

SÍNTESIS EVOLUTIVA DE MECANISMOS APLICADA AL DISEÑO DE UN EXOESQUELETO PARA LA REHABILITACIÓN DE LOS DEDOS DE LA MANO

Alex Bataller, Juan A. Cabrera, Juan Jesús Castillo, Fernando Nadal



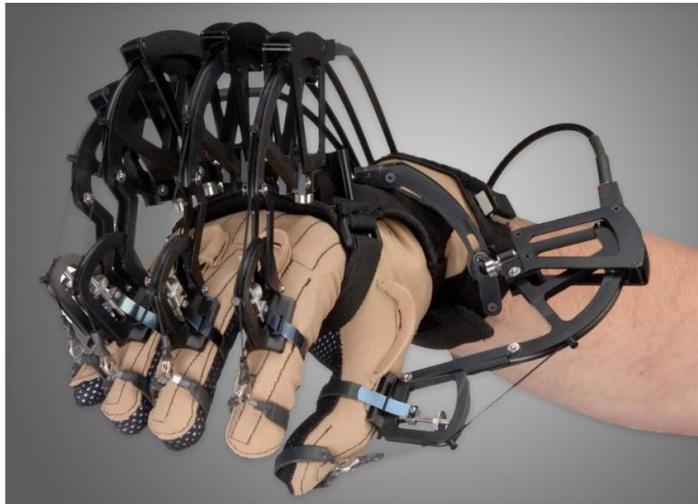
UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Área de Ingeniería Mecánica

- 1. Introducción**
- 2. Cadena cinemática de un dedo, variables de diseño y datos**
- 3. Algoritmo evolutivo MUMSA**
- 4. Planteamiento del problema de síntesis**
- 5. Aplicación a un caso real**
- 6. Diseño del exoesqueleto**
- 7. Conclusiones y líneas futuras**

Exoesqueletos activos para la rehabilitación de la mano:

- Con sensores para ayudar al movimiento
- Hasta 20 grados de libertad para los dedos
- Caros, pesados, con control complejo
- Para rehabilitación activa tras accidente cerebrovascular o lesión medular



Propuesta: Exoesqueleto pasivo

- Diseño de un exoesqueleto específicamente para para la rehabilitación con CPM.
- Estructura rígida que permite ser utilizado como férula de inmovilización postquirúrgica.
- Diseñado a medida para cada paciente.
- Configurable para un solo dedo o para varios dedos según requerimiento.
- Económico, fácil de fabricar y con un control sencillo.

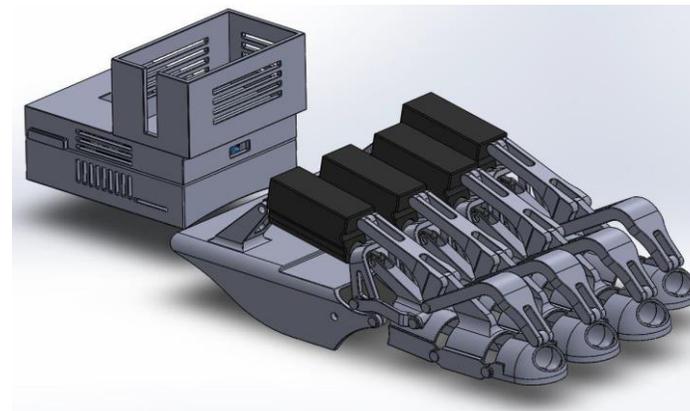


Tabla 1: Variables de diseño

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

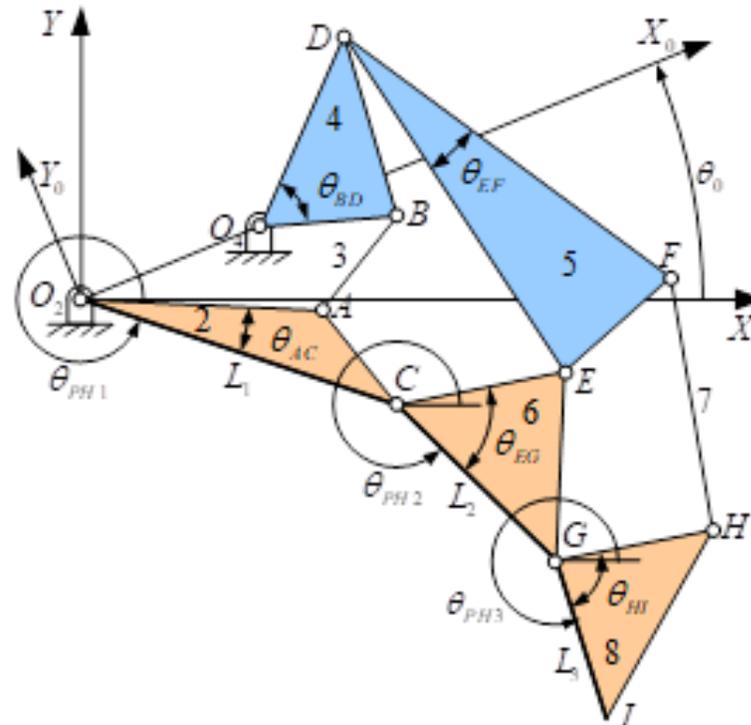
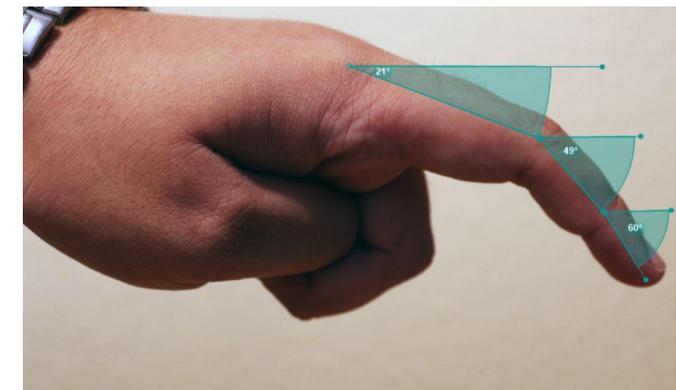
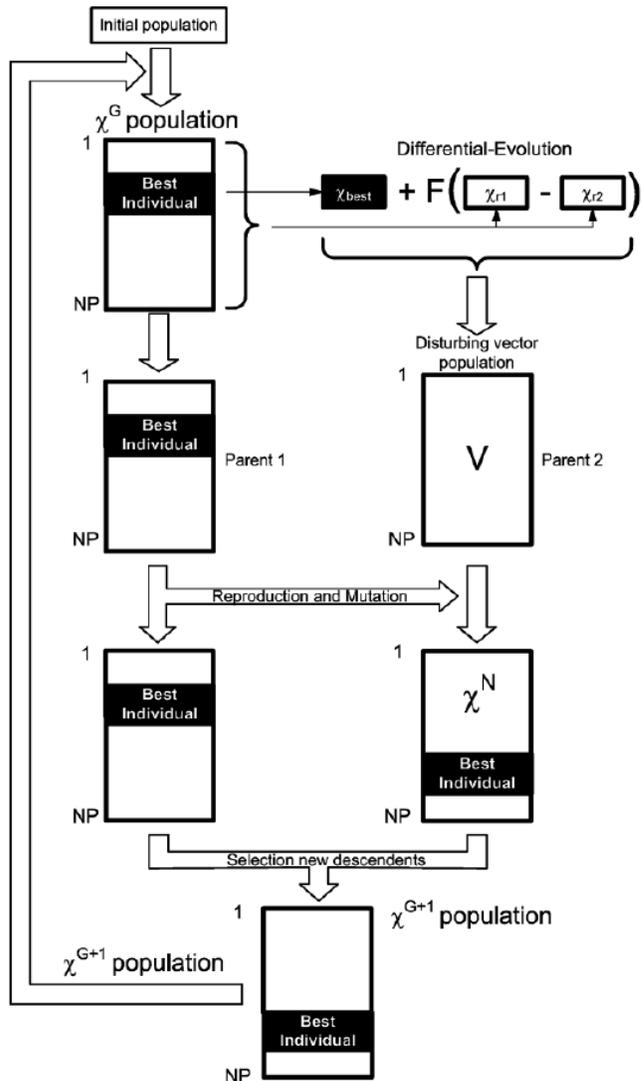


Tabla 2: Datos de entrada

Variable	Descripción
θ_{PH1}	Posición angular de la falange proximal
θ_{PH2}	Posición angular de la falange media
θ_{PH3}	Posición angular de la falange distal
L_1	Longitud de la falange proximal
L_2	Longitud de la eslabón 2
L_3	Longitud del eslabón 3





Parámetros del algoritmo:

NP - Número de individuos de la población inicial

F - Factor de perturbación del mejor individuo: $V = \chi_{best} + F \cdot (\chi_{r1} - \chi_{r2})$

CP - Factor del operador de cruce

MP - Factor de probabilidad de la mutación

Range - Rango de la mutación de los genes x_{in} : $[x_{in} - range, x_{in} + range]$

Itermax - Máximo número de poblaciones

Minerror - Mínimo error

Planteamiento del problema de síntesis:

$$\min_{\chi} \{M \cdot f(\chi)\} \quad \chi = \left[\theta_0, r_1, r_2, r_3, r_4, \theta_{AC}, r_D, \theta_{BD}, r_5, \right. \\ \left. r_6, r_{DF}, \theta_{EF}, \theta_{EG}, r_7, r_8, \theta_{HI} \right]$$

Función objetivo:

$$f(\chi) = \sum_{i=1}^N \left[(\theta_{PH2}^i - \theta_{PH2g}^i)^2 + (\theta_{PH3}^i - \theta_{PH3g}^i)^2 \right]$$

Límites de las variables y restricciones del problema:

$$li_i \leq x_i \leq ls_i \quad \forall x_i \in \chi$$

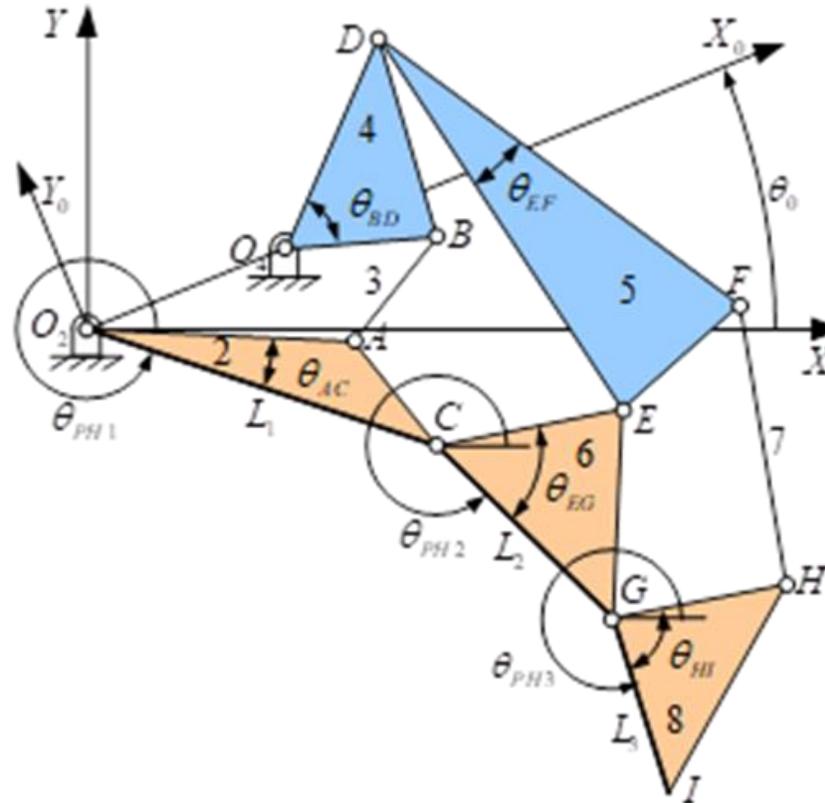
Parámetros de entrada

Tabla 3: Ángulos medidos para las falanges proximal, media y distal del dedo índice del paciente respecto a la horizontal.

Posición	θ_{PH1} [°]	θ_{PH2} [°]	θ_{PH3} [°]
1	-7.4	-10.0	-12.4
2	-12.7	-15.6	-17.7
3	-17.0	-20.0	-22.0
4	-19.7	-23.4	-25.4
5	-22.5	-27.0	-31.0
6	-28.5	-33.9	-38.7
7	-33.0	-43.0	-50.0
8	-40.0	-55.0	-64.5
9	-46.3	-68.0	-77.5
10	-51.2	-78.3	-92.0
11	-57.0	-90.0	-109.0
12	-61.0	-102.9	-128.0
13	-65.0	-118.0	-150.7
14	-69.0	-132.0	-172.0
15	-73.6	-146.0	-195.0
16	-76.8	-161.9	-219.7

Tabla 4: Longitudes de las falanges del dedo del paciente

Falange	L_i [mm]
1 (Proximal)	50
2 (Media)	28
3 (Distal)	26



VARIABLES DE DISEÑO

$$\chi = \left[\theta_0, r_1, r_2, r_3, r_4, \theta_{AC}, r_D, \theta_{BD}, r_5, r_6, r_{DF}, \theta_{EF}, \theta_{EG}, r_7, r_8, \theta_{HI} \right]$$

LÍMITES DE LAS VARIABLES

$$\begin{aligned} r_1, r_2, r_3, r_4 &\in [10, 40] \\ r_D, r_5, r_6, r_{DF}, r_7, r_8 &\in [10, 70] \\ \theta_{AC}, \theta_{BD}, \theta_{EF}, \theta_{EG}, \theta_{HI} &\in [0, 2\pi] \\ \theta_0 &\in [\pi/4, \pi/2] \end{aligned}$$

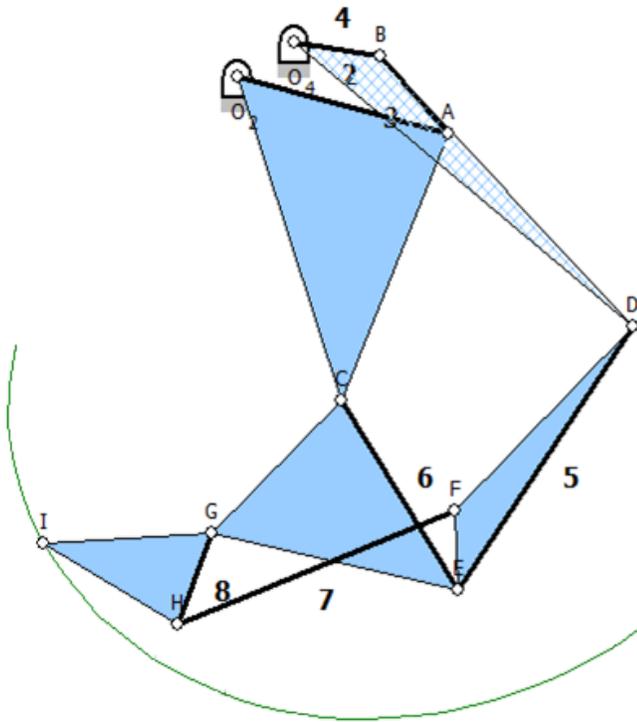
RESTRICCIONES DEL PROBLEMA

$$\begin{aligned} r_1, r_2, r_3, r_4 &\in [10, 40] \\ \theta_0 &\in [\pi/6, \pi/2] \end{aligned}$$

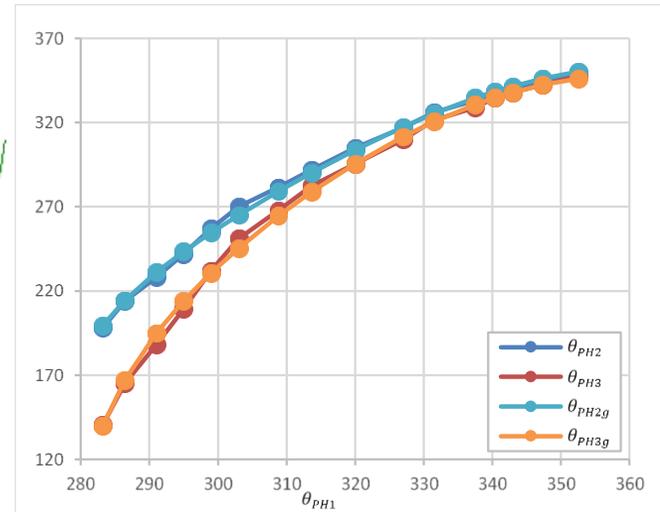
PARÁMETROS DEL ALGORITMO

$$NP=100, F=0.4, CP=0.6, MP=0.1, range=1, itermax=10.000$$

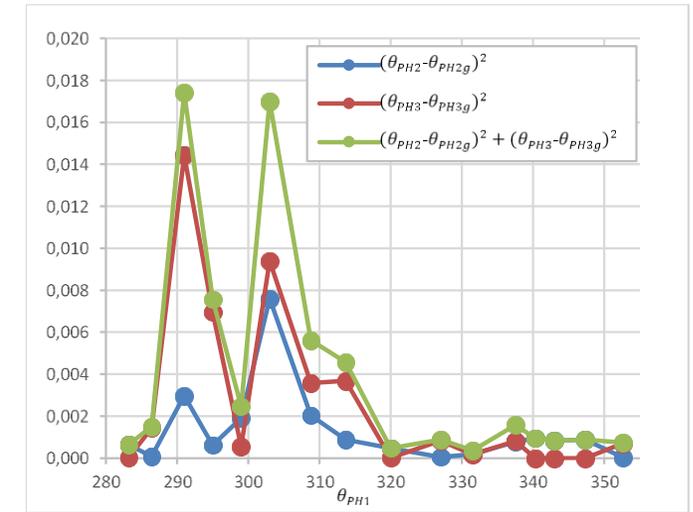
Mecanismo obtenido:



Posición angular



Función objetivo



Parámetros de entrada

Tabla 3: Ángulos medidos para las falanges proximal, media y distal del dedo índice del paciente respecto a la horizontal.

Posición	θ_{PH1} [°]	θ_{PH2} [°]	θ_{PH3} [°]
1	-7.4	-10.0	-12.4
2	-12.7	-15.6	-17.7
3	-17.0	-20.0	-22.0
4	-19.7	-23.4	-25.4
5	-22.5	-27.0	-31.0
6	-28.5	-33.9	-38.7
7	-33.0	-43.0	-50.0
8	-40.0	-55.0	-64.5
9	-46.3	-68.0	-77.5
10	-51.2	-78.3	-92.0
11	-57.0	-90.0	-109.0
12	-61.0	-102.9	-128.0
13	-65.0	-118.0	-150.7
14	-69.0	-132.0	-172.0
15	-73.6	-146.0	-195.0
16	-76.8	-161.9	-219.7

Dedo medio: $L_1= 54$ mm, $L_2= 32$ mm, $L_3= 27$ mm
 Dedo anular: $L_1= 46$ mm, $L_2= 27$ mm, $L_3= 25$ mm
 Dedo meñique: $L_1= 35$ mm, $L_2= 22$ mm, $L_3= 22$ mm

Límites de las variables

Tabla 7. Límites de las variables de diseño para los dedos medio, anular y meñique.

Variable	Límite	
	Inferior li_i	Superior ls_i
r_1 [mm]	10.00	11.966
r_2 [mm]	28.750	38.896
r_3 [mm]	13.248	17.924
r_4 [mm]	11.308	15.298
θ_0 [mm]	25.590	34.622
θ_{AC} [°]	257.427	348.283
r_D [mm]	56.970	77.078
θ_{BD} [°]	280.884	380.020
r_5 [mm]	39.998	54.114
r_6 [mm]	28.003	37.887
r_{DF} [°]	32.807	44.387
θ_{FF} [°]	296.941	401.743
θ_{EG} [°]	280.356	322.409
r_7 [mm]	39.279	53.142
r_8 [mm]	12.039	16.287
θ_{HI} [°]	250.719	339.209

Variables de diseño

$$\mathcal{X} = \left[\theta_0, r_1, r_2, r_3, r_4, \theta_{AC}, r_D, \theta_{BD}, r_5, r_6, r_{DF}, \theta_{EF}, \theta_{EG}, r_7, r_8, \theta_{HI} \right]$$

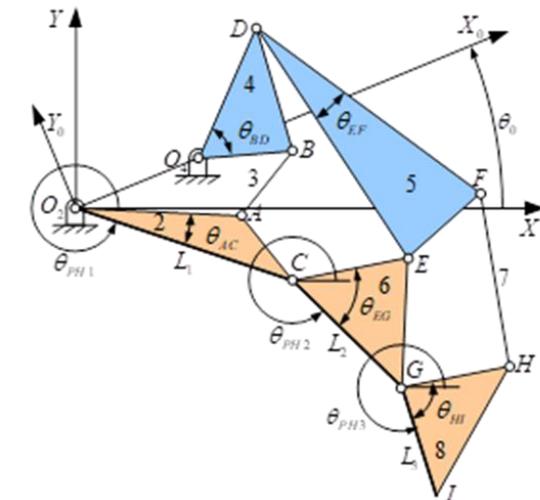
Restricciones del problema

$$r_1, r_2, r_3, r_4 \in [10, 40]$$

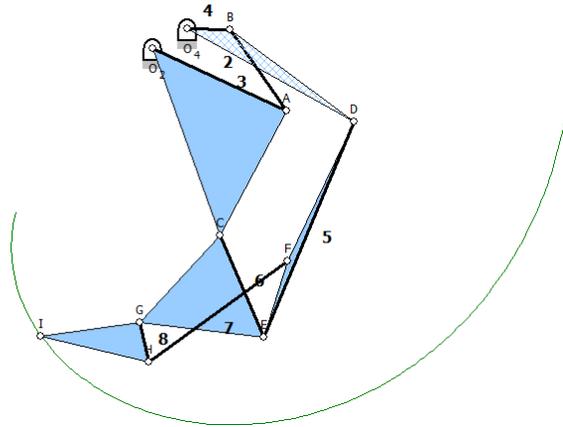
$$\theta_0 \in [\pi/6, \pi/2]$$

Parámetros del algoritmo

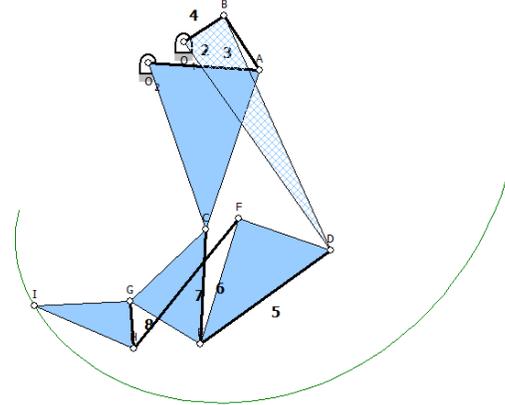
$$NP=100, F=0.4, CP=0.6, MP=0.1, range=1, itermax=10.000$$



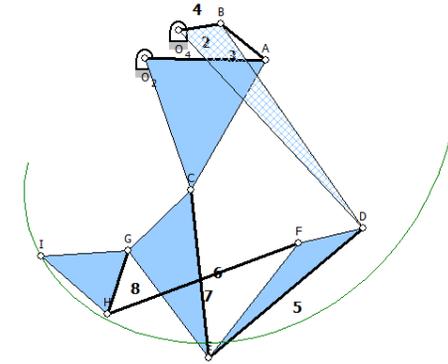
Mecanismo medio



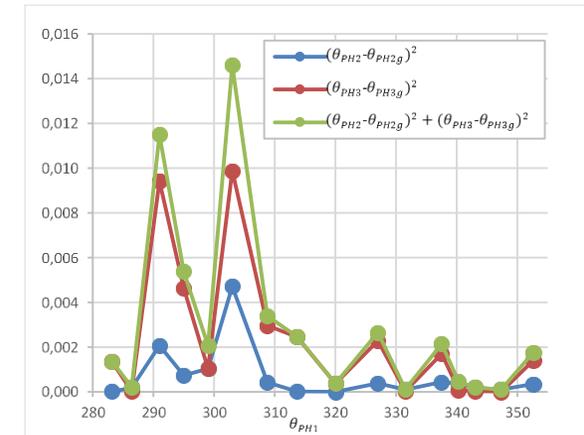
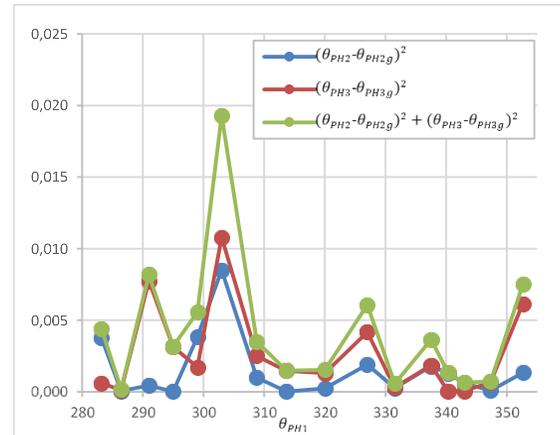
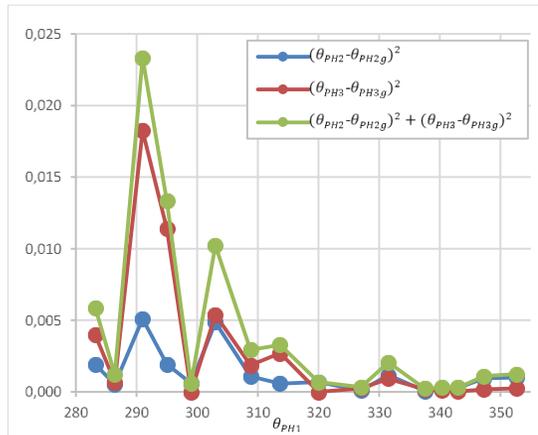
Mecanismo anular



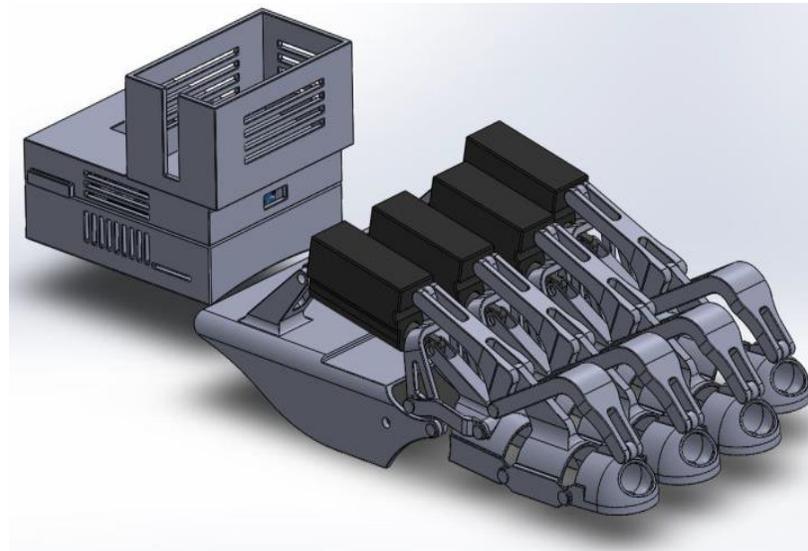
Mecanismo meñique



Posición angular de las falanges



- La mano se imprime en 3D en una única pieza
- Un Motor lineal Actuonix® independiente para cada dedo
- Cada dedo puede moverse con diferente amplitud y velocidad
- El control se realiza con una placa Arduino® ONE
- Se ha desarrollado una aplicación para su control con un Smartphone



Nuevo enfoque para el diseño de dispositivos para la rehabilitación de los dedos de la mano tras sufrir una lesión o una operación de los tendones flexores con movimiento continua pasivo (CPM):

- Adaptado al movimiento de los dedos del paciente
- Precisión de la síntesis de mecanismos con algoritmos evolutivos
- Suficiente con 1 grado de libertad por dedo o para la mano completa
- Configurable entre 1 y 4 dedos
- Impresión 3D de la mano en una pieza
- Falta la síntesis del dedo pulgar

