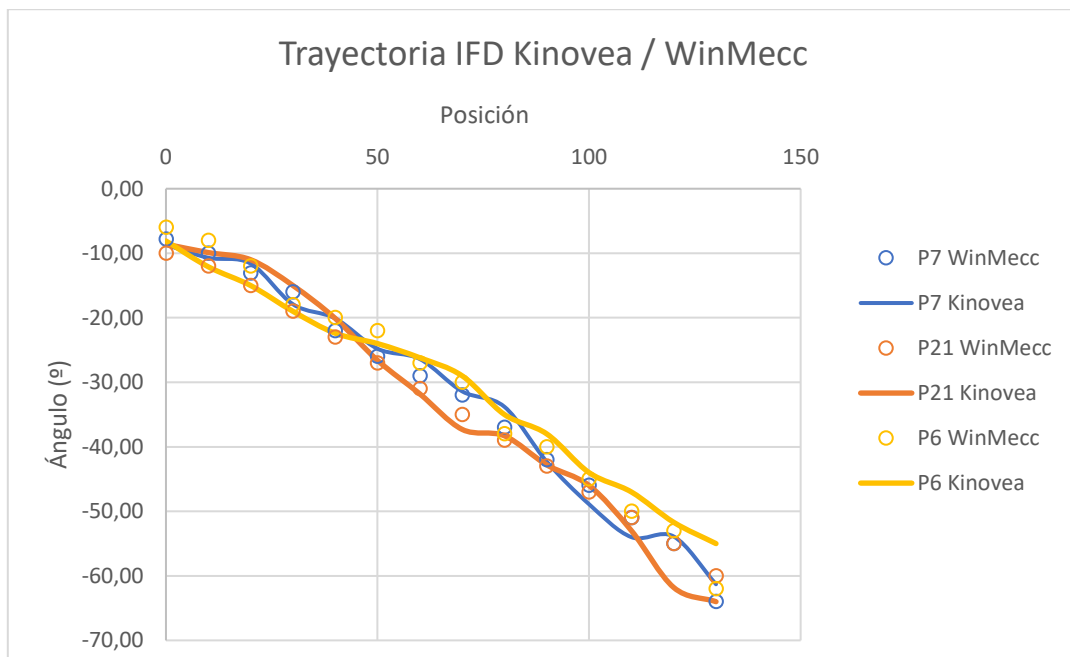


Imagen 34. Ángulos de la articulación IFD medidos en Kinovea frente a los descritos por el mecanismo.
Elaboración propia

Se puede concluir observando estas gráficas que la desviación entre trayectorias es mínima por lo que no genera un problema y el mecanismo es completamente viable, en consecuencia, se procede a su diseño.

7. ESTUDIO ERGONÓMICO

7.1 Objetivos ergonómicos

Un diseño ergonómico es aquel que ha sido creado para la interacción entre producto y usuario de manera eficiente y segura. Es necesario el uso de equipamientos adecuados para evitar lesiones causadas por posturas incorrectas. Partiendo de estas premisas, se establecen las características que debe poseer el exoesqueleto:

- **Seguridad:** la piel del paciente está protegida de roces por contacto directo con el material usando un tipo de material suave, almohadillado y poroso para su correcta transpiración. Además, se han redondeado todas las aristas del diseño para evitar posibles cortes y/o arañazos.
- **Diseño:** además de ser atractivo visualmente gracias a las líneas curvas que conforman el diseño, gracias a los estudios fisiológicos y antropométricos realizados el exoesqueleto sigue correctamente la trayectoria seguida por el dedo por lo que evita tensiones causadas por problemas posturales.
- **Material:** gracias al uso de una impresora 3D el material es extremadamente ligero, ofreciendo un producto muy ligero a la par que cumple con sus características mecánicas. Esto permitirá su uso durante tiempos prolongados sin ocasionar molestias al paciente.

7.2 Parametrización del diseño

Para optimizar la experiencia producto-usuario y obtener resultados óptimos tras el proceso de rehabilitación, se ha realizado un diseño del exoesqueleto que se ajusta a las características antropométricas del paciente. Los valores parametrizables son los correspondientes a los seleccionados como principales en el proceso de toma y recogida de datos.

Estos valores conformarán las variables globales con las que se trabajarán en SolidWorks. A continuación, se muestra el proceso de parametrización de cada una de las piezas:

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

Apoyo sobre falange distal, media y proximal:

En estas piezas, los valores parametrizables son la anchura de los dedos a la altura media de cada una de las falanges y la longitud de las mismas.

Los valores parametrizados son:

- “B3”: véase en la Imagen 55.
- “D”: véase en la Imagen 54.

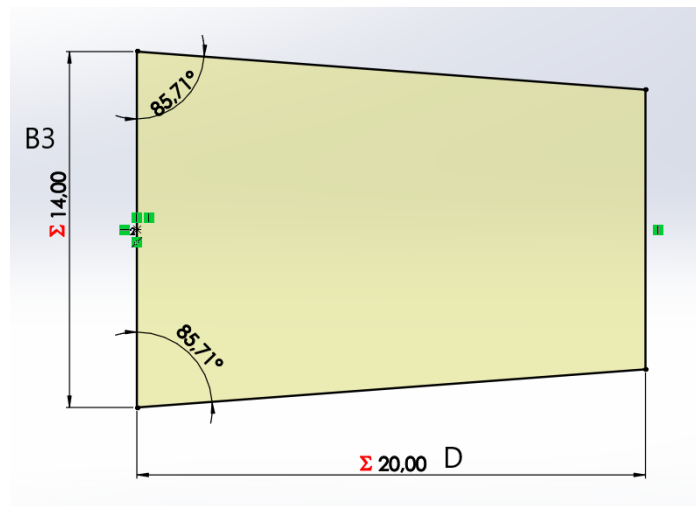


Imagen 35. Parametrización apoyo sobre falange distal. Elaboración propia.

Gracias a la ligera curvatura dada junto con el espesor del almohadillado, se garantiza una sujeción cómoda. Además, a las longitudes de las falanges se le ha restado el espacio necesario para dejar libre la zona de las articulaciones interfalángicas.

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

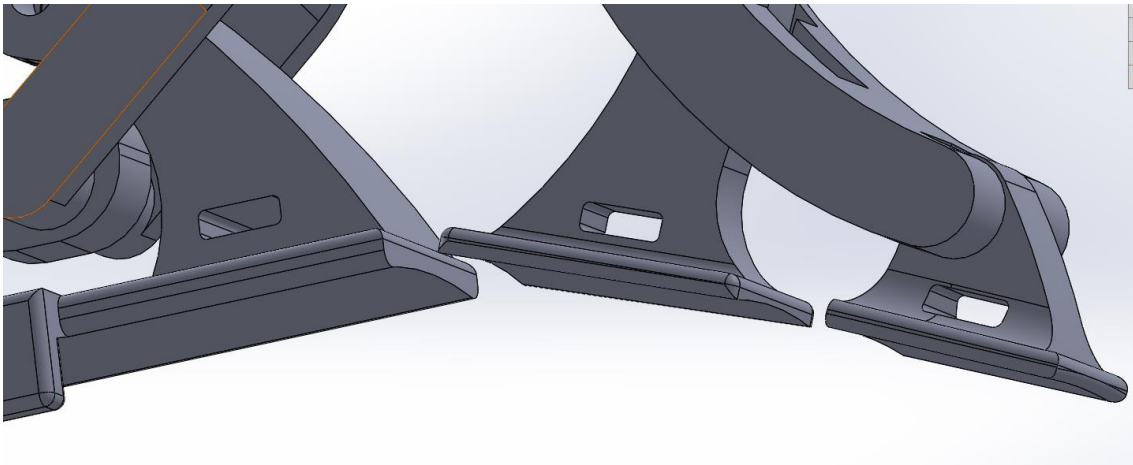


Imagen 36. Vista curvatura y huecos libres para las articulaciones interfalángicas. Elaboración propia.

Además, en los diseños de estas tres piezas específicamente se ha de tener en cuenta que van apoyadas sobre los dedos y las articulaciones IFP (punto C) e IFD (punto G) están a media altura tal y como se ha explicado en la Imagen 24. Por lo tanto, suponiendo una media de 1 cm de espesor de los dedos, se ha reducido en 5 mm la altura de la coordenada “y” de los puntos “A”, “E” y “H” pertenecientes a estas piezas.

Eslabones

El diseño de los mismos se realizará parametrizando los valores de posición (x,y) del mecanismo correspondiente al paciente de cada uno de los puntos que lo forman.

A continuación, se muestra un ejemplo de parametrización de la barra 7 del mecanismo que une los puntos F y H por los que los valores parametrizados son sus coordenadas (x,y).

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

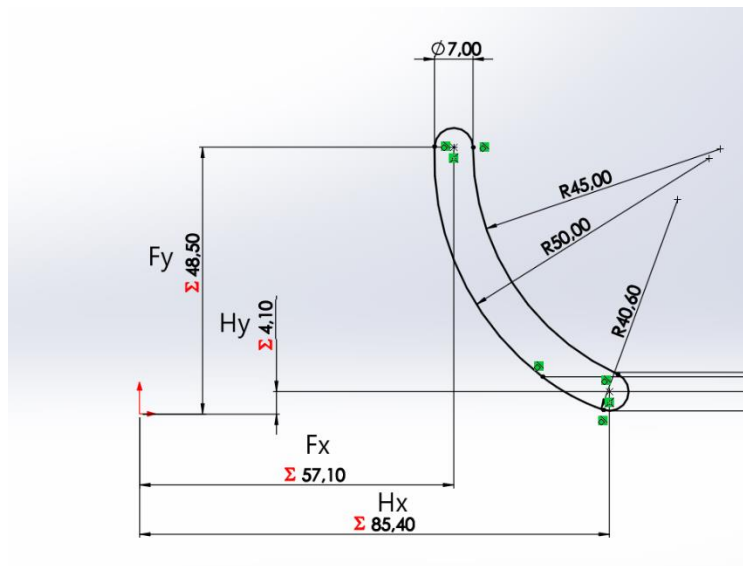


Imagen 37. Parametrización barra 7. Elaboración propia.

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

8. SOLUCIONES Y PROCESO VIRTUAL

8.1 Prototipado virtual

Tras un *brainstorming*, se detallaron las características principales que se buscaban en el producto y que se observarán en las capturas de los renders de ensamblajes realizados en SolidWorks: minimalismo y robustez.

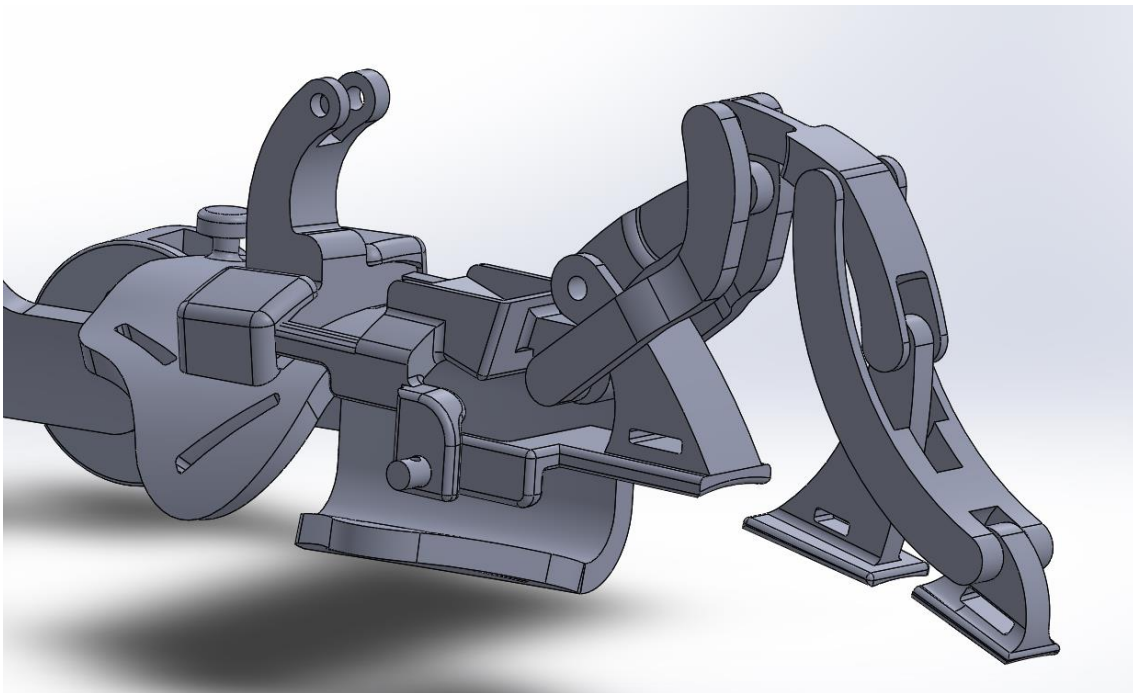


Imagen 38. Vista 1 prototipo virtual. Elaboración propia.

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

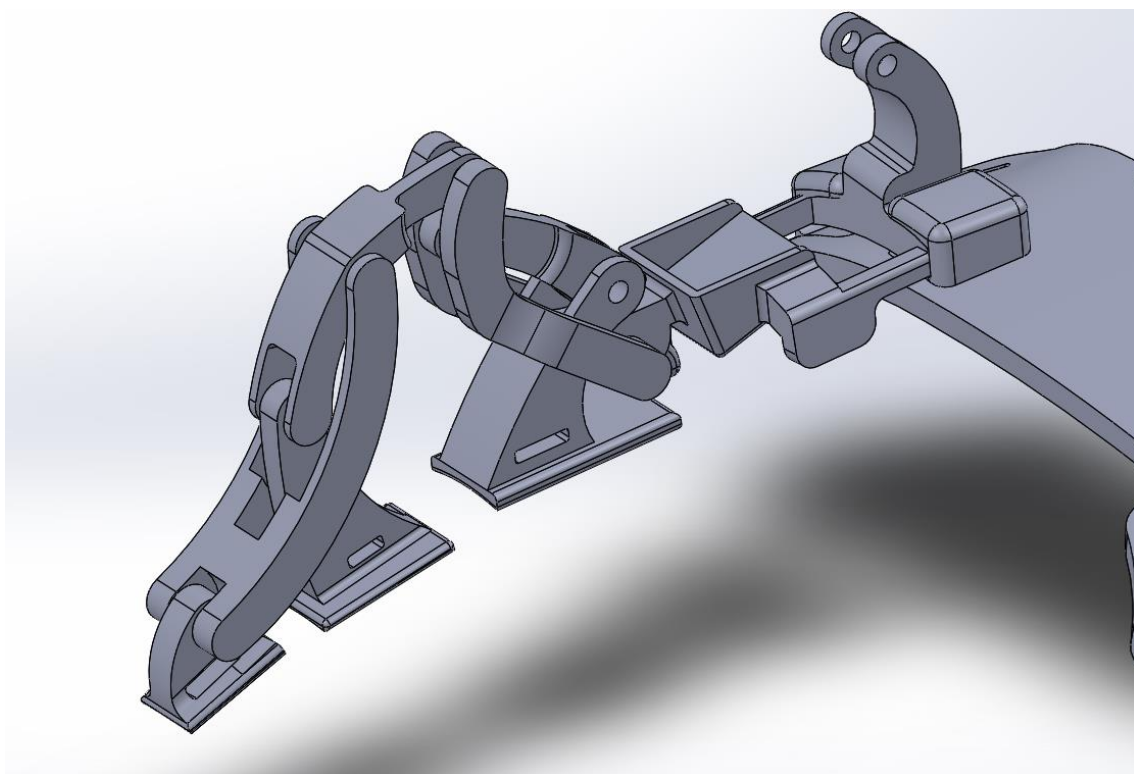


Imagen 39. Vista 2 prototipo virtual. Elaboración propia.

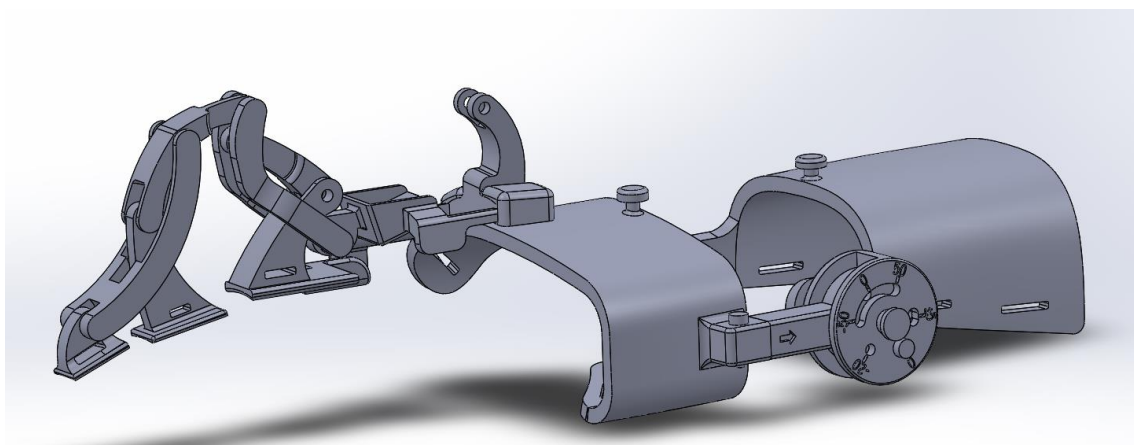


Imagen 40. Vista 3 prototipo virtual. Elaboración propia.

9. SOLUCIONES Y PROCESO FÍSICO

9.1 Preparación para la impresión 3D

Para la obtención física de la pieza, se ha empleado la impresora Phrozen Sonic Mini 4K, una impresora de tipo LCD que trabaja con resina líquida. Esta tecnología utiliza una fuente de luz ultravioleta que proviene de una matriz LED que brilla a través de una pantalla LCD que destella capas completas en el tanque de resina. Estas fuentes de luz inciden directamente en el área de construcción y de forma paralela, al iluminarse toda la pantalla a la vez, la luz se filtra por los bordes. La calidad de la capa depende de la resolución de la pantalla [21].

Las características de este tipo de impresión el diseño de piezas con buen acabado final y el uso de formas y ensamblajes complejos con pequeñas tolerancias. Estos motivos junto con el bajo coste de la resina hacen de la impresora ideal para este proyecto donde se busca un producto de bajo coste, resistente, atractivo y ergonómico.

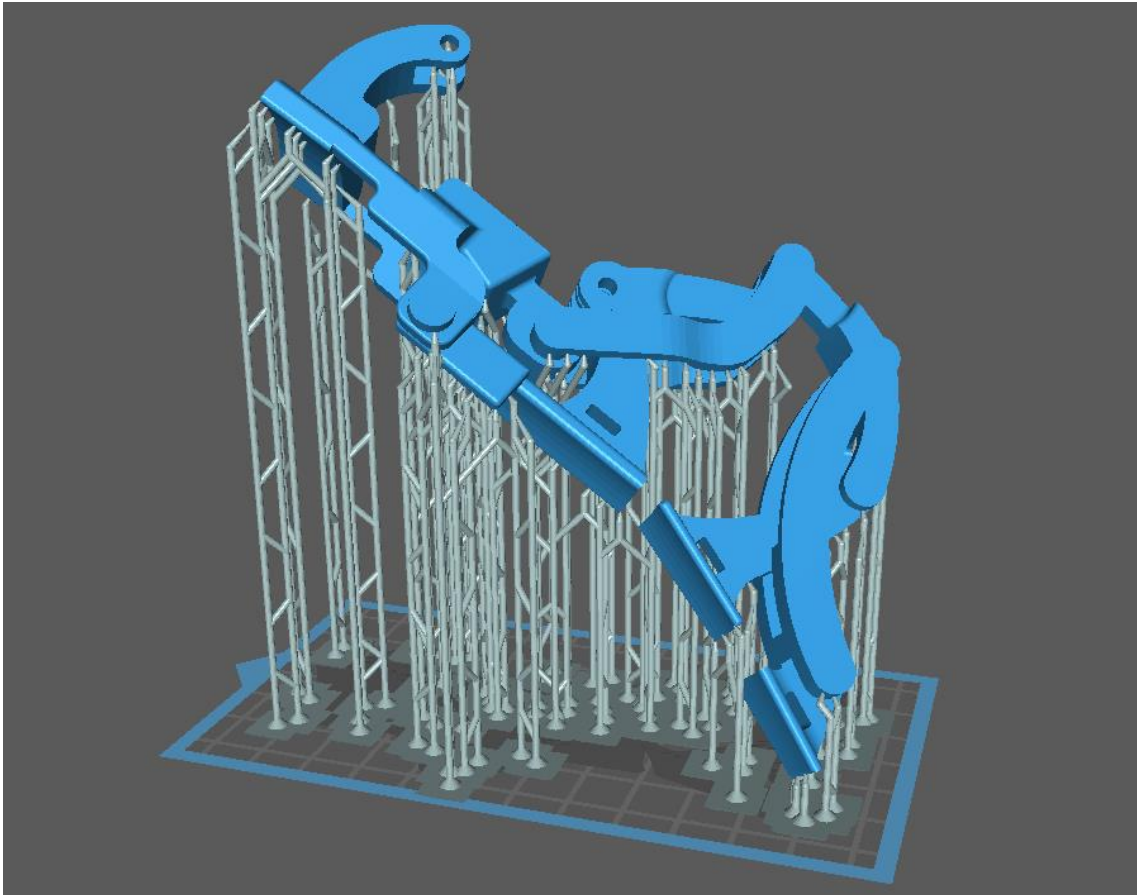
El software que se ha empleado para la creación del archivo que se necesita para ejecutar la impresión se denomina Chitubox. Este software permite fijar los parámetros que se necesitan para una correcta impresión del producto en función de sus características geométricas. Tras su correcta definición se genera un fichero de tipo .ctb el cual la impresora lee y ejecuta tras introducirle mediante una tarjeta de tipo USB.

Para trabajar con Chitubox, se deben exportar los archivos generados en SolidWorks a un archivo de tipo .STL. Una vez abierto el archivo en el programa, lo primero que se ha realizado es colocar el ensamblaje de la manera más óptima posible para que la generación de bases y soportes se entrecrucen lo mínimo posible con las zonas donde las tolerancias son muy pequeñas. Para esto se le ha dado una considerable inclinación de forma que la impresora de resina trabajará mejor.

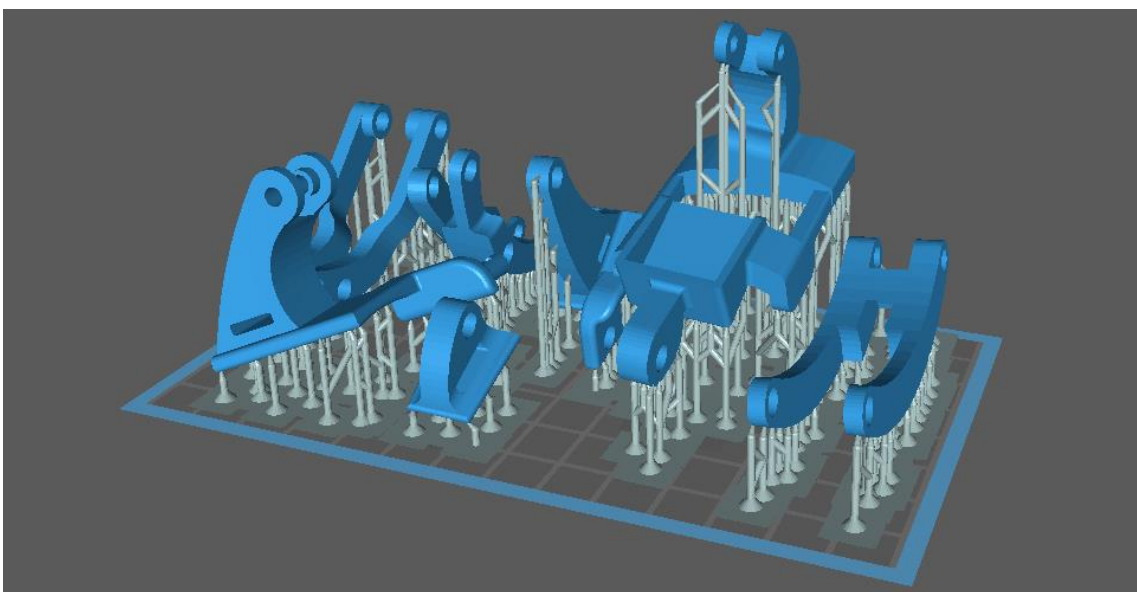
Tras todo lo especificado, la primera impresión ha quedado configurada tal y como se muestra en la siguiente imagen.

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA



*Imagen 41. Preparación del archivo de impresión en Chitubox, posición del exoesqueleto ensamblado.
Elaboración propia.*



*Imagen 42. Preparación del archivo de impresión en Chitubox, posición del exoesqueleto por partes.
Elaboración propia.*

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

El post-procesamiento del exoesqueleto una vez impreso se resume paso a paso en la imagen que se muestra a continuación:

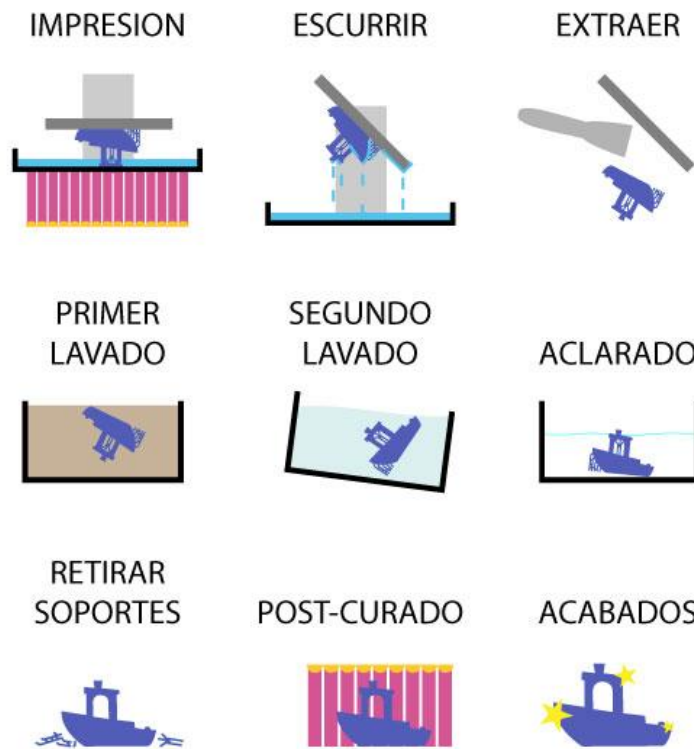


Imagen 43. Procesos y accesorios para la impresión con resina. [21]

9.2 Pruebas prototipado

En primer lugar, se realizó una prueba de impresión del ensamblaje completo:



Imagen 44. Primera impresión de prueba del prototipo físico. Elaboración propia.

El principal problema que surgió fue la obstrucción del movimiento de los ensamblajes por exceso de material sobrante (resina sólida). Ante este problema se replantearon dos opciones: realizar otra impresión nuevamente en la impresora de resina Phrozen Sonic Mini 4K donde, en lugar de imprimir el ensamblaje completo, se modificaría el diseño para poder imprimir cada pieza que lo conforma de manera independiente y ser ensamblada posteriormente mediante pernos y paralelamente imprimir el diseño original del ensamblaje completo en una impresora de mayor precisión y propiedad de la UMA ubicada en el parque tecnológico.

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA



Imagen 45. Vista de exceso de resina en el prototipo. Elaboración propia.

Además, para mejorar la experiencia del paciente, se ha optimizado el diseño de la pieza correspondiente al apoyo sobre la falange proximal dejando mayor espacio al saliente del nudillo y evitando roces directos sobre la piel.

9.3 Rediseño y prototipo final

Tras observar estos problemas se optó por dos opciones de impresión del exoesqueleto:

- Volver a emplear la impresora Phrozen Sonic Mini 4K, pero el exoesqueleto se imprimirá por partes las cuales se ensamblarán mediante pernos o tornillos.
- Emplear otra impresora de mayor calidad de precisión manteniendo el exoesqueleto como pieza única ya ensamblada. Para esta opción se aumentaron las tolerancias ya dadas en el diseño de la primera prueba.

La impresión de los elementos que componen el mecanismo por partes presenta una gran ventaja: la rotura de una de las piezas permite su sustitución de manera

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

individual, disminuyendo en gran medida su coste de reemplazo y los tiempos de espera que serían mínimos.

Se han obtenidos resultados muy satisfactorios tras elegir esta opción obteniendo un exoesqueleto limpio, resistente, seguro y muy ligero.

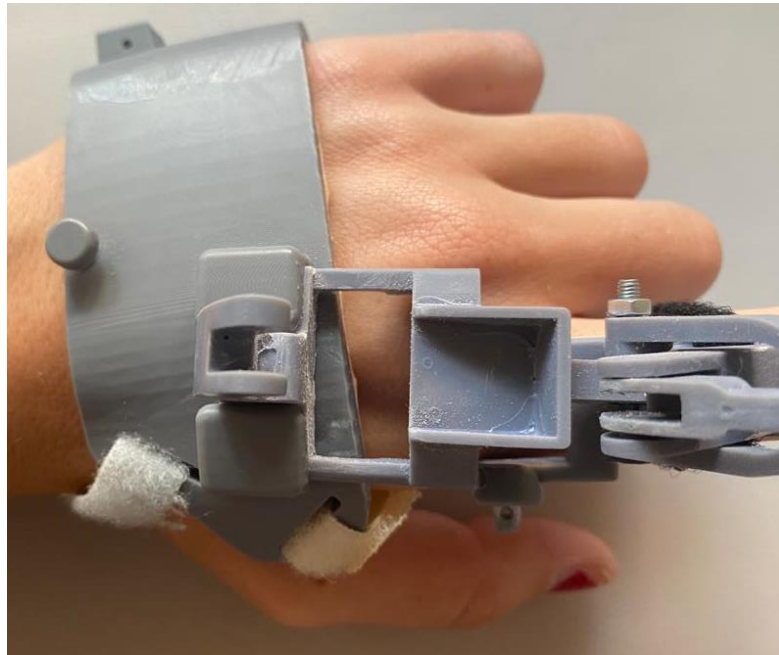


Imagen 46. Vista superior en detalle del espacio de ubicación del motor. Elaboración propia

Como bien puede apreciarse en la Imagen 46, el exoesqueleto una vez encajado en el soporte diseñado para el mismo, perteneciente a la pieza del agarre de la mano de la férula dinámica de muñeca se encuentra completamente alineado con el dedo en su posición natural, lo que asegurará una exitosa recuperación del paciente.

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA



Imagen 47. Ejemplo de posibilidad de uso de goma elástica para rehabilitaciones activas. Elaboración propia.

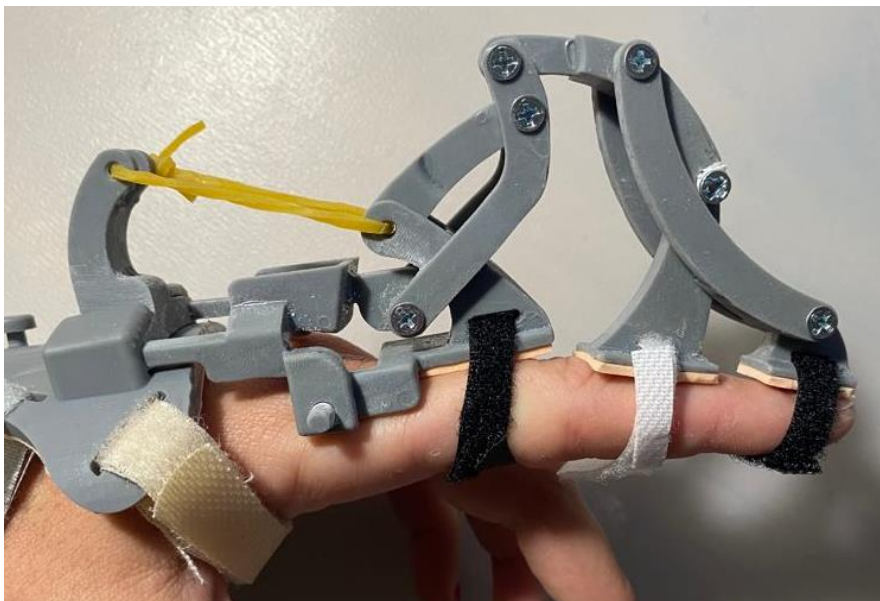


Imagen 48. Ejemplo 2 de posibilidad de uso de goma elástica para rehabilitaciones activas. Elaboración propia.

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

El motor lineal se integrará en el hueco que se observa y será ensamblado al exoesqueleto.



Imagen 49. Vista motor lineal encajado en el exoesqueleto. Elaboración propia.

10. CONCLUSIONES

Con el presente proyecto, se ha conseguido un producto innovador capaz de cubrir las necesidades del público objetivo: pacientes con necesidad de un producto sanitario de Clase I (aquel que entra en contacto únicamente con la piel intacta del individuo) capaces de hacer uso de los elementos mecánicos que dotan de dinamismo el exoesqueleto. Además, se puede afirmar que ha habido un gran avance con respecto a los proyectos anteriores ya que además de ser parametrizable, permite su uso en las fases de rehabilitación activa incluyendo una gomilla elástica.

Tras varios prototipados para optimizar el producto, se ha conseguido un diseño compacto y resistente, de gran ligereza gracias a la tecnología de fabricación aditiva empleada y muy agradable a la vista gracias a sus líneas curvas y su minimalismo en los elementos que componen el ensamblaje. Se han obtenido numerosas ventajas de las opciones de impresión realizadas: tanto en la división de elementos en el caso de ensamblado mediante pernos y ensamblado directo, el exoesqueleto es totalmente ecológico y sostenible, por lo que se puede afirmar que también se ha cumplido con el objetivo de ecodiseño.

Gracias a la técnica de diseño virtual CAD, el exoesqueleto es fácilmente parametrizable por lo que el tiempo de espera es mínimo y por tanto viable para situaciones de rehabilitación de tendones flexores para el cual está pensado principalmente. A pesar de este enfoque, su diseño permite su uso en múltiples tipos de lesiones tanto físicas como cognitivas.

Al no haber generación de residuos ni procesos intermedios, se minimiza el tiempo de producción, reduciendo aún más los costes y siendo respetuoso con el entorno frente a otros sistemas como la inyección.

11. LÍNEAS DE FUTURO

Lo primero a realizar, será comprobar la fiabilidad del exoesqueleto como producto médico realizando seguimientos detallados de la evolución presentada en cada una de las fases de la rehabilitación.

Una vez comprobada su viabilidad en el ámbito médico, el siguiente paso consistirá en la búsqueda de una impresora profesional que aporte tanto precisión como resistencia al exoesqueleto.

A nivel tecnológico, se podría conectar el motor empleado a una aplicación móvil capaz de regular la velocidad, longitud de empuje, tiempo de rehabilitación, alarmas de aviso, etc.

12. ANEXOS

12.1 Materiales

13.1.1 Información y especificaciones de la Resina TR300 de Phrozen

El material empleado para la impresión de la ortesis es una resina termorresistente para aplicaciones de alta temperatura denominada *Phrozen TR300 Ultra High Temp Resin*. Esta resina es un material ideal para el modelado conceptual, la creación de prototipos funcionales, las herramientas de fabricación y las piezas de uso final. Está especialmente desarrollado para impresoras 3D LCD de 405 nm y tan solo tarde 1,3 segundos en curarse cuando se imprime con una impresora de la serie Phrozen Sonic.



Imagen 50. Resina empleada para la impresión 3D. [22]

A continuación, se mencionan todas las propiedades de la resina TR300 de Phrozen, empleadas en la personalización de características del material en el análisis estructural realizado con SolidWorks.

- Viscosidad: 160 cps a 250 °C.
- Densidad: 1,1 g / cm³.
- T_g: 220 °C.

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

- Alargamiento por tracción a la rotura: 2%.
- Resistencia al desgarro: 32 MPa.
- Módulo de tracción: 1850 MPa.
- Dureza superficial: Shore 80D.
- Dureza: 5H (a 500g de carga).
- Resistencia al impacto con muescas IZOD: 8 KJ / m².

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

13.1.2 Información y especificaciones del plastazote autoadhesivo

El material seleccionado de entre los disponibles en el mercado para proteger la piel del paciente frente a los posibles roces o incomodidades del contacto directo con la férula es el plastazote. Es reconocido como el material de espuma termoplástica más citado en la literatura médica por sus características hipoalergénicas y alto confort [23].

Las propiedades de la espuma de plastazote son:

- Espuma de polietileno termodeformable a 160° - 180°.
- Peso específico 45kg/m³.
- Suministrable en colores: carne, blanco, rojo y azul.
- Inoloro.
- No tóxico.
- Altamente resistente a ungüentos y lociones.



Imagen 51. Plastazote perforado color carne. [24]

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

13.1.3 Información y especificaciones del velcro

Consistente en una tira de nylon con dos piezas, macho y hembra con adhesivo base acrílico.

Sus propiedades principales son las que se muestran a continuación:

Características.	Descripción.
Fuerza de adhesión.	8.0 p.i.w. al aluminio. 4.0 p.i.w. al vinil.
Rango de temperatura.	-18°C a 135°C (0°F a 275°F) al aluminio. -18°C a 66°C (0°F a 150°F) al vinil.

Imagen 52. Propiedades velcro. [25]



Imagen 53. Velcro. [25]

Se coserá a la cincha como método de fijación y ajuste en torno a los dedos para que sea regulada en función de la inflamación que presente el paciente en cada momento.

12.2 Ficha técnica del motor empleado

El motor empleado es el Firgelli PQ12. A continuación se adjunta su ficha técnica.



PQ12 Actual Size

Benefits

- Compact miniature size
- Precise position feedback
- Limit switches
- Simple control
- Low voltage
- Equal push/pull force
- Easy mounting

Applications

- Robotics
- Consumer appliances
- Toys
- RC vehicles
- Automotive
- Industrial Automation



Miniature Linear Motion Series · PQ12

Firgelli Technologies' unique line of Miniature Linear Actuators enables a new generation of motion-enabled product designs, with capabilities that have never before been combined in a device of this size. These tiny linear actuators are a superior alternative to designing your own push/pull mechanisms. Their low cost and easy availability make them attractive to hobbyists and OEM designers alike.

The PQ12 actuators are complete, self contained linear motion devices with position feedback for sophisticated position control capabilities, or end of stroke limit switches for simple two position automation. Driving them couldn't be easier, simply apply a DC voltage to extend the actuator, and reverse the polarity to retract it. Several gear ratios and voltage options are available to give you varied speed/force configurations.

PQ12 Specifications

Gearing Option	30:1	63:1	100:1
Peak Power Point	15N@15mm/s	30N @ 8mm/s	40N @ 6mm/s
Peak Efficiency Point	8N @ 20mm/s	12N@12mm/s	20N @ 8mm/s
Max Speed (no load)	28mm/s	15mm/s	10mm/s
Max Force (lifted)	18N	45N	50N
Max Side Load	5N	10N	10N
Back Drive Force	9N	25N	35N
Stroke	20 mm		
Input Voltage	6 or 12 VDC		
Stall Current	550mA @ 6V, 210mA @ 12V		
Mass	15g		
Operating Temperature	-10°C to +50°C		
Positional Repeatability	±0.1mm		
Mechanical Backlash	0.25 mm		
Audible Noise	55dB @ 45cm		
Ingress Protection	IP-54		
Feedback Potentiometer	5kΩ±50%		
Limit Switches	Max. Current Leakage: 8uA		
Maximum Duty Cycle	20%		

Basis of Operation

The PQ12 is designed to push or pull a load along its full stroke length. The speed of travel is determined by the load applied(see load curves). When power is removed the actuator will hold its position, unless the applied load exceeds the back drive force. Repeated stalling of the actuator against a fixed load will shorten the life of the actuator. Since application conditions (Environmental, loading, duty cycle, vibration, etc) vary so widely, we advise application specific testing to determine the expected life of the actuator.

Ordering

Small quantity orders can be placed directly online at www.firgelli.com. Each actuator ships with two mounting brackets, M3 mounting hardware, and one FPC ribbon cable connector. To extend the length of the ribbon cable you can purchase one of our PQ12 cable adapters and extension cable, or solder wires directly to the ribbon cable. Contact sales@firgelli.com for volume quotes and customization options for OEM's.



Firgelli Technologies Inc.

580 Stirling Lane
Victoria, BC, V8E 2A9
Canada

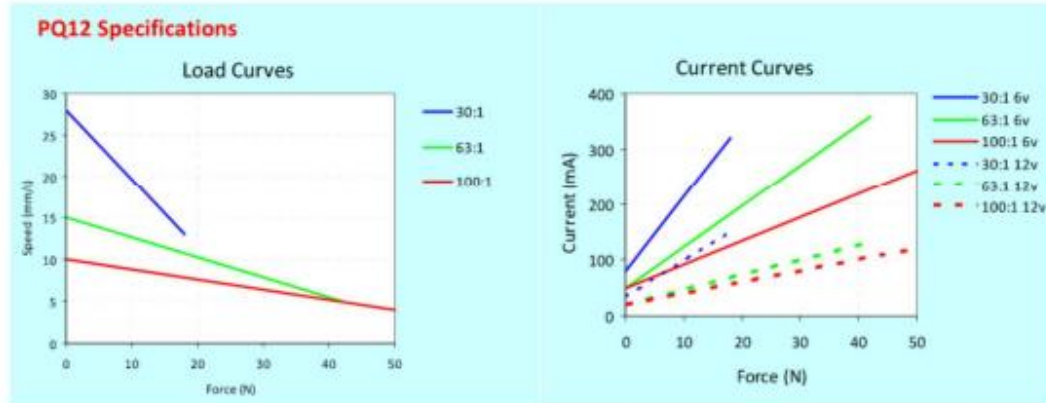
1(206) 347-9684 phone
1(888) 225-9198 toll free
1(206) 347-9684 fax

sales@firgelli.com
www.firgelli.com

Rev B

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA



Model Selection

The PQ12 has 3 configuration choices: Gear Ratio, Voltage and Controller. PQ12 options are identified according to the following scheme:

PQ12-GG-VV-C

feature	options
GG: Gear reduction ratio (refer to load curves above)	30, 63, 100 (lower ratios are faster but push less force, and vice versa)
VV: Voltage	6, 12 (DC volts)
C: Controller	P Potentiometer Feedback S Limit Switches R RC Linear Servo (6V Only)

PQ12 Controller Options

Option S – End of Stroke Limit Switches

WIRING: (see next page for pin numbering)

- 1- Limit Switch Detection (Optional)
- 2- Actuator Motor Power
- 3- Actuator Motor Power
- 4- Not Connected
- 5- Not Connected

The –S actuators have limit switches that will turn off power to the motor when the actuator reaches within 1mm of the end of stroke. Internal diodes allow the actuator to reverse away from the limit switch. The limit switches cannot be moved. While voltage is applied to the motor power pins (2 & 3) the actuator extends. Reverse the polarity and the actuator retracts. This can be accomplished manually with a DPDT switch or relay, or using an H-Bridge circuit. The –S model cannot be used with the LAC control board. Pin #1 can be used to sense when the actuator has reached the end limits. See our FAQ page for a simple schematic to light an LED when the limits are reached.

All the information provided on this datasheet is for information purposes only and is subject to change. Purchase and use of all Firgelli Actuators is subject to acceptance of our Terms and Conditions of sale as posted here: <http://store.firgelli.com/terms.asp>



Firgelli Technologies Inc.
580 Stirling Lane
Victoria, BC, V9E 2A9
Canada

Option P – Potentiometer Position Feedback

WIRING: (see next page for pin numbering)

- 1 – Feedback Potentiometer negative reference rail
- 2 – Actuator Motor Power
- 3 – Actuator Motor Power
- 4 – Feedback Potentiometer positive reference rail
- 5 – Feedback Potentiometer wiper

The –P actuators have no built in controller, but do provide analog position feedback. While voltage is applied to the motor power pins (2 & 3) the actuator extends. Reverse the polarity and the actuator retracts. Position of the actuator stroke can be monitored using the internal linear potentiometer. Provide any stable low and high reference voltage on pins 1 & 4, then read the position signal on pin 5. The voltage on pin 5 will vary linearly between the two reference voltages in proportion to the position of the actuator stroke. Connect to an LAC board for easy interface with any of the following control signals: Analog 0-5V or 4-20mA, or Digital 0-5V PWM, 1-2ms Standard RC, or USB.

Option R – RC Linear Servo

WIRING: (see last page for pin numbering)

- 1 - RC input signal (RC-servo compatible)
- 2 - Power (+6 VDC)
- 3 - Ground

Note: Reversing polarity on pins 2 and 3 may cause damage

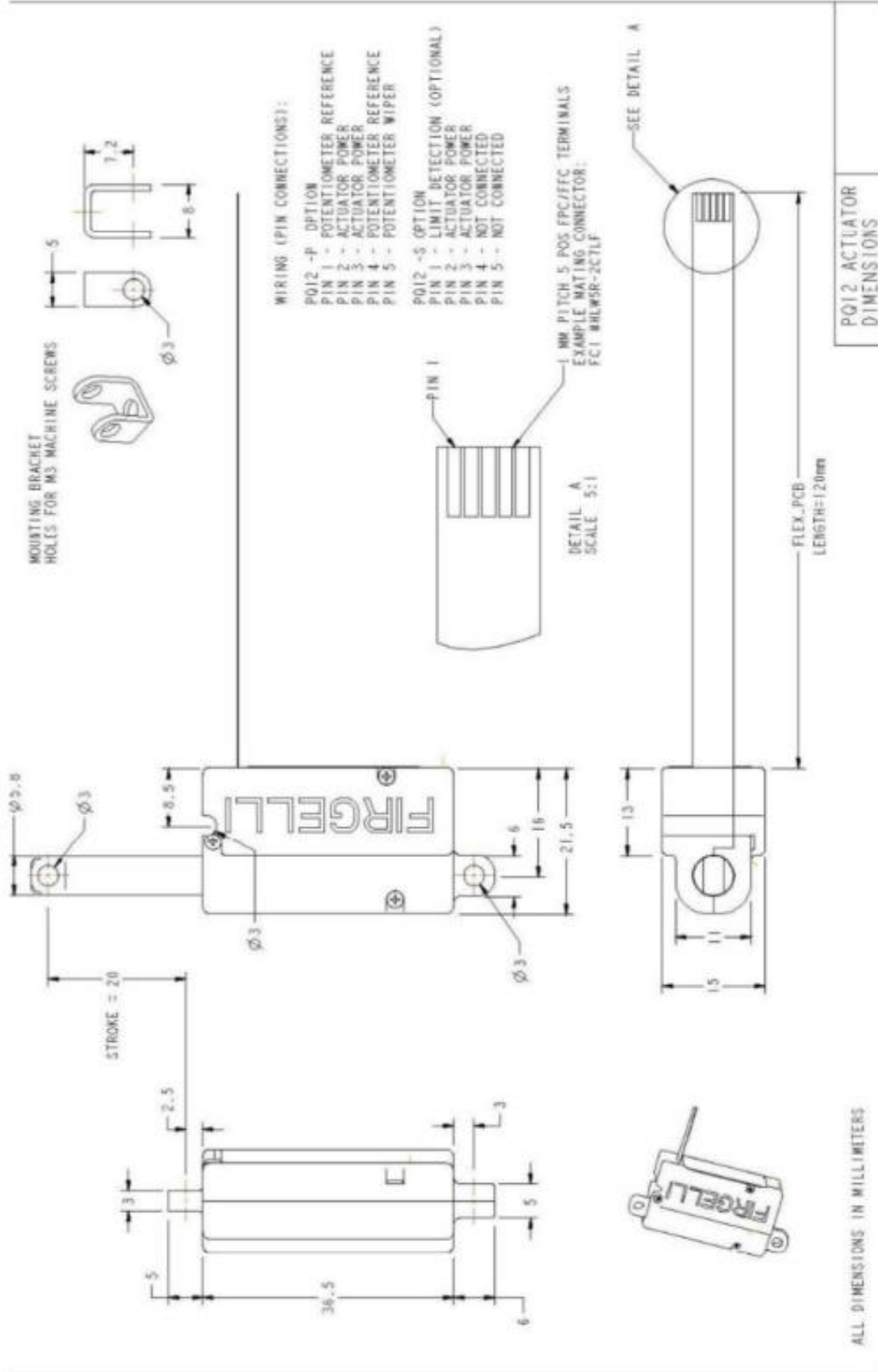
-R actuators are ideally suited to use in robotics and radio control models. The –R actuators or ‘linear servos’ are a direct replacement for regular radio controlled hobby servos. The desired actuator position is input to the actuator on lead 1 as a positive 5 Volt pulse width signal. A 2.0 ms pulse commands the controller to fully retract the actuator, and a 1.0 ms pulse signals it to fully extend. If the motion of the actuator, or of other servos in your system, seems erratic, place a 1–4Ω resistor in series with the actuator’s red V+ lead wire. The PQ12–R Linear Servos are designed to work with typical RC receivers and battery packs. Consequently they also are compatible with Arduino control boards, VEX Microcontrollers and many other similar boards designed for robotics.

Rev B

1 (206) 347-9684 phone sales@firgelli.com
1 (888) 225-9198 toll-free www.firgelli.com
1 (206) 347-9684 fax

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO Nº1 MEMORIA



Copyright 2015 © Fingelli Technologies Inc.

All data provided on this sheet is for information purposes only and is subject to change. Purchase and use of all Fingelli actuators is subject to acceptance of our Terms and Conditions of sale as posted here: <http://store.fingelli.com/terms.asp>

Fingelli Technologies Inc.
 580 Stirling Lane
 Victoria, BC, V8E 2A9



1 (206) 347-8684 phone
 1 (888) 225-9398 toll-free

sales@fingelli.com
www.fingelli.com

12.3 Fundamentos del campo de la medicina

Según la RAE, el dedo se define como cada uno de los cinco apéndices articulados en que terminan la mano y el pie del hombre. Los dedos son las porciones distales de la extremidad superior de la mano y se subdividen en tres falanges: proximal, media y distal

Se trata del órgano más importante del cuerpo humano en lo que a manipulación física se refiere gracias a su función principal: la prensión. Desde el punto de vista fisiológico, la mano constituye su soporte logístico, la cual además de ser un órgano de ejecución es también un receptor sensorial cuyos datos son imprescindibles. Por tanto, la correcta relación mano-dedos es fundamental en la etapa de desarrollo de las personas y para poder llevar una vida con normalidad sin impedimentos físicos.

El presente proyecto se centrará en el estudio de los movimientos de las falanges y metacarpos en el proceso de rehabilitación, llamado artrocinemática.

A nivel funcional se estudiarán las columnas mecánicas media de la mano (dedo índice y corazón) y del 5º dedo formada por la unión funcional de los dedos anular y meñique. No se tendrá en cuenta la columna del pulgar, por lo que no será detallado en los siguientes puntos.

12.3.1 Sistema esquelético

La mano cuenta con 27 huesos incluyendo los de la muñeca, 14 falanges en los dedos, 5 metacarpianos y 8 carpianos. Estos huesos constituyen los 4 grupos principales de articulaciones de la mano [26].

Las articulaciones que conforman la mano son:

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

- Articulaciones metacarpofalángicas: son el sistema extensor y las poleas flexoras de los dedos. En dicha zona se encuentra el tendón del músculo flexor profundo de los dedos (FPD) y el tendón del músculo flexor superficial de los dedos (FSD).

Poseen dos grados de libertad:

- Flexo-extensión en el plano sagital.
- Abducción (no se va a ser estudiada).

- Articulaciones interfalángicas proximales: articulación de tipo troclear que poseen un sistema ligamentoso de bloqueo de la hiperextensión articular, formado por fibras longitudinales y cruzadas.

Poseen un único grado de libertad:

- Flexo-extensión en el plano sagital.

- Articulaciones interfalángicas distales: trocleartrosis¹ establecidas entre la segunda falange y la base de la falange distal.

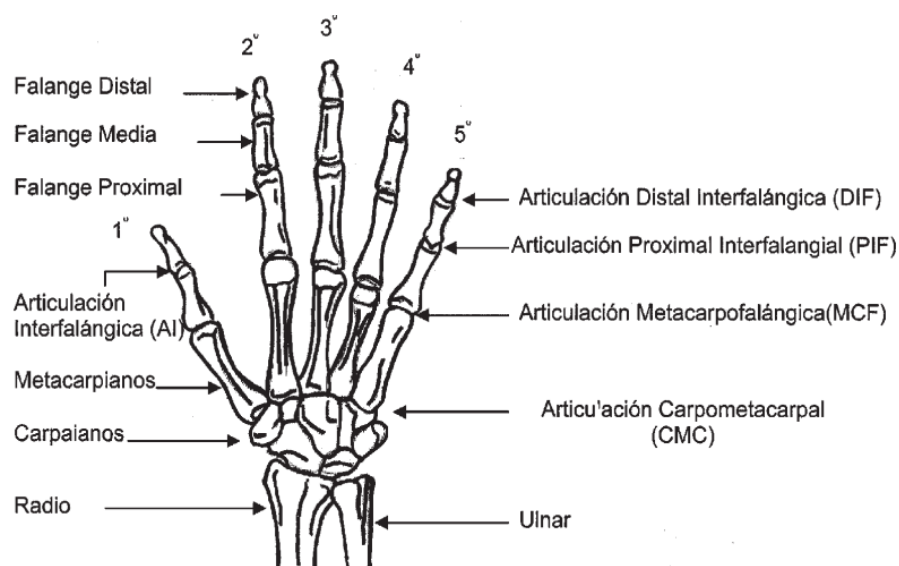


Imagen 54. Huesos y articulaciones de la mano. [26]

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

12.3.2 Sistema tendinoso y muscular

Los tendones flexores se encuentran sujetos por poleas fibrosas que constituyen entre sí correderas osteofibrosas (A1, A3, A5...) y se pueden deslizar en el interior de estas por medio de las vainas serosas (V2, V3, V4...).

Cuando el tendón se desplaza por su corredera, la lámina visceral lubrica una pequeña cantidad de líquido sinovial y se desliza sobre la lámina parietal. Si a consecuencia de la infección de la vaina las dos láminas se adhieren entre sí, el tendón ya no se deslizaría sobre ellas y quedaría “gripado”, es decir, que perdería todo su valor funcional [12]. Esto es lo que se pretende evitar con la ayuda del exoesqueleto.

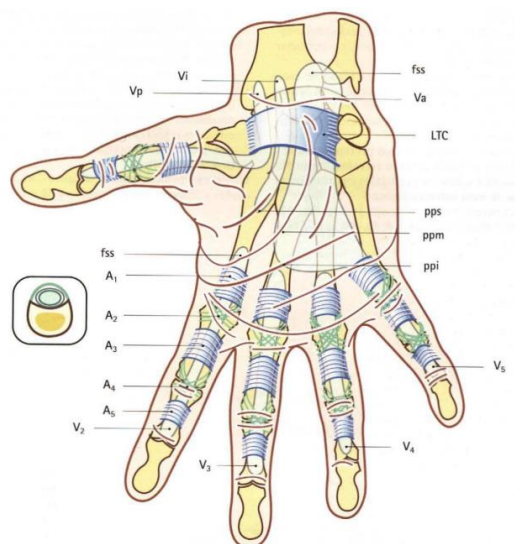


Imagen 55. Sistema tendinoso de la mano. [12]

Los músculos flexores pueden dividirse en dos grandes grupos:

- Músculo flexor superficial: es flexor de la segunda falange y no ejerce acción ninguna sobre la tercera. Para ser flexor de la primera falange la segunda debe estar completamente flexionada.

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

- Músculo flexor profundo: es ante todo flexor de la tercera falange. En este caso si está asociado con la segunda falange ya que no existe extensor de ésta capaz de oponerse a la flexión profunda.

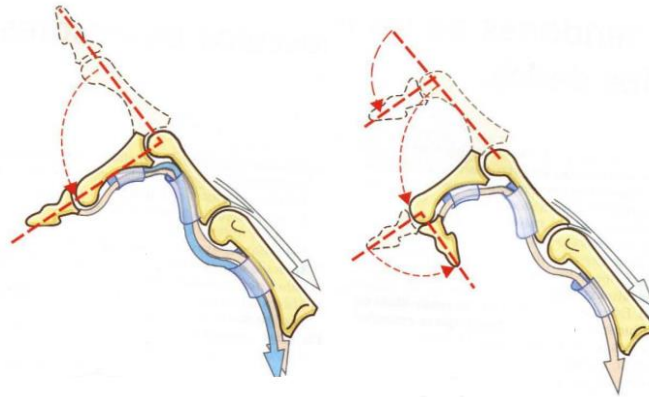


Imagen 56. Secuencia movimiento de flexión. [12]

12.4 Toma y recopilación de medidas

Al igual que en el proceso de diseño de la férula dinámica de muñeca a la que va acoplado el exoesqueleto, el principal objetivo de esta parte del proceso es el de facilitar en la medida en que se pueda su adquisición. Esto implica descartar el uso de escáneres 3D los cuales requieren conocimientos técnicos de los que carecen los profesionales médicos que tratarán al paciente.

Previo a esta toma de medidas, es importante tener claro que el cuerpo humano se encuentra dividido por tres planos de referencia que permiten describir la ubicación y localización de las distintas partes y órganos del cuerpo. Estos planos son de gran ayuda a la hora del estudio de las posturas y ángulos corporales.

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

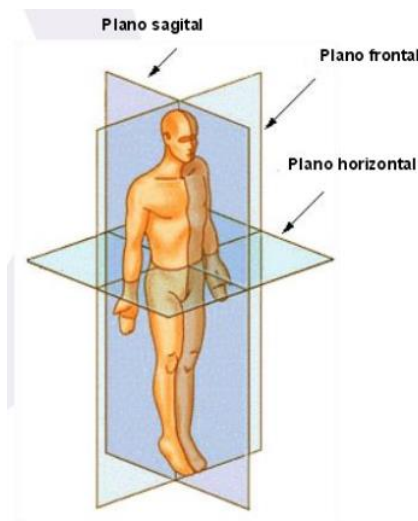


Imagen 57. Planos de referencia del cuerpo humano. [27]

12.4.1 Medidas antropométricas

Para llevar a cabo el estudio, se le han tomado medidas a un total de 26 personas cubriendo el rango de edades laboral entre 18 y 67 años. Se recomienda realizar el proceso en el orden en que se describe a continuación.

En primer lugar, se tomarán medidas antropométricas de la mano correspondientes al plano frontal. Estas medidas incluirán todas las longitudes (medidas en mm) que permiten parametrizar todos los dedos de la mano a excepción del pulgar, para tener suficientes datos disponibles en caso de tener que realizar un estudio proporcional para la parametrización del diseño:

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

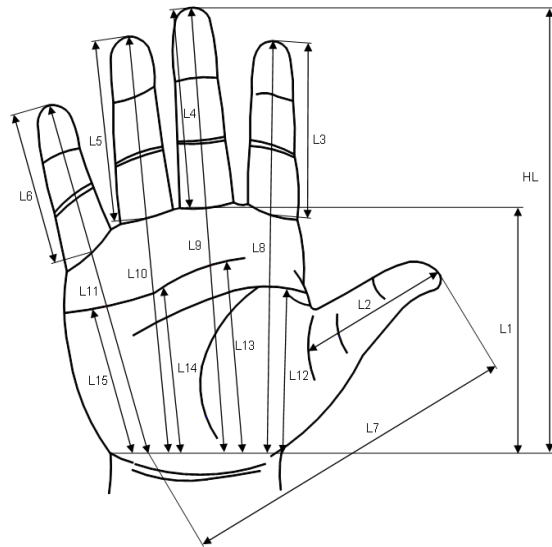


Imagen 58. Marcas longitudes de la mano. [28]

Paciente n°	Altura (cm)	Peso (kg)	Edad	Sexo	L3	L4	L5	L6	L8	L9	L11	L12
1	174	76	24	F	103	79	72	59	176	185	147	70
2	179	85	63	M	106	83	75	62	180	190	150	75
3	167	65	60	F	86	73	66	54	155	160	135	69
4	166	63	22	F	88	76	67	51	162	169	139	65
5	170	69	54	F	92	75	67	56	164	175	124	64
6	177	80	57	M	106	83	81	67	192	215	150	70
7	166	67	23	F	95	78	72	58	170	177	139	75
8	168	70	38	F	87	75	65	54	158	172	139	64
9	164	67	55	F	84	83	80	67	161	169	134	65
10	182	79	59	M	86	90	81	68	157	175	139	53
11	169	71	48	F	76	85	76	63	143	157	121	55
12	166	59	24	F	83	78	74	64	188	158	145	80
13	172	74	58	M	113	80	75	60	185	190	160	85
14	165	57	24	F	82	74	65	52	153	175	130	65
15	168	69	29	F	101	79	72	78	169	180	150	79
16	177	78	55	M	110	82	76	62	181	187	158	76
17	162	62	55	F	94	74	65	58	160	168	136	63
18	167	61	18	M	117	83	81	68	190	191	152	73
19	170	66	26	F	95	78	67	56	172	178	145	75
20	162	59	32	F	78	69	60	53	135	141	113	46
21	165	68	28	M	90	69	65	51	151	163	121	65
22	201	91	33	M	98	90	81	65	165	180	135	71
23	176	72	41	M	93	76	71	60	147	153	125	68
24	191	65	40	M	101	85	76	64	168	179	145	66
25	177	70	35	M	107	82	76	62	181	187	158	76
26	159	63	18	F	87	83	80	67	161	169	134	65

Tabla 7. Medidas tomadas de las longitudes de la mano. Elaboración propia.

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

Longitudes de cada una de las falanges que comprenden cada uno de los dedos, a excepción del pulgar:

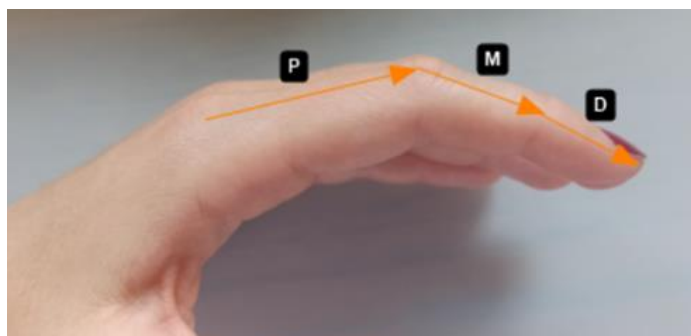


Imagen 59. Marcas longitudes de las falanges que se deben medir. Elaboración propia.

Paciente n°	Edad	Sexo	Meñique (D/M/P)	Anular (D/M/P)	Corazón (D/M/P)	Índice (D/M/P)
1	24	F	24/25/42	25/24/50	26/25/50	24/25/50
2	63	M	25/21/48	28/25/52	27/25/55	23/24/51
3	60	F	20/18/39	23/22/43	24/23/48	20/23/42
4	22	F	23/17/38	24/20/43	23/23/46	19/22/46
5	54	F	20/17/38	26/21/50	28/24/49	20/24/47
6	57	M	24/19/45	26/25/60	25/27/61	23/25/53
7	23	F	23/18/40	25/24/45	26/24/50	20/25/49
8	38	F	20/14/40	22/18/45	24/22/52	20/23/44
9	55	F	23/17/40	25/23/47	26/27/50	16/22/38
10	59	M	26/20/45	30/26/55	27/25/53	17/27/42
11	48	F	21/19/45	19/20/45	21/23/49	15/17/35
12	24	F	20/17/38	26/21/50	28/24/49	20/24/47
13	58	M	24/19/45	26/25/60	25/27/61	23/25/53
14	24	F	23/18/40	25/24/45	26/24/50	20/25/49
15	29	F	22/20/38	24/28/46	23/29/49	24/26/50
16	55	M	24/20/40	27/25/50	27/33/60	23/25/50
17	55	F	20/16/45	25/20/50	23/25/51	19/25/49
18	18	M	23/18/35	22/20/50	22/20/51	22/25/45
19	26	F	20/21/40	25/28/45	23/30/50	20/21/45
20	32	F	20/18/35	22/21/40	21/25/48	19/20/45
21	28	M	23/15/37	24/21/44	26/21/55	19/25/52
22	33	M	24/21/44	25/25/50	29/27/56	23/26/50
23	41	M	25/19/42	26/24/55	25/24/59	24/26/52
24	40	M	23/19/43	26/23/54	29/24/55	21/26/47
25	35	M	23/18/35	22/20/50	22/20/51	22/25/45
26	18	F	20/18/35	22/21/40	21/25/48	15/18/33

Tabla 8. Medidas tomadas de los valores de las falanges. Elaboración propia.

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOSQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

Por último, es importante el conocimiento de la anchura de los dedos (medida en mm), ya que sobre estos irá apoyado el exoesqueleto:

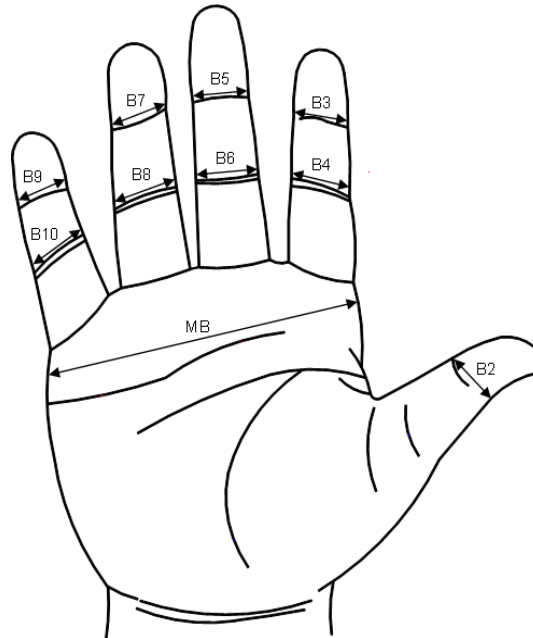


Imagen 60. Marcas anchura de los dedos. [28]

Paciente n°	Edad	Sexo	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10
1	24	F	14	15	16	17	14	16	13	15
2	63	M	18	20	18	21	20	20	15	17
3	60	F	13	17	16	17	13	18	13	15
4	22	F	14	18	15	17	13	15	11	14
5	54	F	17	20	17	18	15	16	14	16
6	57	M	18	22	18	20	18	20	16	19
7	23	F	16	20	17	20	17	19	16	17
8	38	F	17	19	16	18	15	17	13	14
9	55	F	19	19	13	19	15	18	15	18
10	59	M	18	20	16	19	15	18	14	17
11	48	F	16	19	18	19	16	17	14	15
12	24	F	15	19	17	19	14	16	10	14
13	58	M	20	25	20	21	22	26	20	22
14	24	F	15	17	18	23	15	18	13	15
15	29	F	17	20	17	20	15	18	15	17
16	55	M	18	20	17	17	19	21	17	20
17	55	F	14	16	16	18	15	16	14	17
18	18	M	17	18	17	19	16	19	15	18
19	26	F	16	19	17	20	16	17	15	16
20	32	F	14	16	15	16	11	13	10	13

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

21	28	M	17	19	19	19	18	17	15	17
22	33	M	17	18	16	18	14	17	14	15
23	41	M	15	16	16	16	15	16	14	15
24	40	M	16	19	17	18	16	18	14	15
25	35	M	17	18	17	19	16	19	15	18
26	18	F	14	16	15	16	11	13	10	13

Tabla 9. Valores de las medidas tomadas de la anchura de los dedos. Elaboración propia.

La toma de medidas de todos los dedos a excepción del pulgar se realizó ya que a principio del proyecto no se tenía claro si el exoesqueleto iba a ir destinado a un único dedo a todos ellos. Tras un exhaustivo estudio de fichas técnicas de lesiones de los tendones flexores, se descubrió que el mayor porcentaje de dedos lesionados residía sobre el índice por ser el más cercano a la herramienta con la que se trabaja y por tanto realiza el corte.

Se concluyó entonces que las medidas necesarias restantes para concluir el estudio previo al diseño del exoesqueleto serían estudiadas sobre el dedo índice únicamente

12.4.2 Rangos de movilidad

Para el estudio y análisis de la trayectoria del dedo índice, se ha seleccionado de entre todas las personas participantes un muestreo de 12 de ellas que comprenden diferentes edades, sexo, altura y peso para trabajar sobre la mayor variedad posible y obtener datos objetivos.

Para la toma de valores, se les ha pedido a los individuos que realicen el movimiento de flexión lo más natural posible simulando una situación real en rehabilitación. En esta situación ninguna de las articulaciones llega a su valor ROM, sino que su máximo se encuentra por debajo de éste.

Como referencia se ha tomado la falange proximal para la toma de dichos valores angulares. Como se observa en la Imagen 56, se tomarán capturas de la secuencia del movimiento completo de flexión partiendo de una situación de reposo para saber qué

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

ángulos debe formar el exoesqueleto para no forzar el tendón flexor que se pretende rehabilitar

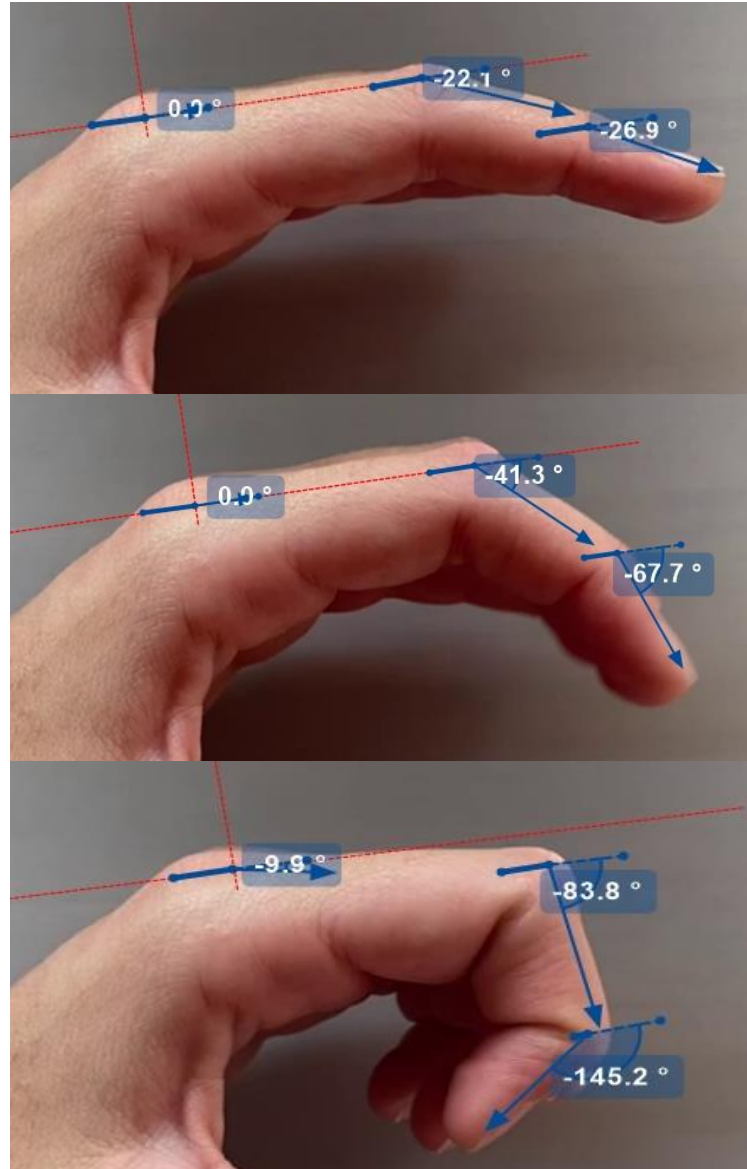


Imagen 61. Rangos de movilidad de las articulaciones interfalángicas en el movimiento de flexión. Elaboración propia.

12.5 Protocolo de rehabilitación

12.5.1 Objetivo terapéuticos

Estudios han demostrado que la capacidad funcional de la mano puede verse modificada en función de diferentes constructos psicológicos como la percepción de la autosuficiencia, es decir, la idea que el paciente tiene sobre su capacidad para realizar actividades de acuerdo con los estándares preestablecidos. Cuanto mayor es el nivel de autosuficiencia, más activos y persistentes son las personas en su proceso de rehabilitación y además, manifiestan una intensidad de dolor más baja, menor discapacidad física y una mejor respuesta a los tratamientos [29].

12.5.2 Fases del protocolo

Todos los miembros del equipo médico y el paciente son responsables de la recuperación. El proceso de rehabilitación comienza cuando el paciente se presenta por primera vez después de su lesión o cirugía.

No existe un protocolo específico y consensuado por todos los fisioterapeutas y cirujanos de la mano, por lo que las fases del protocolo presentadas se basan en reuniones con expertos y una extensa documentación.

A pesar de que en los años 60 se basaban en la creencia de que la formación de adherencias estaba basada en factores ajenos a la movilidad e inmovilizaban las articulaciones de 3 a 6 semanas, ya en los años 70 se empezaron a aportar mejores resultados con movilizaciones tempranas. Kleinert y Duran-Houser fueron los principales protocolos seguidos hasta día de hoy.

La movilización inmediata evita la formación de adherencias y ayuda a elastificar aquellas que se han podido formar. Biomecánicamente, la inmovilización origina una pérdida de fuerza de extensión en el tendón en las primeras 2 semanas de reparación y la pérdida de capacidad de deslizamiento ocurre en los primeros 10 días.

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

Los protocolos de movilización pasiva temprana implican una flexión activa y extensión pasiva o activa. Movilización activa inmediata se refiere a una movilización activa ya sea en extensión o flexión de los dedos implicados en la lesión.

Las fases del protocolo comprenden:

1) Inmovilización (3 a 5 días)

Se inmovilizará el dedo única y exclusivamente cuando la inflamación postquirúrgica presentada sea considerable y se deba dejar desinflamar para comenzar con la movilización pasiva. Se mantiene la articulación MC en flexión entre 30° y 40°, mientras que la IFP e IFD casi en extensión ya que cuando los dedos se encuentran en flexión, la proximidad entre el flexor superficial y el profundo es mayor en flexión y tendrían mayor probabilidad de adherencia.

2) Movilización pasiva (1 – 2 semanas)

El comienzo de la movilización se realiza una vez la inflamación haya sido controlada. La rehabilitación no debe enfocarse únicamente en la recuperación del deslizamiento tendinoso sin causar rotura, sino también debe prevenir la deformación del tendón reparado para evitar que pierda eficiencia mecánica.

El paciente acude a consulta durante las primeras 3 semanas posoperatorias. Los objetivos en esta fase son:

- Control del edema.
- Control de la inmovilización.
- Favorecer el deslizamiento tendinoso/evitar la formación de adherencias.
- Mantener la movilidad pasiva y el rango articular del preoperatorio.
- Detección precoz de complicaciones (algoneurodistrofia, sudeck, etc.).

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

- Evitar la contractura en flexión de la IFP.
- Aprendizaje y realización correcta de los ejercicios.

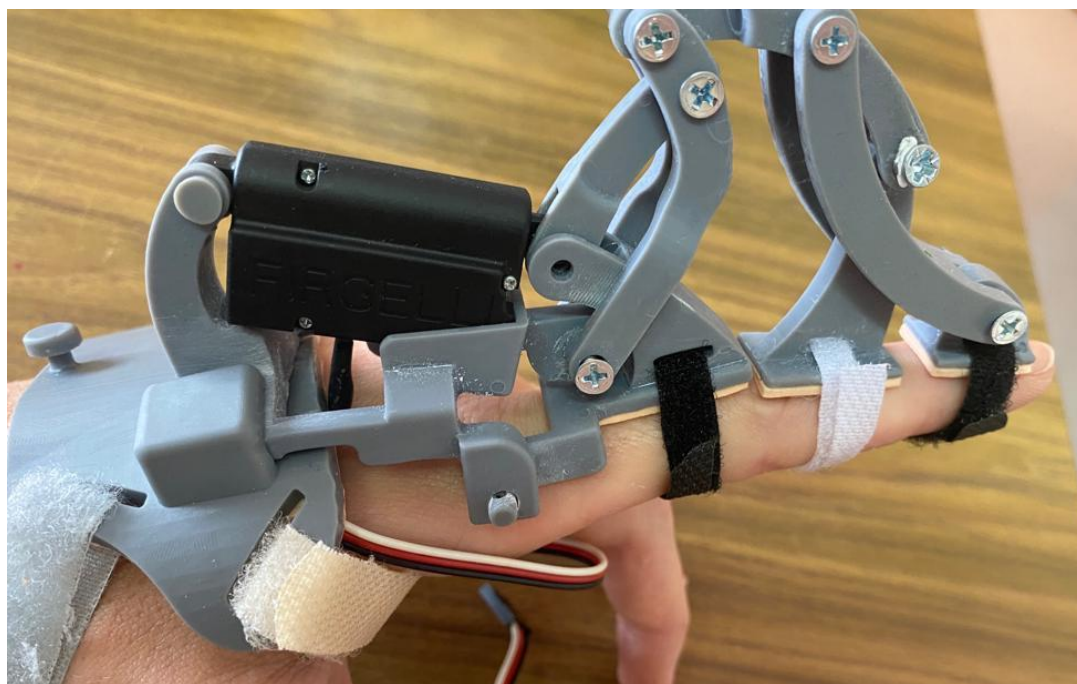


Imagen 62. Movimiento pasivo guiado por motor lineal. Elaboración propia.

3) Movilización activa (2 – 3 semanas)

El programa de ejercicios consiste en [29]:

- Ejercicios activos en tenodesis de muñeca: el paciente flexiona activamente la muñeca por fuera de la mesa mientras extiende los dedos. Una vez que se ha llegado al final del recorrido articular se le pide que pasivamente extienda por completo la IFP ayudándose con la otra mano, para evitar que permanezca en flexión. Posteriormente, se le pide la extensión activa de la muñeca unida a una flexión de dedos hasta donde permite el vendaje. Una vez conseguida la máxima flexión de dedos activa, se

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

aumenta le flexión pasivamente con la otra mano y se le pide mantener la posición obtenida de forma activa (*place and hold*).

- Ejercicios *place and hold* con la muñeca flexionada al menos 30°, de las MC e interfalángicas.
- Cada hora se le pide al paciente de realizar 10 extensiones activas venciendo la resistencia del elástico hasta donde le permite la férula.

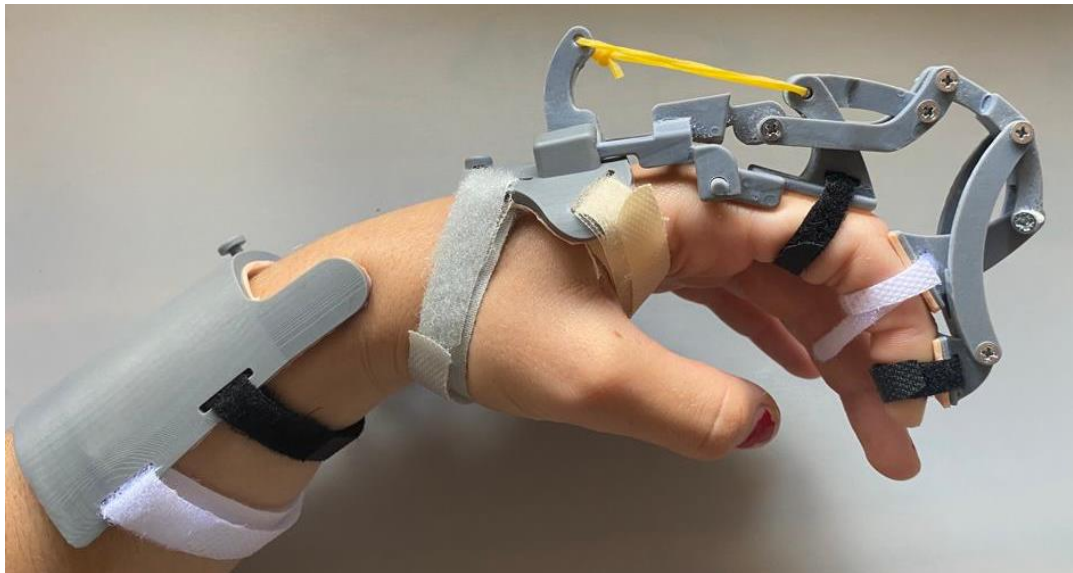


Imagen 63. Flexión activa de falanges y muñeca. Elaboración propia.

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

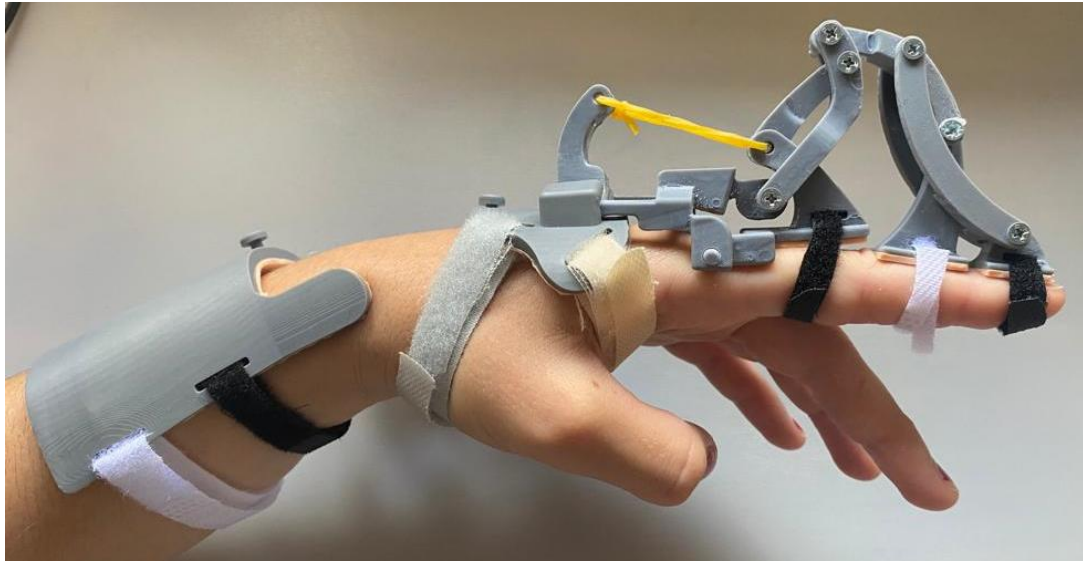


Imagen 64. Flexión activa de muñeca con falanges en reposo. Elaboración propia.

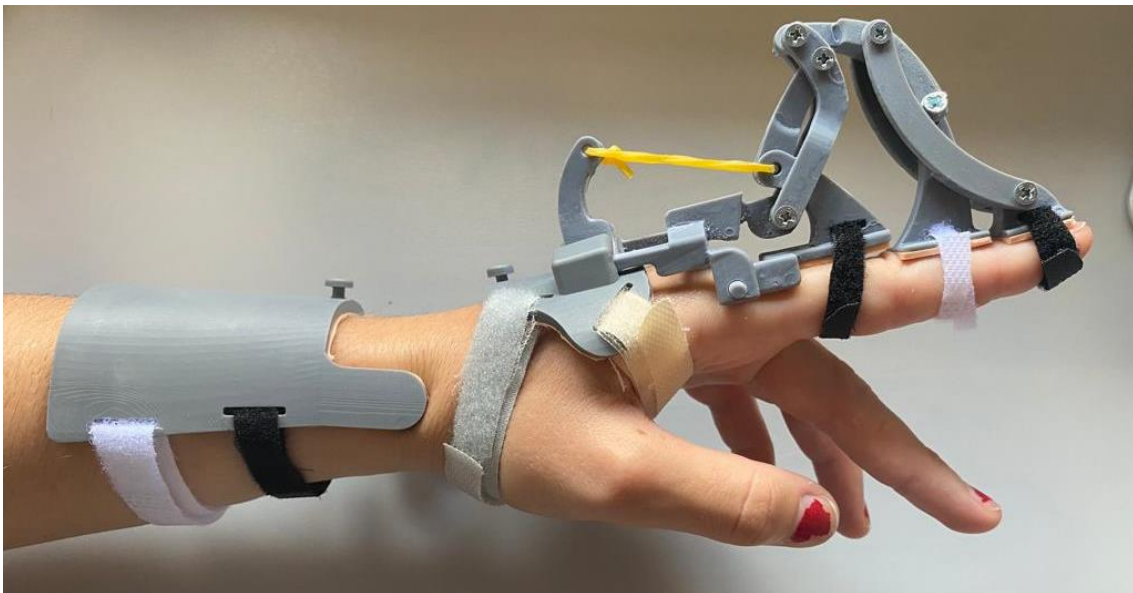


Imagen 65. Extensión activa de muñeca y falanges. Elaboración propia.

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

13. Bibliografía

- [1] Resumen de la evolución histórica de la biomecánica. (s. f.). Grupo Sobre Entrenamiento (G-SE). Recuperado en abril de 2023, de <https://g-se.com/blog-2-resumen-de-la-evolucion-historica-de-la-biomecanica-bp-457cfb26d0a0a6>
- [2] Fernández, J. M. (2022). Historia de la Biomecánica 7 épocas en la evolución. *Mundo Entrenamiento*. Recuperado en abril de 2023, de <https://mundoentrenamiento.com/historia-de-la-biomecanica/>
- [3] Zubizarreta, J. & Ministerio de trabajo y economía social. (2021). Exoesqueletos 1: Definición y clasificación. *INSST*, 1.162
- [4] Madrideojos, A. (2017, 5 septiembre). Un exoesqueleto robótico para ayudar a lesionados medulares. *Elperiódico*. Recuperado en marzo de 2023, de <https://www.elperiodico.com/es/ciencia/20170904/exoesqueleto-robotico-upc-para-lesionados-medulares-6263841>
- [5] *Exoesqueletos & Ergonomía - Soluciones técnicas - Biosafety*. (2023, 16 enero). Biosafety. Recuperado en marzo de 2023, de https://biosafety.es/?gclid=CjwKCAjw67ajBhAVEiwA2g_jEDFd2O_oILms7PXeJmY6qZfWFcT4cU9g07kTg7W8PaQetyIRQV06fxoCdAMQAvD_BwE
- [6] Puerto, K. (2014). Lockheed Martin FORTIS, un exoesqueleto que se va a hacer el servicio militar. *Xataka*. Recuperado en abril de 2023, de <https://www.xataka.com/robotica-e-ia/lockheed-martin-fortis-un-exoesqueleto-que-se-va-a-hacer-el-servicio-militar>
- [7] Independiente, E. (2019, 13 febrero). Descubren que no sólo el cerebro controla nuestras manos. *El Independiente*. Recuperado en abril de 2023, de

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO Nº1 MEMORIA

<https://www.elindependiente.com/futuro/2019/02/13/descubren-que-no-solo-el-cerebro-controla-nuestras-manos/>

[8] HEXXOR y HandSOME, dos proyectos de exoesqueletos robot para rehabilitación de la mano. (2011, 7 enero). Rehabilitación y medicina física. Recuperado en abril de 2022, de <https://rehabilitacionymedicinafisica.wordpress.com/2010/12/04/hexxor-y-handsome-dos-proyectos-de-exoesqueletos-robot-para-rehabilitacion-de-la-mano/>

[9] Moya, R. V. T., & Magal-Royo, T. (2019). Diseño y prototipado de un dispositivo de rehabilitación para la artritis reumatoide de mano. *Tsantsa: Revista de Investigaciones Artísticas*, 7, 233-240. Recuperado en abril de 2023, de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7650478>

[10] Unidad de Comunicación. Universidad de Alicante. (2021, octubre 21). *La UA patenta un exoguante robótico para mejorar la vida de personas con problemas de movilidad en la mano*. Web.ua.es. Recuperado en abril de 2023, de <https://web.ua.es/es/actualidad-universitaria/2020/octubre2020/1-11/la-ua-patenta-un-exoguante-robotico-para-mejorar-la-vida-de-personas-con-problemas-de-movilidad-en-la-mano.html>

[11] Minutos. (2019, 19 julio). Jóvenes salmantinos buscan financiación para lanzar un exoesqueleto biónico para personas sin movilidad en manos. *www.20minutos.es - Últimas Noticias*. Recuperado en abril de 2023, de <https://www.20minutos.es/noticia/3708887/0/jovenes-salmantinos-buscan-financiacion-para-lanzar-exoesqueleto-bionico-para-personas-sin-movilidad-manos/>

[12] Kapandji, A., I. (2006). *Fisiología Articular/ Articulate Psychology: Miembro Superior* (6.a ed.). Medica Panamencana.

[13] Reyes Tejedor, P. (2023). Diseño de una férula de muñeca impresa en 3D con soporte para un exoesqueleto de los dedos de la mano. UMA.

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

[14] Charmant, J. (s. f.-a). *Kinovea*. Recuperado en enero de 2022, de <https://www.kinovea.org/>

[15] *Descripción del producto MATLAB - MATLAB & Simulink - MathWorks España*. (s. f.). Recuperado en marzo de 2023, de https://es.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html

[16] Fernández, M. M. (s. f.). WinMecC - Programa de análisis cinemático y dinámico de mecanismos planos. Recuperado en mayo de 2023, de <http://www.winmecc.com/>

[17] Traumatopedia. (2021). Luxación de los dedos de la mano – Diagnóstico y tratamiento. *Traumatopedia*. Recuperado en marzo de 2023, de <https://traumatopedia.com/traumatologia/luxacion-de-los-dedos-de-la-mano-diagnostico-y-tratamiento/>

[18] Bustamante, A., & De Prevención, S. Y. M. A. F. M. I. (2008). *Ergonomía para diseñadores*.

[19] Angulo, T., Álvarez, A., & Fuentes, Y. (2011). Biomecánica clínica Biomecánica de la Extremidad Superior Exploración de la Mano. *Reduca*, 3.

[20] Jiménez Lucena, B., (2017) Diseño de un exoesqueleto para la rehabilitación de la mano. UMA.

[21] AndreuMS. (2020). Los procesos y accesorios necesarios para la impresión con resina. *Capa Sobre Capa*. Recuperado en abril de 2023, de <https://capasobrecapa.com/proceso-herramienta-resina/>

[22] Impresoras3d.com. (2023). Diferencias entre la tecnología DLP vs LCD en tu impresora de resina. *impresoras3d.com*. Recuperado en mayo de 2023, de

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

<https://www.impresoras3d.com/diferencias-entre-la-tecnologia-dlp-vs-lcd-en-tu-impresora-de-resina/#:~:text=Impresi%C3%B3n%20con%20tecnolog%C3%ADa%20LCD,en%20el%20tanque%20de%20resina>

[23] Professional Plastics, Inc. (s. f.). LD45 Plastazote Plastazote-Zotefoams. Professionalplastics.com. Recuperado en diciembre de 2022, de <https://www.professionalplastics.com/es/ZOTEFOAMLD.html>

[24] Logarsalud. (s. f.). Recuperado en diciembre de 2022, de <https://www.logarsalud.com>

[25] Velcro coser. (2021, 2 junio). Merceriahilodeplata.com. Recuperado en diciembre de 2022, de <https://www.merceriahilodeplata.es/producto/velcro-coser/>

[26] Velázquez Sánchez, A., Merchán Cruz, E., Hernández Gómez, L., & Urriolagoitia Calderón, G. (2007). Rango de movilidad y función descriptiva del dedo índice. Científica, 11(4), 177-188

[27] Valero, A. (s.f.). Antropometría. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo

[28] Borsci, S., Chaurand, R. A., Muñoz, E., & Erlandson, R. A. (2015). Definición de dimensiones antropométricas en la construcción de guantes a partir de requerimientos de diseño. ICONOFACTO, 11(16), 125-140. <https://revistas.upb.edu.co/index.php/iconofacto/article/download/6076/5571>

[29] Cantero, R. (2020). Terapia de mano basada en el razonamiento y la práctica clínica. Universidad Internacional de Andalucía

**REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA
REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO**

DOCUMENTO N°1 MEMORIA

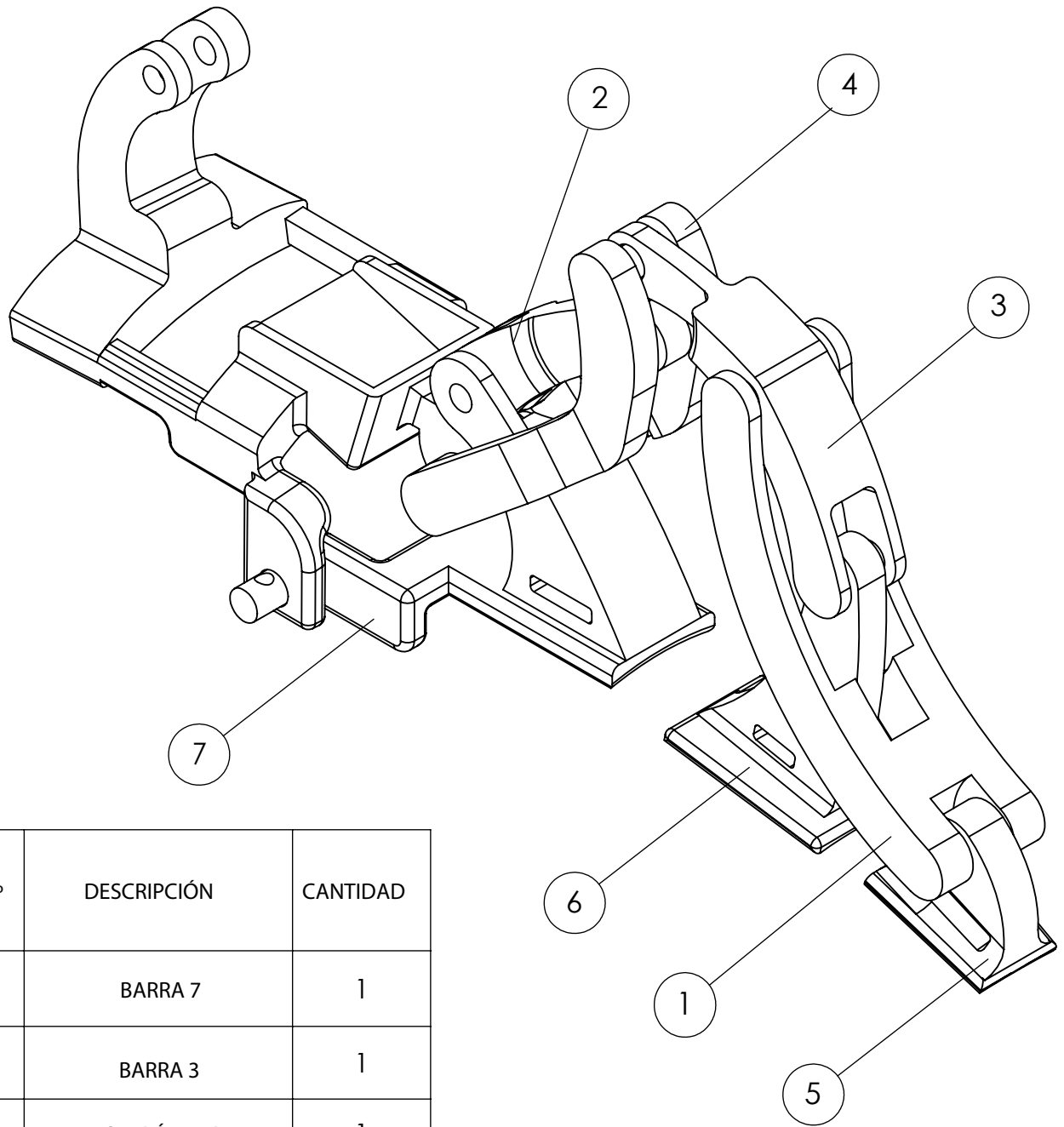
DOCUMENTO N°2. PLANOS

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOSQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO Nº2. PLANOS

ÍNDICE GENERAL

1. PLANO DE CONJUNTO
 - 1.1 Barra 7
 - 1.2 Barra 3
 - 1.3 Eslabón EFD
 - 1.4 Eslabón O4BD
 - 1.5 Pieza falange distal
 - 1.6 Pieza falange media
 - 1.7 Pieza falange proximal



N.º	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	BARRA 7	1
2	BARRA 3	1
3	ESLABÓN EFD	1
4	ESLABÓN O4BD	1
5	PIEZA FALANGE DISTAL	1
6	PIEZA FALANGE MEDIA	1
7	PIEZA FALANGE PROXIMAL	1

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	PALOMA REYES TEJEDOR		12/06/23
VERIF.	ALEX BATALLER TORRAS		12/06/23

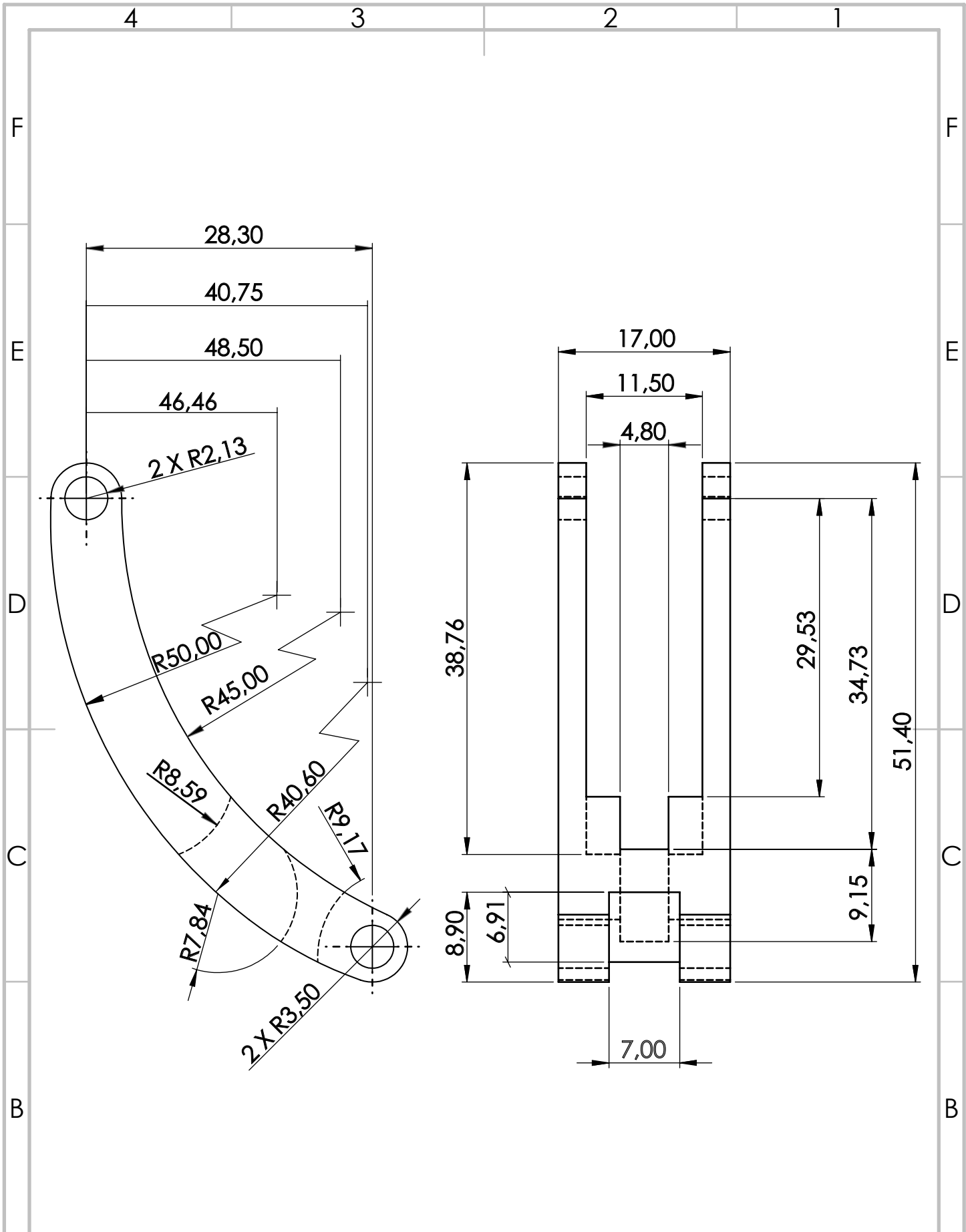


TÍTULO:	PLANO DE CONJUNTO	
N.º DE DIBUJO	1	A4

NO CAMBIE LA ESCALA	SI NO SE INDICA LO CONTRARIO, LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
---------------------	---

MATERIAL:	RESINA FROZEN TR300
ESCALA	3:2

N.º DE DIBUJO	1	A4
---------------	---	----

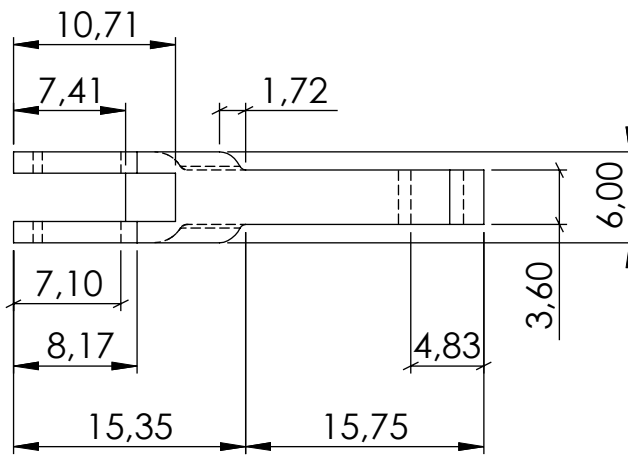
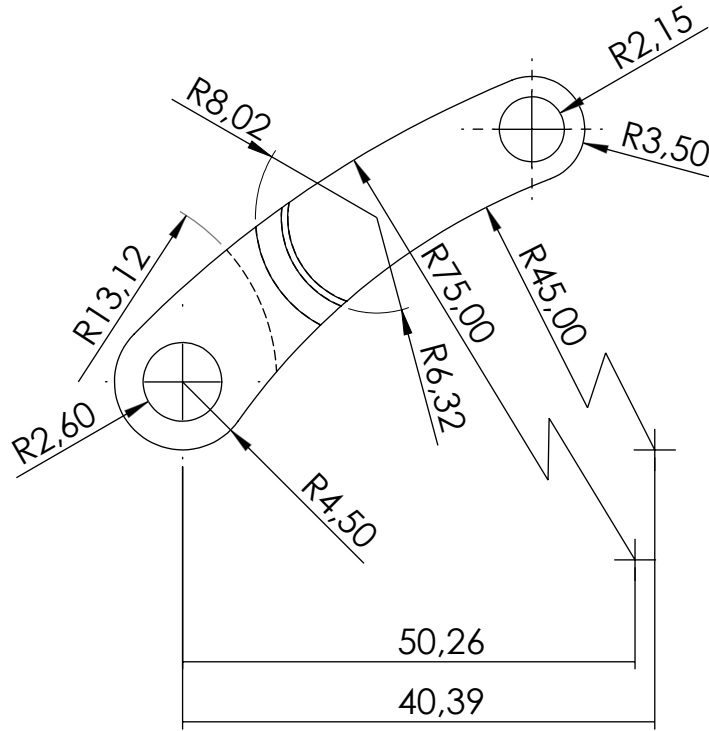


	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	PALOMA REYES TEJEDOR		12/06/23
VERIF.	ALEX BATALLER TORRAS		12/06/23

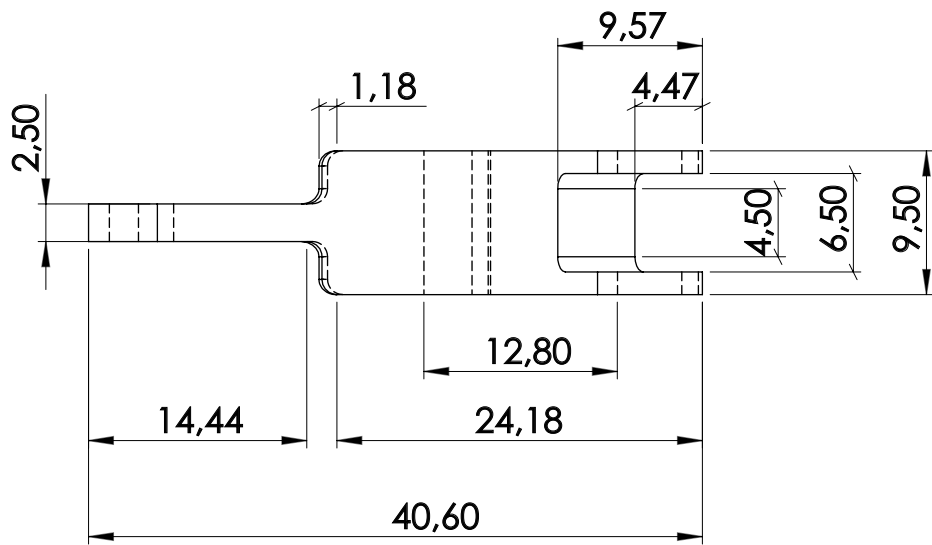
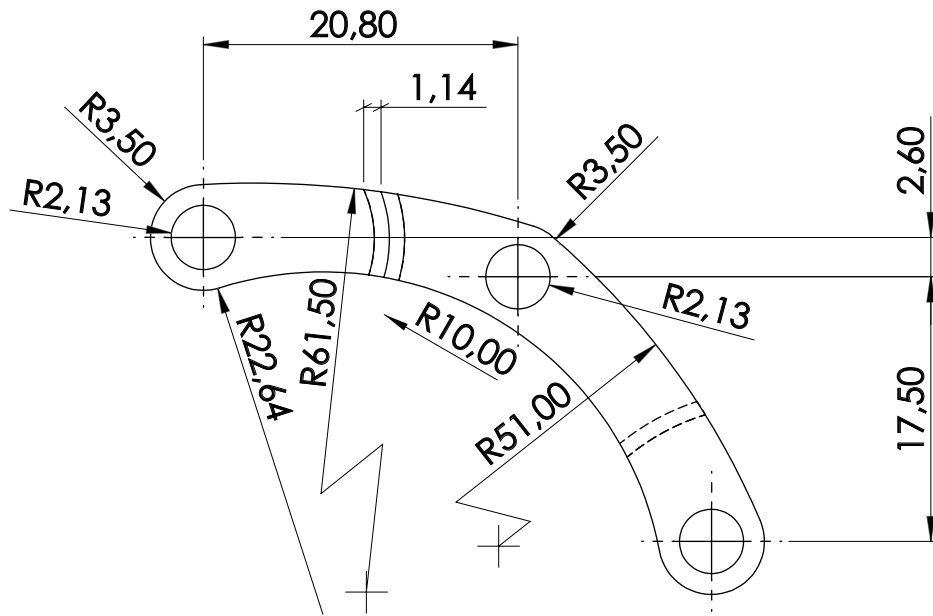
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

TÍTULO:	BARRA 7	
N.º DE DIBUJO	1.1	A4

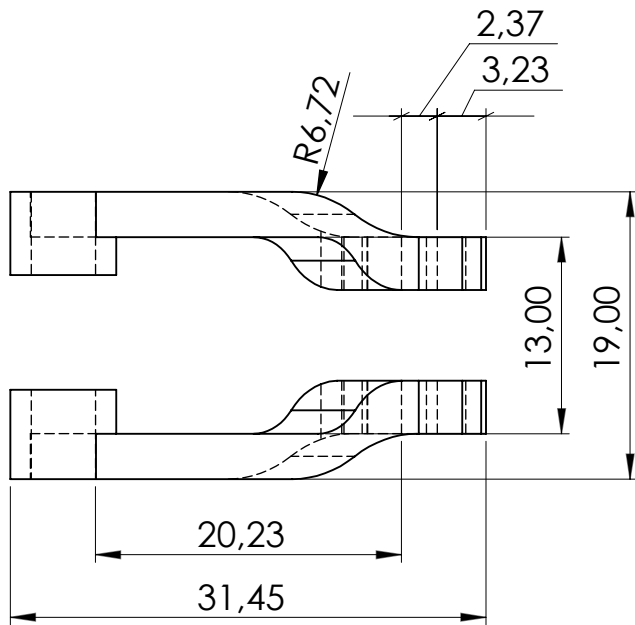
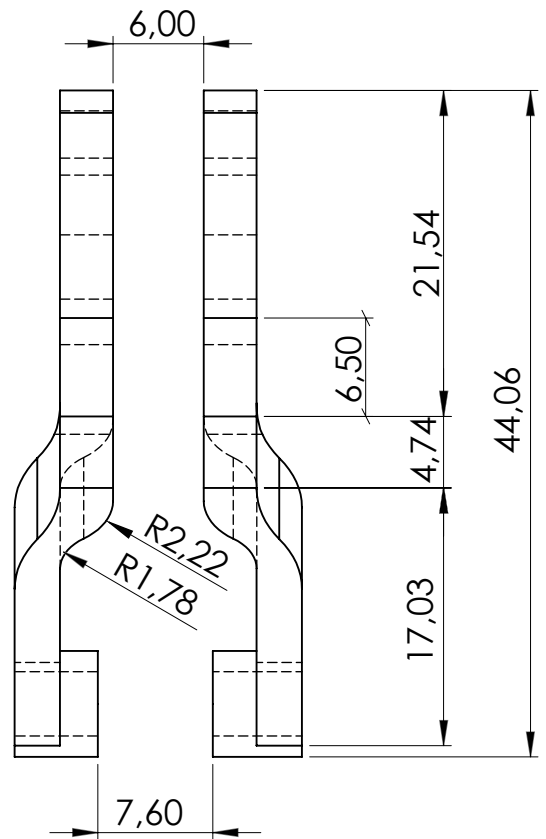
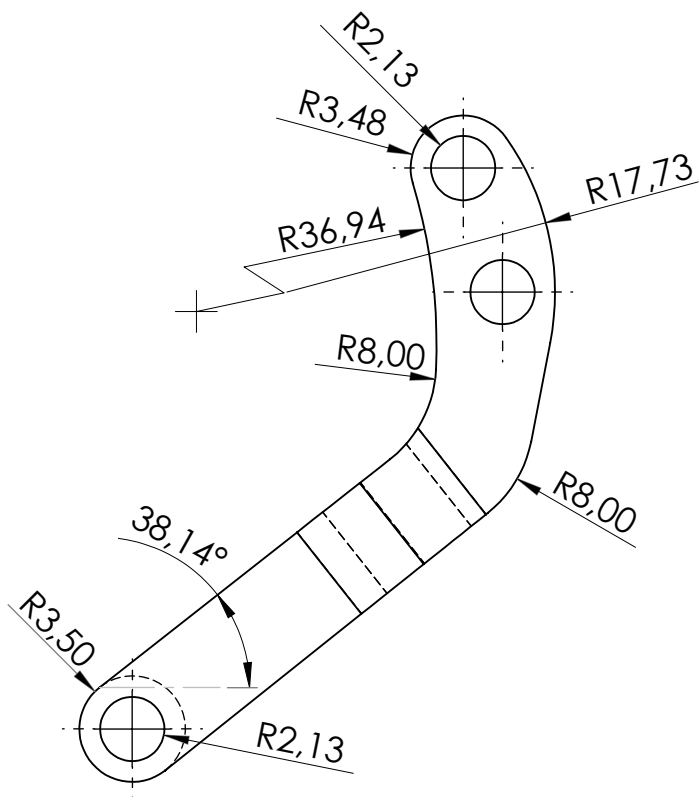
NO CAMBIE LA ESCALA	SI NO SE INDICA LO CONTRARIO, LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM	MATERIAL: RESINA FROZEN TR300	ESCALA 2:1	HOJA 1 DE 7
---------------------	---	----------------------------------	------------	-------------



	NOMBRE	FIRMA	FECHA	 ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES	TÍTULO:	BARRA 3	
DIBUJ.	PALOMA REYES TEJEDOR		12/06/23				
VERIF.	ALEX BATALLER TORRAS		12/06/23		N.º DE DIBUJO	1.2	A4
NO CAMBIE LA ESCALA		SI NO SE INDICA LO CONTRARIO, LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		MATERIAL:	RESINA FROZEN TR300		
				ESCALA 2:1			HOJA 2 DE 7



	NOMBRE	FIRMA	FECHA		TÍTULO:	ESLABÓN EFD	
DIBUJ.	PALOMA REYES TEJEDOR		12/06/23				
VERIF.	ALEX BATALLER TORRAS		12/06/23		N.º DE DIBUJO	1.3	A4
NO CAMBIE LA ESCALA		SI NO SE INDICA LO CONTRARIO, LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		MATERIAL:	RESINA FROZEN TR300		
				ESCALA 2:1			HOJA 3 DE 7



	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	PALOMA REYES TEJEDOR		12/06/23
VERIF.	ALEX BATALLER TORRAS		12/06/23



TÍTULO:	ESLABÓN O4BD	
N.º DE DIBUJO	1.4	A4

NO CAMBIE LA ESCALA	SI NO SE INDICA LO CONTRARIO, LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
---------------------	---

MATERIAL:	RESINA FROZEN TR300
ESCALA	2:1

HOJA	4 DE 7
------	--------

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

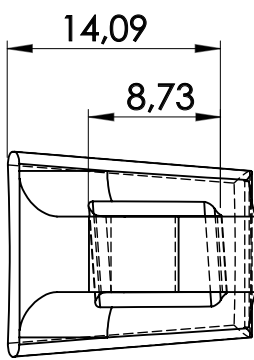
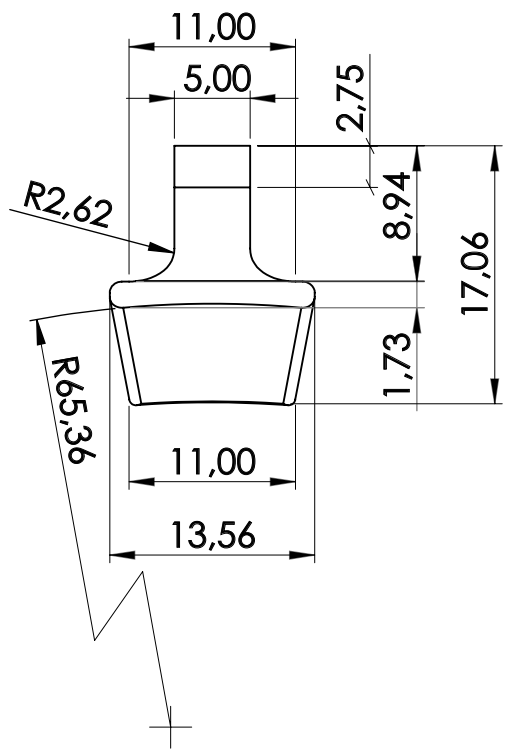
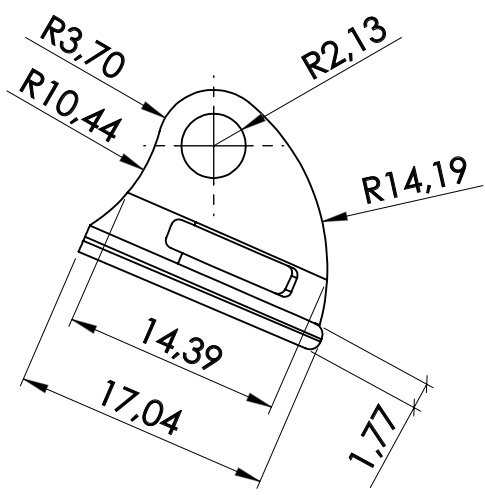
C

B

B

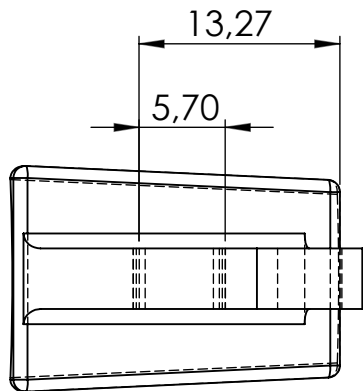
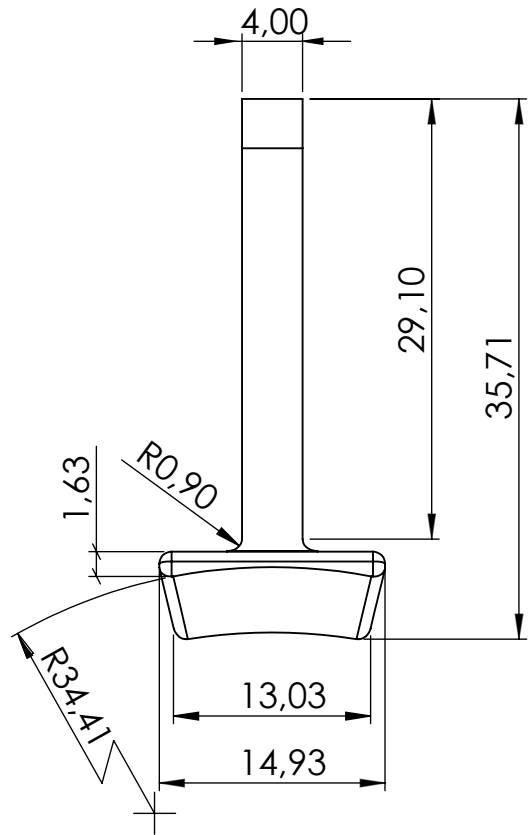
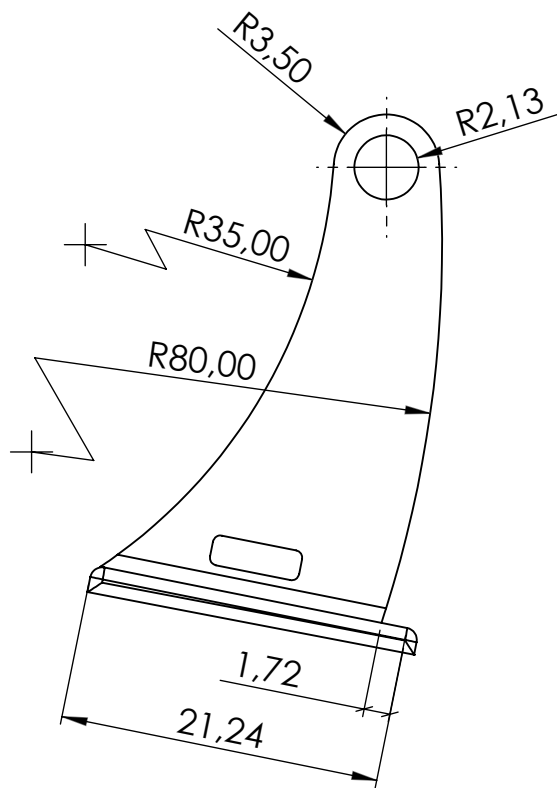
A

A

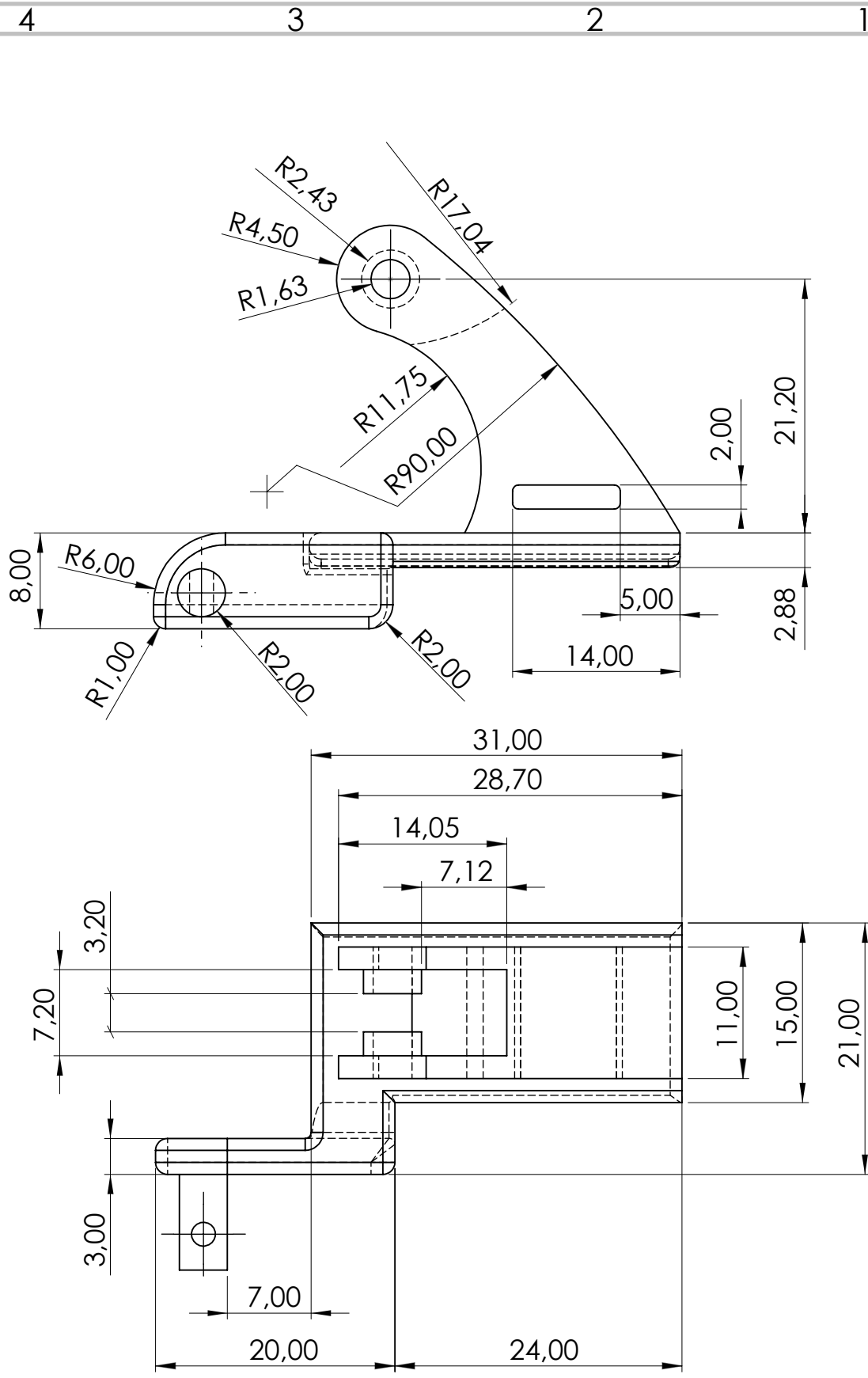


	NOMBRE	FIRMA	FECHA		TÍTULO:	
DIBUJ.	PALOMA REYES TEJEDOR		12/06/23		PIEZA FALANGE DISTAL	
VERIF.	ALEX BATALLER TORRAS		12/06/23	MATERIAL:		
	NO CAMBIE LA ESCALA	SI NO SE INDICA LO CONTRARIO, LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		RESINA FROZEN TR300	N.º DE DIBUJO	
				ESCALA 2:1	1.5	A4
					HOJA 5 DE 7	

4 3 2 1



NOMBRE			FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ.	PALOMA REYES TEJEDOR		12/06/23	 ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES	PIEZA FALANGE MEDIA	
VERIF.	ALEX BATALLER TORRAS		12/06/23			
NO CAMBIE LA ESCALA		SI NO SE INDICA LO CONTRARIO, LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		MATERIAL:	N.º DE DIBUJO	
				RESINA FROZEN TR300	1.6	A4
				ESCALA 2:1	HOJA 6 DE 7	



	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	PALOMA REYES TEJEDOR		12/06/23
VERIF.	ALEX BATALLER TORRAS		12/06/23



TÍTULO: PIEZA FALANGE PROXIMAL

N.º DE DIBUJO

NO CAMBIE LA ESCALA	SI NO SE INDICA LO CONTRARIO, LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM	MATERIAL: RESINA FROZEN TR300	N.º DE DIBUJO: 1.7	A4
		ESCALA 2:1	HOJA 7 DE 7	

DOCUMENTO N°3. PRESUPUESTO

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO Nº3. PRESUPUESTO

1. PRESUPUESTO GENERAL

El presupuesto proyectado será dividido en varias tablas en función del desarrollo de las actividades para la correcta fabricación del exoesqueleto.

En primer lugar, se crea una tabla donde se incluyen todos los aspectos relacionados con el desarrollo del exoesqueleto físico contratando una empresa para su impresión.

Código	Medición CANT.	Medición Ud.	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO	IMPORTE (€)	TOTAL (€)
1.1.1	1	Ud	ENSAMBLAJE EXOESQUELETO			
	0.039	kg	Material: Resina TR300 de Phrozen Actividad: IMPRESIÓN 3D	35 €/kg	1.365	
	6	h	Maquinaria: Impresora 3D: Phrozen Sonic Mini 4k	3 €/h	36	
	2		Mano de obra: Operario 1	6 €/h	12	
			Medios auxiliares: No requeridos			
			Actividad: RETIRADA DE SOPORTES			
	1	Ud	Maquinaria: Espátula	3.50 €	3.5	
	0.2	h	Mano de obra: Operario 1	6 €/h	1.2	
			Medios auxiliares: No requeridos			
			Actividad: LIMPIEZA DEL EXOESQUELETO			
	0.05	l	Maquinaria: Alcohol Agua	3 €/l	0.15	
	0.2	h	Mano de obra: Operario 1	12 €/h		
			Medios auxiliares: Paño			
	1	Ud	Actividad: COSER EL VELCRO	0.50 €		

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO Nº3. PRESUPUESTO

	1 0.03 0.5	Ud m h	Maquinaria Aguja Hilo Mano de obra: Operario 1 Medios auxiliares: No requeridos	1.20 € 2.5 €/m 12 €/h	1.2 0.08 6	
	0.05 0.2 1	l h Ud	<u>Actividad: LIMPIEZA DEL EXOESQUELETO</u> Maquinaria: Alcohol Agua Mano de obra: Operario 1 Medios auxiliares: Paño	3 €/l 12 €/h 0.50 €	0.15	
TOTAL (€)						61.64 €

Teniendo en cuenta el coste del 21% IVA, el precio total de obtención del exoesqueleto es de sesenta y un euros con sesenta y cuatro céntimos.

Además, se debe tener en cuenta el precio del actuador lineal que se empleará para realizar el movimiento controlado el cual tiene un precio de: 70 €.

Finalmente, se obtiene el conjunto del producto listo para su puesta en funcionamiento que cuesta:

CIENTO TREINTA Y UN EUROS CON SESENTA Y CUATRO CÉNTIMOS

En el supuesto caso de prescindir de la subcontrata y producir el exoesqueleto a través de medios propios, prescindiendo entonces de los gastos por tiempo de impresión:

- Gastos prescindiendo del tiempo de impresión subcontratado y de los materiales y actividades relativas a la impresión: $131.64 - 58 = 73.64$ €.

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOSQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO Nº3. PRESUPUESTO

Tener en cuenta que en todos estos cálculos se ha prescindido de los costes de alquiler y/o mantenimiento del local de trabajo, así como de los gastos relativos a la línea de negocios, personal, seguros, etc.

Si se mantiene una máquina de impresión como la usada en el proyecto (cuyo precio es de 350€), debido a su tamaño y velocidad de impresión, el tiempo total empleado para la fabricación de un exoesqueleto es de 6h por lo que habría posibilidad de producción de 2 exoesqueletos diarios. Suponiendo que el nivel de demanda es aproximadamente de 250 días al año:

$$\text{Precio adicional} = \frac{350}{500} = 0.7 \text{ €}$$

En segundo lugar, se crea una tabla donde se incluyen los costes de los softwares y herramientas empleadas junto con los costes del ingeniero contratado para su uso y desarrollo en caso de no disponer de ellos previamente.

Código	Medición CANT.	Medición Ud.	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO	IMPORTE (€)	TOTAL (€)
	1	Ud	Software y Herramientas: SolidWorks	119.79 €/ 12 meses	119.79	
	3	h	Mano de obra: Operario 2	13 €/h	39	
	1	Ud	Software y Herramientas: Adobe Illustrator	29.99 €/mes	359.88	
	5	h	Mano de obra: Operario 2	13 €/h	65	
	1	Ud	Software y Herramientas: Kinovea	0	0	
	1	h	Mano de obra: Operario 2	13 €/h	13	
	1	Ud	Software y Herramientas: CHITUBOX	0	0	
	0.2	h	Mano de obra: Operario 2	13 €/h	2.6	
TOTAL €						599.27 €

REDISEÑO Y PARAMETRIZACIÓN DE UN EXOSQUELETO PARA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

DOCUMENTO Nº3. PRESUPUESTO

El coste total debido a herramientas adicionales de software será: 599.27 €

Manteniendo la suposición de demanda anual: Precio adicional = $\frac{599.27}{500} = 1.20 \text{ €}$

Sumando el conjunto se tiene: $73.64 \text{ €} + 0.70 \text{ €} + 1.20 \text{ €} = 75.54 \text{ €}$

Suponiendo inicialmente un porcentaje de contribución del 30%, el costo variable debe ser el 70% por lo que el precio de venta de cara al público final será:

Precio de venta = $\frac{75.54}{0.3} = 251.80 \text{ €}$

Redondeando al alza para sumar el precio de la baja cantidad de resina que se emplea se obtiene entonces que el precio final de venta es de:

DOSCIENTOS CINCUENTA Y UN EUROS CON OCHENTA CÉNTIMOS