

DISEÑO DE UNA MANO ROBÓTICA DE 15 GDL CON CARACTERÍSTICAS ANTROPOMÓRFICAS Y ANTROPOMÉTRICAS

*DESIGN OF A 15 DOF ROBOTIC HAND WITH
ANTHROPOMORPHIC AND ANTHROPOMETRIC FEATURES*

Luis Fernando Dzul Maldonado

Instituto Politécnico Nacional, CICATA, México
ldzulm2200@alumno.ipn.mx

Eduardo Morales Sánchez

Instituto Politécnico Nacional, CICATA, México
emoraless@ipn.mx

Recepción: 12/noviembre/2024

Aceptación: 14/marzo/2025

Resumen

Este estudio tiene como objetivo el diseño de una mano robótica con 15 grados de libertad, capaz de emular los movimientos y la funcionalidad de una mano humana. A través de la integración de características anatómicas, biomecánicas y antropométricas, se desarrolló y analizó un modelo cinemático utilizando software especializado. El diseño de cada componente se realizó con software CAD. Las simulaciones de movimiento revelaron una amplia gama de movimientos en las articulaciones de los dedos, los cuales incluyen flexión-extensión y aducción-abducción. El pulgar, por su parte, presentó un rango significativo de movilidad, incluyendo la capacidad de realizar movimientos complejos incluyendo flexión-extensión, aducción-abducción y oposición. Los resultados indican una alta movilidad, sugiriendo aplicaciones potenciales en brazos robóticos, agarres de precisión y sistemas de interacción hombre-máquina.

Palabras Clave: Dedo dígito, Grados de libertad, Mano robótica.

Abstract

This study aims at the design of a robotic hand with 15 degrees of freedom, capable of emulating the movements and functionality of a human hand. Through

the integration of anatomical, biomechanical, and anthropometric features, a kinematic model was developed and analyzed using specialized software. The design of each component was generated using CAD software. Motion simulations revealed a wide range of motion in the finger joints, including flexion-extension and adduction-abduction. The thumb, on the other hand, presented a significant range of mobility, including the ability to perform complex movements including flexion-extension, adduction-abduction, and opposition. The results indicate high mobility, suggesting potential applications in robotic arms, precision grippers and human-machine interaction systems.

Keywords: *Degrees of freedom, Digit finger, Robotic hand.*

1. Introducción

En los últimos años, el desarrollo de manos robóticas con un mayor número de grados de libertad (GDL) y características antropomórficas y antropométricas ha ganado considerable interés [Ramos, 2021]. Las manos robóticas son cruciales en la robótica avanzada debido a su capacidad para replicar la destreza y funcionalidad de las manos humanas. Ejemplos destacados incluyen la Gifu Hand III [Tetsuya, 2002], con un pulgar de 4 GDL y dedos de 3 GDL, y la mano multiarticulada [Ramos, 2021] con un pulgar de 3 GDL y dedos con 2 GDL para flexo-extensión.

El diseño de manos robóticas ha explorado diversas tecnologías, como la EthoHand [Konnaris, 2016] con una articulación esférica accionada por tendones, y el pulgar de 3 GDL [Prudencio, 2014], así como la mano ILDA [Kim, 2021] que utiliza una combinación de tendones y mecanismos de 4 barras. La robótica blanda también ha sido aplicada, como en el BCL-13 [Zhou, 2018] y la RBO Hand 2 [Deimel, 2016], algunas incluyendo métodos de inyección [Buchner, 2023] y de actuación neumática [Tian, 2021]. Además, existe un mecanismo de 4 barras acoplado con un resorte [Zhang, 2018] y se ha reportado una mano con un dedo de 1 GDL basado en 2 mecanismos acoplados de 4 barras [Prudencio, 2014], [Reyes, 2018]. La mano Robonaut 2 de la NASA y GM [Bridgwater, 2012] incluye un dedo con 3 GDL para tareas complejas. A pesar de la gran variedad de manos robóticas reportadas muy pocos diseños contemplan dimensiones antropométricas y antropomórficas. Es

importante este aspecto porque permite una mayor empatía del ser humano con estos mecanismos evitando el rechazo psicológico. Además, existe una relación directa entre el número de grados de libertad y el criterio de adaptación a la forma en un mecanismo de dedo [Kashef, 2020], por lo que más GDL genera una mejor capacidad de agarre.

Este artículo presenta el diseño de una mano robótica con 15 GDL con características tanto antropomórficas como antropométricas. El diseño se realizó utilizando software de diseño asistido por computadora (CAD), el objetivo es desarrollar una mano robótica que no solo replique la apariencia de una mano humana, sino que también pueda realizar una amplia variedad de movimientos y gestos. Se empleó el software CAD Fusion 360, permitiendo un diseño preciso de cada componente y asegurando alta fidelidad en estructura y funcionalidad.

2. Métodos

La consideración detallada de la antropometría de la mano es fundamental en el diseño integral de la mano robótica. Para el desarrollo de este proyecto, se utilizaron las dimensiones antropométricas de la mano humana según la norma DIN 33 402, 2ª parte. Los dedos de la mano presentan movimientos que incluyen la flexión-extensión de las articulaciones metacarpofalángica (MCF) y proximal interfalángica (PIF), esta última comparte el movimiento con la articulación distal interfalángica (DIF), la aducción-abducción de los dedos y la oposición del pulgar. En la Figura 1 se pueden observar estos movimientos y los rangos de movimiento de los dedos se encuentran en la Tabla 1. Para generar el diseño se decidió usar mecanismos de transmisión rígida para aumentar los GDL, lo cual puede permitir un funcionamiento óptimo para el agarre de objetos, además tiene la ventaja de generar una mayor fuerza de agarre en los dedos, para cumplir estas características se seleccionó el mini motor N20 el cual tiene medidas menores a una falange proximal humana.

Modelado cinemático

Para generar el diseño de la mano robótica, se desarrolló un modelo cinemático. Al simular movimientos con este modelo, pudimos asegurarnos de que la estructura

diseñada facilitara el rango de movimiento y funcionalidad previstos. Esto también permitió optimizar los parámetros de diseño para lograr un rendimiento óptimo. Se ajustó la longitud de los metacarpianos y se refinó la estructura general para mejorar la destreza del pulgar.

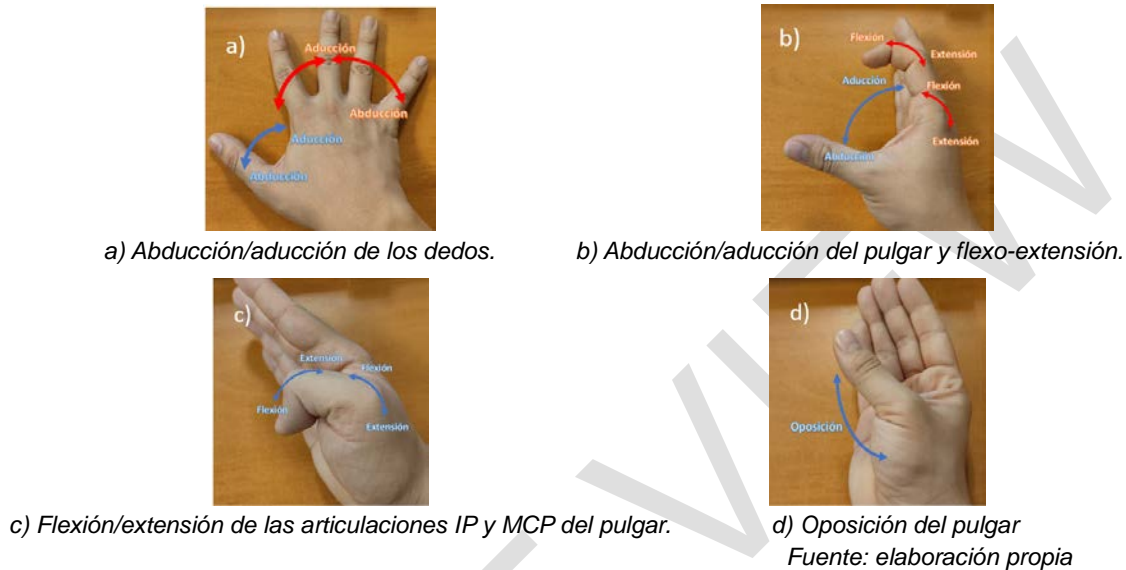


Figura 1 Movimientos de los dedos.

Tabla 1 Rangos de movimiento de los dedos de la mano.

Dedo	Articulación	Rango de Movimiento
Pulgar [Barakat, 2013]	CMC	Abducción Palmar: 61.2° Abducción Radial: 62.9° Kapandji score: 9
	MCF	Flexión: 60° Extensión: 8.1°
	IF	Flexión: 88° Extensión: 12°
Índice, Medio, Anular. Meñique [Schünke, 2005]	MCF	Extensión: 45° Flexión: 90° Aducción: 25°
	PIF	Flexión: 100°
	DIF	Extensión: 10° Flexión: 90°

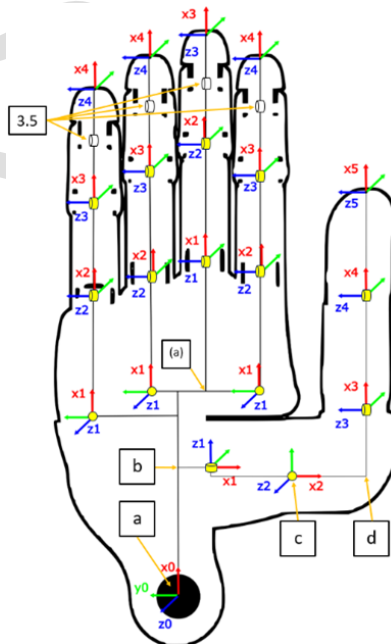
Fuente: elaboración propia

A través del análisis de los movimientos naturales de la mano humana, se determinó que el número de GDL para cada dedo se correlacionaría con sus respectivos movimientos, resultando en un modelo de 15 GDL. Utilizando estos datos

preliminares, se creó el modelo cinemático representado en la Figura 2, de la cual se pueden obtener los parámetros de Denavit-Hartenberg (DH), que permiten generar las ecuaciones del punto final y simular los movimientos de la mano robótica.

Cada dedo se modela como un robot serial, ya que sus cadenas cinemáticas son de naturaleza abierta. Para integrar la cinemática de la mano con la cinemática completa del brazo, se consideró la base de la mano como la muñeca. En este contexto, el dedo pulgar exhibe 4 GDL, el dedo medio presenta 2 GDL y los demás dedos cuentan con 3 GDL cada uno. Este enfoque proporciona una representación detallada y precisa de los movimientos de la mano en el modelo cinemático.

Como se muestra en la Figura 2, los parámetros cinemáticos se generaron a partir de los movimientos de cada dedo, donde a, b, c, d y (a) son referencias auxiliares y 3.5 es la articulación no actuada del mecanismo de 4 barras. Cada dedo tiene su propia cadena cinemática que se inicia en la muñeca de la mano robótica. Este modelo cinemático detallado es fundamental para simular y analizar los movimientos de la mano robótica, asegurando que los 15 GDL proporcionen la destreza necesaria para realizar tareas complejas.



Fuente: elaboración propia

Figura 2 Modelo cinemático de la mano robótica.

Para comprobar que el modelo cinemático fuera funcional antes de empezar el proceso de diseño detallado, se generó una simulación en la plataforma Matlab, como se muestra en la Figura 3, en donde se puso a prueba los movimientos que se pueden alcanzar según los parámetros escogidos para el modelo. Al realizar simulaciones utilizando este modelo, se garantizó que la estructura diseñada permitiera el rango de movimiento y la funcionalidad previstos. Además, este enfoque posibilitó la optimización de los parámetros de diseño para lograr un rendimiento óptimo en las simulaciones. En este proceso, se realizaron ajustes en la longitud de los metacarpianos y se refinó la estructura general con el objetivo de mejorar la destreza de los dedos.

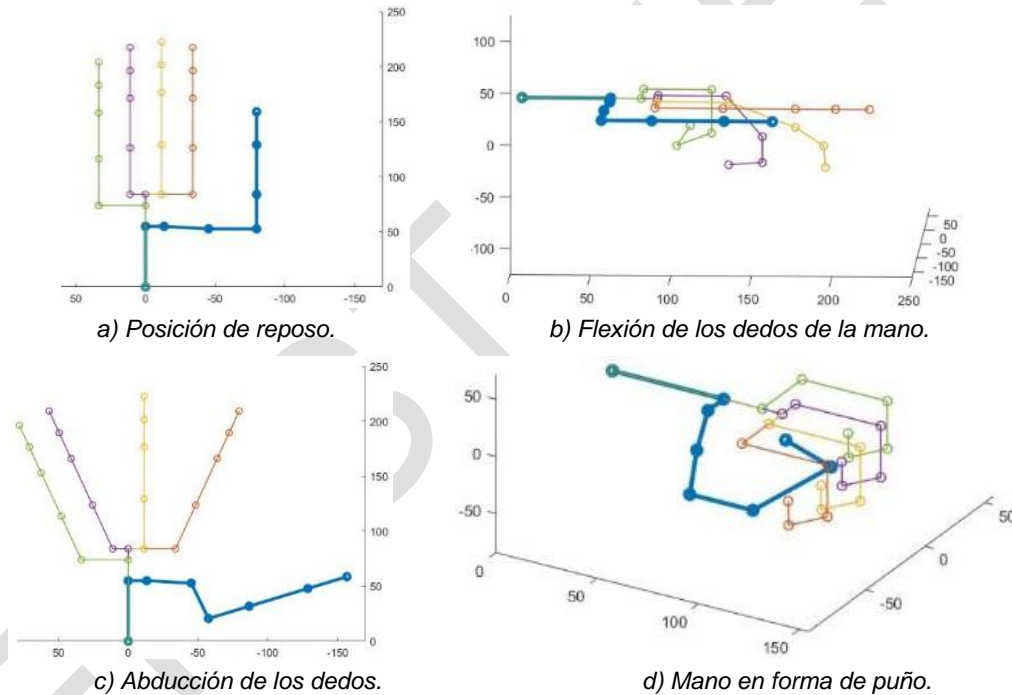


Figura 3 Posiciones de la mano robótica simuladas en Matlab.

Con los parámetros de la cinemática se puede encontrar la ecuación del punto final con respecto a la muñeca de cada uno de los dedos, la Ecuación 1 corresponde al cálculo del pulgar, la Ecuación 2 muestra la ecuación de los dedos dígitos 2, 4 y 5 y la Ecuación 3 corresponde al dedo medio.

$$T_{D15}^0 = A_a^0 A_b^a A_1^b A_c^1 A_d^2 A_3^d A_4^3 A_5^4 \quad (1)$$

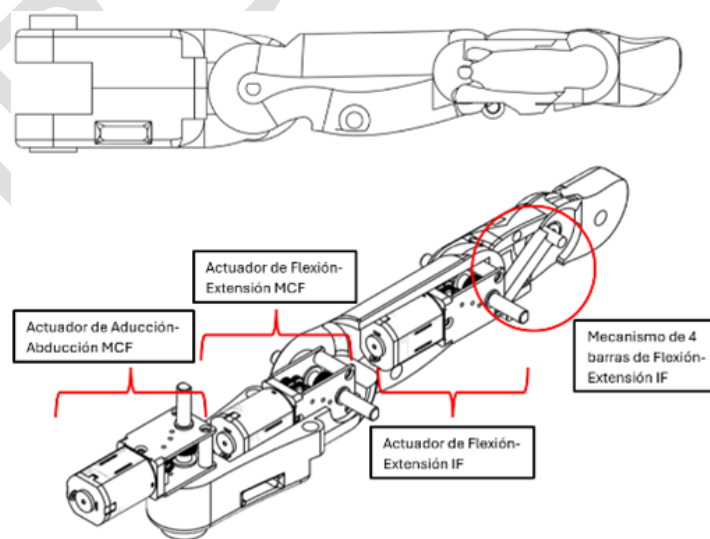
$$T_{D2,D4,D5}^0 = A_a^0 A_1^a A_2^1 A_3^2 A_{3.5}^3 A_4^{3.5} \quad (2)$$

$$T_{D3}^0 = A_a^0 A_{(a)}^a A_1^{(a)} A_2^1 A_{3.5}^2 A_3^{3.5} \quad (3)$$

Diseño del dedo robótico

Para el diseño del dedo robótico se inició seleccionando la antropometría del dedo, estableciendo las longitudes de las falanges medial y distal en 25 y 21 mm, respectivamente. La falange proximal varía según los diferentes dedos: 45 mm para los dedos anular e índice, 47.25 mm para el dedo medio y 42 mm para el meñique. El diámetro máximo del dedo se fijó en 22.5 mm. Estas medidas se eligieron siguiendo la Norma DIN 33 402, 2ª parte, y teniendo en cuenta las dimensiones de los motores, se optó por una transmisión mediante eslabones rígidos, utilizando mini motores eléctricos N20 como actuadores.

Basándonos en la forma de un dedo humano, se diseñó la falange proximal, que cuenta con un espacio interno de 11x13 mm para integrar el mini motor N20. También se diseñó para permitir la integración del metacarpo en la articulación proximal interfalángica (PIF) y se creó un enlace para el motor y el metacarpo en la articulación metacarpofalángica (MCF). En la Figura 4 se detalla el diseño del dedo robótico.



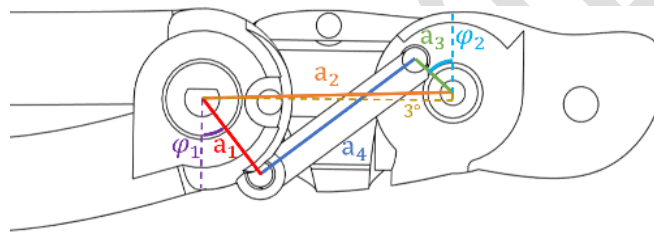
Fuente: elaboración propia

Figura 4 Diseño externo e interno del dedo robótico.

Mecanismo de 4 barras del dedo robótico

En el dedo humano las articulaciones PIF y DIF comparten un movimiento de flexión-extensión, para generar este movimiento se generó un mecanismo de 4 barras. La trayectoria de la articulación interfalángica del proximal y medial genera un ángulo de hasta 70° que mantiene la funcionalidad y antropomorfía del dedo.

La Figura 5 muestra el mecanismo de 4 barras del dedo dígito ($\varphi_1 = 40^\circ$, $\varphi_2 = 50^\circ$, $a_1 = 9.2mm$, $a_2 = 20.035mm$, $a_3 = 5mm$, $a_4 = 19.157mm$), el mecanismo solo requiere de un GDL activo para mover el mecanismo, el actuador que genera este movimiento se encuentra en la falange proximal. La falange distal se diseñó con una distancia de $21mm$ desde su unión con la falange medial a la yema del dedo. Las dimensiones de las falanges medial y distal no varían entre los dedos dígitos.



Fuente: elaboración propia

Figura 5 Mecanismo de 4 barras de la falange medial.

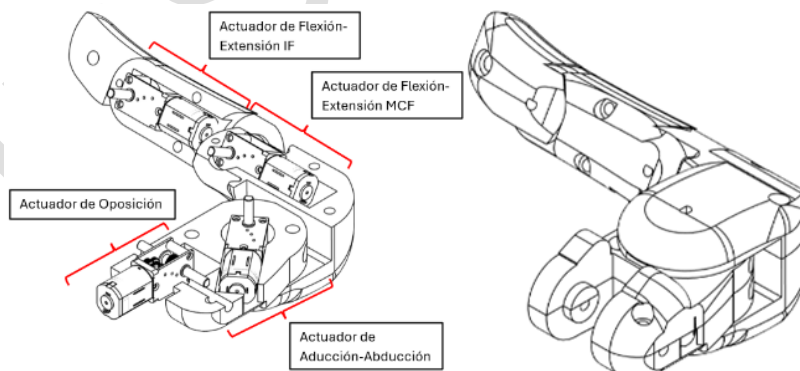
Metacarpo del dedo robótico

La fase final del diseño del dedo se centra en el metacarpo, donde se gestiona el movimiento de aducción-abducción. Adaptar los movimientos naturales de un dedo humano a un mecanismo rígido requiere consideraciones específicas. Este diseño presenta una estructura de metacarpo dividida, permitiendo la conexión con la falange proximal y facilitando el movimiento de aducción-abducción.

El metacarpo de la mano robótica tiene dos variaciones de diseño: una para el dedo índice y otra para los dedos anular y meñique, mientras que el dedo medio es fijo dentro de la mano. El metacarpo está diseñado para integrar un mini motor N20 dentro del mismo, proporcionando libertad de movimiento a la falange proximal. Las variaciones se basan en la ubicación de los actuadores que generan el movimiento de aducción-abducción.

Diseño del pulgar robótico

El pulgar robótico cuenta con 4 GDL accionados. Estos GDL son usados para cada uno de los movimientos del pulgar incluyendo la oposición, abducción-aducción en los planos palmar y radial, y la flexión-extensión de las articulaciones metacarpofalángicas (MCF) e interfalángicas (IF). La estructura articular se ha diseñado con una división en el hueso metacarpiano para facilitar los movimientos de oposición y abducción-aducción, manteniendo simultáneamente la apariencia natural del pulgar humano. La distancia entre las divisiones se establece en el mínimo posible, garantizando una apariencia realista, conforme a los límites de los actuadores. El pulgar robótico incorpora un sistema de transmisión con enlaces rígidos. Los mini motores N20 se ubican en la falange proximal y las dos secciones del hueso metacarpiano. Un micromotor adicional se destina a acoplarse dentro de la mano robótica para generar la oposición. Para las dos falanges del pulgar humano, proximal y distal, la precisión del diseño robótico exige medidas exactas para las distancias articulares. Se ha fijado una distancia de 45 mm entre las articulaciones, mientras que la longitud de la falange distal es de 30 mm, con un diámetro máximo de 25 mm. Con estas medidas, se generó la silueta del dedo humano. En la Figura 6 se observa el diseño del pulgar robótico.



Fuente: elaboración propia

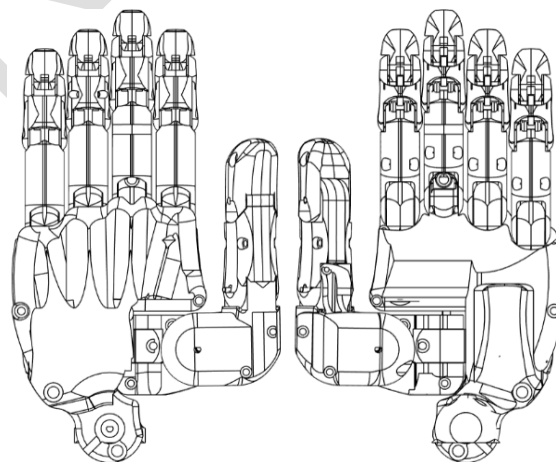
Figura 6 Diseño interno y externo del pulgar robótico.

Diseño de la mano robótica

El diseño conceptual de la mano robótica se basó en las medidas antropométricas de la norma DIN 33 402, 2ª parte, con el objetivo de replicar la

silueta superior de una mano humana. Este diseño se dividió en dos secciones: la palma y la parte superior de la mano. En el desarrollo de ambas partes, se tuvieron en cuenta las dimensiones específicas de los dedos robóticos, así como la disposición de los motores responsables de los movimientos de aducción-abducción de los dedos y la oposición del pulgar. Para garantizar que los motores no interfirieran entre sí durante el funcionamiento, se llevaron a cabo cálculos precisos de distribución espacial y torque. Estos cálculos incluyeron el análisis del torque necesario para los movimientos de los metacarpos y la colocación estratégica de los motores dentro de la estructura de la mano. El mini motor N20 fue seleccionado por su capacidad para generar un torque adecuado de 0.4 Nm , suficiente para cumplir con los requerimientos de fuerza en los movimientos de flexión y abducción de los dedos, además de ser lo suficientemente compacto para integrarse sin comprometer el diseño.

Se generaron espacios específicos en el diseño de la palma para alojar los motores junto con los metacarpos, asegurando que hubiera suficiente espacio para los movimientos de aducción y abducción. Una vez completado el modelado interno, se procedió al diseño externo, cuya prioridad fue crear una estética que mantuviera una apariencia natural y antropomórfica, Figura 7. Este enfoque integral no solo asegura la funcionalidad de los movimientos, sino también una apariencia visual similar a la de una mano humana real.



Fuente: elaboración propia

Figura 7 Diseño de la mano robótica.

3. Resultados

La evaluación del movimiento de la mano robótica es fundamental para entender y optimizar su funcionamiento en aplicaciones prácticas. Se presentan datos detallados sobre los GDL de cada dedo, describiendo tanto la flexión-extensión como la aducción-abducción.

Rango de Movimiento de los Dedos

Los dedos índice, anular y meñique cuentan con 3 GDL cada uno. En las articulaciones MCF de estos dedos, se alcanza una flexión de 90° y una extensión de 15° . En las articulaciones IF, se logra una flexión de 70° , una extensión de 15° y una abducción de 20° , con la excepción del meñique, que obtiene 30° de abducción, y el dedo medio, que con 2 GDL carece de abducción. Los movimientos de aducción-abducción y flexión-extensión de los dedos, Figura 8.



a) 90° de flexión y 45° de extensión en MCF. b) Abducción índice, anular 20° ; meñique 30° y pulgar 69° .

c) 70° de flexión y 15° de extensión de la articulación IF

Fuente: elaboración propia

Figura 8 Posiciones del movimiento de los dedos de la mano robótica.

El dedo robótico tiene 3 GDL, donde el primer grado de libertad usa un actuador directo para la aducción-abducción. El segundo actuador, también de transmisión directa, se encuentra en la unión del metacarpo y la falange proximal, y realiza la

flexión-extensión de todo el dedo. El tercer actuador está acoplado directamente en la unión de la falange proximal y la falange medial, realizando un segundo movimiento de flexión-extensión. Cuando se mueve el segundo actuador, también se produce un movimiento de flexión-extensión pasivo de la falange distal, gracias a un mecanismo de 4 barras. Estos actuadores, con sus 3 GDL, permiten una gran libertad de movimiento de los dedos para realizar movimientos de agarre. La Tabla 2 muestra los rangos de movimiento de la mano robótica comparados con los de una mano humana.

Tabla 2 Rangos de movimiento de la mano robótica contra la humana.

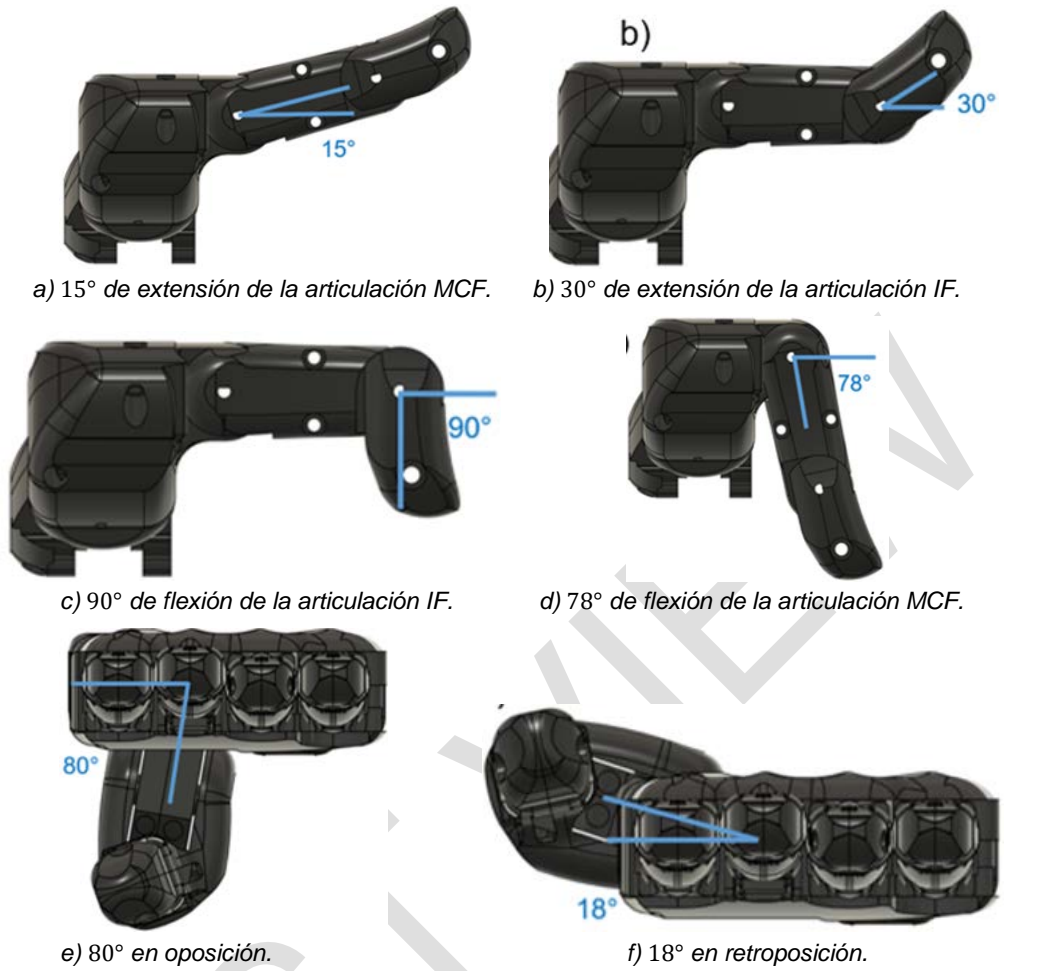
Dedo	Articulación	Mano humana	Mano Robótica
Pulgar	CMC	Abducción: 61.2°	Abducción: 69°
	MCF	Flexión: 60° Extensión: 8.1°	Flexión: 78° Extensión: 15°
	IF	Flexión: 88° Extensión: 12°	Flexión: 90° Extensión: 30°
Dedos	MCF	Extensión: 45° Flexión: 90° Aducción: 25°	Extensión: 45° Flexión: 90° Aducción: 20° (30° meñique)
	PIF	Extensión: 0° Flexión: 100°	Extensión: 0° Flexión: 70°
	DIF	Extensión: 10° Flexión: 90°	Extensión: 15° Flexión: 90°

Fuente: elaboración propia

El pulgar cuenta con 4 GDL, lo que le permite realizar movimientos de retroposición de 18° y oposición de 80°. En la articulación MCF del pulgar, se alcanza una flexión de 90° y una extensión de 15°. La articulación IF del pulgar permite una flexión de 78°, una extensión de 30° y una abducción de 69°, Figura 9. Estos rangos de movimiento proporcionan al pulgar una gran versatilidad para realizar una amplia variedad de gestos y agarres, esenciales para la funcionalidad de la mano robótica.

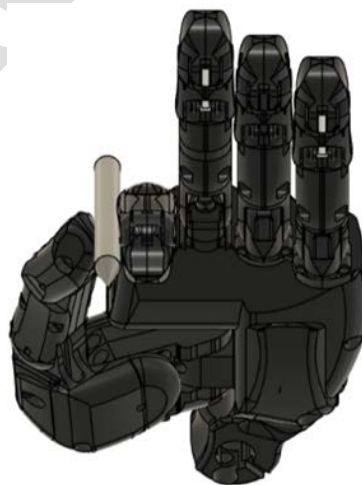
Agarre de precisión

El agarre de precisión es crucial para tareas que requieren alta destreza y exactitud. El diseño de mano robótica puede realizar este agarre utilizando principalmente el dedo índice y el pulgar, Figura 10.



Fuente: elaboración propia

Figura 9 Posiciones del movimiento del pulgar de la mano robótica.



Fuente: elaboración propia

Figura 10 Agarre de precisión.

Agarre cilíndrico

El agarre cilíndrico es utilizado para sostener objetos con forma cilíndrica, como una lata de refresco, como se muestra en la Figura 11a. En este tipo de agarre, la mano robótica envuelve el objeto con todos los dedos, asegurando una sujeción firme y estable. Este método de agarre resulta crucial para la manipulación efectiva de botellas, tubos y otros objetos de formas similares, permitiendo un control preciso y una estabilidad adecuada durante su manejo.

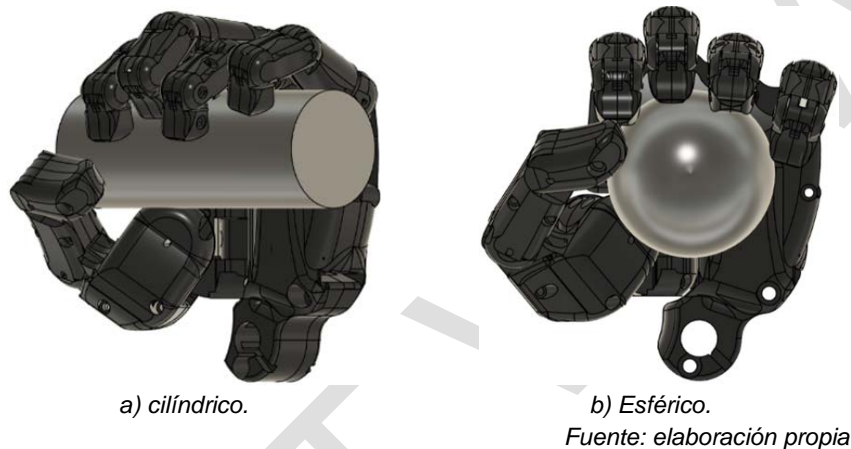


Figura 11 Agarres.

Agarre esférico

El agarre esférico permite a la mano robótica manejar objetos con forma esférica de manera eficaz. Al emplear el pulgar, el dedo medio y el anular, la mano puede sujetar una pelota de forma estable y precisa. Además, la mano robótica tiene la capacidad de generar un agarre esférico utilizando todos los dedos simultáneamente, como se muestra en la Figura 11b. Este tipo de agarre es especialmente útil para manipular frutas, pelotas y otros objetos redondeados, garantizando una interacción eficiente y una adaptación precisa a la forma del objeto.

El diseño de la mano robótica no solo replica los rangos de movimiento de una mano humana, sino que también introduce mejoras que superan las capacidades de otros diseños en el estado del arte. En comparación con investigaciones previas, el incremento en la abducción del pulgar (69° frente a 61.2° en una mano humana) y

una mayor flexión en la articulación MCF (78° frente a 60°) proporcionan una mayor movilidad, especialmente en agarres de precisión, lo que permite un control más fino y adaptabilidad a objetos pequeños o de formas irregulares. Además, el ajuste en los rangos de flexión-extensión de las articulaciones PIF y DIF asegura un balance entre precisión y estabilidad, optimizando la interacción en tareas delicadas. A diferencia de otros trabajos, donde los diseños se limitan a emular movimientos humanos sin mejoras sustanciales, esta mano robótica ha sido optimizada para garantizar tanto la estabilidad como la precisión en aplicaciones que requieren una alta destreza, como la manipulación de objetos frágiles o la asistencia en tareas quirúrgicas. Estas características diferenciales posicionan a este diseño como una innovación clave en el campo de la robótica de precisión.

4. Discusión

El diseño de la mano robótica con 15 GDL presentado en este estudio representa un avance significativo en la replicación de la funcionalidad y los movimientos de la mano humana. La integración de características antropométricas y antropomórficas precisas no solo ha permitido un diseño altamente realista, sino que también ha asegurado una funcionalidad comparable a la de la mano humana, validada a través de simulaciones cinemáticas.

Las simulaciones realizadas en este estudio revelaron rangos de movimiento que son coherentes con los observados en manos humanas. Las articulaciones metacarpofalángicas (MCF) de los dedos 2 a 5 presentaron un rango de flexión-extensión de 0° a 90° y un rango de aducción-abducción de 0° a 30° , lo que es comparable con los datos de la biomecánica humana. De manera similar, las articulaciones interfalángicas (IF) mostraron un rango de 0° a 70° en la articulación proximal y de 0° a 90° en la distal, lo que confirma la efectividad del diseño para emular movimientos básicos. Esta comparativa con datos anatómicos reales refuerza la precisión del diseño presentado, en contraste con modelos como la mano ILDA [Kim, 2021], que, aunque presenta un enfoque innovador en cuanto a la integración de tendones y mecanismos de 4 barras, no iguala la amplitud de movimiento demostrada en este estudio.

El pulgar robótico, con un rango de flexión-extensión interfalángica de -15° a 90° , metacarpofalángica de -15° a 78° , y aducción-abducción en los planos palmar y radial, destaca por su similitud con los rangos observados en el pulgar humano. La inclusión de una rotación carpometacarpiana de -18° a 80° en el pulgar aumenta significativamente su capacidad de realizar funciones clave, como la pinza y la oposición. Este nivel de destreza supera el logrado por otras manos robóticas, como la BCL-13 [Zhou, 2018], que, aunque adopta tecnologías de robótica blanda, no proporciona el mismo grado de precisión en la oposición del pulgar.

El diseño e integración de los actuadores, distribuidos de manera que eviten colisiones y maximizando el espacio disponible, ha permitido una alta movilidad y precisión. El uso de software CAD para la planificación estructural y funcional de los componentes ha sido crucial para alcanzar estos resultados. La posibilidad de realizar ajustes rápidos durante el desarrollo es una ventaja significativa de este enfoque.

El análisis cinemático realizado sugiere que la mano robótica es capaz de realizar movimientos complejos, similares a los de la mano humana, lo que abre la puerta a su aplicación en diversos campos. En particular, su potencial para ser implementada en sistemas de agarre en robótica industrial, así como en dispositivos de interacción humano-robot, es considerable.

No obstante, el diseño presenta algunas limitaciones. La variabilidad en los rangos de movimiento y la necesidad de ajustes finos en los actuadores podrían mejorar aún más la precisión en tareas específicas. Estudios como el de [Prudencio, 2014] señalan que la integración de mecanismos de 4 barras en los dedos puede ofrecer mayor adaptabilidad a la forma de los objetos, lo que podría ser una vía de mejora para el diseño actual.

A diferencia de los diseños previos, esta mano robótica no solo se destaca por la distribución optimizada de sus 15 GDL, sino que también enfatiza un estricto apego a las proporciones antropométricas humanas. Esto es particularmente relevante en aplicaciones donde la interacción humano-robot es crítica, ya que una mayor similitud visual y funcional puede reducir el rechazo psicológico, como lo menciona [Ramos, 2021]. Mientras que modelos como la Robonaut 2 y la Gifu Hand III se

centran en la destreza mecánica, este diseño equilibra la funcionalidad con un enfoque estético y antropométrico que mejora la empatía del usuario y la capacidad de la mano robótica para tareas de alta precisión, como la manipulación de objetos pequeños y la realización de gestos complejos.

Para futuras investigaciones, se recomienda optimizar los mecanismos de transmisión y explorar la integración de sensores adicionales que proporcionen retroalimentación en tiempo real, mejorando así el control de los movimientos. Además, la incorporación de tecnologías de robótica blanda [Zhou, 2018] o de inteligencia artificial para un control adaptativo podría mejorar aún más la capacidad de la mano para realizar tareas en entornos dinámicos y no estructurados.

5. Conclusiones

El diseño y desarrollo de una mano robótica humanoide con 15 GDL se ha logrado exitosamente, destacando por su alta movilidad y un diseño antropométrico que replica fielmente las características de una mano humana. El modelo cinemático y su posterior simulación permitieron un análisis detallado de los movimientos de cada dedo, asegurando que la mano robótica pueda emular las funciones y movimientos de una mano humana real.

Este diseño representa una contribución significativa en el campo de la robótica, situándose entre los pocos que integran con éxito 15 GDL respetando las dimensiones antropométricas humanas. El diseño, basado en una mecánica impulsada por engranajes, permite a la mano replicar movimientos complejos como flexión, extensión, abducción y aducción de los dedos.

El proceso de diseño incluyó consideraciones detalladas, como la división de la forma de la mano para acomodar los movimientos de oposición y aducción-abducción de los dedos, la selección adecuada de motores y la creación de compartimentos internos para su integración.

Las simulaciones de pruebas de movimiento confirmaron que la mano puede realizar una amplia variedad de movimientos y agarres, subrayando su versatilidad y potencial para aplicaciones en áreas de servicio que requieren interacción hombre-máquina. En resumen, este desarrollo marca un avance significativo en la

creación de dispositivos robóticos y prótesis, con aplicaciones prácticas en diversos campos.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Barakat, M.J., Field, J. & Taylor, J. (2013). The range of movement of the thumb. *HAND* 8, pp. 179–182. <https://doi.org/10.1007/s11552-013-9492-y>.
- [2] Buchner, T. J. K., Rogler, S., Weirich, S., Armati, Y., Cangan, B. G., Ramos, J., Twiddy, S. T., Marini, D. M., Weber, A., Chen, D., Ellson, G., Jacob, J., Zengerle, W., Katalichenko, D., Keny, C., Matusik, W., & Katzschmann, R. K. (2023). Vision-controlled jetting for composite systems and robots. *Nature*, 623(7987), 522–530. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06684-3>.
- [3] Deimel, R., and Brock, O. (2016). A novel type of compliant and underactuated robotic hand for dexterous grasping. *Int. J. Robot. Res.* 35, 161–185. doi:10.1177/0278364915592961.
- [4] Kashef, S. R., Amini, S., & Akbarzadeh, A. (2020). Robotic hand: A review on linkage-driven finger mechanisms of prosthetic hands and evaluation of the performance criteria. *Mechanism and Machine Theory*, 145(103677), 103677. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.103677>.
- [5] Kim, U., Jung, D., Jeong, H., Park, J., Jung, H.-M., Cheong, J., Choi, H. R., Do, H., & Park, C. (2021). Integrated linkage-driven dexterous anthropomorphic robotic hand. *Nature Communications*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27261-0>.
- [6] Konnaris Charalambos, Gavriel Constantinos, A.C. Thomik Andreas, Faisal A. Aldo. (2016). EthoHand: A Dexterous Robotic Hand with Ball-Joint Thumb Enables Complex In-hand Object Manipulation. 6th IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob) June 26-29, 2016. UTown, Singapore.
- [7] Prudencio, A., Morales, E., García, M. A., & Lozano, A. (2014). Anthropometric and Anthropomorphic Features Applied to a Mechanical Finger (Vol. 8917).

- [8] Ramos, Mario (2021). Diseño y construcción de una Mano Robótica Humanoide Multiarticulada. Trabajo de tesis. Qro. México. Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada-IPN Unidad Querétaro.
- [9] Reyes, Alonso, Morales Eduardo. (2018) Generación del agarre de precisión mediante dedos robóticos multiarticulados con características antropométricas y antropomórficas basado en mecanismos planares de 4 barras. *Pistas Educativas*, No. 130, noviembre 2018, México, Tecnológico Nacional de México en Celaya.
- [10] Schünke, S. S. (2005). PROMETHEUS, Texto y Atlas de anatomía. Editorial Medica Panamericana.
- [11] Tetsuya Mouri, H. K. (2002). Anthropomorphic Robot Hand: Gifu Hand III. *Semantic Scholar*, 1288-1293.
- [12] Tian, L., Li, H., Wang, Q., Du, X., Tao, J., Chong, J., Thalmann, N. M., & Zheng, J. (2021). Towards complex and continuous manipulation: A gesture based anthropomorphic robotic hand design. *IEEE robotics and automation letters*, 6(3), 5461–5468. <https://doi.org/10.1109/lra.2021.3076960>.
- [13] Zhou Jianshu, Yi Juan, Chen Xiaojiao, Liu Zixie, Wang Zheng. (2018). BCL-13: A 13-DOF Soft Robotic Hand for Dexterous Grasping and In-Hand Manipulation. *IEEE Robotics And Automation Letters*, Vol. 3, No. 4, October 2018.