

UNIVERSITAT JAUME I

**ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA I CIÈNCIES
EXPERIMENTALS**

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

**Análisis y optimización de mecanismo para un
exoesqueleto agarre pinza**

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Autora: Marina Gabarda López

Director: Víctor Roda Casanova

Castellón de la Plana

Julio 2023

Dedicatoria

A mi abuelo y a mi abuela.

Agradecimientos

Primeramente, me gustaría agradecer a mi familia, a mi madre y a mi padre por aguantarme durante estos años de universidad y por apoyarme y darme ánimos para terminar este proyecto. También a Olga por ser mi máximo apoyo desde el minuto 2. Por último me gustaría agradecer a todos esos profesores que hacen todo lo posible para que entendamos hasta lo que pensamos imposible de entender, en especial a Víctor no solo le agradezco haber sido mi tutor de TFG y brindarme la oportunidad de participar en este proyecto, sino también por ser uno de los mejores profesores que he tenido sin ninguna duda.

Tabla de contenidos

Indice de figuras	IX
Acrónimos	X
1. Objeto	1
2. Alcance	2
3. Antecedentes	3
4. Normas y referencias	4
4.1. Disposiciones legales y normas aplicadas	4
4.2. Bibliografía	4
4.3. Programas de cálculo	4
4.4. Otras referencias	4
5. Definiciones y abreviaturas	5
5.1. Algoritmo Genético	5
5.2. Optimización Cartesiana	6
6. Estado del arte	7
6.1. Historia de los exoesqueletos	7
6.2. Primer exoesqueleto de mano	10
6.3. Modelos en el mercado	12
7. Requisitos de diseño	17
7.1. Propiedades generales	17
7.2. Propiedades específicas según la aplicación	19
7.2.1. Clasificación según aplicación final	19
7.2.2. Requisitos específicos según aplicación	20
7.3. Movilidad	23
7.3.1. Número de apoyos	23

7.4.	Diseño mecánico	25
7.4.1.	Estructura cinemática	25
7.4.2.	Colocación del mecanismo	27
7.5.	Selección de características para el mecanismo DERAPPI	28
8.	Análisis	29
8.1.	Presentación de los mecanismos a estudiar	29
8.2.	Datos de partida	31
8.3.	Análisis dedo	31
8.4.	Análisis analítico del mecanismo RLM	33
8.4.1.	Cálculo de posición inicial y final	35
8.4.2.	Cálculo mecanismo	41
8.5.	Análisis analítico del Mecanismo de Toronto	43
8.5.1.	Cálculo de posición inicial y final	45
8.5.2.	Cálculo mecanismo	47
8.6.	Optimización mecanismos	50
8.7.	Análisis Gráfico	52
8.7.1.	Mecanismo RML	53
8.7.2.	Mecanismo de Toronto	54
9.	Resultados	56
9.1.	Resultados mecanismo RML	56
9.1.1.	Análisis analítico	56
9.1.2.	Análisis gráfico	59
9.2.	Resultados mecanismo de Toronto	61
9.2.1.	Análisis analítico	61
9.2.2.	Análisis gráfico	63
10.	Discusión	65
11.	Conclusión	67
11.1.	Conclusiones sobre los métodos de cálculo utilizados	67
11.2.	Conclusiones sobre los mecanismos	67

11.3. Conclusiones generales	68
12. Presupuesto	70
12.1. Licencias de Software	70
12.2. Hardware	70
12.3. Horas de trabajo	70
12.4. Presupuesto total	70
13. Pliego de condiciones	71
13.1. Condiciones generales	71
13.1.1. Objeto	71
13.1.2. Documentación que define el proyecto	71
13.1.3. Condiciones facultativas	71
13.1.4. Condiciones del contrato del proyectista	72
13.1.5. Accidentes de trabajo	72
13.1.6. Condiciones de explotación	72
13.1.7. Normativa	72
13.1.8. Plazos y condiciones generales del proyecto	73
13.1.9. Responsabilidades del proyectista	73
13.2. Condiciones particulares	73
13.2.1. Especificaciones de software	73
13.2.2. Especificaciones de equipos	74
13.2.3. Condiciones de los equipos	74
13.2.4. Dossier técnico	74
A. Descripción de funciones predefinidas en Matlab	75
A.1. Función fsolve	75
B. Cálculos	77
B.1. Cálculos del dedo	77
B.2. Función intersección de círculos	77
B.3. Función intersección Recta-Circunferencia	78
B.4. Cálculos mecanismo RML	81

B.4.1. Calcular posición inicial y final	81
B.4.2. Calcular mecanismo	82
B.5. Cálculos mecanismo de Toronto	84
B.5.1. Calcular posición inicial y final	84
B.5.2. Calcular mecanismo	86
B.6. Ventaja mecánica	89
C. Planos	90
Referencias	93

Índice de figuras

1.	Recreación de caballero mecánico según los planos de Leonardo da Vinci de 1495	7
2.	Prototipo Hardiman I	8
3.	Exoesqueleto controlado mediante impulsos cerebrales	9
4.	HandSOME	10
5.	SIFREHAB 1.21	12
6.	Hand of hope	13
7.	CarbonHand	14
8.	IronHand	14
9.	Gloreha Sinfonia	15
10.	NeoMano	16
11.	Modelo cinemático de una mano: cada dedo tiene 3 articulaciones con 3 GDL: índice, medio, anular y meñique tienen MCP, PIP y DIP articulaciones, el pulgar tiene CMC, MCP y IP articulaciones.	17
12.	Exoesqueletos genéricos diseñados para diferentes aplicaciones	20
13.	Tipos de puntos de apoyo en un exoesqueleto de mano	24
14.	Selecciones cinemáticas	26
15.	Distintas colocaciones para el exoesqueleto	27
16.	RML Glove sacado del artículo	29
17.	Mecanismo RML	30
18.	Mecanismo de Toronto	31
19.	Dedo simplificado	32
20.	Mecanismo RML con puntos nombrados	33
21.	Barra 2 mecanismo RML	33
22.	Barra 3 mecanismo RML	33
23.	Barra 4 mecanismo RML	34
24.	Barra 5 mecanismo RML	34
25.	Barra 6 mecanismo RML	34
26.	Punto B calculado mediante la intersección de dos círculos	36
27.	B_{12} y B_{21}	37

28.	B_{12} y B_{22}	37
29.	B_{11} y B_{22}	38
30.	B_{11} y B_{21}	38
31.	Intersección recta circunferencia	39
32.	Intersección de recta-circunferencia 2 posiciones	40
33.	Intersección de recta y circunferencia para posición final y posición inicial.	41
34.	Intersección de 2 circunferencias para calcular punto D	42
35.	Mecanismo de Toronto con puntos nombrados	43
36.	Barra 2 mecanismo de Toronto	43
37.	Barra 3 mecanismo de Toronto	43
38.	Barra 4 mecanismo de Toronto	43
39.	Barra 5 mecanismo de Toronto	44
40.	Barra 6 mecanismo de Toronto	44
41.	Barra 7 mecanismo de Toronto	44
42.	Barra 8 mecanismo de Toronto	44
43.	Intersección circulo-recta punto B	46
44.	Intersección de dos círculos- Punto G	47
45.	Intersección de dos círculos- Punto E	48
46.	Intersección de dos círculos- Punto H	49
47.	Dedo en posición inicial	53
48.	Dedo en posición final - RML	53
49.	Mecanismo RML posición inicial y final	54
50.	Dedo en posición inicial	54
51.	Dedo en posición final - Toronto	55
52.	Mecanismo de Toronto posición inicial y final	55
53.	Mecanismo RML posición inicial- Matlab	57
54.	Mecanismo RML posición intermedia- Matlab	57
55.	Mecanismo RML posición final- Matlab	58
56.	Mecanismo RML acotado - SolidWorks	59
57.	Parámetros derivados RML - SolidWorks	60
58.	Mecanismo de Toronto posición inicial- Matlab	61

59.	Mecanismo de Toronto posición intermedia- Matlab	62
60.	Mecanismo de toronto posición final- Matlab	62
61.	Mecanismo de Toronto acotado - SolidWorks	63
62.	Parámetros derivados de Toronto - SolidWorks	64
63.	Mecanismo RML	69
64.	Mecanismo RML implementado en mano real	69
65.	Intersección de 2 circunferencias	78
66.	Intersección Recta-Circunferencia 2 posiciones	79
67.	Flujo de trabajo	90

Acrónimos

GDL	Grados De Libertad
MCP	Metacarpofalángico
PIP	Proximal Interfalángico
DIP	Distal Interfalángico
CMC	Carpometacarpiano
IP	Interfalángico

1. Objeto

El objetivo general de este proyecto consiste en analizar diversas opciones de mecanismos con un grado de libertad que permitan replicar el movimiento natural del dedo índice durante el agarre de pinza. El propósito es realizar una simulación por ordenador que evalúe los distintos parámetros de diseño y culmine en un diseño funcional.

A través de la simulación por ordenador, se podrán evaluar y comparar las diferentes opciones, considerando factores como la ventaja mecánica.

Al finalizar el proyecto, se espera obtener un diseño funcional basado en las mejores opciones de mecanismos identificadas, lo cual podría ser utilizado como base para futuros desarrollos de dispositivos o exoesqueletos que asistan o faciliten el movimiento del dedo índice durante el agarre de pinza.

Como objetivos más específicos encontramos los siguientes:

- Analizar los mecanismos propuestos: análisis gráfico y análisis analítico
- Optimización de los mecanismos.

2. Alcance

En el alcance de este estudio se pretenden definir las limitaciones que se tendrán en esta investigación. Para empezar este estudio tendrá una duración de tres meses en la cual, al principio se realizara un estudio para evaluar las diferentes alternativas en cuanto a qué productos con este fin existen en el mercado. A continuación, se evaluarán distintas opciones de mecanismo y se comenzará con el análisis y la optimización del mismo haciendo uso de conocimientos adquiridos en asignaturas como teoría de máquinas o diseño de máquinas. Para la realización de dicho análisis y de la optimización se hará uso del programa informático Matlab, haciendo uso de los conocimientos adquiridos durante el grado en relación con el manejo de este programa. También se hará uso del programa CAD 3D Solidworks, para la realización tanto dle análisis gráfico y como de los planos necesarios para cada mecanismo, con ello se usarán conocimientos del área de ingeniería gráfica.

EL estudio para el que se realiza este TFG, DERRAPI, tendrá un alcance en diferentes aspectos como el social y económico:

1. Aspecto económico

- Reducción de coste tanto de traslado como de personal ya que el exoesqueleto trabaja de forma autónoma.
- Coste del exoesqueleto adecuado en calidad/precio a todo tipo de economías

2. Aspecto social

- El presente proyecto de investigación pretender servir de guía para futuras investigaciones en el ámbito de estudio de exoesqueletos de la universidad Jaume I en colaboración con Unidad de Daño Cerebral del Hospital La Magdalena de Castellón.

En cuanto a limitaciones se tienen las siguientes:

- Las medidas de referencia se tomarán de una sola persona por lo que el tamaño de muestra es reducido.

3. Antecedentes

En los últimos 20 años ha aumentado un 25 % el número de casos de ictus entre las personas de 20 a 64 años. Debido a esto, actualmente se fomenta la prevención mediante la divulgación de una serie de hábitos saludables.

La prevención es la mejor forma de frenar el aumento de ictus pero no se puede asegurar que llevar una vida saludable prevenga un posible ictus, por ello actualmente la sociedad se encuentra en una búsqueda de soluciones enfocadas a la rehabilitación ante este accidente cerebro-vascular.

La rehabilitación después de un ictus busca minimizar las discapacidades que el paciente pueda haber experimentado después de este. Es decir, que una vez pasado el ictus comienza un largo camino que busca la recuperación funcional del paciente. Para lograr dicha recuperación de una forma más autónoma se han estudiado diferentes soluciones, entre estas soluciones se encuentran los exoesqueletos.

Los exoesqueletos son estructuras que recubren total o parcialmente el cuerpo del paciente, estos sirven tanto de apoyo como para asistir el movimiento del cuerpo, el cual a través de memoria muscular es capaz de recuperar X capacidad de movilidad.

La finalidad del este proyecto es optimizar y analizar mecanismos que sirven para un exoesqueleto sobre el dedo índice, este exoesqueleto reproducirá el agarra pinza que efectúa dicho dedo junto al pulgar cuyo mecanismo se estudiará en futuros proyectos. Lo que se busca con este exoesqueleto es abaratar los costes de estos para que puedan llegar a cualquier paciente que sufra los efectos de un ictus, sin importar las economías personales.

4. Normas y referencias

4.1. Disposiciones legales y normas aplicadas

Normas utilizadas:

ISO, IEC, UNE y APA

4.2. Bibliografía

La bibliografía se encuentra en la parte final del documento, concretamente en el apartado C

4.3. Programas de cálculo

Para llevar a cabo los cálculos del presente TFG, se han utilizado distintos programas de cálculo, tales como Matlab, Octave y SolidWorks.

4.4. Otras referencias

Este proyecto se ha desarrollado mediante un método colaborativo entre proyectista y director, para ello se ha hecho uso del programa GitHub. Contactar con la autora de este TFG para acceder a los archivos de Matlab.

5. Definiciones y abreviaturas

5.1. Algoritmo Genético

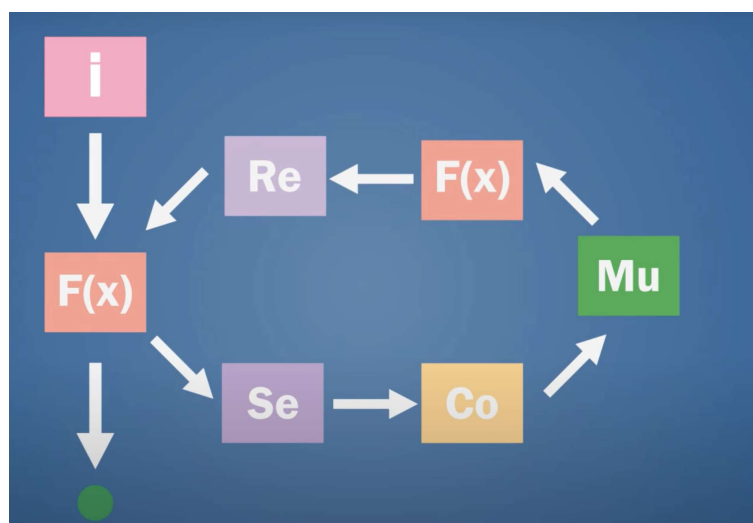
Para optimizar los valores del mecanismo se había propuesto el método de optimización denominado Algoritmo Genético. Este algoritmo es una técnica de búsqueda basada en la teoría de la evolución, en la que se intenta replicar el comportamiento biológico de la selección natural y de la genética.

El algoritmo genético comienza con una población inicial de datos que representan posibles resultados, estos datos en términos biológicos equivalen a los cromosomas. Los datos son sometidos a una función de aptitud $f(x)$, para saber cuan eficaz es el dato que esta codificado, al final de la fase, cada dato va a recibir una calificación/porcentaje final de aptitud. Tras esta calificación, los datos que mayor porcentaje de eficacia muestren serán escogidos para la siguiente fase.

Una vez seleccionados los datos más eficaces, comienza el cruce o recombinación de datos y la mutación de datos. Tras la recombinación de datos y la mutación, los datos son evaluados de nuevo con la función de aptitud para conocer lo eficaces que son los nuevos datos.

Este método es repetido n veces. Se termina cuando se encuentra una solución satisfactoria; cuando se llega al número máximo de iteraciones; cuando se rompe el algoritmo o cuando es detenido manualmente.

Finalmente, este método se implementará en futuros proyectos dentro del ámbito.



5.2. Optimización Cartesiana

Este método consiste en definir un rango para las variables a optimizar y crear una tabla con todas las combinaciones posibles. Para el caso de este TFG maximizando la ventaja mecánica. Será explicado con más detalle a lo largo del apartado de optimización.

6. Estado del arte

6.1. Historia de los exoesqueletos

Los exoesqueletos, también conocidos como trajes robóticos, son dispositivos que se colocan en el cuerpo humano para aumentar la fuerza, la resistencia y la capacidad de movilidad. Estos dispositivos están diseñados para proporcionar un soporte externo que ayuda a los usuarios a realizar tareas que de otra manera serían difíciles o imposibles de realizar.

La idea de los exoesqueletos no es nueva, se remonta a la época del Renacimiento, cuando el artista e inventor italiano Leonardo da Vinci diseñó un traje de armadura mecánica. Sin embargo, no fue hasta 1890 cuando el ruso Nicholas Yagin desarrolló el primer dispositivo similar al exoesqueleto, este dispositivo consistía en un conjunto de aparatos asistidos para caminar, saltar y correr.

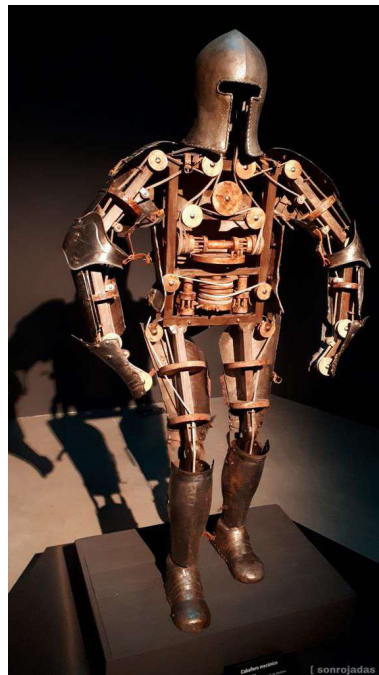


Figura 1: Recreación de caballero mecánico según los planos de Leonardo da Vinci de 1495

En 1927, Leslie C. Kellie, un inventor estadounidense, desarrolló un dispositivo al que le dio el nombre de podómetro, este funcionaba con energía de vapor con ligamentos artificiales que actuaban en paralelo a los movimientos del cliente.

La primera aplicación práctica de los exoesqueletos se produjo en la década de 1960, cuando el Departamento de Defensa de los Estados Unidos comenzó a investigar la tecnología para ayudar a los soldados a transportar cargas pesadas. Desarrollaron un traje al que llamaron Hardiman, este funcionaba con sistemas hidráulicos y electricidad. Amplificaba la fuerza del usuario en un factor de 25, es decir, que cuando este levantaba 110 kg sentía que levantaba 4,5 kg. Sin embargo, este exoesqueleto tenía una gran limitación ya que su peso oscilaba los 680 kg.

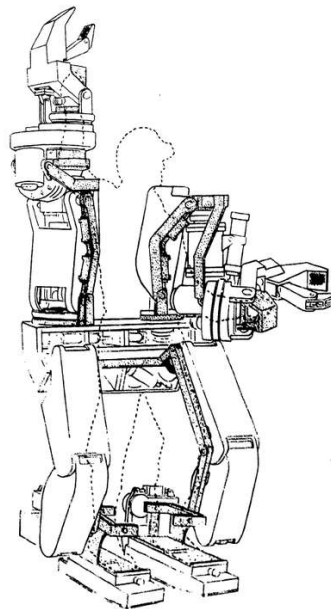


Figura 2: Prototipo Hardiman I

Paralelamente, los primeros robots humanoides y exoesqueletos activos se desarrollaban en el Instituto Mihajlo Pupin (Serbia) por un equipo dirigido por el Profesor Miomir Vukobratović. Primero, se desarrollaron los sistemas de locomoción con patas, teniendo como objetivo ayudar en la rehabilitación de las personas que sufrían de paraplejía. En 1972, se probó en la Clínica Ortopédica de Belgrado un exoesqueleto activo para la rehabilitación de personas parapléjicas que funcionaba neumáticamente.

En 1985, un ingeniero del Laboratorio Nacional de los Álamos desarrolló un exoesqueleto con el nombre de Pitman, este se componía de una armadura de gran alcance para soldados de infantería. El diseño incluía sensores de escaneo cerebral y fue considerado demasiado futurista por lo que nunca fue construido.

A lo largo de las décadas siguientes, la investigación y el desarrollo de exoesqueletos se intensificaron, con un enfoque creciente en su uso en la industria, el ejército y la medicina. En la década de 2000, los exoesqueletos comenzaron a utilizarse en la rehabilitación de personas que habían sufrido lesiones graves o enfermedades como la poliomielitis. En la actualidad, también se utilizan en la atención domiciliaria y en la asistencia a personas mayores y personas en situación de discapacidad.

Uno de los avances más importantes dentro del área de la medicina ha sido el desarrollo de exoesqueletos controlados por el cerebro, que utilizan la tecnología de electroencefalografía (EEG) para permitir que el usuario controle el dispositivo mediante impulsos cerebrales.

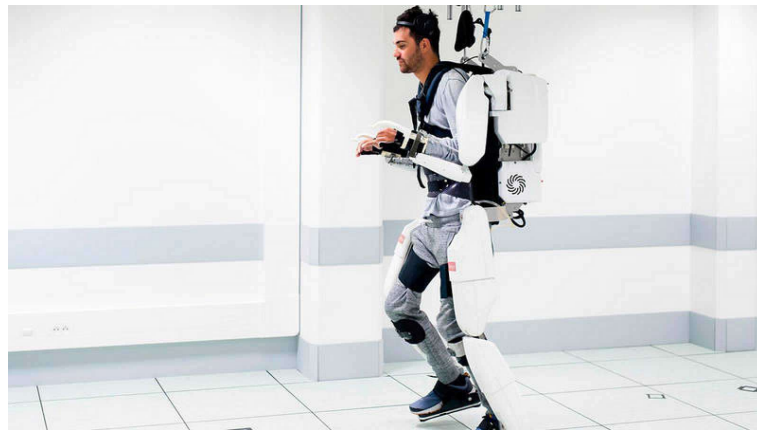


Figura 3: Exoesqueleto controlado mediante impulsos cerebrales

A medida que la tecnología de los exoesqueletos sigue evolucionando, es probable que veamos una amplia gama de aplicaciones en la industria, la medicina y el ámbito militar. Con el tiempo, es posible que los exoesqueletos se conviertan en una herramienta esencial para mejorar la calidad de vida de las personas y ayudar a superar las limitaciones físicas.

6.2. Primer exoesqueleto de mano

A pesar de la búsqueda exhaustiva para resolver esta cuestión, se ha llegado a la conclusión de que no existe una fecha exacta o un único invento que pueda ser considerado el primero. No obstante, los exoesqueletos para manos han sido una idea recurrente en la investigación científica desde hace mucho tiempo.

En la década de 1960, la NASA empezó a desarrollar trajes espaciales que incluían elementos de exoesqueletos para facilitar ciertas tareas a los astronautas. En estos trajes introducían unos refuerzos de metal a los guantes que mejoraban la fuerza de agarre y la protección contra objetos afilados.

En 1969, George Devol, ingeniero estadounidense, desarrolló el primer brazo robótico controlado por ordenador, este es considerado como una de las bases para la posterior creación del exoesqueleto de mano. A raíz de esto, diversos inventores y empresas han desarrollado exoesqueletos para manos con diferentes aplicaciones y objetivos.

Sin embargo, si se pone el foco específicamente en el primer exoesqueleto para manos que se ha creado, este tiene el nombre de "HandSOME" (Hand Rehabilitation Exoskeleton) desarrollado en la Universidad de Harvard en 2011. Fue diseñado específicamente para asistir en rehabilitaciones de personas que habían sufrido un accidente cerebro-vascular o que tenían una lesión medular.



Figura 4: HandSOME

Se trata de un dispositivo ligero que se ajusta a la mano y los dedos del paciente y que está equipado con sensores que detectan los movimientos de la mano. Está

conectado a un ordenador que controla tanto la dirección de los movimientos como la fuerza y que a la vez proporciona una retroalimentación visual a través de la pantalla.

6.3. Modelos en el mercado

Se ha hecho una búsqueda de exoesqueletos que estén en el mercado para comparar y situar el modelo que se busca en este proyecto.

En el caso de este proyecto el exoesqueleto actúa en los dedos índice y pulgar simulando el agarre pinza, pero no se ha encontrado ningún dispositivo de estas características en el mercado. Por ello, se comparan exoesqueletos que actúan en toda la mano o en diferentes dedos.

SIFREHAB-1.21

SIFREHAB 1.21 es un guante en el que se efectúa una especie de terapia de espejo, es decir que la mano a tratar efectuará los movimientos de otra mano. Tiene un peso de 3kg en total y un precio de 10.295\$ que al cambio son 9.568,17€.



Figura 5: SIFREHAB 1.21

Hand of hope

Hand of hope es un dispositivo que fija la mano un soporte, el mecanismo está dispuesto en la parte dorsal de la mano. Tiene un precio que oscila los 5.000\$ que al cambio son 4.587,80€. El peso total del soporte y el guante esta alrededor de 800g. Este exoesqueleto de mano tiene cuatro dedos activos y se controla mediante una aplicación móvil.



Figura 6: Hand of hope

CarbonHand

CarbonHand es una solución modular compuesta por un guante, cables de transmisión y una unidad de control y potencia. Este dispositivo portátil se acciona mediante una serie de sensores de presión integrados en el guante. Tiene un peso de 700g y un precio de 7.000 \$ que al cambio son 6.505,80€

Este modelo solo esta disponible en Suecia, Noruega, Bélgica, Alemania, Italia y Japón.



Figura 7: CarbonHand

Ironhand®

Este dispositivo, refuerza la capacidad de hacer presión y sostener objetos con la mano de manera continuada. Es mas aparatoso que el resto ya que toda la electrónica va enganchada al pecho y los cables descenden por el brazo. Tiene un precio de 10.000\$ que al cambio son 9.175,60€. Su peso es de 1kg.



Figura 8: IronHand

Gloreha Sinfonia

Este exoesqueleto de mano tiene cinco dedos activos y se controla mediante movimientos del muñeca. Su precio es de 7.500\$ que al cambio son 6.881,70€. Tiene un peso de 1,1kg.



Figura 9: GloReha Sinfonia

NeoMano

NeoMano es un exoesqueleto que ayuda a la rehabilitación de los dedos índice, medio y pulgar. Está diseñado para ayudar a las personas con parálisis de manos a realizar actividades diarias. Su precio es de 2.500\$ que equivalen a 2.293,90€. Es el menos pesado de todos los estudiados, con un peso de 100g.



Figura 10: NeoMano

Como vemos las alternativas encontradas son muy costosas, algunas se venden exclusivamente en algunos países o tienen un peso relativamente alto. A continuación, se comparan los distintos modelos en una tabla con el fin de aclarar que aspectos deberá cumplir el exoesqueleto del proyecto DERAPPI.

Modelo	Precio	Peso	Venta
SIFREHAB-1.21	9.568,17€	3kg	Global
Hand of hope	4.587,8€	800g	Japón
CarbonHand	6.505,80€	700g	Suecia, Noruega, Bélgica, Alemania, Italia y Japón
Ironhand®	9.175,60€	1kg	Global
Gloreha Sinfonia®	6.881,70€	1,1kg	Sin datos
NeoMano	2.293,90€	100g	Estados Unidos y Canadá

Tabla 1: Exoesqueletos de mano/dedos

7. Requisitos de diseño

7.1. Propiedades generales

- **Anatomía de la mano:** La mano humana tiene 5 dedos, 15 articulaciones y 20 grados de libertad (GDL) y un exoesqueleto de mano debe cumplir con la anatomía de la mano (ver Figura 11). Los dedos índice, medio, anular y meñique, tienen 3 articulaciones con 4 GDL: metacarpofalángico (MCP) con 1 GDL de flexión/extensión y 1 GDL abducción/aducción, proximal interfalángico (PIP) y distal interfalángico (DIP) con 1 GDL flexion/extension cada uno. Aunque PIP y DIP sean físicamente independientes, están anatómicamente ligados entre ellos, por lo que se mueven juntos. El pulgar, de forma similar, tiene 3 articulaciones con 4 GDL: carpometacarpiano (CMC) con 1 GDL de flexión/extensión y 1 GDL abducción/aducción, MCP e interfalángico (IP) con 1 GDL flexión/extensión cada uno.

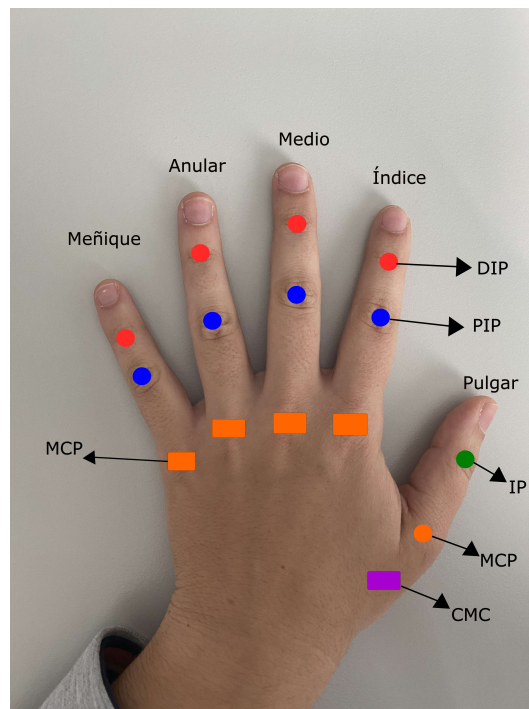


Figura 11: Modelo cinemático de una mano: cada dedo tiene 3 articulaciones con 3 GDL: índice, medio, anular y meñique tienen MCP, PIP y DIP articulaciones, el pulgar tiene CMC, MCP y IP articulaciones.

- **Seguridad:** Es fundamental que un exoesqueleto de mano garantice constantemente diversos aspectos relacionados con la seguridad. El manejo y el movimiento del exoesqueleto deben ser congruentes con los movimientos naturales de las articulaciones de los dedos y el tamaño de la mano. Además, es necesario ajustar los límites mecánicos de manera que cuando las articulaciones alcancen su rango máximo, el mecanismo deje de ejercer fuerzas sobre ellas.
- **Comodidad:** Es crucial que el exoesqueleto proporcione comodidad al paciente, dado que este deberá utilizar el dispositivo durante un período de tiempo determinado. El diseño cinemático y ergonómico debe garantizar que el exoesqueleto no cause ninguna clase de perjuicio al usuario.
- **Fuerza de transmisión efectiva:** Es imprescindible que el dispositivo transmita fuerzas de manera orgánica al paciente. Mientras se controlan múltiples articulaciones en los dedos, los esfuerzos de torsión alrededor de dichas articulaciones deben mantenerse dentro de un ratio adecuado para evitar cualquier tipo de lesión en cualquier orientación. Por último, es crucial que las fuerzas entre el exoesqueleto y las falanges sean perpendiculares, ya que si fueran tangenciales, el dedo podría deslizarse y salirse del dispositivo.
- **Asequibilidad:** Un exoesqueleto debe contar con un precio accesible para las clínicas, lo cual permitirá que los pacientes puedan utilizar estos dispositivos durante sus procesos de rehabilitación. Asimismo, es importante que estos dispositivos sean de fácil mantenimiento, sin requerir conocimientos técnicos avanzados. Además, deben ser funcionales para adaptarse a una amplia variedad de pacientes, tanto en términos de tamaño de las manos como de niveles de discapacidad.

7.2. Propiedades específicas según la aplicación

7.2.1. Clasificación según aplicación final

- **Exoesqueletos para rehabilitación:** Este tipo de exoesqueletos se desarrollan principalmente para tratar discapacidades en pacientes que están bajo tratamiento clínico. Por lo general, se enfocan en acciones repetitivas, los más comunes abren y cierran los dedos. Se recomienda que estos exoesqueletos sean portátiles, aunque no es obligatorio, sí es preferible. Es fundamental que no resulten incómodos y que no requieran un esfuerzo considerable para su puesta en marcha. Además, suele ser preferible que la parte inferior de la mano quede libre, lo cual permite que el paciente interactúe con objetos y aplique fuerza sobre superficies. Otro factor importante es la capacidad de ajuste rápido del dispositivo para diferentes tareas, aunque en algunos casos específicos solo se busca recuperar un movimiento determinado y no se requiere dicha función de ajuste.
- **Exoesqueletos de asistencia:** Estos dispositivos están creados para brindar asistencia a usuarios con discapacidad en las manos, en tareas cotidianas como agarrar una cuchara para comer o sostener un vaso de agua (ver figura 12b)). La portabilidad y la capacidad de ajuste fácil son aspectos de gran importancia para este tipo de exoesqueletos. Es fundamental que permitan a los pacientes interactuar con objetos reales y aplicar fuerza sobre ellos.
- **Exoesqueletos hápticos:** Estos dispositivos se diseñan con el objetivo de permitir que el paciente interactúe en un entorno virtual. La capacidad de ajuste instantáneo para diferentes ejercicios y la portabilidad del dispositivo son características clave de un exoesqueleto háptico.



(a) Exoesqueleto de rehabilitación (b) Exoesqueleto de asistencia (c) Exoesqueleto háptico

Figura 12: Exoesqueletos genéricos diseñados para diferentes aplicaciones

7.2.2. Requisitos específicos según aplicación

También se pueden clasificar los exoesqueletos según su aplicación final. Como cada propiedad puede ser llevada a cabo a través de las decisiones tomadas en el diseño del aparato, a continuación se desarrolla una lista con las selecciones de diseño más apropiadas:

- **Control independiente de cada dedo:** Para poder agarrar una diversa variedad de objetos, los dedos deben adoptar diferentes posiciones en distintos planos. Por lo tanto, los exoesqueletos de asistencia y hápticos deben contar con un control independiente para cada dedo. Sin embargo, los exoesqueletos de rehabilitación no requieren necesariamente esta característica, ya que su funcionalidad se centra en ejercicios repetitivos que implican abrir y cerrar todos los dedos al mismo tiempo.
- **Bienestar:** Para los pacientes con discapacidades, llevar exoesqueletos puede resultar doloroso. Por ello, tanto los exoesqueletos de rehabilitación como los de asistencia deben garantizar que el dispositivo se adapte adecuadamente a la mano de cada paciente, además de asegurar una posición inicial que sea lo más natural posible. Esto es fundamental para minimizar el malestar y maximizar la comodidad durante el uso del exoesqueleto.
- **Fuerzas de salida:** En algunos casos, los pacientes con discapacidad pueden experimentar rigidez en las articulaciones, lo que implica que el exoes-

queleto debe ser capaz de proporcionar una cantidad adecuada de fuerza para facilitar la rotación de las articulaciones. Es importante que el exoesqueleto esté diseñado y calibrado de manera que pueda aplicar la fuerza necesaria para superar la rigidez y permitir un movimiento más fluido y cómodo para el paciente. Esto puede contribuir a mejorar la funcionalidad y la calidad de vida de los usuarios con discapacidad.

- **Ligereza y portabilidad:** estos aspectos son importantes a considerar en un exoesqueleto diseñado para asistir en tareas diarias. En ese caso, es fundamental que el dispositivo sea lo más liviano y compacto posible para que el usuario pueda llevarlo cómodamente y realizar sus actividades diarias sin restricciones. Sin embargo, en el contexto de un exoesqueleto de rehabilitación utilizado en clínicas, donde el enfoque está en ejercicios específicos de rehabilitación y terapia, la ligereza y portabilidad pueden ser menos prioritarias. En estos casos, es posible que el exoesqueleto se utilice dentro del entorno clínico y no requiera una movilidad constante o transporte frecuente. La atención principal puede centrarse en la efectividad terapéutica y en la capacidad del dispositivo para proporcionar el soporte y los movimientos necesarios para la rehabilitación del paciente.
- **Transparencia:** Permitir que el paciente pueda ver y reconocer su propia mano a través del exoesqueleto puede ser muy beneficioso en términos de efectividad y participación del paciente. Cuando el paciente tiene una visión clara de su mano y puede observar cómo se mueve y realiza acciones, se crea una mayor conexión entre su percepción y los movimientos generados por el exoesqueleto. Esto puede aumentar la sensación de control y compromiso del paciente, lo que a su vez puede tener un impacto positivo en la eficacia de la terapia y la motivación del paciente para participar activamente en el proceso de rehabilitación. La transparencia en el diseño del exoesqueleto puede brindar una experiencia más inmersiva y realista, lo que contribuye a un enfoque más centrado en el paciente y a resultados terapéuticos más positivos.
- **Pose del dedo:** Es cierto que en ciertos tratamientos, como en el caso de los exoesqueletos de rehabilitación, es necesario realizar un seguimiento de la posición y los movimientos de los dedos del usuario. Esto permite monitorear el progreso del paciente durante el tratamiento y evaluar la mejora

obtenida. El seguimiento preciso de la pose de los dedos puede proporcionar datos objetivos sobre la funcionalidad y el rendimiento del usuario. Estos datos pueden ser utilizados por los terapeutas para ajustar y adaptar el programa de rehabilitación de acuerdo con las necesidades específicas del paciente. Además, el uso de juegos y actividades interactivas en el tratamiento con exoesqueletos de rehabilitación puede ayudar a mantener la motivación y el compromiso del paciente. Estas actividades lúdicas no solo hacen que el tratamiento sea más entretenido, sino que también permiten una mayor variedad de movimientos y ejercicios, evitando que se convierta en algo rutinario. En resumen, el seguimiento de la pose de los dedos en los exoesqueletos de rehabilitación es esencial para evaluar el progreso y personalizar el tratamiento, y la implementación de juegos y actividades interactivas puede mejorar la participación y el interés del paciente en el proceso de rehabilitación.

La combinación de estas selecciones de diseño conducen a un dispositivo correctamente adaptado y apto para el uso.

7.3. Movilidad

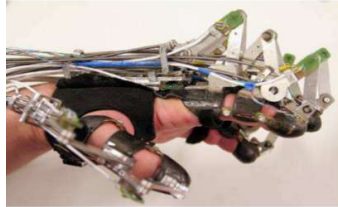
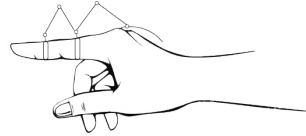
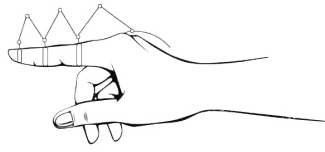
7.3.1. Número de apoyos

El dedo humano se compone de tres falanges: la falange distal, la falange medial y la falange proximal. Esta estructura anatómica permite una gran movilidad y flexibilidad durante las diversas actividades manuales que realizamos a diario. Al diseñar un exoesqueleto, se puede aprovechar esta característica para crear un dispositivo que interactúe con las diferentes falanges del dedo y transmita fuerzas de actuación con el objetivo de facilitar y mejorar la rotación de las articulaciones.

Los dispositivos con múltiples apoyos son beneficiosos para mejorar el agarre de objetos durante la rehabilitación y proporcionan una mayor seguridad al paciente al limitar la espasticidad de manera más estricta. Sin embargo, el diseño de estos dispositivos se vuelve más complejo al buscar una alta movilidad del dedo. Los mecanismos con dos apoyos pueden lograr cierta movilidad del dedo con hasta 3 o 4 grados de libertad (GDL). Por otro lado, los dispositivos con un solo apoyo en la falange distal pueden manejar hasta 4 GDL.

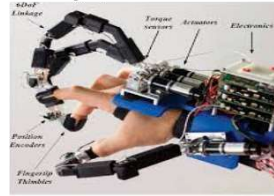
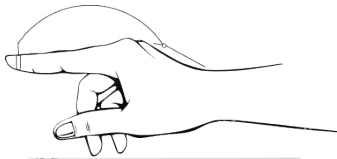
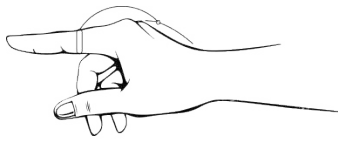
Es cierto que reducir el número de apoyos simplifica el mecanismo del exoesqueleto, pero esto conlleva la desventaja de que puede haber dificultades para reflejar de manera realista las reacciones al interactuar con objetos en el caso de dispositivos de asistencia o hápticos. Por ejemplo, un dispositivo con un solo apoyo en la punta del dedo permite la interacción con objetos, pero no permite aplicar fuerzas en otras falanges para lograr un agarre más realista.

En resumen, los dispositivos con múltiples apoyos mejoran el agarre y la seguridad durante la rehabilitación al limitar la espasticidad de forma estricta. Sin embargo, la complejidad del diseño aumenta al buscar una alta movilidad del dedo. Por otro lado, los dispositivos con un solo apoyo simplifican el mecanismo, pero pueden tener limitaciones para reflejar reacciones realistas en el agarre. La elección entre estos enfoques depende de los objetivos específicos del dispositivo y las necesidades del paciente en términos de rehabilitación o asistencia.



(a) 3 puntos (3 GDL)

(b) 2 puntos (2 GDL)



(c) 1 punto (1 GDL)

(d) 1 punto (3 GDL)

Figura 13: Tipos de puntos de apoyo en un exoesqueleto de mano

7.4. Diseño mecánico

7.4.1. Estructura cinemática

La estructura cinemática de un exoesqueleto de mano puede adoptar la forma de un guante o un mecanismo. Los dispositivos tipo guante precisan un guante flexible con sensores que el paciente lleva puesto, y son especialmente adecuados para aplicaciones hápticas. Por otro lado, los exoesqueletos resisten las actividades del usuario gracias a un cable de transmisión (ver figura 14a) o mecanismo de transmisión (ver figura 14b). Incluso aunque el apoyo con el dedo sea a través de un Velcro, los usuarios deben colocar la mano en una posición inicial determinada.

Los dispositivos que se conforman por mecanismos utilizan barras que se colocan en los dedos y permiten realizar una variedad de movimientos en ellos. Estos mecanismos se pueden configurar de diferentes formas, como girar solo la articulación metacarpofalángica, proporcionar un acoplamiento parcial o establecer una conexión únicamente con la punta del dedo, entre otras opciones. Si se desea lograr un control independiente para cada dedo, será necesario contar con actuadores individuales que permitan ajustar y controlar de manera independiente los movimientos de cada dedo.

Los exoesqueletos basados en mecanismos pueden simplificarse en base al número de actuadores al utilizar estructuras cinemáticas diferentes. Al controlar la mano con uno o dos actuadores, se puede simplificar en gran medida el diseño del exoesqueleto y abaratar los costes del dispositivo.

Los dispositivos acoplados interactúan en múltiples puntos del dedo y consiguen mover las articulaciones en proporciones ajustadas por el mecanismo (ver figura 14d). Estos mecanismos controlan el movimiento con 1 o dos actuadores.

A diferencia de los dispositivos acoplados, dispositivos apoyados solo en la punta del dedo, interactúan desde un solo punto y logran reproducir el movimiento independientemente de como se mueven las articulaciones. Estos dispositivos utilizan un solo actuador, lo que los hace muy económicos y fáciles de transportar.

Por último, los dispositivos subactuados son aquellos que utilizan un solo actuador para controlar múltiples articulaciones. Estos dispositivos ajustan automáticamente las fuerzas aplicadas en las falanges en respuesta a las fuerzas de interacción, gracias a diversos componentes distribuidos a lo largo del mecanismo (ver figura 14e). Los elementos pasivos dispuestos a lo largo del mecanismo

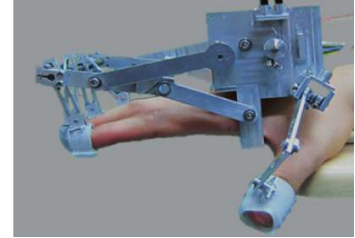
aseguran que el dispositivo sea lo mas cómodo posible.



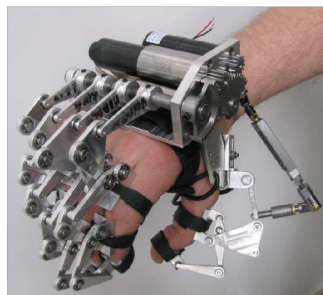
(a) Guante



(b) Mecanismo articulado



(c) Apoyo en la punta del dedo



(d) Dispositivo acoplado



(e) Dispositivo subactuado

Figura 14: Selecciones cinematicas

7.4.2. Colocación del mecanismo

La ubicación de los componentes es crucial para el diseño del dispositivo, especialmente en aquellos conformados por mecanismos. Existen tres opciones principales para su colocación: dorsal, lateral y palmar, y es importante que se elija la más adecuada según la aplicación del dispositivo.

Los **dispositivos dorsales** se conforman de mecanismos o componentes de transmisión ubicados en la parte superior de los dedos(ver figura 15a). Al igual que los dispositivos laterales, permiten que el usuario interactúe con objetos. Sin embargo, suelen ser mas aparatosos y muchos no permiten ver la mano en su totalidad.

Los **dispositivos palmares** se conforman de mecanismos o componentes de transmisión ubicados sobre la palma de la mano (ver figura 15b). Sin embargo, son los dispositivos menos usados ya que no permiten el agarre de objetos.

Los **dispositivos laterales** se conforman de mecanismos o componentes de transmisión ubicados en uno o en ambos lados del dedo (ver figura 15c). Estos dispositivos dejan libre la palma de la mano por lo que permiten agarrar objetos. Además, permiten que los pacientes puedan ver su mano, lo cual es importante para reconocer y visualizar el progreso durante los procesos de rehabilitación.

En cualquiera de las tres disposiciones, el mecanismo se sujeta a la mano a través de Velcro, sujeciones flexibles o dedales.

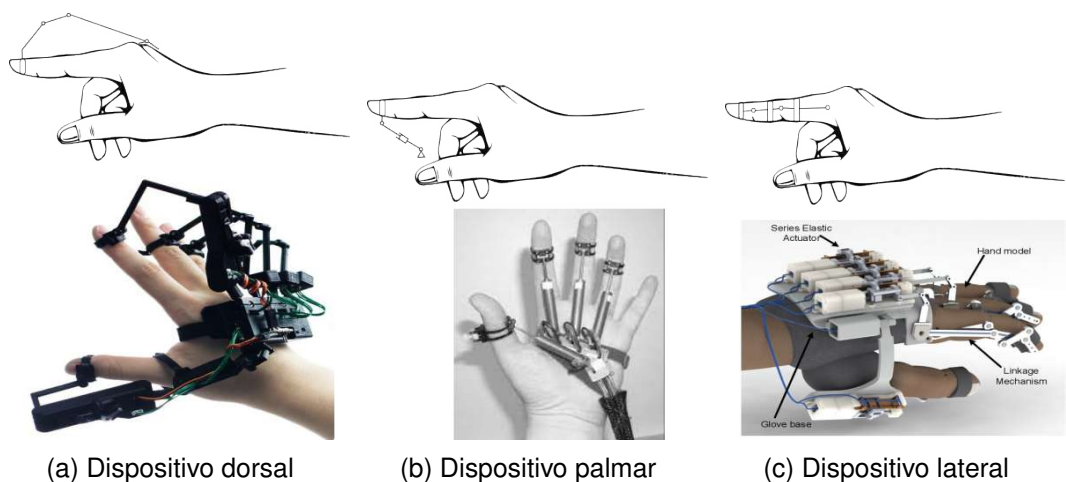


Figura 15: Distintas colocaciones para el exoesqueleto

7.5. Selección de características para el mecanismo DERAPPI

Después de analizar en detalle las diferentes características que pueden tener los exoesqueletos de mano, se tomará la decisión sobre el diseño que se investigará en este trabajo de fin de grado. Para ello se tendrán en cuenta las recomendaciones dadas por los médicos y los consejos y decisiones de los investigadores principales de el proyecto DERAPPI.

Finalmente se presentará una propuesta de mecanismo con un grado de libertad, el cual contará con un punto de apoyo situado en la falange distal y que estará dispuesto en la posición dorsal.

8. Análisis

8.1. Presentación de los mecanismos a estudiar

- **Mecanismo RML:**

Este mecanismo ha sido obtenido del artículo ubicado en la bibliografía como [7]. Se trata de un mecanismo compuesto por cinco eslabones más el eslabón fijo o tierra.

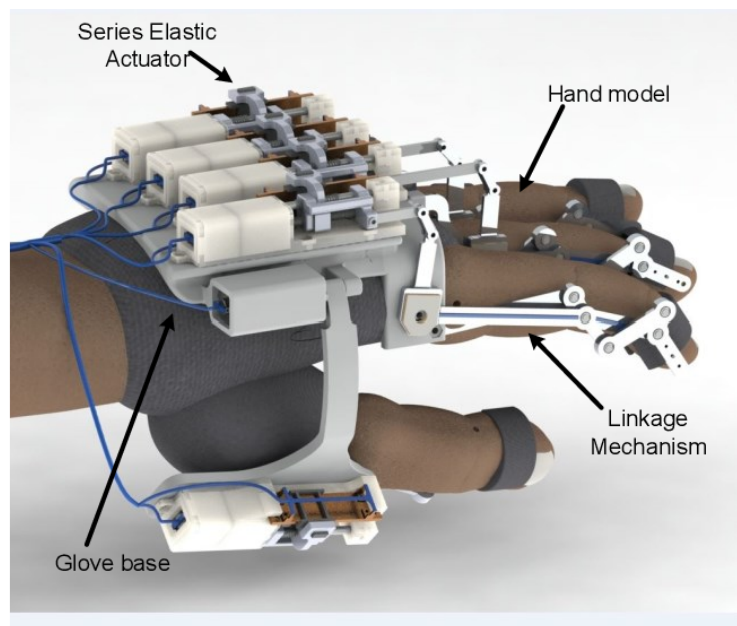


Figure 1. RML glove

Figura 16: RML Glove sacado del artículo

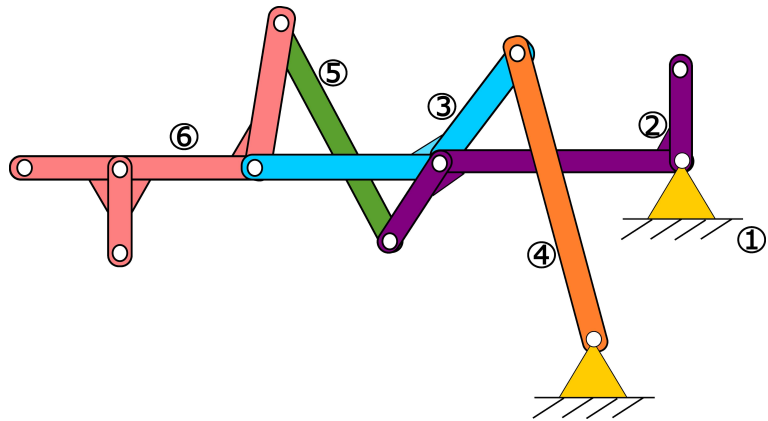


Figura 17: Mecanismo RML

Como podemos observar en la figura 17, el eslabón 2 consta de tres barras, siendo la barra vertical la que acciona todo el mecanismo.

■ Mecanismo de Toronto

En segundo lugar se estudiará el mecanismo de Toronto, este mecanismo ya ha sido estudiado con anterioridad en diversos estudios aplicado a una prótesis de mano o a una pinza robótica.

Este mecanismo se compone de un total de siete eslabones, además del eslabón fijo. A diferencia del mecanismo previamente mencionado, que se activaba mediante la rotación de la barra vertical del segundo eslabón, el mecanismo de Toronto se acciona mediante el desplazamiento de una corredera-deslizadera. Sin embargo, como se detallará en la sección de cálculos, se ha configurado de manera que ambos mecanismos presenten el mismo ángulo de entrada. Esto permitirá obtener una comprensión más sólida y una comparación más precisa entre ambos.

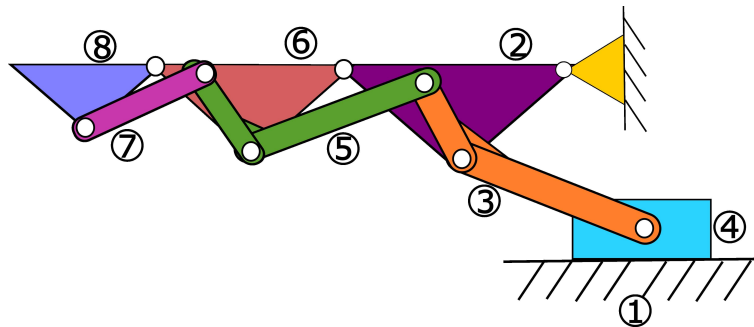


Figura 18: Mecanismo de Toronto

8.2. Datos de partida

Para empezar, resulta de suma importancia tener en cuenta que los datos iniciales son extraídos de una tabla de datos elaborada experimentalmente por uno de los investigadores involucrados en el proyecto. Son datos reales tomados con un guante que seguía la trayectoria del dedo a estudiar. Esta tabla proporciona directamente los ángulos medidos para cada una de las falanges del dedo. Por consiguiente, se llevará a cabo en primer lugar un análisis inicial de manera simplificada con el propósito de definir las dimensiones y posiciones requeridas para el dedo índice.

8.3. Análisis dedo

Conforme se ha explicado en la sección anterior y se aprecia en la figura 19, el dedo se compone de tres falanges, cada una de las cuales posee un ángulo de rotación asociado. Siendo, θ_7 el ángulo que forma la falange proximal con la horizontal, θ_8 que denota el ángulo que forma la falange medial respecto a la falange proximal y finalmente θ_9 que representa el ángulo que forma la falange distal con respecto a la falange medial.

Con estos datos y sabiendo, la norma de los vectores **O7R**, **RS** y **ST** o dicho de otra forma la longitud de cada falange, se tienen todos los datos necesarios para definir las posiciones del dedo. Estos cálculos se encuentran en las ecuaciones B.1.

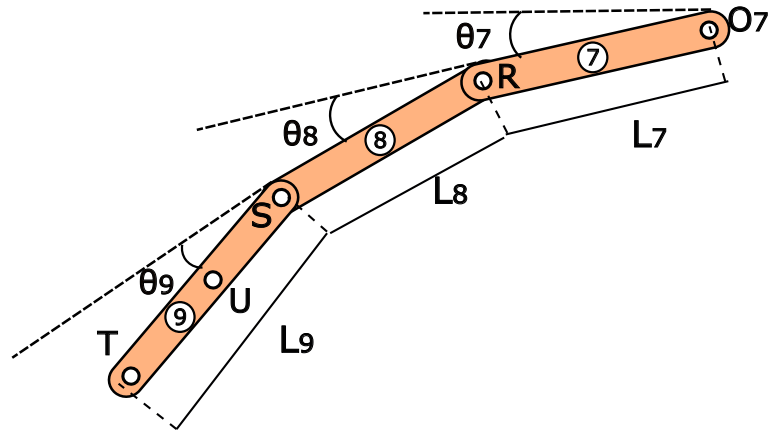


Figura 19: Dedo simplificado

8.4. Análisis analítico del mecanismo RLM

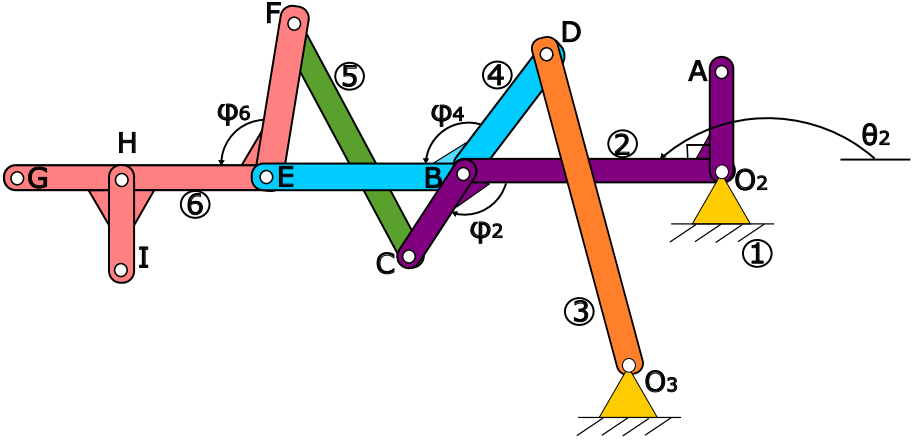


Figura 20: Mecanismo RLM con puntos nombrados

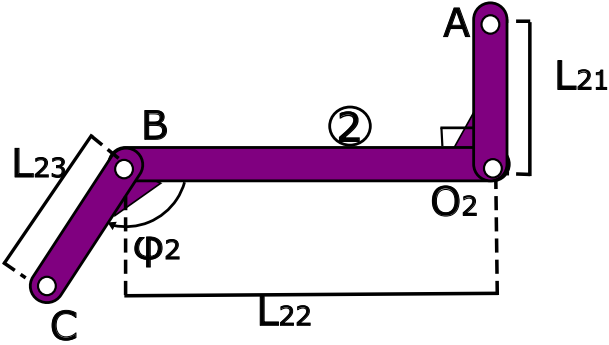


Figura 21: Barra 2 mecanismo RLM

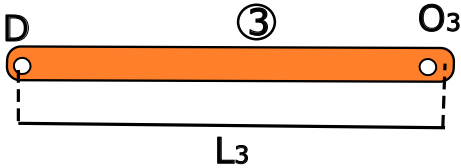


Figura 22: Barra 3 mecanismo RLM

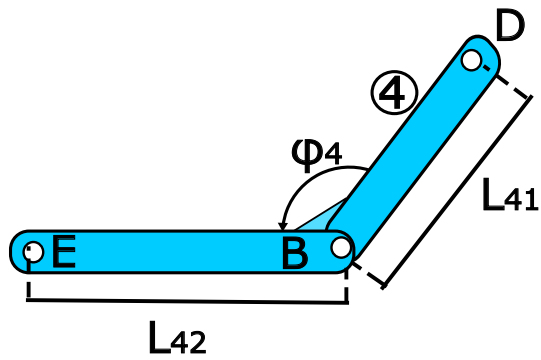


Figura 23: Barra 4 mecanismo RML

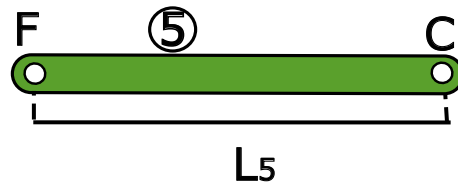


Figura 24: Barra 5 mecanismo RML

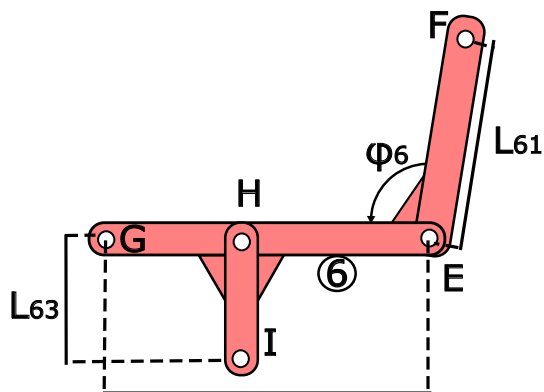


Figura 25: Barra 6 mecanismo RML

El análisis de este mecanismo consta de dos fases. La primera, utiliza los datos de la tabla para establecer una posición inicial y una posición final del dedo. En esta parte se pueden diferenciar dos tipos de datos: variables de diseño y parámetros derivados, se definirán en el apartado correspondiente a dicha fase. La segunda fase, utiliza todos los datos, tanto de diseño como los parámetros derivados que ya han sido obtenidos, y calcula las posiciones del mecanismo.

8.4.1. Cálculo de posición inicial y final

Como se ha comentado con anterioridad, hay 2 tipos de datos, variables de diseño y parámetros derivados del cálculo, están indicados en la tabla 2.

Eslabón	Variables de diseño	Parámetros derivados
1	$O_{2x}, O_{2y}, O_{3x}, O_{3y}$	-
2	$L_{21}, L_{22}, L_{23}, \phi_2$	-
3	-	L_3
4	L_{42}, ϕ_4	L_{41}
5	-	L_5
6	L_{62}, ϕ_6	L_{61}

Tabla 2: Datos mecanismo RML

Para empezar habrá que definir los puntos del sistema en la posición final e inicial. Se procederá a definir los puntos del mecanismo de izquierda a derecha para ambas posiciones. El punto O_2 es un dato conocido en el problema, al igual que el punto O_3 . Se hacen coincidir los Puntos E y G con los puntos del dedo S y T , respectivamente. Para sacar el punto B se necesita aplicar el método de intersección de dos círculos explicado en apartado B.2. En este caso un círculo estará centrado en O_2 y el otro en E_1 para la posición definida por θ_{ini} , de igual manera uno está centrado en O_2 y el otro en E_2 para θ_{end} . Para que esto sea posible, se han de cumplir dos condiciones para cada posición del dedo:

1. La suma de las normas de los vectores O_2B y L_{42} , tiene que ser menor que la norma del vector O_2E . De no cumplirse esta condición los círculos no intersectarían al quedar demasiado lejos uno del otro.
2. La resta de las normas de los vectores O_2B y L_{42} deberá ser mayor que la norma del vector O_2E , ya que si esto no ocurre los círculos no intersectarían al quedar uno dentro del otro.

En caso de cumplirse las condiciones establecidas, se obtendrán dos puntos correspondientes a cada posición, lo cual requerirá la selección de uno de ellos.

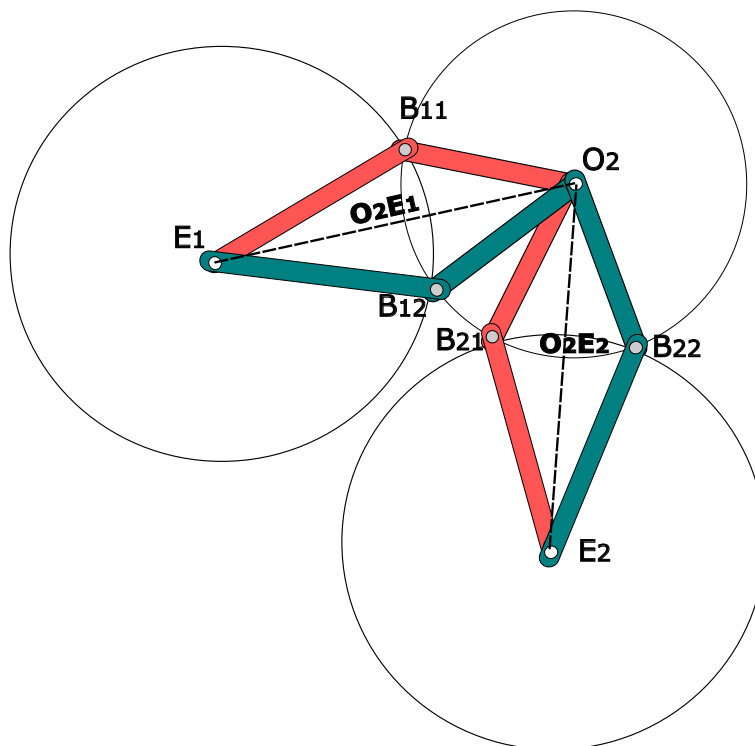


Figura 26: Punto B calculado mediante la intersección de dos círculos

Para escoger el punto necesario, primero hemos de calcular los ángulos θ_{ini} y θ_{end} para los dos puntos en las dos posiciones tal y como se muestra en el conjunto de ecuaciones 9 del anexo de cálculos. Una vez tenemos θ_{ini1} θ_{ini2} se harán pruebas para ver cual dará un mejor resultado. Lo mismo se aplicará para los ángulos θ de cada punto B en la posición final.

En el caso de que alguno de estos ángulos resulte negativo, se le sumará 360° para hacerlo positivo.

Ahora, se necesita elegir los puntos definitivos de B , es decir, elegir entre combinaciones de B las cuales darán lugar a su vez a combinaciones de los ángulos iniciales: θ_{2Ini} mayor y θ_{2End} de menor valor; θ_{2Ini} mayor y θ_{2End} mayor; θ_{2Ini} menor y θ_{2End} mayor; y por ultimo, θ_{2Ini} menor y θ_{2End} menor. Para ello, se comprobará en Matlab cual da mejor resultado.

- θ_{2Ini} mayor y θ_{2End} menor

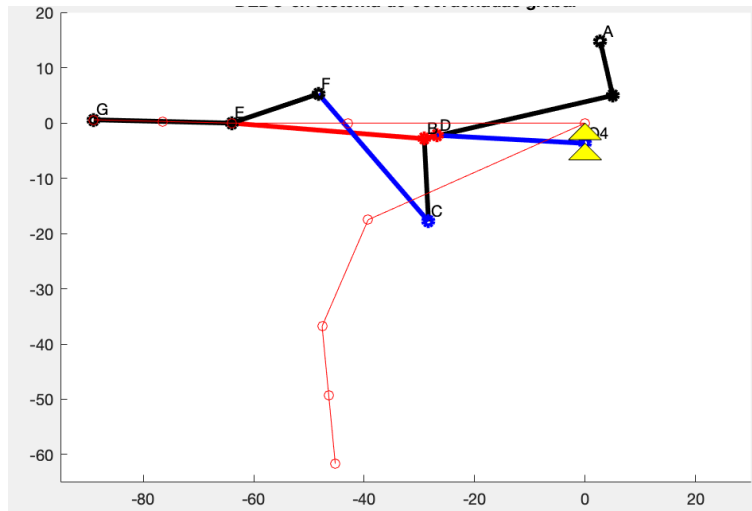


Figura 27: B_{12} y B_{21}

Como podemos observar esta combinación es B_{12} y B_{21} . En este caso la barra L_{41} que es la que conecta B y D , es demasiado pequeña por lo que cuando se ejecuta el programa se puede ver que no hay movimiento.

- θ_{2Ini} mayor y θ_{2End} mayor

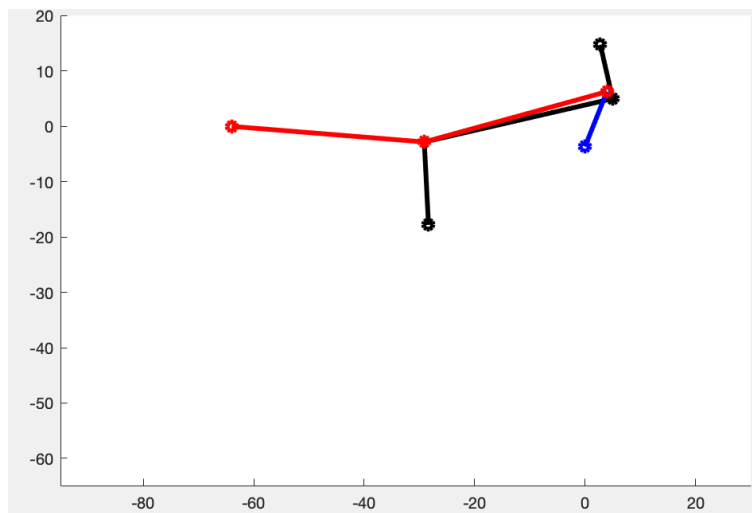


Figura 28: B_{12} y B_{22}

Como se puede intuir con esta foto, la combinación de B_{12} y B_{22} da lugar a un mecanismo nulo, es decir, ya no solo no se consigue movimiento sino que ni siquiera se encuentra un mecanismo.

- θ_{2Ini} menor y θ_{2End} mayor

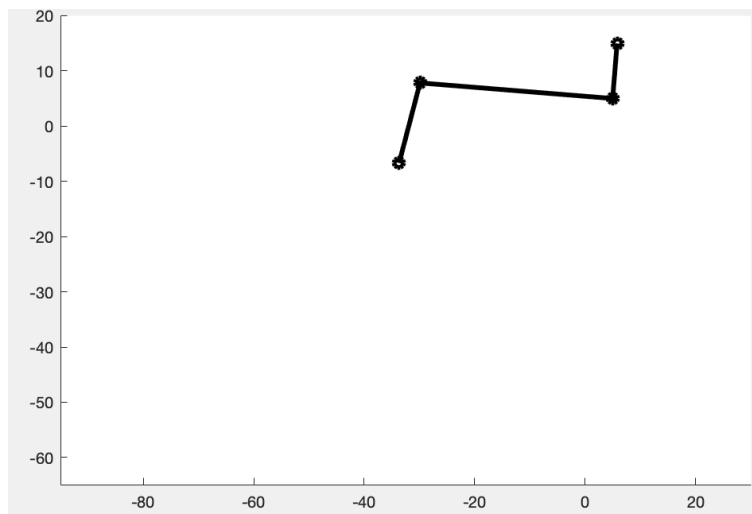


Figura 29: B_{11} y B_{22}

Aquí pasa lo mismo que en el caso anterior, en este caso la combinación es B_{11} y B_{22} .

- θ_{2Ini} menor y θ_{2End} menor

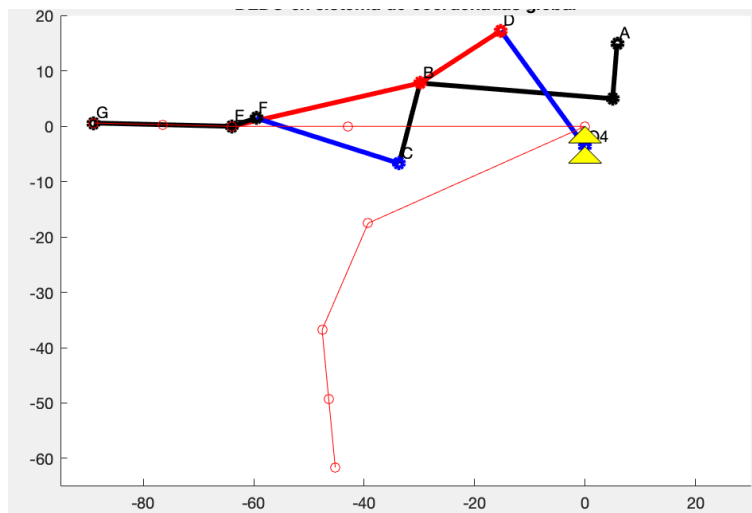


Figura 30: B_{11} y B_{21}

B_{11} y B_{21} sería la última combinación posible, con ella se consigue un

mecanismo apto y a la vez un movimiento que cumple todas las condiciones que hasta ahora se han implantado.

Una vez hecha la prueba de combinaciones, se continúa con la última realizada, la que utiliza B_{11} y B_{21} , es decir la que utiliza θ_{2Ini} menor y θ_{2End} menor.

El siguiente punto a calcular es el punto D , este punto será calculado mediante el método de intersección círculo-recta explicado en el apartado B.3, del anexo de cálculos B. Siendo:

$$O_3 = O_3$$

$$D = P$$

$$B = A$$

$$E = B$$

$$\phi_4 = \phi_4$$

$$L_3 = L$$

$$L_{41} = t$$

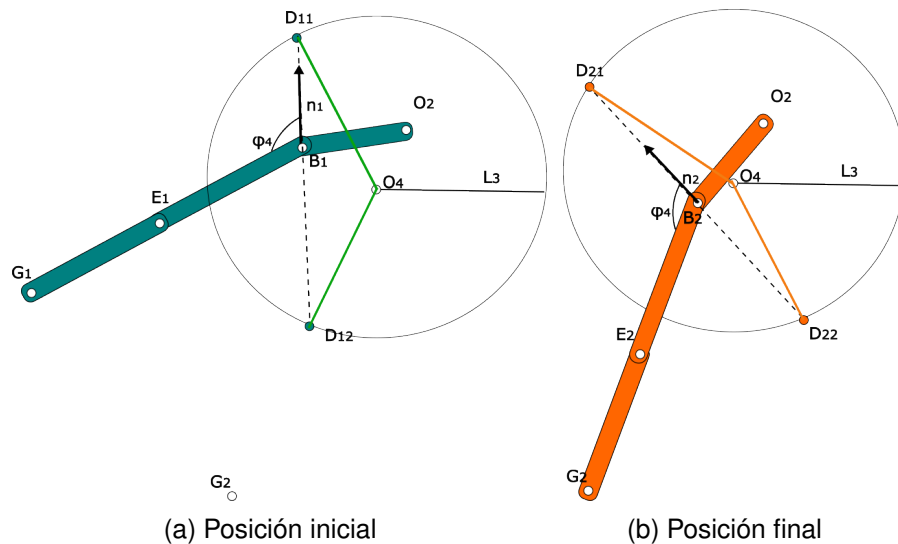


Figura 31: Intersección recta circunferencia

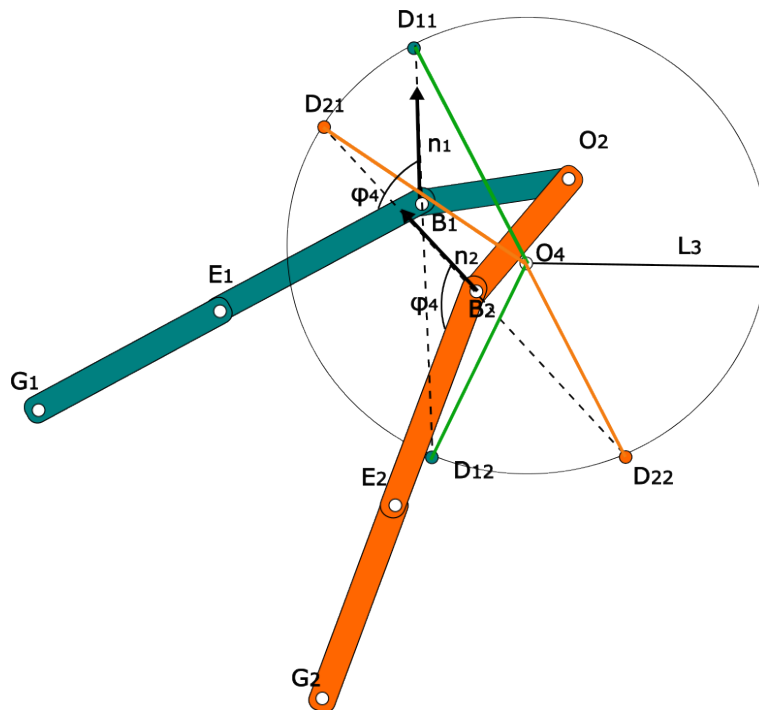


Figura 32: Intersección de recta-circunferencia 2 posiciones

Como se observa, de estas ecuaciones se podrán despejar los parámetros derivados L_3 y L_{41} . En las figuras 31 y 32. Se debe tener en cuenta que siempre se elegirá la solución de L_{41} positiva ya que es una longitud.

Una vez obtenidos esos parámetros finalmente se obtiene el punto D para ambas posiciones.

A continuación, se calcularán los puntos C_1 y C_2 y tal y como muestra el sistema de ecuaciones 11.

Seguidamente, se calculará el punto F para ello se han de calcular los puntos F_1 y F_2 se repite el calculo mediante intersección entre una recta explicada en el apartado B.3 del anexo, siendo:

$$C = O_3$$

$$F = P$$

$$E = A$$

$$G = B$$

$$\phi_6 = \phi_4$$

$$L_5 = L$$

$$L_{61} = t$$

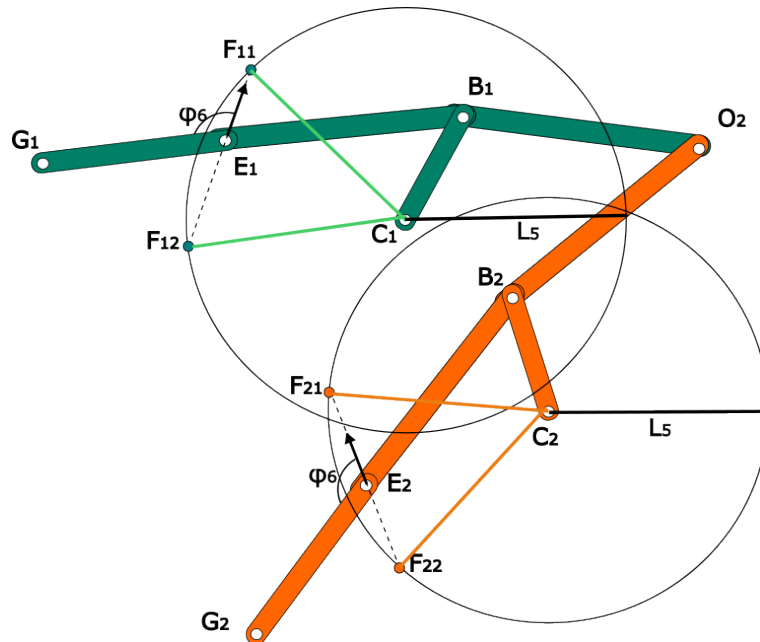


Figura 33: Intersección de recta y circunferencia para posición final y posición inicial.

Una vez hecho esto, ya se disponen de todos los parámetros derivados y por tanto de todos los datos necesarios para calcular el mecanismo.

8.4.2. Cálculo mecanismo

Una vez conocidos todos los datos del mecanismo, se procederá a calcularlo. Los puntos O_2 , O_3 , a y B se calculan de manera sencilla tal y como muestran las ecuaciones 12.

A continuación, calculamos el punto D mediante el método de intersección de círculos. Tomando, O_3 como centro de la primera circunferencia y L_3 como su radio; El punto B como centro y L_{41} como radio de la segunda circunferencia.

Si no se tienen puntos previos calculados, solo ocurriría para θ_{2Ini} , se coge la solución que da una configuración cruzada (ecuaciones 13). Si la cruz es mayor o igual que 0, se escoge D_1 , sino D_2 .

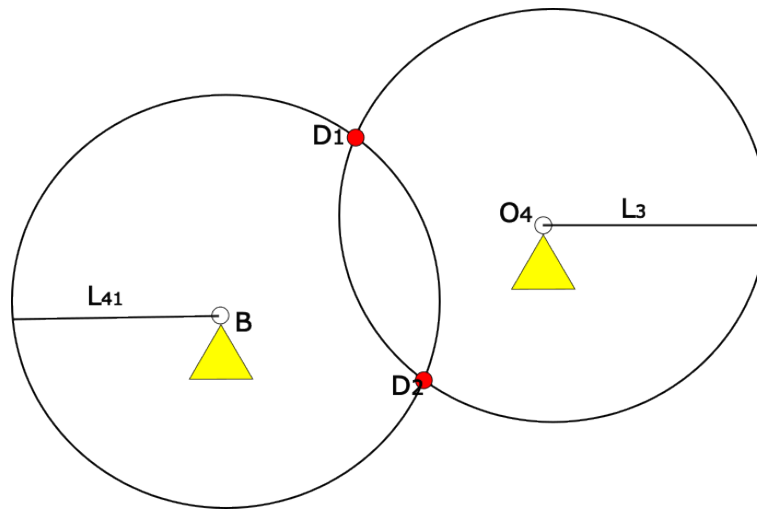


Figura 34: Intersección de 2 circunferencias para calcular punto D

Si por el contrario, tenemos puntos previos calculados se escogerá la solución más cercana al antiguo punto D (ecuaciones 14).

Seguidamente, se procede al cálculo de los puntos C y E utilizando las ecuaciones correspondientes, detalladas en las ecuaciones 15.

Posteriormente, se calcula el punto F utilizando el método de intersección de dos circunferencias. Tomando, E como centro de la primera circunferencia y L_{61} como su radio; El punto C como centro y L_5 como radio de la segunda circunferencia. Se elige el punto de la mismo forma que hemos hecho con D , dependiendo de si se tienen o no puntos previos calculados.

Por último, se calcula el punto G de manera similar a como se ha calculado el punto E (ecuaciones 16).

Una vez tenemos el mecanismo calculado, se procederá con la optimización del mismo, este se explica en el apartado 8.6.

8.5. Análisis analítico del Mecanismo de Toronto

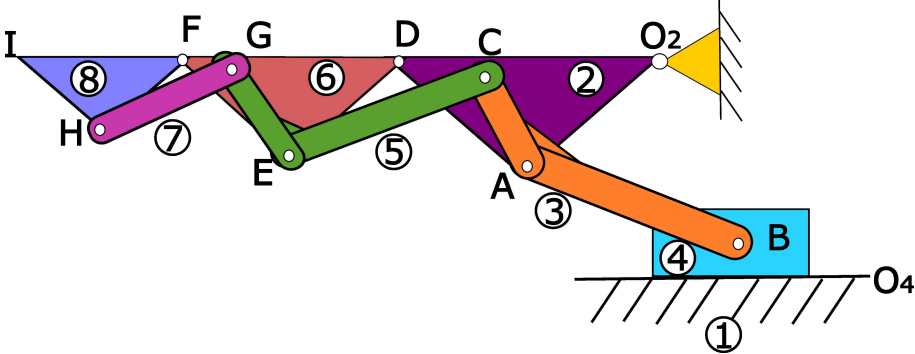


Figura 35: Mecanismo de Toronto con puntos nombrados

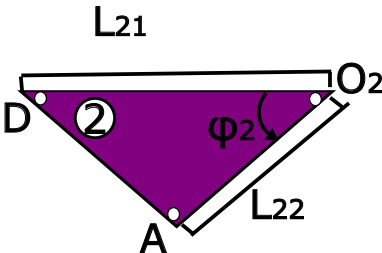


Figura 36: Barra 2 mecanismo de Toronto

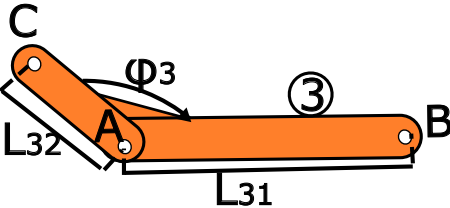


Figura 37: Barra 3 mecanismo de Toronto

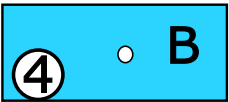


Figura 38: Barra 4 mecanismo de Toronto

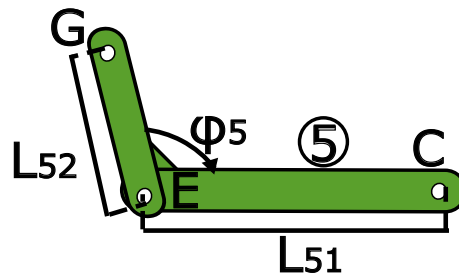


Figura 39: Barra 5 mecanismo de Toronto

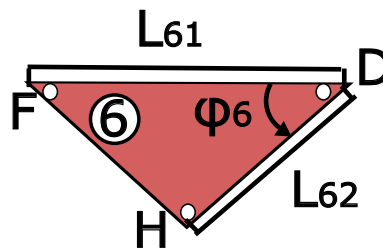


Figura 40: Barra 6 mecanismo de Toronto

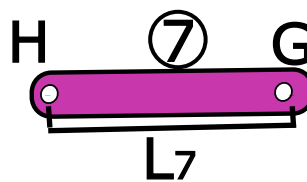


Figura 41: Barra 7 mecanismo de Toronto

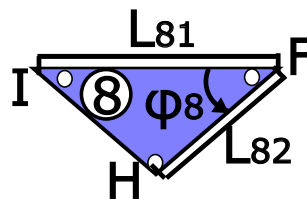


Figura 42: Barra 8 mecanismo de Toronto

Al igual que pasaba con el mecanismo estudiado con anterioridad, el análisis de este mecanismo consta de dos fases. La primera, utiliza los datos de la tabla de datos experimentales para establecer una posición inicial y una posición final del dedo. Sin embargo, a diferencia de lo que pasaba con el mecanismo RML, en

este análisis se pueden diferenciar tres tipos de datos: parámetros fijos, variables de diseño y parámetros derivados, se definirán en el apartado correspondiente a dicha fase. La segunda fase, utiliza todos los datos, tanto de diseño como los parámetros derivados que ya han sido obtenidos, y calcula las posiciones del mecanismo.

8.5.1. Cálculo de posición inicial y final

Como se ha comentado con anterioridad, hay 3 tipos de datos, esto se debe a que al haber sacado este mecanismo de estudios anteriores, los eslabones 2, 6, y 8, simularían las 3 falanges del dedo, es decir que las longitudes L_{21} , L_{61} y L_{81} coincidirán siempre con las longitudes de las falanges proximal, medial y distal, respectivamente. Además, el punto O_2 se situará siempre en el punto $(0, 0)$ ya que tiene que coincidir con el centro de rotación de la falange proximal. Si no se cumple esto, no se puede realizar el movimiento. Los otros dos tipos de datos son los mismos que se encontraban en el mecanismo RML.

Eslabón	Parámetros fijos	VARIABLES DE DISEÑO	Parámetros derivados
1	O_{2x}, O_{2y}	-	-
2	L_{21}	L_{22}, ϕ_2	-
3	-	L_{31}	L_{32}, ϕ_3
4	-	B_y	-
5	-	L_{51}	L_{52}, ϕ_5
6	L_{61}	L_{62}, ϕ_6	-
7	-	L_7	-
8	L_{81}	L_{82}, ϕ_8	-

Tabla 3: Datos mecanismo de Toronto

Similarmente al mecanismo RML, el mecanismo de Toronto se empezará a analizar de izquierda a derecha. Para empezar, se establece el punto O_2 en la posición $(0, 0)$, esto es debido a que O_2 tiene que coincidir con el eje de rotación de la falange proximal. Si no se cumple esto, no se puede realizar el movimiento. A continuación se hacen coincidir los puntos D , F e I con los puntos R , S y T del dedo e ambas posiciones, inicial y final.

Seguidamente se calculan los ángulos, para las posiciones extremas, θ_{ini} y θ_{end} ,

tal y como muestran las ecuaciones 19. En este momento es posible calcular de forma sencilla los puntos A , E y H , final e inicial. Esto se realiza en las ecuaciones 20, 21 y 22.

A continuación se calculan las posiciones en x del punto B , a partir de la intersección de un círculo centrado en A y una recta sin pendiente situada a una distancia L_1 .

Antes de calcular se tienen que cumplir las siguientes condiciones:

- $L_1 \geq A_{1y} + L_{31}$
- $L_1 \geq A_{2y} + L_{31}$

Siendo $L_1 = B_y$

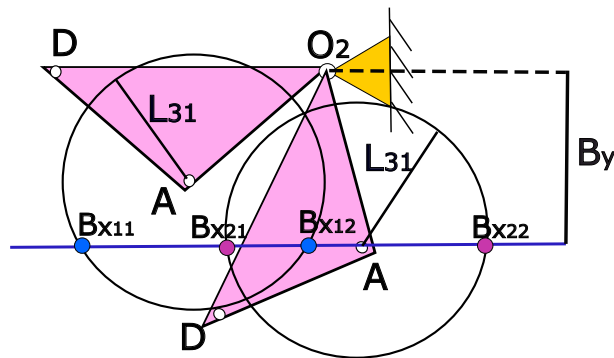


Figura 43: Intersección círculo-recta punto B

El valor B_x se calcula en las ecuaciones 23a y 23c, siempre se elegirá el valor que quede mas a al derecha en el eje x.

Ahora mediante una intersección de dos círculos se sacarán los puntos G_1 y G_2 . Estos cálculos están explicados en el apartado B.2. Al igual que para el mecanismo anterior, primero se harán las comprobaciones correspondientes a dicho método de cálculo.

1. La suma de las longitudes de los vectores L_{52} y L_7 , tiene que ser menor que la norma del vector EH . De no cumplirse esta condición los círculos no intersectarían al quedar demasiado lejos uno del otro.
2. La resta de las longitudes de los vectores L_{52} y L_7 deberá ser mayor que la norma del vector EH , ya que si esto no ocurre los círculos no intersectarían al quedar uno dentro del otro.

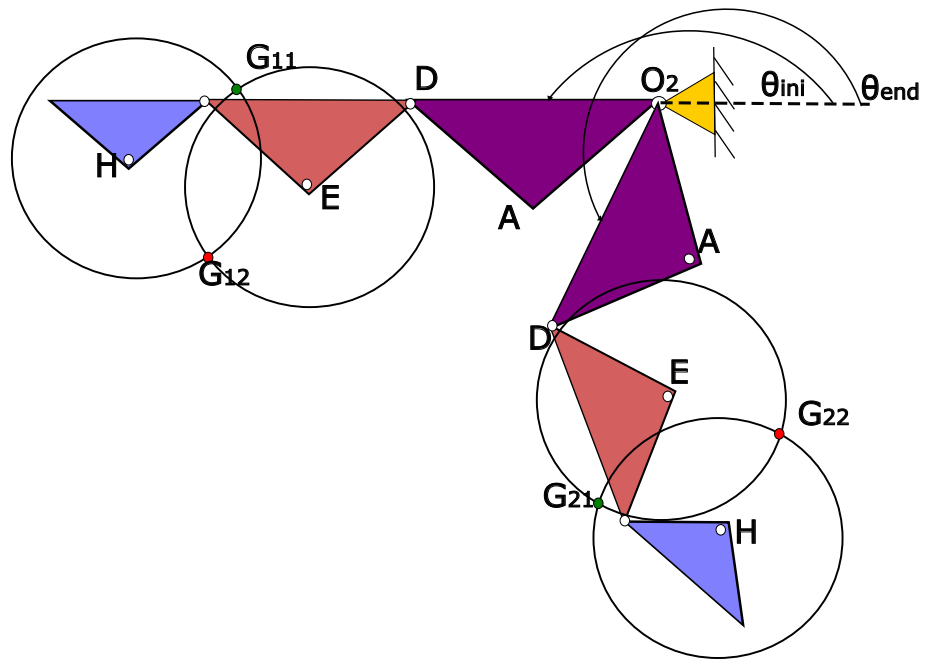


Figura 44: Intersección de dos círculos- Punto G

En este caso, para elegir el punto deseado para cada posición, primero se calcula el ángulo que forma la barra EG con la horizontal y se escoge siempre el menor. Esto se realiza tanto para las posiciones inicial como para la final.

Finalmente con todos estos puntos sacados, igualando el cálculo del punto C desde el punto E y desde el punto A para ambas posiciones, inicial y final. Del sistema de ecuaciones 25, se despejan todos los parámetros derivados de este mecanismo. Para que las longitudes de las barras no sean excesivamente grandes, se implementa una condición que limita las barras en función a la distancia AE , siendo la suma de estas barras siempre inferior a $1,5 \cdot AE$.

Una vez obtenidos ϕ_3 , L_{32} , ϕ_5 y L_{51} tenemos todos los datos necesarios para calcular el mecanismo en cualquier posición.

8.5.2. Cálculo mecanismo

Conocidos todos los datos necesarios, se procederá a calcular el mecanismo para todo el recorrido de θ_2 .

Primero, se calculan de forma directa los puntos O_2 , A y D , tal y como indican las ecuaciones 27.

El punto B , se calcula de forma similar a como se ha calculado en el apartado de posición inicial y final. Solo es necesario sacar la posición en x de dicho punto ya que la posición en y es constante. De esta forma se resuelve la ecuación de la intersección de la recta y el círculo (Ecs.28).

Para calcular el punto C , primero es necesario calcular el ángulo que forma el eslabón 3 con la horizontal, θ_3 . A continuación a este ángulo se le suma ϕ_3 cambiando de dirección el vector unitario, para finalmente llegar al punto C . Este proceso se desarrolla en las ecuaciones 29.

Seguidamente, se calcula el punto E . Para ello es necesario hacer la intersección de dos círculos centrados en D y C . Siendo la longitud L_{62} el radio del círculo centrado en D y L_{51} el radio del círculo centrado en C . El cálculo de los puntos de una intersección de dos círculos se explica en el apartado B.2, con las condiciones explicadas tanto en ese apartado como en puntos anteriores.

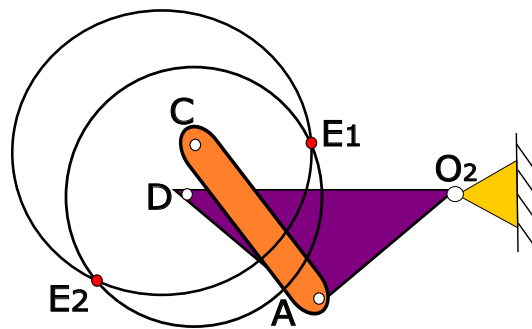


Figura 45: Intersección de dos círculos- Punto E

Con dicha intersección se obtienen dos posibles soluciones, para asegurar que siempre se escoge la posición que se desea se imponen algunas condiciones:

- Para θ_{2ini} : se escoge el punto que haga que los vectores ED y DC se crucen. Esto se realiza tal y como muestran las ecuaciones 30.
- Para el resto de posiciones del ángulo θ_2 : Se calcula la distancia entre el punto E anterior y los dos nuevos puntos E . Se elige el nuevo punto que sea mas cercano al anterior. Dichas distancias están calculadas en las ecuaciones 31

Ahora se calcula el punto G y F , su calculo es similar al del punto C y se muestra en las ecuaciones 32 y 33.

El punto H se calcula igual que el punto E , en esta intersección de círculos uno esta centrado en el punto F y tiene como radio la longitud L_{82} y el otro esta centrado en G y tiene como radio la longitud L_7 .

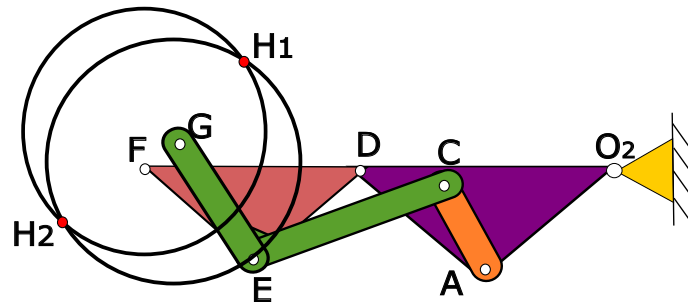


Figura 46: Intersección de dos círculos- Punto H

En este caso las condiciones de selección de uno de los dos puntos resultantes es diferente, por razones que se explicaran el apartado de discusión de el presente Trabajo de Fin de Grado.

Las condiciones serán las siguientes:

- Para θ_{2ini} : se escoge el punto para el cual el ángulo formado por la barra FH sea mayor. (Ecs. 34).
- Para el resto de posiciones del ángulo θ_2 : Se calcula la norma entre el punto H anterior y los dos nuevos puntos H , también se calcula el ángulo formado por la barra FH para la posición anterior y se impone que el nuevo punto H sea el mas cercano y a su vez que el el nuevo ángulo sea superior al de la posición anterior. Estas condiciones están desarrolladas en las ecuaciones 35.

El punto I se calcula de forma similar a los puntos C , G y F , tal y como indican las ecuaciones 38.

8.6. Optimización mecanismos

A continuación se optimizarán todas las variables denominadas anteriormente de diseño para ello primero se les adjudica un valor mínimo y un valor máximo, seguidamente se crea un rango de variación:

$$\begin{aligned}L_1 &= L_{1min} : \frac{(L_{1max} - L_{1min})}{(nVar - 1)} : L_{1max} \\L_{22} &= L_{22min} : \frac{(L_{22max} - L_{22min})}{(nVar - 1)} : L_{22max} \\L_{31} &= L_{31min} : \frac{(L_{31max} - L_{31min})}{(nVar - 1)} : L_{31max} \\ \phi_2 &= \phi_{2min} : \frac{(\phi_{2max} - \phi_{2min})}{(nVar - 1)} : \phi_{2max} \\ \phi_6 &= \phi_{6min} : \frac{(\phi_{6max} - \phi_{6min})}{(nVar - 1)} : \phi_{6max} \\ \phi_8 &= \phi_{8min} : \frac{(\phi_{8max} - \phi_{8min})}{(nVar - 1)} : \phi_{8max} \\L_{62} &= L_{62min} : \frac{(L_{62max} - L_{62min})}{(nVar - 1)} : L_{62max} \\L_{82} &= L_{82min} : \frac{(L_{82max} - L_{82min})}{(nVar - 1)} : L_{82max} \\L_{52} &= L_{52min} : \frac{(L_{52max} - L_{52min})}{(nVar - 1)} : L_{52max} \\L_7 &= L_{7min} : \frac{(L_{7max} - L_{7min})}{(nVar - 1)} : L_{7max}\end{aligned}$$

nVar es el numero de variaciones que hará la optimización.

Una vez tenemos los rangos de variación de cada variable, se creara la matriz denominada 'resultados' para crear esa matriz primero se ejecutará la función que realiza los cálculos explicados en el apartado **Cálculo de posición inicial y final** variando en bucle las variables de diseño, utilizando los datos del rango creado anteriormente. Seguidamente, si las soluciones son validas, se evaluará la ventaja mecánica tal y como esta explicada en el anexo correspondiente. Ahora se crean dos matrices distintas, una denominada 'resultadosBuenos' donde se encuentran las configuraciones válidas, y la otra matriz denominada 'resultadosMalos' que

recoge todas las configuraciones de mecanismos no válidos. Todo lo explicado se encuentra en las funciones de Matlab denominado **funOptimizacionCartesiana** y **funMechanicalAdvantage**.

En la matriz resultadosBuenos , cada columna nos indica el resultado de una variable de diseño o de un parámetro derivado. Por tanto cada fila será algo así:

O_{2x}	O_{2x}	L_{22}	L_1	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_4	ϕ_6	L_{23}	L_{22}	Validez	L_3	L_{41}	L_5	L_{61}	Ventaja mecánica
----------	----------	----------	-------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	---------	-------	----------	-------	----------	------------------

Tabla 4: Fila matriz resultadosBuenos RML

L_1	L_{22}	ϕ_2	L_{31}	L_{62}	ϕ_6	L_{82}	ϕ_8	L_{52}	L_7	Validez	L_{32}	L_{51}	ϕ_3	ϕ_5	Ventaja mecánica
-------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-------	---------	----------	----------	----------	----------	------------------

Tabla 5: Fila matriz resultadosBuenos Toronto

Si en la columna de validez, se obtuviera como resultado: falso, ese mecanismo se descartaría y pasaría a la matriz de resultadosMalos.

Una vez creada la matriz que contiene todas las configuraciones validas para nuestro mecanismo, se selecciona una de ellas y se dibuja la solución para comprobar que todo esta correcto.

8.7. Análisis Gráfico

Una vez obtenidos los resultados mediante el método analítico y tras la optimización de estos se procederá a comprobar dichos resultados mediante un análisis gráfico. Este análisis será llevado a cabo mediante el programa SolidWorks. La realización de este análisis se desarrolla en los siguientes pasos.

Primero se crea un croquis que defina la posición inicial del dedo, para ello utilizamos los mismo ángulos escogidos para Matlab, en este caso:

$$\theta_{7ini} = 0^\circ$$

$$\theta_{8ini} = 0^\circ$$

$$\theta_{9ini} = -1,38^\circ$$

A continuación se realiza un segundo croquis, esta vez definiendo la posición final del dedo y de manera similar se acota con los ángulos de Matlab:

$$\theta_{7end} = 24,02^\circ$$

$$\theta_{8end} = 42,57^\circ$$

$$\theta_{9end} = 28,89^\circ$$

También se acota para ambas posiciones la longitud de cada falange que han de ser las mismas en ambos casos. Igual que antes, se introducen los mismos datos que en el análisis analítico de manera que:

$$L_7 = 43 \text{ mm}$$

$$L_8 = 21 \text{ mm}$$

$$L_9 = 25 \text{ mm}$$

Tanto los ángulos como las longitudes de las falanges corresponden al esquema representado en la figura 19.

8.7.1. Mecanismo RML

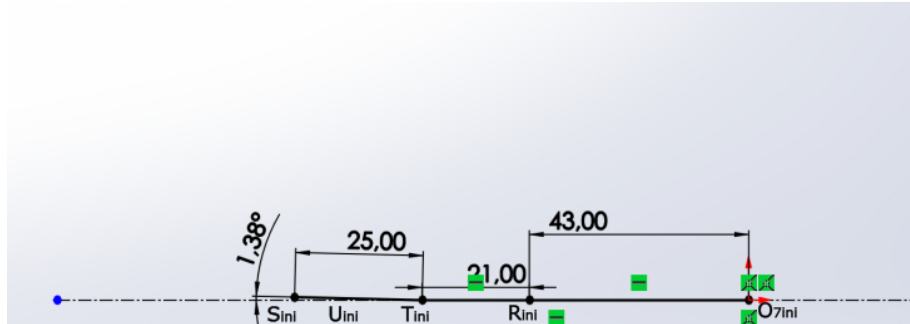


Figura 47: Dedo en posición inicial
- RML

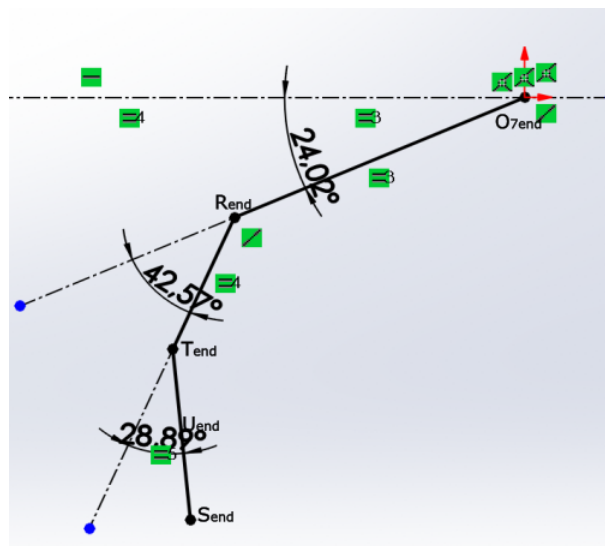


Figura 48: Dedo en posición final - RML

Una vez se tienen los croquis correspondientes a los dedos definidos, se crea un ultimo croquis en el que dibuja el mecanismo para ambas posiciones, este se une en la mitad de la falange distal y mitad de la barra 62, se acotan todas las barras correspondientes a la variables de diseño poniendo los resultados extraídos de Matlab, una vez acotadas dichas barras, las correspondiente a los parámetros derivados, deberían coincidir con los resultados de Matlab, esto se comentará mas adelante en el apartado de resultados y discusión. Es importante decir que

para ambas posiciones las barras equivalentes tienen que estar igualadas. En la figura 52 se muestra el croquis hecho para ambas posiciones.

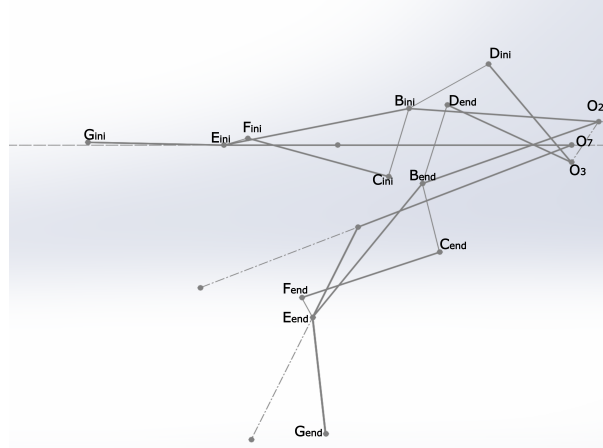


Figura 49: Mecanismo RML posición inicial y final

8.7.2. Mecanismo de Toronto

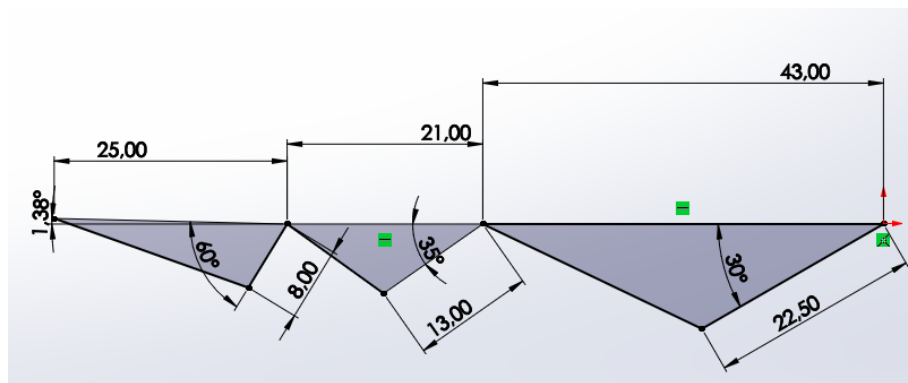


Figura 50: Dedo en posición inicial
- Toronto

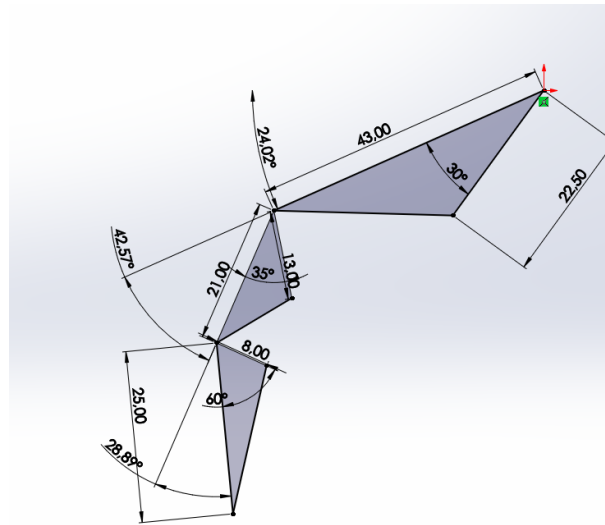


Figura 51: Dedo en posición final - Toronto

De forma similar al mecanismo anterior, cuando el croquis que determina la posición de los dedos está completamente definido se procede a dibujar las barras del mecanismo en ambas posiciones, inicial y final. En este caso, se han hecho coincidir las 3 barras superiores con las falanges de los dedos. A continuación se acotan las barras correspondientes a las variables de diseño y de forma similar a lo que se ha hecho con el mecanismo RML se igualan para ambas posiciones las barras que corresponden a los parámetros derivados. Una vez hecho esto se extraen los resultados y se comparan con los de Matlab.

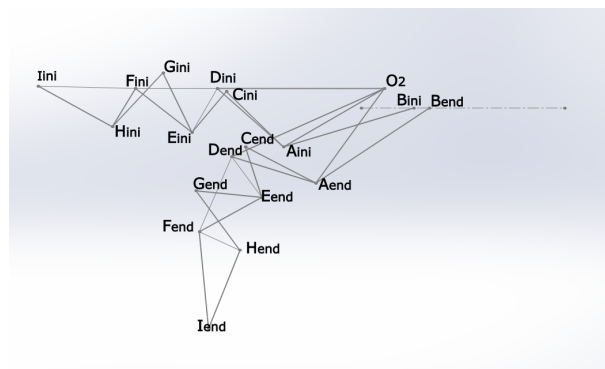


Figura 52: Mecanismo de Toronto posición inicial y final

9. Resultados

9.1. Resultados mecanismo RML

9.1.1. Análisis analítico

Como se ha mencionado previamente en la sección 8.6, se ha obtenido un conjunto de resultados válidos en forma de matriz. En este caso, la matriz resultante consta de 11.533 filas y 16 columnas, donde cada columna representa los datos definidos en la tabla 4. Para el caso se selecciona la fila 7.250, ya que es la más conveniente para nuestro mecanismo. Sin embargo, el resto de resultados serían igualmente válidos. A continuación, se detallan los resultados obtenidos para la fila 7.250:

O_{2x}	O_{2x}	L_{22}	L_1	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_4	ϕ_6	L_{23}	L_{22}	Validez	L_3	L_{41}	L_5	L_{61}	Ventaja mecánica
5	5	35	10	60	260	160	160	15	35	1	25,9219	17,4094	27,1587	4,6733	0,1191

Tabla 6: Resultados mecanismo RML

Utilizando los resultados mencionados anteriormente, se procedió a dibujar el mecanismo en el entorno de Matlab, obteniendo la siguiente representación visual:

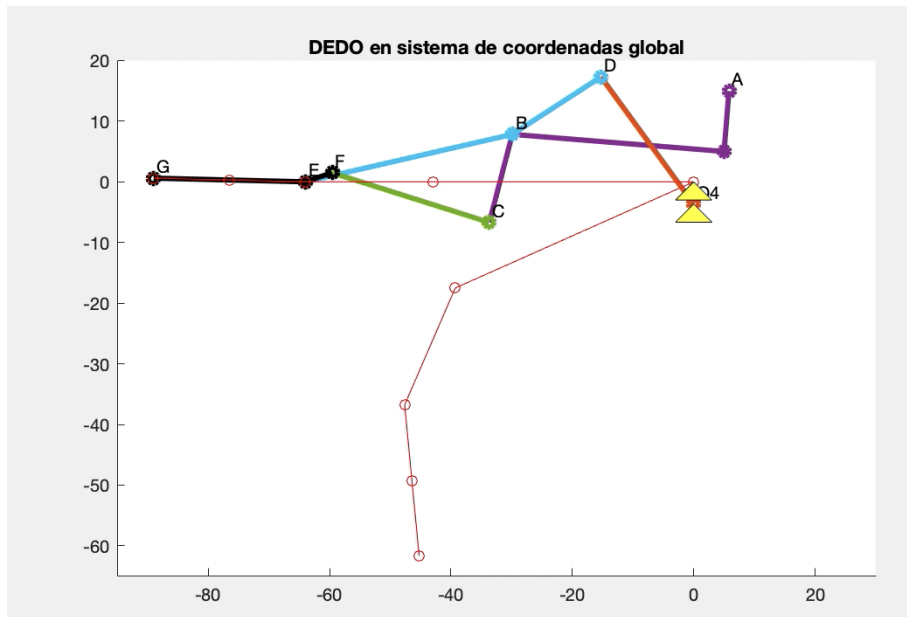


Figura 53: Mecanismo RML posición inicial- Matlab

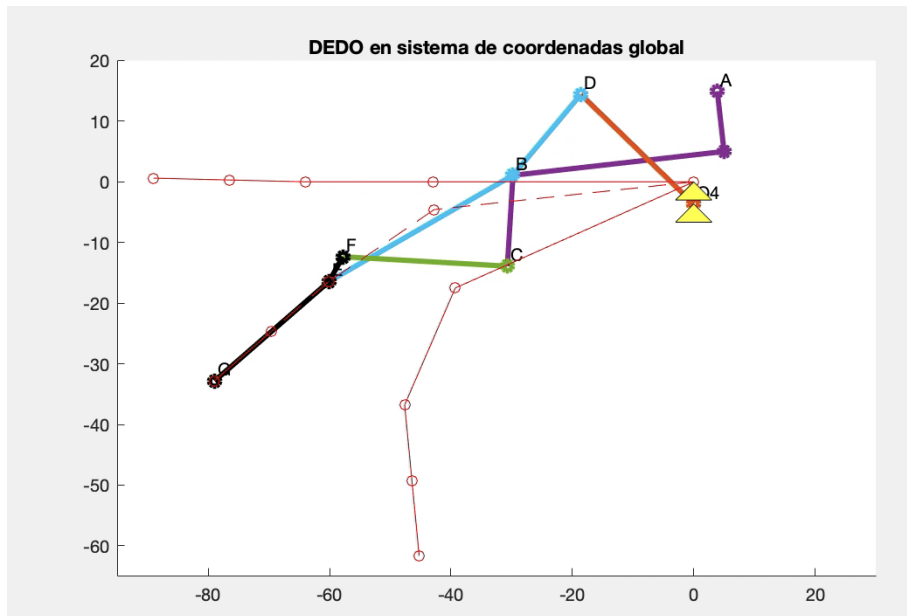


Figura 54: Mecanismo RML posición intermedia- Matlab

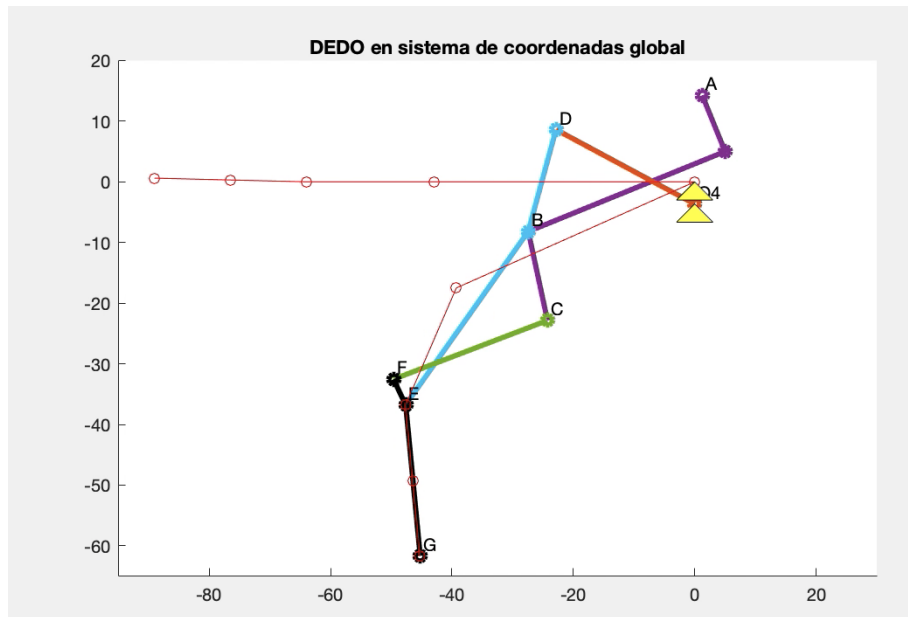


Figura 55: Mecanismo RML posición final- Matlab

La figura muestra el mecanismo en su configuración óptima para las distintas posiciones consideradas como relevantes, siguiendo las especificaciones y dimensiones definidas en la tabla de resultados.

Es importante destacar que esta representación gráfica en Matlab proporciona una visualización clara y detallada del mecanismo optimizado, lo cual facilita el análisis y la comprensión de su funcionamiento. Además, esta representación será de gran ayuda a la hora de comparar de forma visual estos resultados con los obtenidos a partir de análisis gráfico realizado mediante SolidWorks.

9.1.2. Análisis gráfico

Los resultados del análisis gráfico se obtiene a partir de implementar las variables de diseño definidas en la tabla 2 como cotas para el mecanismo y como se ha explicado en el apartado 8.7, la manera de comprobar el mecanismo obtenido a partir de Matlab con el análisis gráfico será que los parámetro derivados coincidan con los resultados proporcionados por Matlab (ver tabla 6).

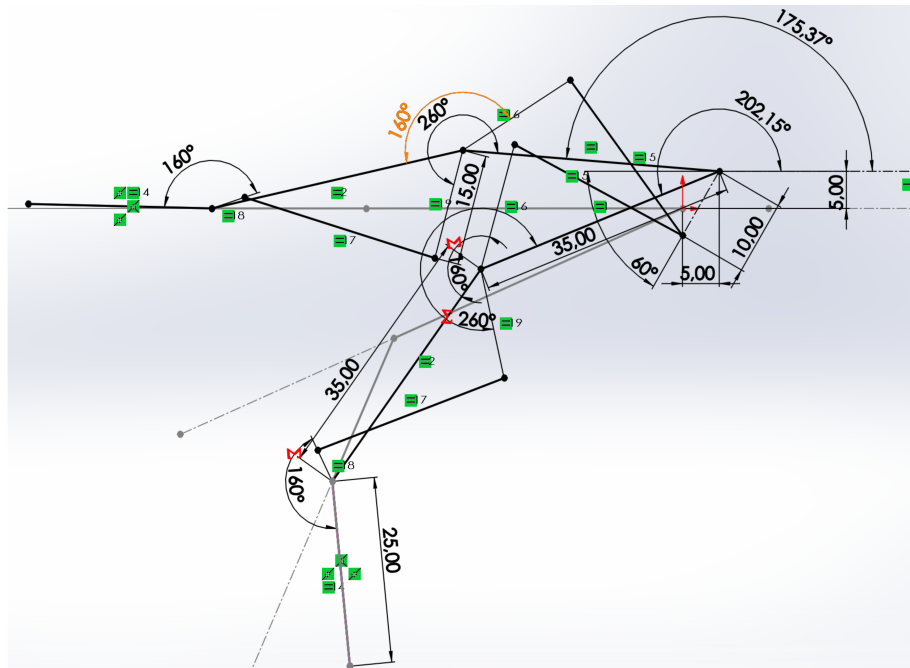


Figura 56: Mecanismo RML acotado - SolidWorks

Una vez acotado el sistema, se definen las variables de diseño como cotas conducidas, dando lugar al siguiente mecanismo:

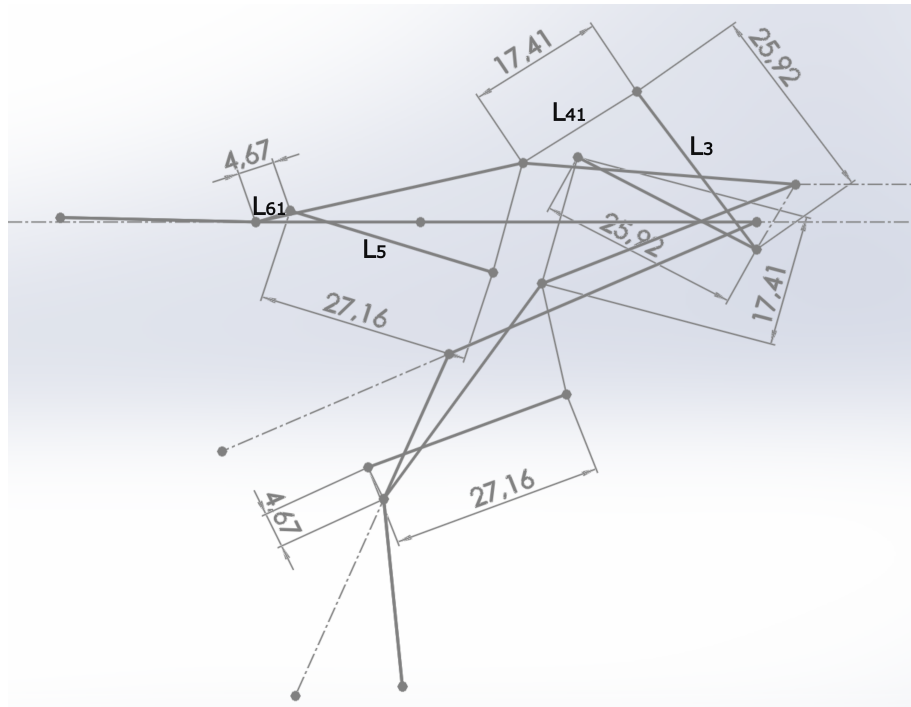


Figura 57: Parámetros derivados RML - SolidWorks

Como se observa en la figura 57 y en la tabla 6, los parámetros derivados son equivalentes por lo que la comprobación del mecanismo calculado en Matlab es satisfactoria y se demuestra que se puede llegar a los mismo resultados mediante ambos análisis.

9.2. Resultados mecanismo de Toronto

9.2.1. Análisis analítico

En este mecanismo se ha obtenido un matriz de resultados validos que consta de 19.459 filas y 16 columnas, cada columna contiene los resultados de las dimensiones tal y como ilustra la tabla 5. En este caso se ha seleccionado la fila 467 ya que tiene una ventaja mecánica adecuada y unas dimensiones que se adecuan a los resultados esperados.

A continuación, se detallan los resultados obtenidos para la fila 467:

L_1	L_{22}	ϕ_2	L_{31}	L_{62}	ϕ_6	L_{82}	ϕ_8	L_{52}	L_7	Validez	L_{32}	L_{51}	ϕ_3	ϕ_5	Ventaja mecánica
5	22,5	30	30	13	35	8	60	17	13	1	21,8635	13,7754	149,5623	116,5574	0,3832

Tabla 7: Resultados mecanismo de Toronto

Utilizando los resultados mencionados anteriormente, se procedió a dibujar el mecanismo en el entorno de Matlab, obteniendo la siguiente representación visual:

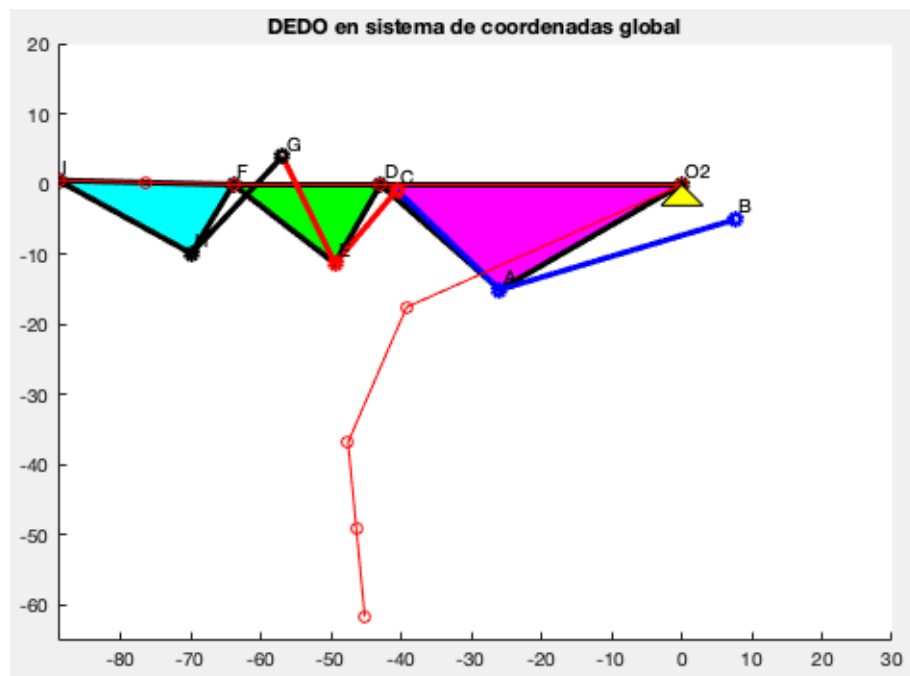


Figura 58: Mecanismo de Toronto posición inicial- Matlab

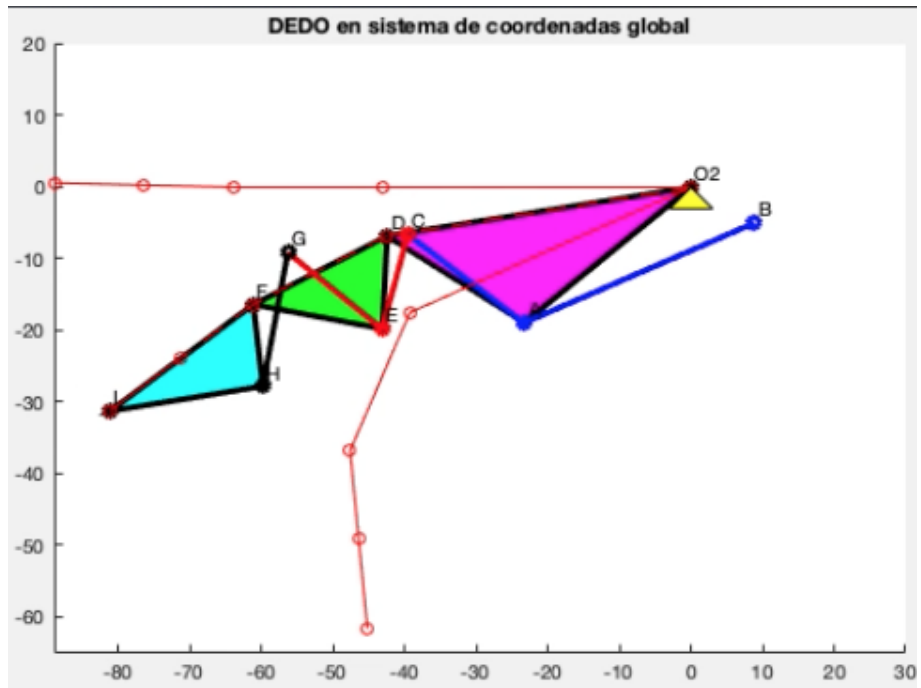


Figura 59: Mecanismo de Toronto posición intermedia- Matlab

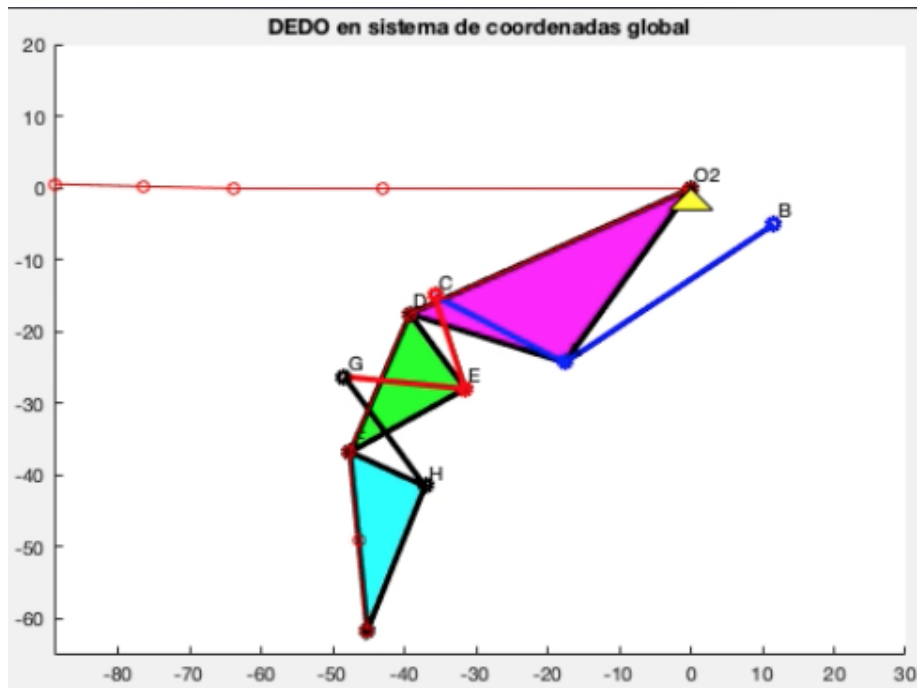


Figura 60: Mecanismo de toronto posición final- Matlab

Al igual que como pasaba con el mecanismo RML, estas representaciones muestran el mecanismo en una de sus configuraciones óptimas para 3 posiciones que reflejan el recorrido del dedo. Esta representaciones aportara una imagen clara a la hora de comparar la síntesis analítico con la síntesis gráfico.

9.2.2. Análisis gráfico

De forma similar a lo que se ha hecho con el mecanismo de Toronto, se implementan las dimensiones del mecanismo correspondientes a las variables de diseño, tal y como se ha explicado en la explicacion teorica del analisis grafico. Y se procede a analizar si los parametros derivados corresponden a los definidos por Matlab.

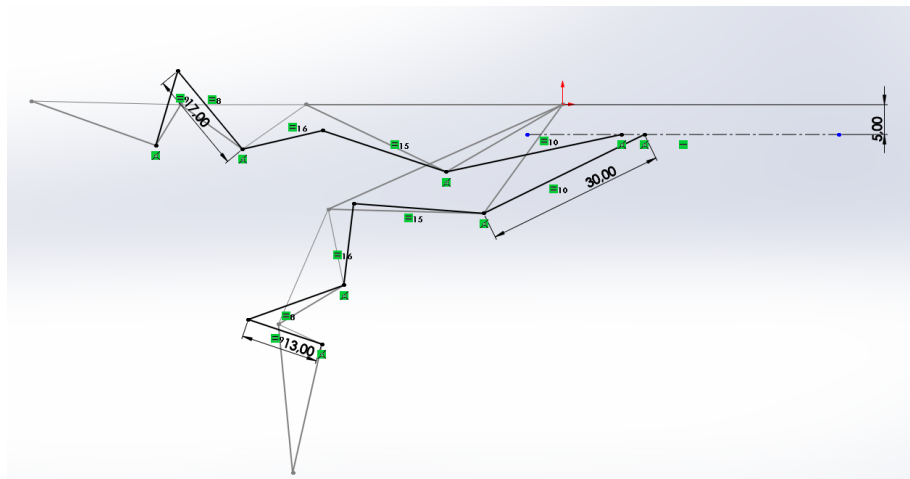


Figura 61: Mecanismo de Toronto acotado - SolidWorks

Una vez acotado el sistema, se definen las variables de diseño como cotas conducidas, dando lugar al siguiente mecanismo:

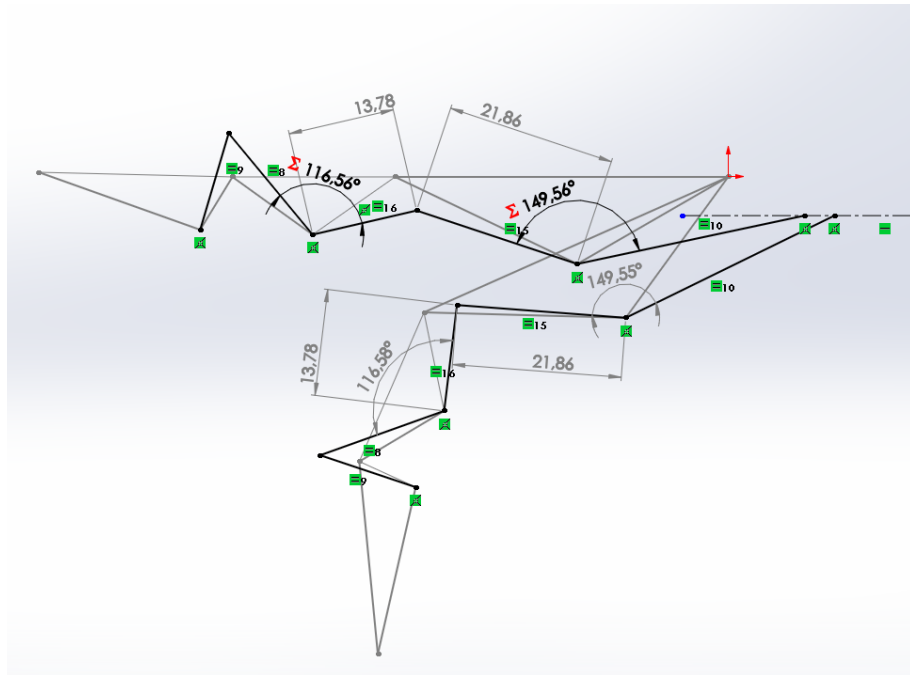


Figura 62: Parámetros derivados de Toronto - SolidWorks

Como se observa en la figura 62 y en la tabla 7, los parámetros derivados son equivalentes por lo que la comprobación del mecanismo calculado en Matlab es satisfactoria y se demuestra que se puede llegar a los mismo resultados mediante ambos análisis.

10. Discusión

La presente discusión de resultados se centra en el estudio comparativo de dos mecanismos destinados a ser utilizados en un exoesqueleto de mano, utilizando dos métodos de cálculo: el método gráfico y el método analítico. Si bien el objetivo inicial era optimizar estos mecanismos mediante distintos algoritmos, se debe mencionar que el algoritmo genético propuesto no ha sido implementado debido a limitaciones de tiempo, dejando esta posibilidad como una dirección para futuros estudios.

Cabe destacar que al inicio del estudio, se exploraron diversos métodos de cálculo, como las fórmulas de Chace y las ecuaciones de lazo, con el objetivo de encontrar una solución eficiente y precisa para describir el funcionamiento de los mecanismos. Sin embargo, se observó que estas aproximaciones resultaban en cálculos más complejos y añadían una mayor carga de trabajo al requerir el cálculo de ángulos adicionales.

A raíz de estas dificultades, se optó por utilizar el método basado en intersecciones de círculos y de círculos con rectas. Este enfoque demostró ser más práctico y rápido, al tiempo que proporcionaba resultados consistentes y confiables. Al utilizar la geometría y las propiedades de las intersecciones, fue posible describir con precisión los movimientos y posiciones de los elementos del mecanismo.

La elección de utilizar intersecciones de círculos y círculos con rectas se basó en su simplicidad y capacidad para capturar las características clave del movimiento del mecanismo. Este enfoque permitió evitar la necesidad de cálculos adicionales y simplificó el análisis al proporcionar soluciones directas y visuales.

En general, los resultados obtenidos en este estudio han sido en línea con las expectativas iniciales, ya que ambos métodos de análisis han llegado a conclusiones similares. Ambos mecanismos diseñados han demostrado ser satisfactorios para su implementación en un exoesqueleto de dedo, lo cual es una noticia alentadora para el desarrollo de dispositivos de asistencia en la rehabilitación y mejora de la funcionalidad de la mano.

Sin embargo, se han observado dificultades específicas en el mecanismo de Toronto al describir el recorrido del dedo en ciertas situaciones de singularidad, como se ha descrito en la figura jsjr (referencia). Estas situaciones de singularidad presentan desafíos adicionales en el cálculo del mecanismo, lo que implica que

ciertos puntos del mecanismo tengan condiciones particulares para conseguir un funcionamiento correcto.

Estas dificultades pueden atribuirse a la complejidad inherente del mecanismo de Toronto y su configuración específica. Aunque este mecanismo puede ofrecer ciertas ventajas en términos de diseño y ergonomía, su análisis y descripción precisa en todas las situaciones de funcionamiento pueden requerir enfoques más avanzados o ajustes específicos.

En conclusión, aunque los resultados generales han sido satisfactorios y ambos mecanismos son viables para su implantación en un exoesqueleto de dedo, se debe tener en cuenta las dificultades encontradas en el mecanismo de Toronto relacionadas con situaciones de singularidad. Estas dificultades proporcionan oportunidades para futuras investigaciones, donde se pueden aplicar enfoques más sofisticados o mejoras específicas para abordar estos desafíos y garantizar un rendimiento óptimo del exoesqueleto en todas las situaciones operativas.

11. Conclusión

11.1. Conclusiones sobre los métodos de cálculo utilizados

En conclusión, en el estudio comparativo entre el análisis de mecanismos a través de un método gráfico y otro mediante un enfoque analítico ha demostrado que ambos métodos son igualmente efectivos al llegar a los mismos resultados. Tanto el método gráfico como el método analítico proporcionan una comprensión completa y precisa de los mecanismos estudiados, lo que demuestra su validez y utilidad en el campo del análisis mecánico.

El método gráfico aprovecha visualmente la representación de los elementos del mecanismo y sus movimientos, permitiendo una comprensión intuitiva y rápida de su funcionamiento. Por otro lado, el método analítico utiliza ecuaciones y cálculos matemáticos para describir y resolver los problemas mecánicos, proporcionando una aproximación más precisa y rigurosa. A su vez, se ha demostrado que el método analítico puede ser de gran utilidad si se utiliza a través de programas matemáticos como Matlab, ya que permite utilizar algoritmos y métodos de variación que obtienen miles de resultados válidos en cuestión de segundos.

Aunque existen diferencias en la forma de abordar el análisis, se ha demostrado que ambos métodos son coherentes y confiables al obtener resultados consistentes. La elección del método a utilizar dependerá de las preferencias personales, el nivel de experiencia y las necesidades específicas del problema a resolver. En el caso de este estudio lo que se buscaba era un análisis que a su vez realizara una optimización basada en la ventaja mecánica, esto se obtiene de manera eficaz mediante el método analítico, ya que este dota de muchas más posibilidades a la hora de optimizar y condicionar el mecanismo.

En cualquier caso, este estudio ha dejado en claro que los ingenieros y profesionales del campo tienen a su disposición dos enfoques igualmente válidos y efectivos para el análisis de mecanismos, brindando flexibilidad y opciones para abordar los desafíos mecánicos con éxito.

11.2. Conclusiones sobre los mecanismos

Este estudio ha demostrado la importancia de analizar y optimizar diferentes mecanismos para mejorar la funcionalidad de un exoesqueleto de dedo. Al compa-

rar y evaluar dos enfoques distintos, se pudo identificar las fortalezas y debilidades de cada uno, lo que permitió tomar decisiones informadas en el proceso de diseño y desarrollo.

El primer mecanismo demostró mayor flexibilidad, al no seguir en todo momento la trayectoria del dedo, esto lo convierten en un mecanismo más adecuado para actividades que requieren destreza y precisión. Sin embargo, su ventaja mecánica es sustancialmente inferior, lo que indica un menor aprovechamiento de la fuerza de entrada.

Por otro lado, el segundo mecanismo ofrecía una mayor ventaja mecánica, lo que lo hace mas adecuado para aplicaciones que requieran una cantidad de fuerza superior.

La optimización de estos mecanismos implicó encontrar un equilibrio entre las dimensiones de las barras, considerando las necesidades específicas de los usuarios del exoesqueleto. A través de pruebas y ajustes iterativos, se logró mejorar tanto la combinación de las dimensiones como el valor de estas, maximizando así la ventaja mecánica. Sin embargo, el resultado final se eligió no tanto en base a la ventaja mecánica, que se tuvo en cuenta pero no de forma determinante, sino a una coherencia global del mecanismo.

En conclusión, este estudio resalta la importancia de considerar múltiples enfoques y optimizar los mecanismos de un exoesqueleto de dedo para lograr un equilibrio óptimo entre las características deseadas dependiendo de el enfoque. Estos hallazgos tienen el potencial de guiar futuros avances en la tecnología de exoesqueletos, mejorando la calidad de vida de las personas con discapacidades o dificultades en las manos y dedos.

11.3. Conclusiones generales

Como conclusión final se llega a que este estudio abre paso a futuras investigaciones que mejoraran la vida de las personas que padecen o han padecido de ataques cerebro-vasculares, ayudando a su rehabilitación, ya sea total o parcial. Se ha demostrado que existe una forma rápida y efectiva de crear los mecanismos necesarios y por ende un exoesqueleto completo de una manera personalizada a cada paciente siendo precisa y menos costosa de lo que se pensaba.

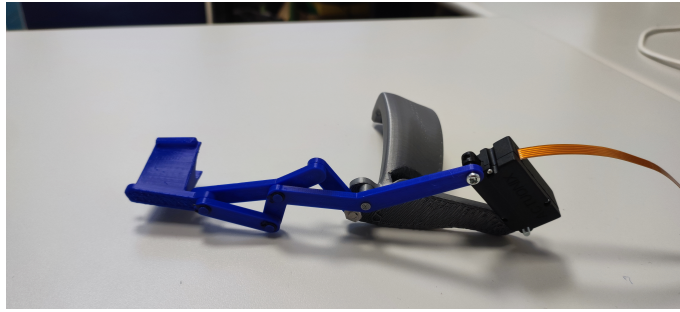


Figura 63: Mecanismo RML

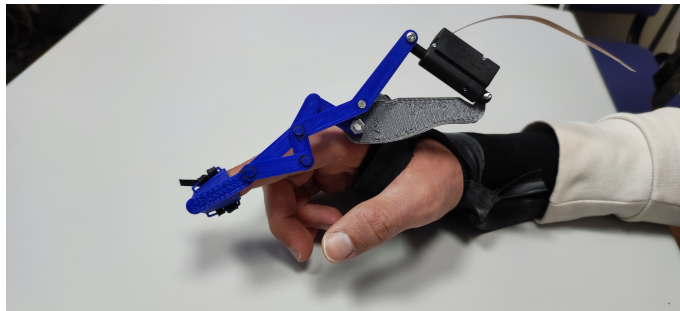


Figura 64: Mecanismo RML implementado en mano real

12. Presupuesto

12.1. Licencias de Software

- Matlab: 860 €/año. Matlab será utilizado tanto por el proyectista como por el tutor del proyecto.
- SolidWorks: 6,930€.

Si por el contrario se utiliza Octave para la realización del proyecto, este es gratuito.

En el caso de este Trabajo de Fin de Grado, se han utilizado licencias de estudiante.

12.2. Hardware

- Impresora 3D : 300€
- Ordenador: 1,500€

12.3. Horas de trabajo

Sujeto	Precio/h (€)	Horas	Total
Proyectista	8	300	2,400€
Director	20	50	1,000€

Tabla 8: Horas de trabajo

12.4. Presupuesto total

Precio sin disponer de licencias de alumno ni ordenador: 12,990€
Precio con licencias de estudiante y ordenador: 3,700€

13. Pliego de condiciones

13.1. Condiciones generales

13.1.1. Objeto

El presente pliego de condiciones tiene como finalidad establecer de manera detallada y precisa los criterios, normas y pautas que regirán la relación y la dinámica de colaboración entre las personas encargadas de llevar a cabo el proyecto en cuestión y la empresa que ha contratado sus servicios.

13.1.2. Documentación que define el proyecto

Los documentos que establecen las directrices que deben ser seguidas en el proyecto actual son los siguientes:

1. Pliego de condiciones
2. Memoria
3. Presupuesto
4. Anexos

Asimismo, se seguirá el orden de prioridad estipulado en caso de existir discrepancias entre los documentos mencionados.

13.1.3. Condiciones facultativas

Las entidades y personas involucradas en la finalización de este proyecto son las siguientes:

- **Proyectista:** Es el autor del Trabajo Final de Grado y se encarga de la concepción, desarrollo, gestión y ajuste de un mecanismo para un exoesqueleto de agarre pinza que tiene como finalidad asistir a pacientes de ictus.
- **Tutor:** Es la persona responsable de supervisar al proyectista. En este caso, se cuenta con un especialista en el ámbito de la mecánica de mecanismos.

- Promotor: Es la entidad que adquiere los servicios del proyectista y los derechos sobre la explotación del proyecto. En este caso específico, el Grupo de Investigación de Biomecánica de la Universidad Jaime I actúa como promotor.

13.1.4. Condiciones del contrato del proyectista

La relación entre el proyectista y el promotor es exclusivamente de carácter educativo, sin que exista una compensación económica involucrada.

Además, es imperativo que el proyectista sea provisionado de lo siguiente:

- Condiciones ambientales estándar: temperatura entre 17 y 27 °C
- Nivel de ruido: inferior a 80 decibelios
- Licencias de software, si es necesario, de los programas especificados en el apartado 13.2.1

13.1.5. Accidentes de trabajo

Las normas básicas de seguridad y salud se encuentran establecidas en la Política de Prevención de Riesgos de la UJI. La cobertura se aplica a los accidentes que ocurran en las instalaciones de la empresa durante el horario de trabajo acordado por ambas partes.

13.1.6. Condiciones de explotación

El grupo de investigación de biomecánica y ergonomía de la UJI retendrá la propiedad intelectual completa de todos los componentes que conforman el mecanismo desarrollado en este estudio. Estos elementos incluyen todos los archivos de software utilizados para la creación del mecanismo, así como todos los documentos que se relacionen con el resultado del proyecto.

13.1.7. Normativa

Es necesario que todos los elementos proporcionados cumplan con las normas ISO, IEC y UNE, o que se utilicen normas equivalentes. En el transcurso del proyecto, se deben entregar las justificaciones de equivalencia y las nuevas normas empleadas.

Es importante destacar que, en cada documento, las especificaciones escritas tienen mayor importancia que las representaciones gráficas

13.1.8. Plazos y condiciones generales del proyecto

La realización de este Trabajo Final de Grado está determinada por las necesidades del grupo BE-UJI, y cualquier modificación en su ejecución debe ser acordada mutuamente.

13.1.9. Responsabilidades del proyectista

Una vez establecida la relación con el promotor, el proyectista tiene las siguientes responsabilidades:

- Es responsable de llevar a cabo el Trabajo Final de Grado de acuerdo con lo estipulado en la documentación correspondiente, asegurando la adecuada gestión del proyecto y la calidad del producto final
- Debe velar por el cumplimiento de las normas aplicables al proyecto, asegurándose de cumplir con los requisitos establecidos
- Debe comprometerse a concluir el proyecto según los términos acordados

13.2. Condiciones particulares

13.2.1. Especificaciones de software

Se utilizarán los siguientes programas y versiones para el desarrollo del estudio:

- macOS Monterey (Versión 12.6)
- TeX Live (LaTeX-Overleaf)
- Inkscape (Versión 1.2)
- Matlab (Versión R2020a) / Octave (Incluyendo las extemnsiones necesarias para optimización)
- SolidWorks Student Engineering Kit (V2022)

13.2.2. Especificaciones de equipos

- Ordenador personal

13.2.3. Condiciones de los equipos

El equipo utilizado debe contar con la capacidad adecuada para ejecutar sin problemas los software mencionados anteriormente, así como tener el sistema operativo necesario para la instalación de estos programas. Es obligatorio que los software informáticos utilizados estén instalados legalmente, mediante el pago de las licencias correspondientes, permitiendo el uso de licencias estudiantiles.

13.2.4. Dossier técnico

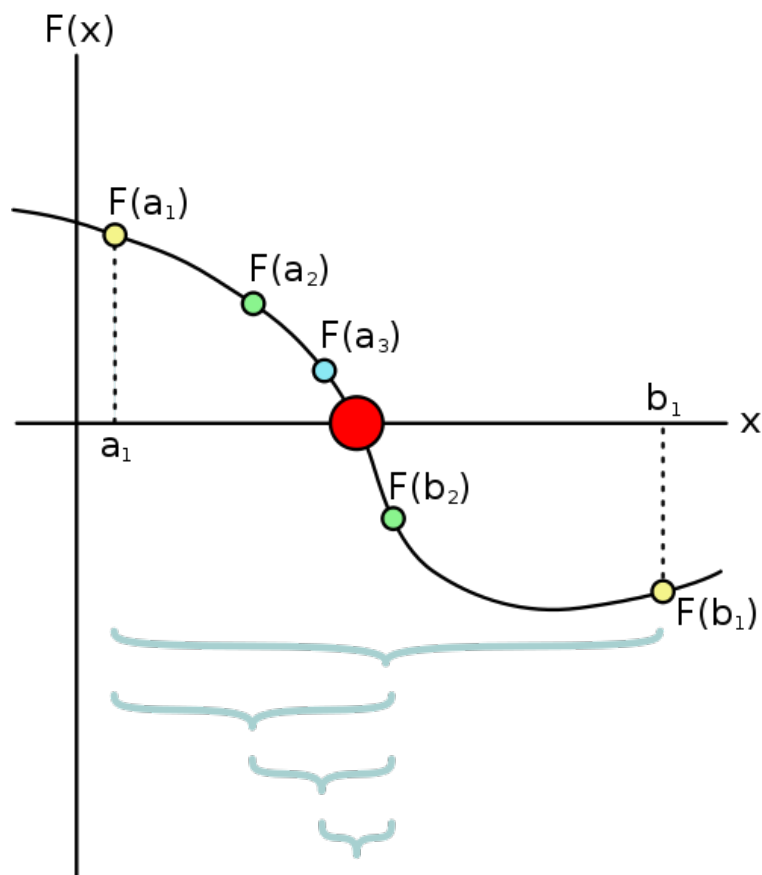
Como parte de la solución final, se deben proporcionar al promotor los siguientes documentos y archivos:

- Documentación técnica: Incluye documento descriptivo del estudio y cualquier otra documentación relevante que facilite el entendimiento y uso de la solución.
- Códigos de programación utilizados.

A. Descripción de funciones predefinidas en Matlab

A.1. Función fsolve

Para entender como funciona la función de Matlab fsolve, primero se ha de entender el método que utiliza, el método de bisección, también llamado Método de Intervalo Medio, es un algoritmo de búsqueda de raíces el cual divide el intervalo dado a la mitad y selecciona el subintervalo que contiene la raíz. A continuación se elabora una explicación más detallada del método.



Dada una función continua $f(x)$ en un intervalo $[a, b]$ se puede aplicar el método de la siguiente forma. Primero se verifica que $f(a) \cdot f(b) \neq 0$, una vez verificado, se calcula el punto medio, m , del intervalo $[a, b]$ y se evalúa $f(m)$, si el resultado es

cero, ya se ha encontrado la raíz. En el caso de que $f(m)$ sea distinta a cero, se verifica si $f(m)$ tiene signo opuesto con $f(a)$ o con $f(b)$.

A continuación, se redefine el intervalo $[a, b]$ como $[a, m]$ o $[m, b]$ dependiendo de en cuál de estos intervalos ocurre un cambio de signo. Con el nuevo intervalo se puede repetir el proceso tantas veces como sea necesario para encerrar la solución en un intervalo cada vez más pequeño, hasta alcanzar la precisión deseada.

B. Cálculos

B.1. Cálculos del dedo

$$O_7 = [x_0, y_0] \quad (1a)$$

$$R = O_7 + L_7 \cdot [-\cos \theta_7, -\sin \theta_7] \quad (1b)$$

$$S = R + L_8 \cdot [-\cos (\theta_7 + \theta_8), -\sin (\theta_7 + \theta_8)] \quad (1c)$$

$$T = S + L_9 \cdot [-\cos (\theta_7 + \theta_8 + \theta_9), -\sin (\theta_7 + \theta_8 + \theta_9)] \quad (1d)$$

B.2. Función intersección de círculos

Para empezar se calcula la distancia entre los centros P_1 y P_2 :

$$d = \sqrt{((P_2x - P_1x) * (P_2x - P_1x)) + ((P_2y - P_1y) * (P_2y - P_1y))} \quad (2a)$$

A continuación, verificamos que los círculos intersecan:

$$si \quad d > r_1 + r_2 \quad (3a)$$

En este caso los círculos están demasiado lejos el uno del otro por lo que no intersecan.

$$si \quad d < |(r_1 - r_2)| \quad (3b)$$

En este caso un círculo queda dentro del otro por lo que no intersecan.

$$si \quad d = 0 \quad y \quad r_1 = r_2 \quad (3c)$$

Los círculos se fusionan.

$$si \quad d < r_1 + r_2 \quad (3d)$$

Hay dos puntos de intersección.

En el caso de darse la última condición, se procede con el cálculo de los puntos de intersección.

$$a = \frac{r_1 * r_1 - r_2 * r_2 + d * d}{2 * d} \quad (4a)$$

$$h = \sqrt{r_1 * r_1 - a * a} \quad (4b)$$

$$P_5 = \left[P_1x + \frac{a}{d} * (P_2x - P_1x), P_1y + \frac{a}{d} * (P_2y - P_1y) \right] \quad (4c)$$

$$I_1 = \left[P_5x - h * \frac{P_2y - P_1y}{d}, P_5y + h * \frac{P_2x - P_1x}{d} \right] \quad (4d)$$

$$I_2 = \left[P_5x + h * \frac{P_2y - P_1y}{d}, P_5y - h * \frac{P_2x - P_1x}{d} \right] \quad (4e)$$

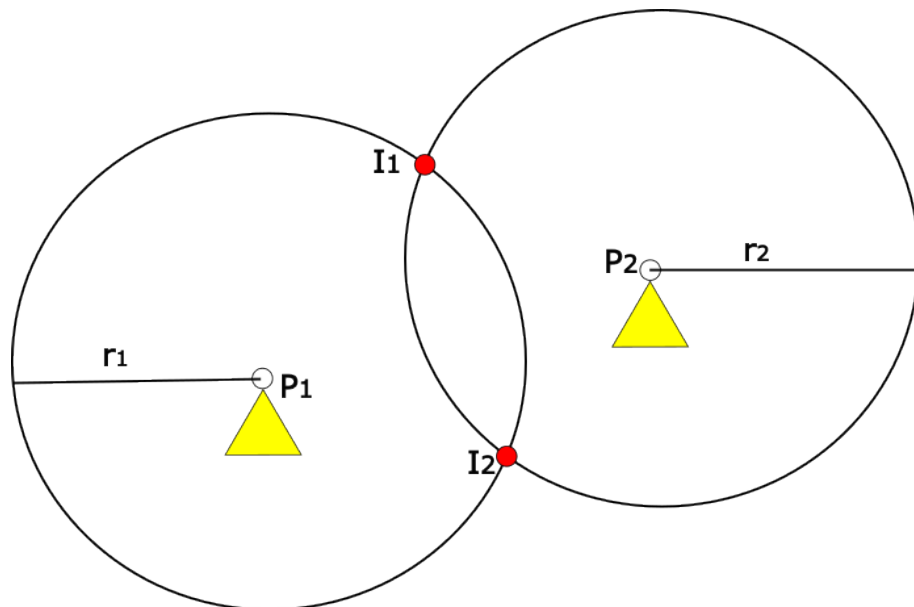


Figura 65: Intersección de 2 circunferencias

B.3. Función intersección Recta-Circunferencia

Antes de resolver la intersección se tiene que cumplir la siguiente condición, para asegurar que la recta corta a la circunferencia.

$$L > O_3P \quad (5a)$$

Siendo P cualquier punto perteneciente a la recta.

Una vez hecho esto, ya se pueden formular las ecuaciones de la intersección de la recta con la circunferencia.

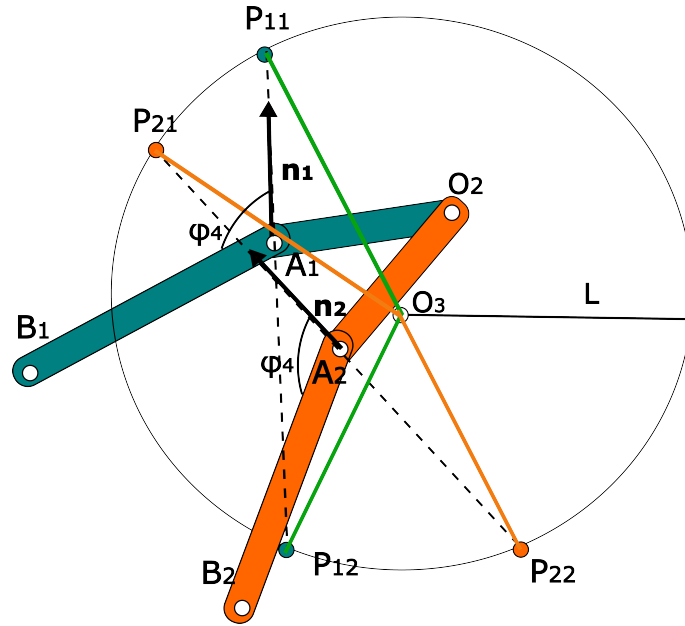


Figura 66: Intersección Recta-Circunferencia 2 posiciones

Primero se calculan los vectores unitarios entre B_1 y A_1 y entre B_2 y A_2 :

$$\vec{n}_1 = \frac{B_1 - A_1}{\sqrt{B_1^2 - A_1^2}} \quad (5b)$$

$$\vec{n}_2 = \frac{B_2 - A_2}{\sqrt{B_2^2 - A_2^2}} \quad (5c)$$

Ahora mediante una matriz de rotación del ángulo ϕ_4 se giran dichos vectores para que vayan en dirección AP

$$[R] = \begin{bmatrix} \cos(-\phi_4) & -\sin(-\phi_4) \\ \sin(-\phi_4) & \cos(-\phi_4) \end{bmatrix} \quad (5d)$$

$$\vec{n}_1 = [[R] * \vec{n}_1'] \quad (5e)$$

$$\vec{n}_2 = [[R] * \vec{n}_2'] \quad (5f)$$

A partir de aquí se puede resolver el problema de dos formas distintas, la primera sería llegar al punto P desde el punto A , llegar desde O_3 e igualar ambos. La segunda opción sería resolver la ecuación de la circunferencia.

Ambas resoluciones dan lugar a sistemas de ecuaciones que resuelven nuestro problema.

Resolviendo de la primera forma se puede formular un sistema de 4 ecuaciones:

$$A_1 + t * \vec{n}_1 = O_3 + L \cdot (\cos \theta_{31}i + \sin \theta_{31}j) \quad (6a)$$

$$A_2 + t * \vec{n}_2 = O_3 + L \cdot (\cos \theta_{32}i + \sin \theta_{32}j) \quad (6b)$$

Siendo θ_3 el ángulo que forma el O_3P con la horizontal.

Con este sistema de 4 ecuaciones y 4 incógnitas ($t, L, \theta_{31}, \theta_{32}$) se puede resolver el problema.

La segunda forma de resolución dará lugar a un sistema de 2 ecuaciones con una resolución mas sencilla al no implementar ángulos como incógnitas.

Se sabe que la ecuación ordinaria de una circunferencia es la siguiente:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2 \quad (6c)$$

Y que los datos de el problema son los siguientes:

$$Centro(a, b) = \vec{O}_3$$

$$Radio = L$$

$$Punto_1(x_1, y_1) = \vec{P}_1$$

$$Punto_2(x_2, y_2) = \vec{P}_2$$

Dando lugar a las siguientes ecuaciones:

$$P_1 = A_1 + t * \vec{n}_1 \quad (6d)$$

$$P_2 = A_2 + t * \vec{n}_2 \quad (6e)$$

$$(P_{1x} - O_{3x})^2 + (P_{1y} - O_{3y})^2 = L^2 \quad (6f)$$

$$(P_{2x} - O_{3x})^2 + (P_{2y} - O_{3y})^2 = L^2 \quad (6g)$$

Sustituyendo La ecuación 6d y 6e en 6f y 6g respectivamente, se tiene lo siguiente:

$$((B_{1x} + t * n_{1x}) - O_{3x})^2 + ((B_{1y} + t * n_{1y}) - O_{3y})^2 = L^2 \quad (6h)$$

$$((B_{2x} + t * n_{2x}) - O_{3x})^2 + ((B_{2y} + t * n_{2y}) - O_{3y})^2 = L^2 \quad (6i)$$

De aquí se despejan las incógnitas L y t, donde t es la norma del vector AP .

En el cálculo de posiciones se usará la segunda resolución, ya que es la forma mas sencilla y rápida de resolver el problema.

B.4. Cálculos mecanismo RML

B.4.1. Calcular posición inicial y final

Cálculo de los puntos O_2 y O_4

$$O_2 = [O_{2x}, O_{2y}] \quad (7a)$$

$$O_3 = O_2 + L_1 * [\cos(180 + \phi_1), \sin(180 + \phi_1)] \quad (7b)$$

Verificación intersección de círculos para el calculo del punto B :

$$E_1 O_2 < L_{22} + L_{42} \quad (8a)$$

$$E_2 O_2 < L_{22} + L_{42} \quad (8b)$$

Residuo que indica cuan alejado esta el mecanismo de cumplir las condiciones previas:

$$res = E_1 O_2 - L_{22} - L_{42} \quad (8c)$$

$$res = E_2 O_2 - L_{22} - L_{42} \quad (8d)$$

Calculo de θ_{2Ini} y θ_{2End} :

$$\theta_{2Ini_1} = \arctan \frac{B_{11y} - O_{2y}}{B_{11x} - O_{2x}} \quad (9a)$$

$$\theta_{2Ini_2} = \arctan \frac{B_{12y} - O_{2y}}{B_{12x} - O_{2x}} \quad (9b)$$

$$\theta_{2End_1} = \arctan \frac{B_{21y} - O_{2y}}{B_{21x} - O_{2x}} \quad (9c)$$

$$\theta_{2End_2} = \arctan \frac{B_{22y} - O_{2y}}{B_{22x} - O_{2x}} \quad (9d)$$

Cálculo de D_1 y D_2 :

$$D_1 = B_1 + L_{41} \cdot \vec{n}_1 \quad (10a)$$

$$D_2 = B_2 + L_{41} \cdot \vec{n}_2 \quad (10b)$$

Cálculo de C_1 y C_2 :

$$C_1 = B_1 + L_{23} \cdot [\cos (\theta_{2Ini} + \phi_2 - 180), \sin (\theta_{2Ini} + \phi_2 - 180)] \quad (11a)$$

$$C_2 = B_2 + L_{23} \cdot [\cos (\theta_{2End} + \phi_2 - 180), \sin (\theta_{2End} + \phi_2 - 180)] \quad (11b)$$

En este caso al haber dos circunferencias, ya que los centros son distintos, habrá dos condiciones a cumplir:

B.4.2. Calcular mecanismo

Cálculo de puntos iniciales:

$$O_2 = [O_{2x}, O_{2y}]; \quad (12a)$$

$$O_4 = O_2 + L_1 * [\cos \phi_1 + 180, \sin \phi_1 + 180]; \quad (12b)$$

$$B = O_2 + L_{22} * [\cos \theta_2, \sin \theta_2]; \quad (12c)$$

$$A = O_2 + L_{21} * [\cos \theta_2 - 90, \sin \theta_2 - 90]; \quad (12d)$$

Cálculos para la selección del punto D, intersección de círculos:

Si no se tienen puntos previos calculados, configuración cruzada.

$$\vec{u}_1 = D'_1 - O_4 \quad (13a)$$

$$\vec{u}_2 = B - O_4 \quad (13b)$$

$$Cruz = u_{1x} * u_{2y} - u_{1y} * u_{2x} \quad (13c)$$

Si $Cruz \geq 0$ se utilizará D'_1 , sino D'_2

Si se tienen puntos previos calculados:

$$d_1 = \sqrt{D_1'^2 - D^2} \quad (14a)$$

$$d_2 = \sqrt{D_2'^2 - D^2} \quad (14b)$$

Se escogerá la solución mas cercana al antiguo punto D.

Calculo de los puntos C y E:

$$C = B + L_{23} * [\cos (\theta_2 + \phi_2 - 180), \sin (\theta_2 + \phi_2 - 180)] \quad (15a)$$

$$[R_E] = \begin{bmatrix} \cos(\phi_4) & -\sin(\phi_4) \\ \sin(\phi_4) & \cos(\phi_4) \end{bmatrix} \quad (15b)$$

$$\vec{u}_1 = \frac{D - B}{\sqrt{D^2 - B^2}}; \quad (15c)$$

$$E = B + L_{42} * [[R_E] * u'_1]'; \quad (15d)$$

Calculo punto G:

$$[R_G] = \begin{bmatrix} \cos(\phi_6) & -\sin(\phi_6) \\ \sin(\phi_6) & \cos(\phi_6) \end{bmatrix} \quad (16a)$$

$$\vec{u}_1 = \frac{F - E}{\sqrt{F^2 - E^2}}; \quad (16b)$$

$$G = E + L_{62} * [[R_G] * u'_1]'; \quad (16c)$$

B.5. Cálculos mecanismo de Toronto

B.5.1. Calcular posición inicial y final

Punto O_2 predefinido:

$$O_2 = (O_{2x}, O_{2y}) \quad (17)$$

Los puntos D, F e I coinciden con los puntos R, S y T del dedo, respectivamente.

$$D_1 = R_1; \quad (18a)$$

$$D_2 = R_2; \quad (18b)$$

$$F_1 = S_1; \quad (18c)$$

$$F_2 = S_2; \quad (18d)$$

$$I_1 = T_1; \quad (18e)$$

$$I_2 = T_2; \quad (18f)$$

Posiciones extremas de θ_2 :

$$\theta_{2ini} = \arctan\left(\frac{D_{1y}}{D_{1x}}\right) \quad (19a)$$

$$\theta_{2end} = \arctan\left(\frac{D_{2y}}{D_{2x}}\right) \quad (19b)$$

Si $\theta_{2ini} < 0$ se le suma 360° , lo mismo ocurre para θ_{2end}

Punto A_1 y A_2 :

$$A_1 = O_2 + L_{22} * [\cos(\theta_{2ini} + \phi_2) + \sin(\theta_{2ini} + \phi_2)] \quad (20a)$$

$$A_2 = O_2 + L_{22} * [\cos(\theta_{2end} + \phi_2) + \sin(\theta_{2end} + \phi_2)] \quad (20b)$$

Punto E_1 y E_2 :

$$\theta_{6ini} = \arctan \frac{F_{1y} - D_{1y}}{F_{1x} - D_{1x}} \quad (21a)$$

$$\theta_{6end} = \arctan \frac{F_{2y} - D_{2y}}{F_{2x} - D_{2x}} \quad (21b)$$

$$E_1 = D_1 + L_{62} * [\cos(\theta_{6ini} + \phi_6), \sin(\theta_{6ini} + \phi_6)]; \quad (21c)$$

$$E_2 = D_2 + L_{62} * [\cos(\theta_{6end} + \phi_6), \sin(\theta_{6end} + \phi_6)]; \quad (21d)$$

Punto H_1 y H_2 :

$$\theta_{8ini} = \arctan \frac{I_{1y} - F_{1y}}{I_{1x} - F_{1x}} \quad (22a)$$

$$\theta_{8end} = \arctan \frac{I_{2y} - F_{2y}}{I_{2x} - F_{2x}} \quad (22b)$$

$$H_1 = F_1 + L_{82} * [\cos(\theta_{8ini} + \phi_8), \sin(\theta_{8ini} + \phi_8)]; \quad (22c)$$

$$H_2 = F_2 + L_{82} * [\cos(\theta_{8end} + \phi_8), \sin(\theta_{8end} + \phi_8)]; \quad (22d)$$

Punto B_1 y B_2 :

$$B_{1x} = A_{1x} + \sqrt{L_{31}^2 - (L_1 - |A_{1y}|)^2} \quad (23a)$$

$$B_1 = [B_{1x}, -L_1] \quad (23b)$$

$$B_{2x} = A_{2x} + \sqrt{L_{31}^2 - (L_1 - |A_{2y}|)^2} \quad (23c)$$

$$B_2 = [B_{2x}, -L_1] \quad (23d)$$

Ángulos necesarios para formular ecuaciones de las que se despejan los parámetros derivados:

$$\theta_{51} = \arctan \frac{G_{1y} - E_{1y}}{G_{1x} - E_{1x}} \quad (24a)$$

$$\theta_{52} = \arctan \frac{G_{2y} - E_{2y}}{G_{2x} - E_{2x}} \quad (24b)$$

$$\theta_{31} = \arctan \frac{B_{1y} - A_{1y}}{B_{1x} - A_{1x}} \quad (24c)$$

$$\theta_{32} = \arctan \frac{B_{2y} - A_{2y}}{B_{2x} - A_{2x}} \quad (24d)$$

Sistema de ecuaciones para la obtención de los parámetros derivados de este mecanismo:

$$E_{1x} + L_{51} \cdot u_{51x} = A_{1x} + L_{32} \cdot u_{31x} \quad (25a)$$

$$E_{1y} + L_{51} \cdot u_{51y} = A_{1y} + L_{32} \cdot u_{31y} \quad (25b)$$

$$E_{2x} + L_{51} \cdot u_{52x} = A_{2x} + L_{32} \cdot u_{32x} \quad (25c)$$

$$E_{2y} + L_{51} \cdot u_{52y} = A_{2y} + L_{32} \cdot u_{32y} \quad (25d)$$

Donde,

$$\vec{u}_{31} = [\cos(\theta_{31} - \phi_3), \sin(\theta_{31} - \phi_3)]; \quad (26a)$$

$$\vec{u}_{32} = [\cos(\theta_{32} - \phi_3), \sin(\theta_{32} - \phi_3)]; \quad (26b)$$

$$\vec{u}_{51} = [\cos(\theta_{51} - \phi_5), \sin(\theta_{51} - \phi_5)]; \quad (26c)$$

$$\vec{u}_{52} = [\cos(\theta_{52} - \phi_5), \sin(\theta_{52} - \phi_5)]; \quad (26d)$$

B.5.2. Calcular mecanismo

Cálculo de O_2 , A y D :

$$O_2 = [O_{2x}, O_{2y}] \quad (27a)$$

$$D = O_2 + L_{21} \cdot [\cos \theta_2, \sin \theta_2] \quad (27b)$$

$$A = O_2 + L_{22} \cdot [\cos \theta_2 + \phi_2, \sin \theta_2 + \phi_2] \quad (27c)$$

Cálculo punto B:

$$B_x = A_x + \sqrt{L_{31}^2 - (L_1 - |A_y|)^2} \quad (28a)$$

$$B = [B_x, -L_1] \quad (28b)$$

Cálculo punto C:

$$\theta_3 = \arctan \frac{(B_y - A_y)}{(B_x - A_x)} \quad (29a)$$

$$\vec{u}_3 = [\cos(\theta_3 + \phi_3), \sin(\theta_3 + \phi_3)] \quad (29b)$$

$$C = A + L_{32} \cdot \vec{u}_3 \quad (29c)$$

Cálculo condiciones punto E:

■ Para θ_{2ini} :

$$\vec{u}_1 = E'_1 - D \quad (30a)$$

$$\vec{u}_2 = C - D; \quad (30b)$$

$$cruz \geq u_{1x} \cdot u_{2y} - u_{1y} \cdot u_{2x} \quad (30c)$$

- Para el resto de posiciones:

$$e_1 = \sqrt{(E'_{1x} - E_{xAnterior})^2 + (E'_{1y} - E_{yAnterior})^2} \quad (31a)$$

$$e_2 = \sqrt{(E'_{2x} - E_{xAnterior})^2 + (E'_{2y} - E_{yAnterior})^2} \quad (31b)$$

Cálculo del punto G:

$$\theta_5 = \arctan \frac{(C_y - E_y)}{(C_x - E_x)} \quad (32a)$$

$$\vec{u}_5 = [\cos(\theta_5 + \phi_5), \sin(\theta_5 + \phi_5)] \quad (32b)$$

$$G = E + L_{52} \cdot \vec{u}_5 \quad (32c)$$

Cálculo del punto F:

$$\theta_6 = \arctan \frac{(D_y - E_y)}{(D_x - E_x)} \quad (33a)$$

$$\vec{u}_6 = [\cos(\theta_6 + \phi_6), \sin(\theta_6 + \phi_6)] \quad (33b)$$

$$F = D + L_{61} \cdot \vec{u}_6 \quad (33c)$$

Cálculo condiciones punto H:

- Para θ_{2ini} :

$$\alpha_{FH1} = \arctan \frac{(H_{1y} - F_y)}{(H_{1x} - F_x)} \quad (34a)$$

$$\alpha_{FH2} = \arctan \frac{(H_{2y} - F_y)}{(H_{2x} - F_x)} \quad (34b)$$

Si $\alpha < 0$ a ese ángulo se le suma 360.

Si $\alpha_{FH2} > \alpha_{FH1}$,

$$H = H'_2 \quad (34c)$$

Por el contrario, si $\alpha_{FH2} < \alpha_{FH1}$,

$$H = H'_1 \quad (34d)$$

- Para el resto de posiciones:

$$\alpha_{FHanterior} = \arctan \frac{(H_{yAnterior} - F_y)}{(H_{xAnterior} - F_x)} \quad (35a)$$

$$\alpha_{FH1} = \arctan \frac{(H_{1y} - F_y)}{(H_{1x} - F_x)} \quad (35b)$$

$$\alpha_{FH2} = \arctan \frac{(H_{2y} - F_y)}{(H_{2x} - F_x)} \quad (35c)$$

$$h_1 = \sqrt{(H'_{1x} - H_{xAnterior})^2 + (H'_{1y} - H_{yAnterior})^2} \quad (35d)$$

$$h_2 = \sqrt{(H'_{2x} - H_{xAnterior})^2 + (H'_{2y} - H_{yAnterior})^2} \quad (35e)$$

Si $h_1 < h_2$ y $\alpha_{FH1} > \alpha_{FHAnterior}$,

$$H = H'_1 \quad (36)$$

Mientras que, si $h_2 < h_1$ y $\alpha_{FH2} > \alpha_{FHAnterior}$,

$$H = H'_2 \quad (37)$$

Cálculo del punto I:

$$\theta_8 = \arctan \frac{(F_y - H_y)}{(F_x - H_x)} \quad (38a)$$

$$\vec{u}_8 = [\cos(\theta_8 + \phi_8), \sin(\theta_8 + \phi_8)] \quad (38b)$$

$$I = F + L_{81} \cdot \vec{u}_8 \quad (38c)$$

B.6. Ventaja mecánica

La ventaja mecánica es una magnitud adimensional que muestra cuanto se magnifica la fuerza aplicada en un mecanismo. Puede definirse como el cociente entre la fuerza ubicada en el eslabón de salida y la fuerza aplicada en el eslabón de entrada.

Para estudiar la ventaja mecánica de nuestro mecanismo, se ha creado la función de Matlab `funEvaluateMechanicalAdvantage`, en ella se crea un bucle que evalúa la ventaja entre las posiciones comprendidas desde en ángulo θ_{2Ini} y θ_{2End} , para cada una de las posiciones se evalúa si la configuración es posibles o no y si lo es, se calcula la ventaja mecánica del mecanismo definiendo como entrada el Punto A y como salida el Punto F.

Para calcular la ventaja mecánica primero se calcula el ángulo θ_2 partiendo de los ángulos θ_{2Ini} y θ_{2End}

$$\theta_2 = \theta_{2Ini} + (i - 1) * \frac{\theta_{2End} - \theta_{2Ini}}{nPos - 1} \quad (39)$$

Una vez hecho esto, se calculan el punto de entrada y el de salida, A y F respectivamente, para θ_2 sumando o restando la variación δ_{θ_2} a dicho ángulo.

$$A_1 = O_2 + L_{21} * [\cos(\theta_2 + \delta_{\theta_2}) - 90, \sin(\theta_2 + \delta_{\theta_2}) - 90] \quad (40)$$

$$A_2 = O_2 + L_{21} * [\cos(\theta_2 - \delta_{\theta_2}) - 90, \sin(\theta_2 - \delta_{\theta_2}) - 90] \quad (41)$$

El punto F se calcula mediante la función de intersección de círculos explicada previamente, usando $\theta_2 + \delta_{\theta_2}$ como ángulo de entrada para calcular F_1 y $\theta_2 - \delta_{\theta_2}$ para calcular F_2 . Con dichos puntos calculados, se procederá a calcular la variación del punto inicial y final.

$$\delta_{Entrada} = \sqrt{A_1^2 - A_2^2} \quad (42)$$

$$\delta_{Salida} = \sqrt{F_1^2 - F_2^2} \quad (43)$$

$$VM = [\theta_2, \frac{\delta_{Entrada}}{\delta_{Salida}}] \quad (44)$$

C. Planos

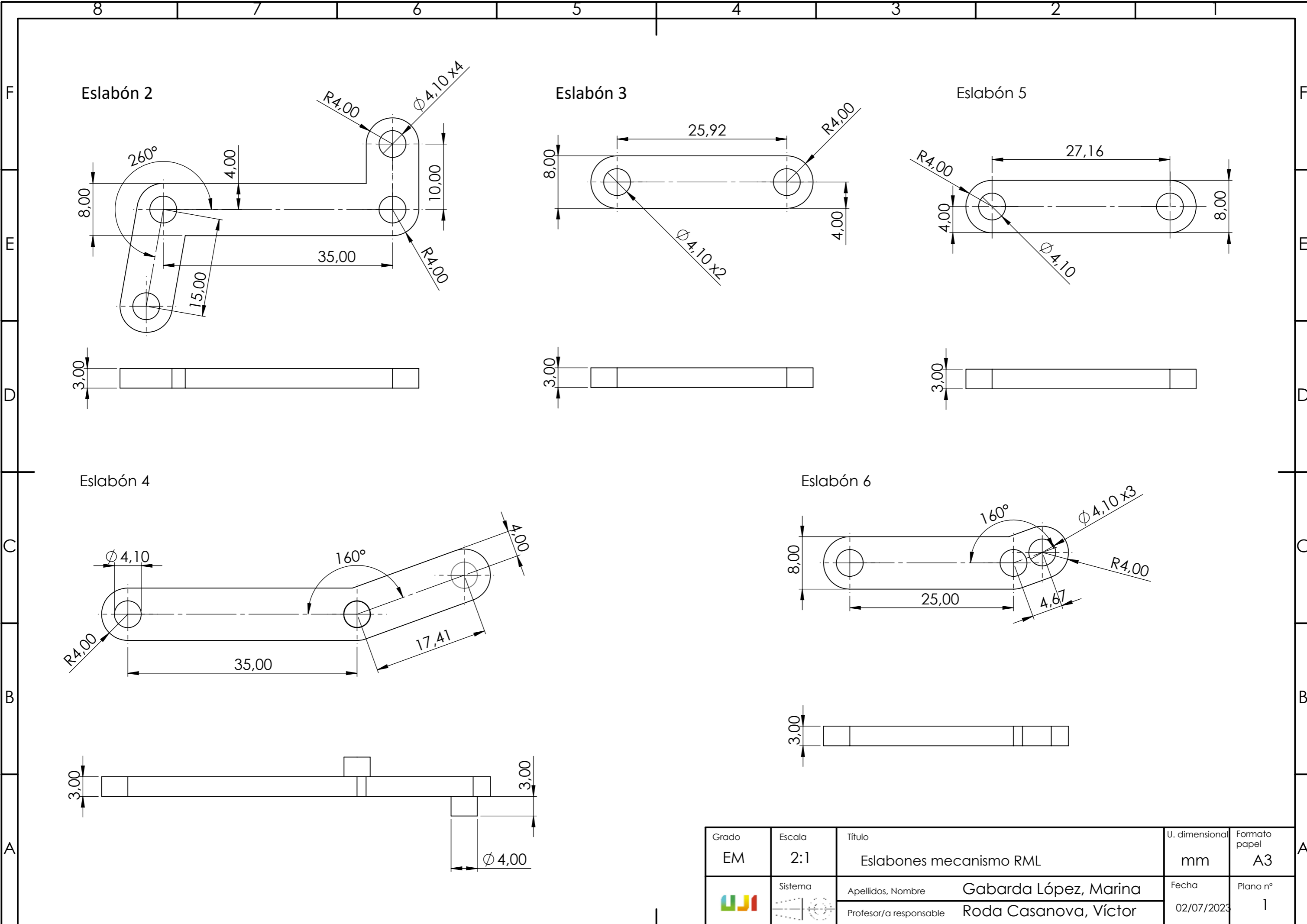
Con el fin de mejorar la comprensión de la elaboración de los planos se ha creado un diagrama que ilustra el proceso desde la toma de medidas de las falanges del paciente hasta la producción del producto.



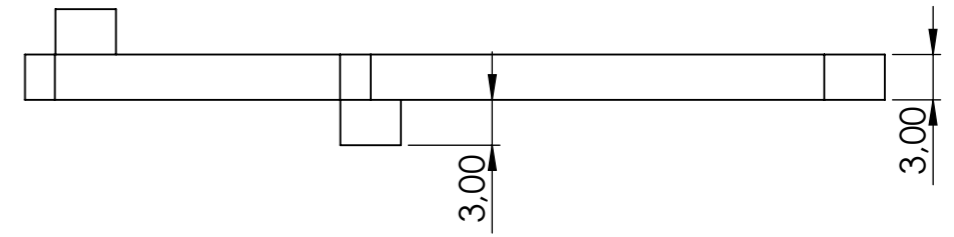
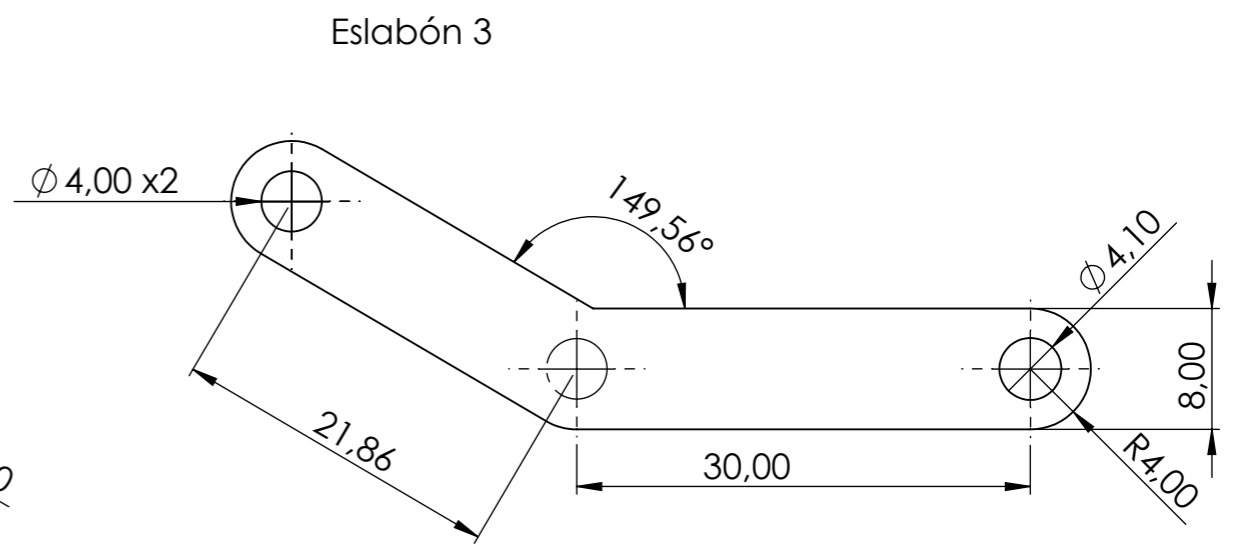
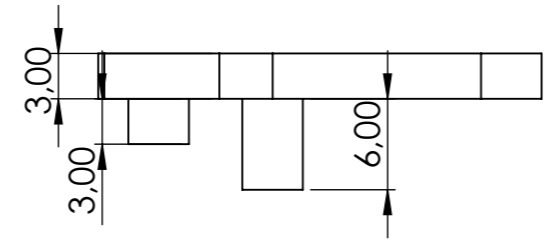
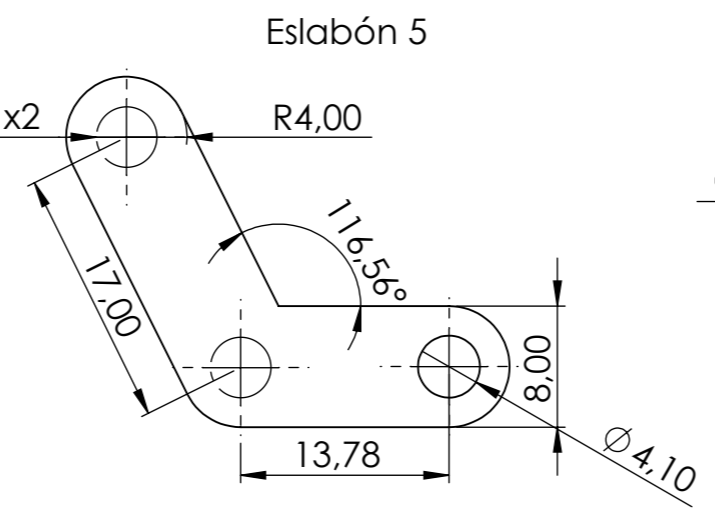
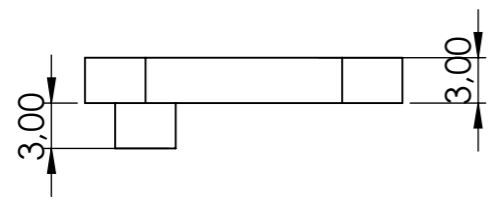
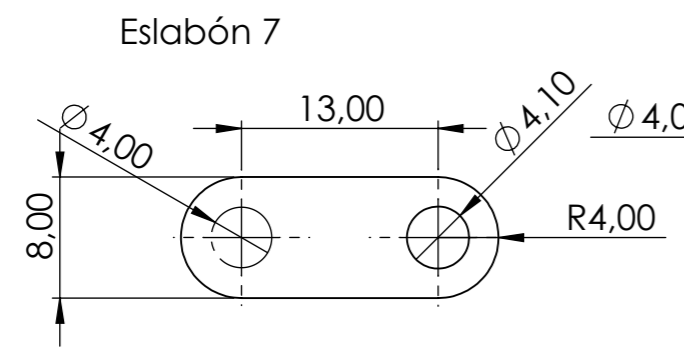
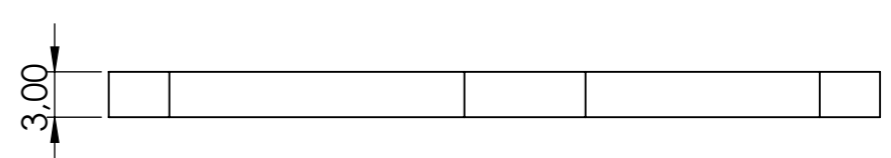
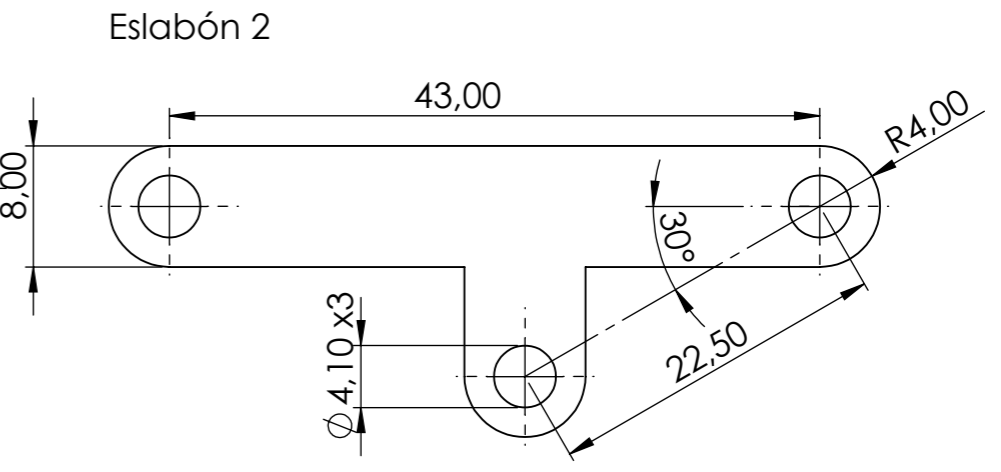
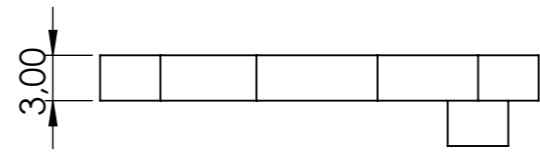
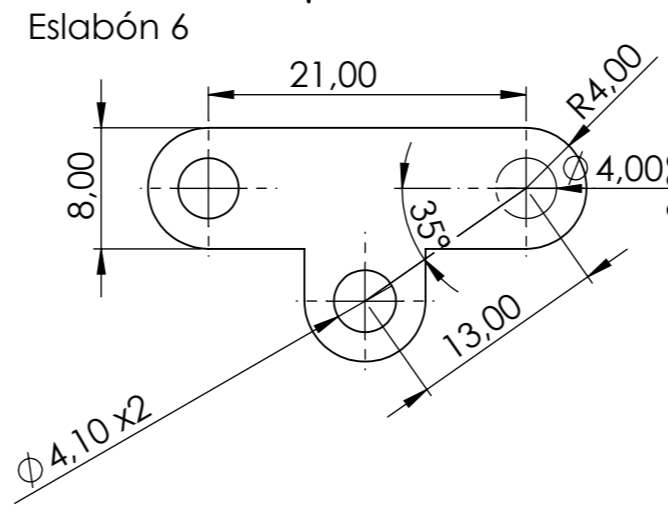
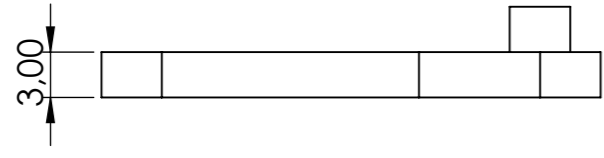
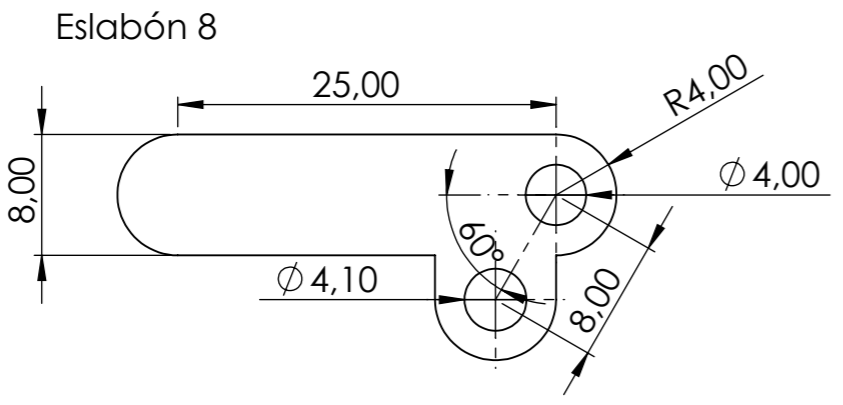
Figura 67: Flujo de trabajo

Tal y como muestra el diagrama de la figura 67, tras ejecutar el programa de Matlab e introduciendo los datos de entrada requeridos, este está configurado para devolver los parámetros finales del mecanismo, creando directamente las piezas en el programa SolidWorks. De esta manera, se obtienen de forma rápida y eficaz los archivos necesarios para imprimir las piezas del mecanismo.

A continuación se muestran los planos sacados con dichos modelos de SolidWorks:



Grado EM	Escala 2:1	Título Eslabones mecanismo RML	U. dimensional mm	Formato papel A3
	Sistema	Apellidos, Nombre Gabarda López, Marina	Fecha 02/07/2023	Plano nº 1
		Profesor/a responsable Roda Casanova, Víctor		



Grado EM	Escala 2:1	Título Eslabones mecanismo de Toronto	U. dimensional mm	Formato papel A3
	Sistema	Apellidos, Nombre Gabarda López, Marina	Fecha 12/07/2023	Plano nº 1
		Profesor/a responsable Roda Casanova, Víctor		

Referencias

- [1] Y. Guo, W. Xu, S. Pradhan, C. Bravo, and P. Ben-Tzvi. Personalized voice activated grasping system for a robotic exoskeleton glove. *Mechatronics*, 83:102745, 2022.
- [2] I. Jo, Y. Park, J. Lee, and J. Bae. A portable and spring-guided hand exoskeleton for exercising flexion/extension of the fingers. *Mechanism and Machine Theory*, 135:176–191, 2019.
- [3] O. F. Portilla Flores, Édgar Alfredo and Avilés Sánchez, R. Piña Quintero, P. A. Niño Suárez, E. Moya Sánchez, and M. A. Molina Vilchis. Análisis cinemático y diseño de un mecanismo de cuatro barras para falange proximal de dedo antropomórfico. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 20(1):45–59, 2010.
- [4] M. Sarac, M. Solazzi, and A. Frisoli. Design requirements of generic hand exoskeletons and survey of hand exoskeletons for rehabilitation, assistive, or haptic use. *IEEE transactions on haptics*, 12(4):400–413, 2019.
- [5] G. Scivoletto, B. Morganti, and M. Molinari. Early versus delayed inpatient spinal cord injury rehabilitation: an italian study. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 86(3):512–516, 2005.
- [6] P. Tran, S. Jeong, K. R. Herrin, and J. P. Desai. Hand exoskeleton systems, clinical rehabilitation practices, and future prospects. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, 3(3):606–622, 2021.
- [7] T. Vanteddu, B. Sebastian, and P. Ben-Tzvi. Design optimization of rml glove for improved grasp performance. In *Dynamic Systems and Control Conference*, volume 51890, page V001T07A004. American Society of Mechanical Engineers, 2018.
- [8] Z. Yue, X. Zhang, J. Wang, et al. Hand rehabilitation robotics on poststroke motor recovery. *Behavioural neurology*, 2017, 2017.

[4] [1] [3] [2] [5] [6] [8] [7]