



*Síntesis dimensional de mecanismo para una mano robótica basado en un
eslabonamiento de cuatro barras*

Dimensional synthesis of mechanism for a robotic hand based on a four-bar linkage

*Síntese dimensional do mecanismo para uma mão robótica com base em uma
ligação de quatro barras*

Byron Germán Barriga-Machado ^I
german.barriga.m@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-4522-3833>

Eduardo Harry Medina-Quintero ^{II}
eduardo.medina@esPOCH.edu.ec
<http://orcid.org/0000-0001-5336-4164>

Edwin Rodolfo Pozo-Safla ^{III}
edwin.pozo@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-8931-3577>

Alexandra Orfelina Pazmiño-Armijos ^{IV}
apazmino_a@esPOCH.edu.ec
<http://orcid.org/0000-0002-5111-7968>

Correspondencia: german.barriga.m@gmail.com

Ciencias técnica y aplicada
Artículo de investigación

***Recibido:** 26 de octubre de 2020 ***Aceptado:** 25 de noviembre de 2020 * **Publicado:** 20 de diciembre de 2020

- I. Investigador Independiente, Chimborazo, Ecuador.
- II. Ingeniero Automotriz, Master en diseño mecánico, Escuela superior politécnica de Chimborazo, facultad de mecánica, Grupo de investigación GIEBI, Docente de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Chimborazo, Ecuador.
- III. Magíster en Diseño, Producción y automatización industrial Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Automotriz, Grupo de Investigación GIEBI, Docente de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Chimborazo, Ecuador.
- IV. Magíster en Informática Empresarial Docente de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Industrial, Grupo de Investigación GIEBI, Docente de Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Chimborazo, Ecuador.

Resumen

En el presente trabajo se describe la síntesis dimensional de un mecanismo de cuatro barras en serie que se aplica para replicar el movimiento de los dedos de la mano humana utilizando tres posiciones prescritas o conocidas para los dedos índice y pulgar. Mediante la utilización del método analítico se dio solución al sistema de ecuaciones de números complejos, cuya solución genera la ubicación en el plano de los puntos principales del mecanismo y los ángulos de rotación de los eslabones principales. Además, mediante la utilización de software se realizó la simulación de las trayectorias generadas por el mecanismo, corroborando de esta manera que el movimiento tanto del dedo índice como pulgar cumpla con las especificaciones prescritas, y obteniendo un movimiento semejante al de la mano humana real. Al final se obtuvo un modelo CAD del mecanismo que puede ser utilizado posteriormente para la fabricación de prototipos mediante impresión 3D.

Palabras clave: Mecanismo; mano robótica; impresión 3D; eslabonamiento; prototipos.

Abstract

The present work describes the dimensional synthesis of a mechanism of four bars in series that is applied to replicate the movement of the fingers of the human hand using three prescribed or known positions for the index finger and thumb. By using the analytical method, a solution was found to the system of complex number equations, the solution of which generates the location in the plane of the main points of the mechanism and the angles of rotation of the main links. In addition, through the use of software, the simulation of the trajectories generated by the mechanism was carried out, thus corroborating that the movement of both the index finger and the thumb meets the prescribed specifications, and obtaining a movement similar to that of the real human hand. In the end, a CAD model of the mechanism was obtained that can be used later for the manufacture of prototypes by 3D printing.

Keywords: Mechanism; hand robot; impression 3D; linkage; prototypes..

Resumo

O presente trabalho descreve a síntese dimensional de um mecanismo de quatro barras em série que é aplicado para replicar o movimento dos dedos da mão humana usando três posições prescritas ou conhecidas para o dedo indicador e o polegar. Utilizando o método analítico, foi encontrada

uma solução para o sistema de equações numéricas complexas, cuja solução gera a localização no plano dos pontos principais do mecanismo e os ângulos de rotação dos elos principais. Além disso, através do uso de software, foi realizada a simulação das trajetórias geradas pelo mecanismo, corroborando assim que o movimento tanto do dedo indicador quanto do polegar atende às especificações prescritas, e obtendo um movimento semelhante ao da mão humana real. Ao final, foi obtido um modelo CAD do mecanismo que poderá ser utilizado posteriormente para a confecção de protótipos por impressão 3D.

Palavras-chave: Mecanismo; robô de mão; impressão 3D; ligação; protótipos.

Introducción

En los últimos años el desarrollo de la robótica ha ido evolucionando cada vez más, y una de las principales aplicaciones de esta área es la bioingeniería, donde se busca combinar a la máquina con el hombre con el fin de solventar problemas generalmente de movilidad con el uso y aplicación de prótesis. Una de las principales partes del ser humano y que presenta mucha complejidad debido a la movilidad y versatilidad que esta posee es la mano humana, y es evidente que las investigaciones en torno a ella son extensas por todas sus características y todas las tareas que nos esta permite hacer día a día.

Las prótesis de mano se han venido desarrollando año tras año, por ejemplo, la mano OTTOBOCK [1] la cual es una prótesis de mano comercializada ampliamente, accionada por motor, pero una de sus principales desventajas radica en su bajo desempeño en términos de destreza y adaptabilidad. Otro ejemplo que podemos citar es la prótesis desarrollada por la Universidad de Toronto, llamada TBM [2] que presenta ventajas como una estructura simple y compacta, peso ligero y buena capacidad de agarre, pero que solo posee un grado de libertad.

Otro tipo de mano robótica es la desarrollada por la Universidad Estatal de IOWA [3] que en cambio posee un mecanismo de resorte ubicado en cada articulación y que es accionada mediante tendones [4], su ventaja radica en el poco peso que posee que es aproximadamente 90g, no obstante debido a la flexibilidad del resorte el control es más difícil y puede provocar que el contacto y agarre sean inestables.

Los investigadores del Instituto de Tecnología de Harbin desarrollaron una mano robótica con 5 grados de libertad basado en mecanismos de eslabonamientos [5], [6] cuya ventaja radica en la simplicidad del accionamiento, la capacidad de control y la semejanza con una mano humana real.

Otras investigaciones se han realizado en torno al desarrollo de una mano robótica basada en mecanismos de eslabonamientos analizando su cinemática principalmente, pero con poco detalle en cuanto a la síntesis dimensional del mecanismo [7]–[10], es decir, a las medidas propias de los eslabones que lo conforman.

Además de manos robóticas también se han desarrollado investigaciones en torno al ámbito de la rehabilitación, como por ejemplo un mecanismo reconfigurable para la rehabilitación de dedos [11] que se usa para terapia robótica asistida con los dedos después de un accidente cerebrovascular. El mecanismo es un eslabonamiento de cuatro barras que, en combinación con longitudes de enlace variables, es capaz de reproducir el movimiento de los dedos para una amplia variedad de tamaños. Como se ha evidenciado existen diversos análisis e investigaciones en torno al desarrollo de manos robóticas, por lo que este artículo tiene como objetivo obtener la síntesis dimensional de un mecanismo para una mano robótica que se basa en dos eslabonamientos de cuatro barras acoplados en serie formando un mecanismo de seis barras Watt tipo I usando el método analítico con 3 posiciones prescritas [12]. También se realizará un modelamiento del mecanismo con herramientas CAD y un análisis de movimiento del ensamblaje final.

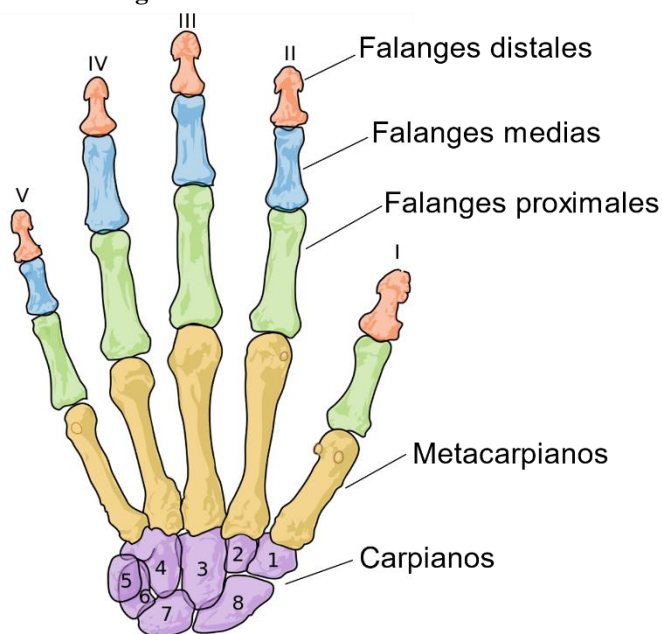
Discusión

A. Datos preliminares para el diseño del mecanismo

Para el diseño del mecanismo de la mano robótica se realizó una búsqueda con los parámetros más importantes en torno al dimensionamiento de una mano humana, encontrando como referencia varios artículos donde detallan las medidas de los principales huesos que conforman la mano que son: falanges, metacarpianos y carpianos. El desarrollo del mecanismo se centra en los huesos que conforman los dedos, es decir las falanges, donde se pueden distinguir 3 tipos para los dedos índice, medio, anular y meñique, y 2 tipos para el dedo pulgar.

Esta clasificación de las falanges consta de falanges distales, falanges medias, y falanges proximales, que se encuentran desde el dedo índice hasta el dedo anular, mientras que en el pulgar solo existen falanges distales y falanges proximales. La figura 1 muestra los huesos que componen la mano humana.

Figura 1: Huesos de la mano humana.



Las medidas necesarias para el diseño del mecanismo se han tomado con respecto a las medidas de una persona adulta y se detallan en la Tabla 1. Cabe recalcar que solo se han tomado las medidas con respecto al dedo índice, pues la síntesis dimensional se hará con respecto a este dedo, replicando después estas medidas en los dedos restantes, exceptuando el dedo pulgar, ya que este posee otra configuración.

Tabla 1: Longitud de las falanges del dedo índice [13].

Falange	Longitud (mm)
Proximal	42
Media	29
Distal	25

El ángulo de rotación máximo de la falange proximal, la cual tomaremos como el elemento motriz es de 87° [5], es decir, que el rango de movilidad para todos los dedos, obviamente exceptuando el pulgar, es de $[0, 87^\circ]$.

En cuanto al dedo pulgar las medidas no solo se han tomado con respecto a las falanges si no también la del hueso metacarpiano, el cual nos servirá como elemento motriz por la configuración que posee el dedo pulgar. Estos parámetros se detallan en la Tabla 2. En cuanto al ángulo de rotación de este dedo se lo ha definido en 21° [14].

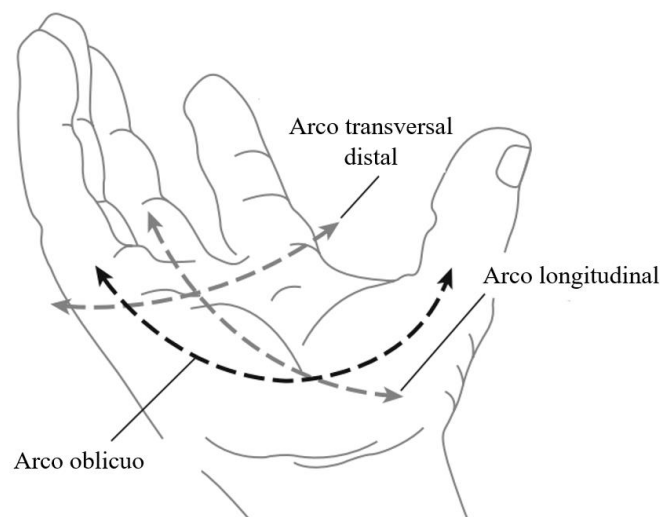
Tabla 2: Parámetros de longitud del dedo pulgar

Hueso	Longitud (mm)
Metacarpiano	45
Falange proximal	32
Falange distal	28

B. Diseño de la palma

De acuerdo con la anatomía de la mano humana se compone de tres arcos que proporcionan la estabilidad y movilidad necesaria, estos arcos se pueden observar en la figura 2. Para lograr replicar este efecto y asemejarse a la anatomía de una mano real la ubicación de cada dedo se debe controlar de forma cuidadosa.

Figura 2: Tres arcos de la mano humana [15].



Según la característica de la mano humana, la curva de la palma se la puede replicar con la ayuda de la posición de cada dedo, ubicando sus planos de rotación a distintos ángulos. La colocación de

cada dedo se muestra en la Fig. 3. La articulación metacarpiana (MCP) del dedo medio se la toma como referencia tanto en posición vertical como horizontal. Las otras dos articulaciones del mecanismo son la interfalange proximal (PIP) y la interfalange distal (DIP). El dedo índice, anular y el meñique tienen un ángulo de rotación de 3° , 3° y 6° con respecto al del eje del dedo medio [5]. Con esta configuración se obtiene una mayor semejanza a la anatomía real de la mano. Un aspecto importante es la oponibilidad del pulgar porque permite una mayor destreza y estabilidad para el agarre. Para ello se ha determinado el ángulo entre el eje del dedo pulgar y el eje del dedo medio respecto a la vista superior tomando un valor de 29° .

C. Diseño del dedo índice

Como se dijo anteriormente, el diseño del dedo índice se replicará para el dedo medio, anular y meñique, variando solo la posición de la MCP. El diseño se ha realizado basándose en la síntesis dimensional de mecanismos de cuatro barras con tres posiciones prescritas [12].

De acuerdo con otras investigaciones [7]–[10] realizadas el mecanismo que asemeja el movimiento del dedo índice se puede obtener uniendo dos mecanismos de cuatro barras en serie, lo que forma un mecanismo Watt tipo I. En la figura 4 se puede observar la configuración del mecanismo utilizado.

Si separamos el primer mecanismo de cuatro barras del mecanismo total podemos utilizar la síntesis dimensional, cuyo análisis y resolución se basa en el uso de números complejos. En la figura 5 se observa la primera sección del mecanismo original representado en forma de díada estándar en su primera y j -ésima posición.

Figura 3: Posiciones de los dedos de la mano robótica

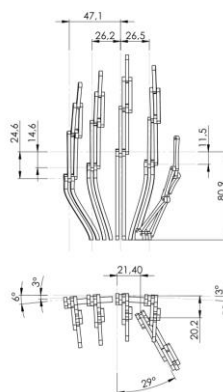


Figura 4: Mecanismo del dedo índice.

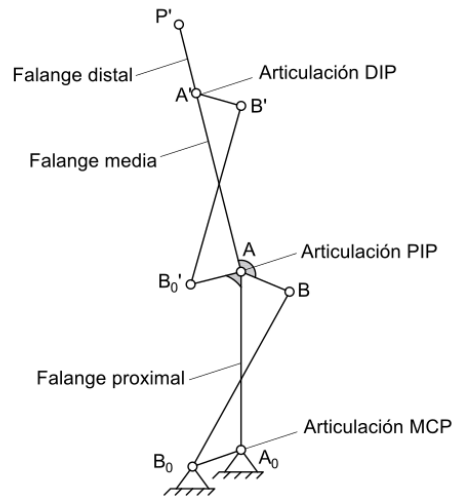
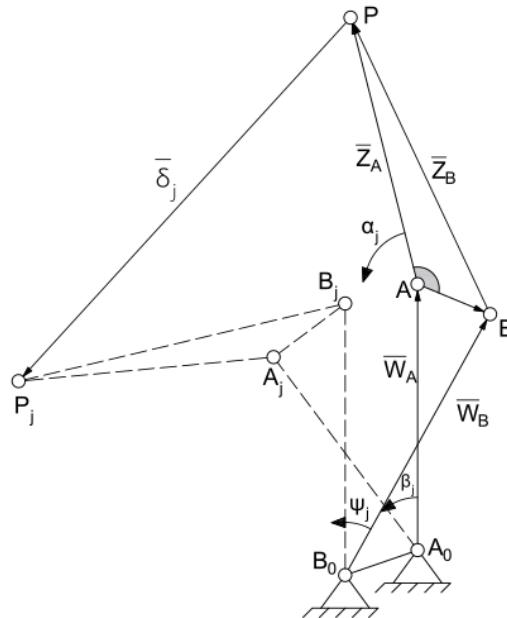


Figura 5: Sección 1 del mecanismo total Watt tipo I representado en forma de díada estándar.



Para la síntesis dimensional se necesitan 3 posiciones prescritas, estas posiciones se refieren a 3 lugares geométricos que se encuentren dentro de la trayectoria deseada para el punto P. Usando el punto B0 como origen de coordenadas las tres posiciones del punto P se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Posiciones prescritas para el punto P para el dedo índice.

Posición	X (mm)	Y (mm)
----------	--------	--------

1	-3,9	72,8
2	-44,2	48,0
3	-37,0	-25,5

La Ec. 1 es la ecuación de la díada estándar para la posición j-ésima, es decir define la posición punto P en cualquier parte de la trayectoria. Esta ecuación se puede reescribir con el fin de definir otras posiciones, el objetivo es determinar la primera posición a partir de otras dos posiciones prescritas, es así que se obtiene las Ec. 2 y Ec. 3 que definen las posiciones 2 y 3 respectivamente [12].

$$\vec{W}(e^{i\beta_j} - 1) + \vec{Z}(e^{i\alpha_j} - 1) = \vec{\delta}_j \quad (1)$$

$$\vec{W}(e^{i\beta_2} - 1) + \vec{Z}(e^{i\alpha_2} - 1) = \vec{\delta}_2 \quad (2)$$

$$\vec{W}(e^{i\beta_3} - 1) + \vec{Z}(e^{i\alpha_3} - 1) = \vec{\delta}_3 \quad (3)$$

Nótese que para la díada B se debe reemplazar el ángulo β por el ángulo ψ en las ecuaciones 2 y 3. Considerando la díada A en primer lugar, las ecuaciones 2 y 3 se pueden resolver como un sistema de ecuaciones de números complejos. La solución del sistema se muestra en las ecuaciones 4 y 5 [12]. Para realizar esta tarea se utilizó el software MatLab. Para resolver este sistema es necesario definir, a más de las posiciones previamente prescritas, los ángulos de rotación α y β para cada posición. Los ángulos β definen la rotación de la falange proximal que son 0° , 30° y 87° que corresponden a la primera, segunda y tercera posición respectivamente, mientras que los ángulos α la rotación de la falange media.

Los ángulos α_2 y α_3 se puede asumir arbitrariamente, hasta que la solución de la díada nos dé como resultado las longitudes de las falanges, es decir, $W \rightarrow_A \approx 42$ mm y $Z \rightarrow_A \approx 29$ mm. Además es importante que las medidas que se obtengan reflejen semejanza antropométrica.

Por ejemplo, una de las consideraciones que se tenían al momento de realizar las iteraciones es que la distancia entre los elementos fijos (A_0 y B_0) sea aproximadamente 10 mm.

El mismo procedimiento se realiza para la díada B donde los ángulos que debemos asumir son ψ_2 y ψ_3 puesto que α_2 y α_3 son los mismo calculados para la díada A.

$$\vec{W} = \frac{\begin{vmatrix} \vec{\delta}_2 & e^{i\alpha_2} - 1 \\ \vec{\delta}_3 & e^{i\alpha_3} - 1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} e^{i\beta_2} - 1 & e^{i\alpha_2} - 1 \\ e^{i\beta_3} - 1 & e^{i\alpha_3} - 1 \end{vmatrix}}$$

$$\vec{Z} = \frac{\begin{vmatrix} e^{i\beta_2} - 1 & \vec{\delta}_2 \\ e^{i\beta_3} - 1 & \vec{\delta}_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} e^{i\beta_2} - 1 & e^{i\alpha_2} - 1 \\ e^{i\beta_3} - 1 & e^{i\alpha_3} - 1 \end{vmatrix}}$$

Debido a que el mecanismo original se conforma de dos eslabonamientos de 4 barras conectados en serie, se puede utilizar el mismo procedimiento para la segunda parte del mecanismo, pero se debe tener en cuenta otro tipo de condiciones que se detallan a continuación:

a) El punto A y el punto B0' se convierten en los puntos fijos para la nueva sección y servirán como referencia para la síntesis de los eslabones. Es decir que la primera parte del mecanismo se toma como fija y solo la sección 2 será móvil.

b) Los ángulos β_2' y β_3' estarán en función de los ángulos α_2 y α_3 determinados en la primera parte con la siguiente relación $\beta_j' = \alpha_j - \beta_j$.

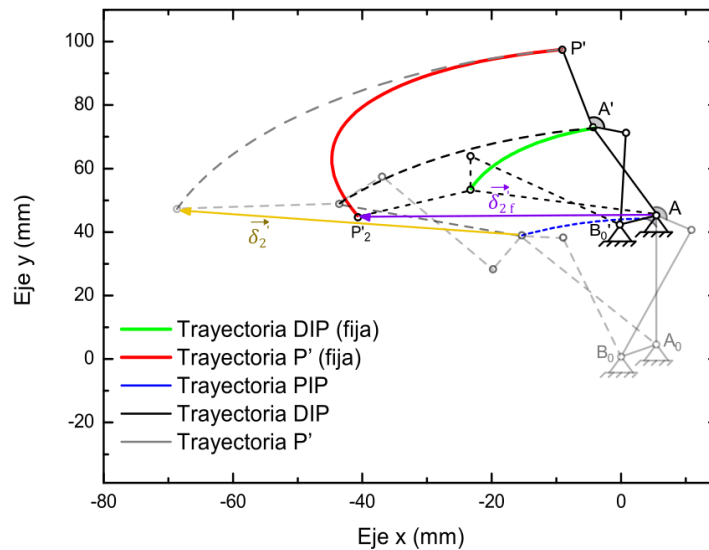
c) Para determinar los vectores posición $\vec{\delta}_j'$ se debe restar la posición del punto P' con la posición del punto A, y aplicar el operador rotacional $e^{i(-\beta_j)}$, es decir realizar el producto punto entre los vectores $\vec{\delta}_j'$ y $e^{i(-\beta_j)} = \cos(\beta_j) \vec{i} + \sin(\beta_j) \vec{j}$. Como se observa en la figura 6 los vectores $\vec{\delta}_2'$ y $\vec{\delta}_2$ son iguales en longitud, pero poseen otra dirección, debido al operador rotacional, para la resolución se debe utilizar el vector $\vec{\delta}_2'$. Las tres posiciones del punto P' y A se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Posiciones prescritas para el punto P' y A para el dedo índice.

Punto	X (mm)	Y (mm)
P ₁	-9,1	97,5

P ₂	-69,3	45,2
P ₃	-11,9	-24,8
A ₁	5,2	44,3
A ₂	-15,9	38,1
A ₃	-36,9	4,4

Figura 6: Sección 2 del mecanismo del dedo índice, posiciones 1 y 2.



Una vez que se han tomado las consideraciones de la sección 2 la resolución del sistema de ecuaciones se realiza como en la sección 1. Los resultados de las soluciones se muestran en la Tabla 5 y 6. En la tabla 5 se encuentran los ángulos para ambas secciones. Cabe recalcar que la sección 2 se refiere a los ángulos “primas” es decir, α' , β' y ψ' . En la tabla 6 se muestran las coordenadas de todos los puntos del mecanismo total, tomando como origen el punto B₀.

Tabla 5: Resultados de la solución del sistema de ecuaciones para los ángulos α , β y ψ (dedo índice).

Ángulo	Sección 1 (°)	Sección 2 (°)
α_2	54,1	52,5
α_3	161,9	165,6
β_2	30,0	24,1

β_3	87,0	74,9
ψ_2	27,2	22,0
ψ_3	90,1	84,0

Tabla 6: Coordenadas de los puntos principales del mecanismo (dedo índice).

Punto	X (mm)	Y (mm)
B_0	0	0
B	10,4	40,4
A_0	5,2	2,2
A	5,2	44,3
B_0'	-0,7	42,0
B'	0,4	70,2
A'	-3,9	72,8
P'	-9,1	97,5

D. Diseño del dedo pulgar

El dedo pulgar desempeña un papel muy importante en la destreza y movilidad de la mano, pero, debido a ello posee mayor complejidad que los demás de dedos puesto que su movimiento se genera en más de dos planos. Para una simplificación del mecanismo, se dispuso de la misma configuración que la usada en el dedo índice, poniendo particular atención en la posición e inclinación de la articulación del mecanismo, como se ilustró en la figura 3.

En la figura 6 se muestra la configuración del mecanismo utilizado para el dedo pulgar. El proceso para la síntesis del mecanismo es el mismo que el del dedo índice, variando obviamente las posiciones de los puntos prescritos y los ángulos de rotación de los eslabones del mecanismo. Estos nuevos puntos se muestran en las Tablas 7 y 8.

Figura 7: Mecanismo del dedo pulgar

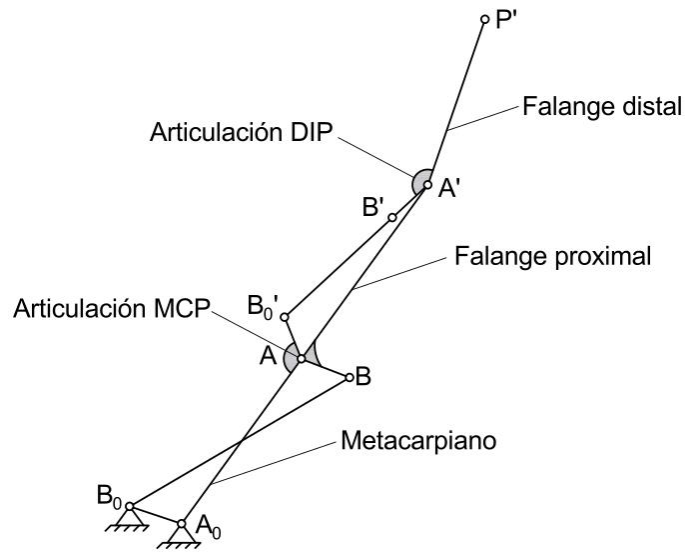


Tabla 7: Posiciones prescritas para el punto P para el dedo pulgar.

Posición	X (mm)	Y (mm)
1	49,5	59,0
2	30,8	69,9
3	-1,8	70,0

Tabla 8: Posiciones prescritas para el punto P' para el dedo pulgar.

Posición	X (mm)	Y (mm)
1	63,5	83,2
2	18,2	94,9
3	-29,3	66,6

Efectuando la solución matemática mediante software se obtienen los resultados tanto de los ángulos de rotación como de la ubicación de los puntos principales del mecanismo. Esta información se presenta en las Tablas 9 y 10.

Tabla 9: Resultados de la solución del sistema de ecuaciones para los ángulos α, β y ψ (dedo pulgar).

Ángulo	Sección 1 (°)	Sección 2 (°)
α_2	25,0	43,0
α_3	70,4	102,0
β_2	10,0	15,0
β_3	21,0	49,4
ψ_2	10,1	10,0
ψ_3	24	48,0

Tabla 10: Coordenadas de los puntos principales del mecanismo (dedo pulgar).

Punto	X (mm)	Y (mm)
A_0	0	0
A	28,9	34,5
B_0	-8,0	2,7
B	35,3	32,4
B_0'	27,3	40,6
B'	44,8	54,5
A'	49,5	59,0
P'	63,5	83,2

E. Simulación del mecanismo

Para la simulación del mecanismo se ha utilizado el software SAM 6.1 que simula las trayectorias generadas por el eslabonamiento y además nos permite comprobar que estas cumplen con las posiciones prescritas anteriormente, comprobando de esta manera que la síntesis dimensional se ha realizado correctamente.

En las figuras 7 y 8 se han ilustrado las trayectorias de los eslabonamientos del dedo índice y dedo pulgar respectivamente, en ellas se pueden evidenciar las posiciones que van a adquirir las

articulaciones entre cada falange durante todo el trayecto, observado en ellas todo el rango de movilidad que posee tanto el dedo índice como el dedo pulgar.

Figura 8: Trayectoria del mecanismo para el dedo índice

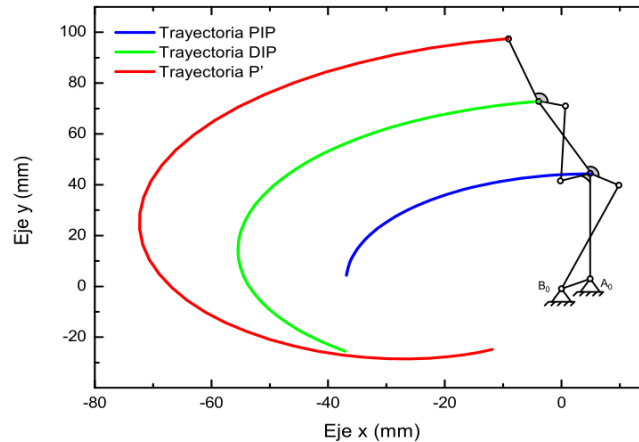
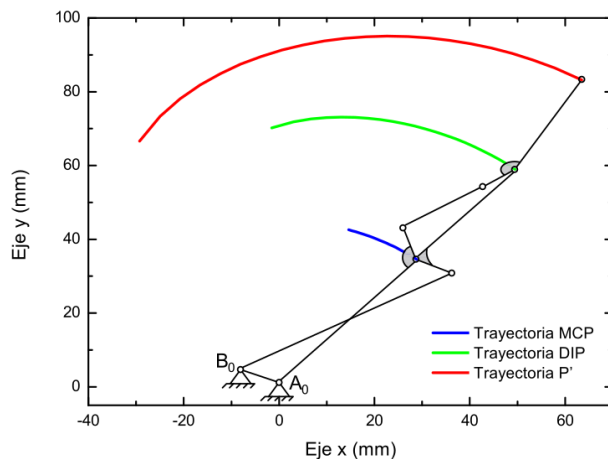


Figura 9: Trayectoria del mecanismo para el dedo pulgar

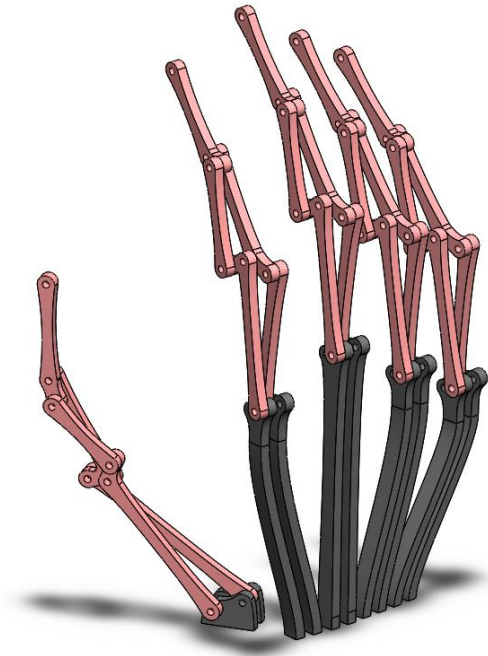


F. Ensamblaje del mecanismo

Para el ensamblaje se ha utilizado software CAD el cual nos permitirá modelar los eslabones del mecanismo total. Se ha considerado el espesor de los eslabones con el fin de que las medidas finales se asemejen a los huesos de una mano real.

El software CAD nos permite también simular el movimiento con el fin de corroborar los cálculos previamente realizados. El ensamblaje final se ilustra en la figura 9.

Figura 10: Ensamblaje final del mecanismo



Conclusiones

El uso de mecanismos es una de las principales herramientas para generar trayectorias, y que además brinda una gran ventaja por la sencillez y simplicidad de su funcionamiento, por lo que utilizarlo para una tarea como replicar los movimientos de una mano humana resulta interesante. Es así que en este artículo se obtuvo un mecanismo capaz de replicar el movimiento de los dedos de la mano humana, a partir del conocimiento de 3 posiciones prescritas mediante la síntesis dimensional utilizando soluciones analíticas asistidas por software, obteniendo resultados favorables en cuanto al desempeño del eslabonamiento.

Las simulaciones de las trayectorias generadas por los mecanismos tanto del dedo índice como del dedo pulgar cumplen con los parámetros antes establecidos y se asemejan de manera muy aproximada al movimiento de una mano real, obviamente con las limitaciones de que este tipo de mecanismo posee tan solo un grado de libertad por cada dedo y que su funcionamiento se genera en un solo plano, por lo que replicar el movimiento total de la mano humana necesitaría un análisis mucho más complejo que presente mayor versatilidad, pero con el inconveniente de que su accionamiento puede ser demasiado complicado para efectuarse.

Este método de síntesis de mecanismos puede ser útil para desarrollar otros tipos de trayectorias si ese fuese el caso, o generar otros mecanismos que complementen el estudio realizado en esta investigación como, por ejemplo, el dedo pulgar requiere un mecanismo de mucha más complejidad donde es necesario que el movimiento no solo sea generado en un plano sino más bien en tres dimensiones, ya que su movimiento es fundamental para la destreza y movilidad de la mano humana.

Se realizó el modelamiento con la ayuda de software CAD el cual se puede utilizar para una posterior fabricación por impresión 3D del mecanismo, esto con el fin de tener un modelo físico del eslabonamiento sintetizado. Esto abre la posibilidad estudiar y analizar su desempeño de forma real, y que además se pueden realizar mejoras para el uso como prótesis de este sistema.

Referencias

1. P. H. Chappell and P. J. Kyberd, "Prehensile control of a hand prosthesis by a microcontroller," *J. Biomed. Eng.*, vol. 13, no. 5, pp. 363–369, Sep. 1991.
2. D. W. Zhao, L. Jiang, H. Huang, M. H. Jin, H. G. Cai, and H. Liu, "Development of a Multi-DOF Anthropomorphic Prosthetic Hand," in 2006 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2006, pp. 878–883.
3. J. Yang, E. P. Pitarch, K. Abdel-Malek, A. Patrick, and L. Lindkvist, "A multi-fingered hand prosthesis," *Mech. Mach. Theory*, vol. 39, no. 6, pp. 555–581, Jun. 2004.
4. Y. W. Liu, F. Feng, and Y. F. Gao, "HIT prosthetic hand based on tendon-driven mechanism," *J. Cent. South Univ.*, vol. 21, no. 5, pp. 1778–1791, 2014.
5. X. Q. Wang et al., "Design and control of a coupling mechanism-based prosthetic hand," *J. Shanghai Jiaotong Univ.*, vol. 15, no. 5, pp. 571–577, 2010.
6. D. peng Yang et al., "An Anthropomorphic Robot Hand Developed Based on Underactuated Mechanism and Controlled by EMG Signals," *J. Bionic Eng.*, vol. 6, no. 3, pp. 255–263, 2009.
7. S. M. Lee, K. D. Lee, H. K. Min, T. S. Noh, and J. W. Lee, "Kinematics of the Robomec robot hand with planar and spherical four bar linkages for power grasping," *IEEE Int. Conf. Autom. Sci. Eng.*, pp. 1120–1125, 2012.

8. M. A. P. Romero, A. T. V. Sánchez, C. R. T. S. Miguel, L. M. Sáez, P. F. H. González, and G. M. U. Calderón, “Sub-actuated anthropometric robotic prototype hand | Prototipo de mano robótica antropométrica sub-actuada,” *Rev. Fac. Ing.*, no. 65, pp. 46–59, 2012.
9. X. Liu, X. Zheng, and S. Li, “Development of a humanoid robot hand with coupling four-bar linkage,” *Adv. Mech. Eng.*, vol. 9, no. 1, pp. 1–13, 2017.
10. N. Omarkulov, K. Telegenov, M. Zeinullin, A. Begalinova, and A. Shintemirov, “Design and analysis of an underactuated anthropomorphic finger for upper limb prosthetics,” *Proc. Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. EMBS*, vol. 2015-Novem, pp. 2474–2477, 2015.
11. D. Sands, A. P. Gracia, J. McCormack, and E. T. Wolbrecht, “Design method for A reconfigurable mechanism for finger rehabilitation,” *Proc. IASTED Int. Conf. Robot. Appl.*, pp. 197–204, 2010.
12. A. G. Erdman, G. N. Sandor, J. de la Cera, R. Escalona, and others, *Diseño de mecanismos: análisis y síntesis*. 1998.
13. T. Doctoral, “Caracterización cinemática e implementación de una mano robótica multiarticulada,” 2007.
14. O. Binvinat, A. Almagià, P. Lizana, and E. Olave, “Aspectos Biométricos de la Mano de Individuos Chilenos,” *Int. J. Morphol.*, vol. 30, no. 2, pp. 599–606, Jun. 2012.
15. A. P. Sangole and M. F. Levin, “Arches of the hand in reach to grasp,” *J. Biomech.*, vol. 41, no. 4, pp. 829–837, 2008.