

Diseño mecatrónico frugal y ensamble de mano robótica usando manufactura aditiva. Frugal mechatronic design and assembly of robotic hand using additive manufacturing.

Erick Axel Padilla-García  ^{a*}

^a Tecnológico Nacional de México/Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec (TESE), Av. Tecnológico, Valle de Anáhuac, 55210, Ecatepec, Estado de México, México.

Resumen

En este manuscrito se presenta el diseño y ensamble de una mano robótica obtenida mediante la implementación de una metodología de diseño mecatrónico secuencial, con un enfoque de innovación frugal, lo que permitió lograr un sistema mecatrónico de arquitectura abierta y bajo costo. Primero, se presenta el proceso de modelado, fabricación, construcción y ensamble que mediante modelado CAD e impresión 3D. Posteriormente, se muestra el proceso de modelado del diseño mecánico utilizando el software Fusion 360, lo que permitió modelar el movimiento conjunto de los dedos de la mano, obteniendo piezas y mecanismos modificables, reproducibles y escalables, para estudiar las diversas funciones de manipulación y agarre, en términos de movilidad, que puedan imitar la compleja funcionalidad de una mano humana real. Mediante el uso de un modelo en realidad virtual se pudo visualizar el diseño final, antes de su instrumentación y construcción. Finalmente, se realizó la fabricación y ensamble real de la mano para validar la propuesta teórica de diseño y movilidad.

Palabras clave: Mano robótica, diseño mecatrónico, innovación frugal, manufactura aditiva

Abstract

This manuscript presents the design and assembly of a robotic hand obtained through the implementation of a sequential mechatronic design methodology, with a frugal innovation approach, which allowed for achieving a low-cost, open-architecture mechatronic system. First, the modeling, manufacturing, construction, and assembly process is presented through CAD modeling and 3D printing. Subsequently, the modeling process of the mechanical design is shown using the Fusion 360 software, which allowed for modeling the joint movement of the fingers of the hand, obtaining modifiable, reproducible, and scalable parts and mechanisms, to study the various manipulation and grip functions. In terms of mobility, it can imitate the complex functionality of a real human hand. Using a virtual reality model was generated to visualize the final design, before its instrumentation and construction. Finally, the actual manufacturing and assembly of the hand were carried out to validate the theoretical design and mobility proposal.

Keywords: Robotic hand, mechatronic design, frugal innovation, additive manufacturing

1. Introducción

La mano es el órgano humano con las mayores funciones de manipulación del cuerpo, donde se encuentran diversas aplicaciones de agarre y destreza en términos de movilidad del cuerpo (López, 2012). En el campo de la robótica, la imitación del funcionamiento de la mano es un tema de interés muy explorado a través de prototipos tecnológicos para interacción con el entorno y manipulación de diversos objetos (González, 2005). Sin embargo, el costo de ensamble de un prototipo que imite la funcionalidad de una mano puede ser costoso, debido a que requiere elementos y mecanismos de gran complejidad

de movimiento y control. Con ello, surge la necesidad de proponer diseños tecnológicos innovadores de bajo costo, de libre programación y asequible a la comunidad. A dichos sistemas que pasaron por un proceso de optimización de los recursos de producción, aumento de la accesibilidad y reducción de los costos producción son conocidos como diseños de innovación frugal (León, 2023).

En sistemas de manufactura donde se requiere prototipado rápido, se buscan sistemas repetibles y escalables con fines de que estudiantes, profesionales, maestros e investigadores puedan alcanzar este tipo de sistemas, siendo de gran interés la innovación frugal (Arias-Vanegas, 2017), es decir, donde a

*Autor para la correspondencia: Erick Axel Padilla García

Correo electrónico: erick.garcia@tese.edu.mx, erickaxelpadillagarcia@gmail.com

partir de contextualizar la necesidad de estudio, se pueden lograr obtener productos de soluciones asequibles y funcionales en un ambiente de menores recursos (Pérez, 2022). Esto mejora la sostenibilidad de los sistemas, ya que podemos dar soluciones a diseño y propuesta de diseño, con prototipado rápido que muestren y validen funciones complejas, como lo son los sistemas robóticos.

En este proyecto se busca desarrollar una mano robótica con un diseño eficiente, funcional y flexible que pueda realizar una variedad de tareas de manipulación, simulando la destreza y la sensibilidad táctil de la mano humana, al tiempo que garantiza la precisión de la mano humana. En la parte de fabricación se busca algo asequible, reproducible, escalable, modificable, de libre uso y libre programación.

Considerando que, un sistemas robótico envuelve distintas disciplinas para lograr un objetivo de funcionamiento común (mecánico, electrónico, selección de actuadores, sensores, teoría de control, entre otros) se propone la implementación de una estrategias de diseño multidisciplinario. Una estrategia tradicional de diseño, estrategia secuencial, es aquella donde la primera etapa de diseño es definir el sistema mecánico o dispositivos físico a controlar, y la siguiente etapa de diseño corresponde a la etapa de control (Ortega, 2018), (Padilla-García, 2024). Sin embargo, se han logrado grande resultados de diseño multidisciplinario con una estrategia de diseño iterativo, donde al finalizar las etapas de diseño secuencial se hace una revisión o validación que evalua de la combinación de las etapas, y si no se logra una solución factible, regresar a modificar las etapas de diseño hasta obtener un sistema combinado usable y funcional (Morelos, 2019).

En esta propuesta se usa una estrategia de diseño mecatrónico secuencial/iterativo para proponer solución de diseño combinado de una mano robótica con un enfoque frugal, buscando así que la construcción y ensamble real validen la propuesta teórica.

2. Materiales y Métodos

El filamento de ácido poliláctico, conocido en manufactura aditiva como *PLA*, es ampliamente utilizado en el prototipado rápido de sistemas complejos, como es la impresión 3D como puede verse en (Rodríguez, 2021), y (Sosa, 2023). Este filamento es popular pofácil de usar con una configuración estándar y su precio asequible lo hace ideal para la validación de la propuesta CAD. Además, tiene la ventaja de ser biodegradable, y hecho de materias primas renovables. Esto lo hace sostenible y respetuoso con el medio ambiente, ya que proviene de fuentes orgánicas y termoplásticas.

Considerando el enfoque frugal, se utiliza una estrategia de diseño mecatrónico secuencial/iterativo, el cual se describirá en las siguientes secciones.

2.2 Metodología de diseño multidisciplinario

Una metodología de diseño con enfoque mecatrónico puede ser utilizado para propuestas de diseño combinado de sistemas robótico (Zheng, 2017), como se muestra en la figura 1. Como primera etapa, se propone el diseño del sistema físico. Luego, se prueban las señales de manipulación del sistema de la mano robótica, que mediante programación, es posible el monitoreo y operación del sistema.

En el método iterativo, se vuelven a revisar las etapas de diseño hasta lograr una solución factible o utilizable, y en cada caso que no se logre, se debe regresar a modificar y analizar nuevamente cada etapa del diseño, como se muestra en la figura 1.

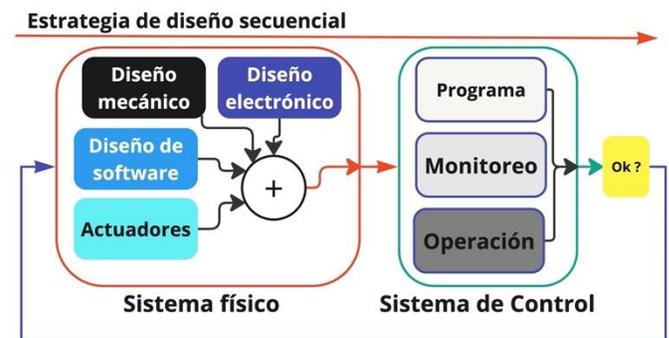


Figura 1: Estrategias de diseño interdisciplinario.

Para el diseño físico de esta propuesta, se usa el Software Simmechanics de Fusion360, lo que permite modelar conjuntos de elementos mecánicos imprimibles. El ensamble total se estudia usando Shapr3D para visualizar de manera virtual el ensamble total, y realizar modificaciones hasta lograr la movilidad deseada de cada uno de los mecanismos del diseño obtenido. A continuación se describen las diferentes etapas de la metodología de diseño.

2.1 Características deseadas de diseño

Algunas características y funciones clave de la mano humana son: función táctil sensitiva, manipulación física, comunicación gestual, movilidad y anatómica compleja (Galcerán, 2017). En este trabajo nos centraremos en la función de manipulación física, ya que es la principal herramienta que el ser humano utiliza para interactuar físicamente con el entorno, con ello permite agarrar, sostener, manipular y realizar una variedad de movimientos con objetos de diferentes formas y tamaños. A continuación, se describirán en detalle cada una de las piezas de ensamble de la mano.

Eslabones: La anatomía de la mano puede verse en la figura 2. En esta propuesta, los huesos del metacarpo se considerarán como una pieza completa, es decir sin movimiento en la palma y en la muñeca. Para las falanges, se propone un eslabón por falange de cada dedo, por lo cual se tienen 14 eslabones de las falanges, y 1 pieza para el metacarpo.

Articulaciones: Una articulación permite la movilidad entre eslabones, cuyo espacio de movimiento está definido por las coordenadas independientes, grados de libertad (de la siglas GDL). Para esta propuesta, se tienen 2 GDL en el pulgar, y 3 GDL para los demás dedos.

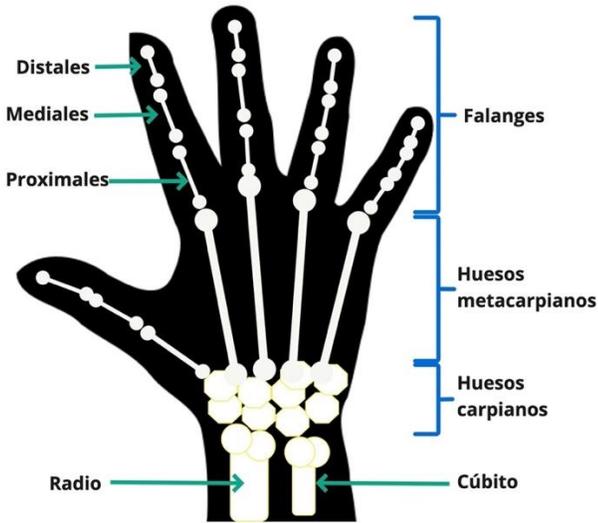


Figura 2: Anatomía de la mano.

Movilidad de las articulaciones: Los arcos de movilidad de las articulaciones de la mano determinan los rangos en grados hasta los cuales una articulación puede moverse sin sufrir daños (G. Cannata, 2005), como se describe a continuación (ver figura 3).

Articulaciones metacarpofalángicas: Con una amplitud de movimiento aproximado de 30° a 45°, para la extensión (enderezar los dedos) y de alrededor de 90° para la flexión (doblar los dedos).

Falanges: La flexión y extensión de las falanges medias y distales puede verse en la figura 4, incisos b y c, donde muestra que los dedos se doblan y se enderezan de forma continua, y cuando están doblados, pueden acercarse a la palma. La abducción y aducción de los dedos, inciso d de la figura 3, esto ocurre cuando todos los dedos se separan en arcos de aproximadamente 20°, o los dedos se juntan y se tocan entre sí, respectivamente.

Pulgar: La articulación puede moverse desde una posición con respecto a la palma 0° hasta alcanzar un ángulo de 70°.

Tipos de agarre: Las acciones que puede realizar la mano, pueden dividirse en agarres de precisión y de fuerza. En este diseño, nos enfocaremos en los agarres de precisión. En este agarre se manipulan objetos únicamente con la punta de los dedos, por ejemplo para tomar un papel o un objeto solamente con falanges distales. En esta propuesta se utilizan agarres de precisión con los distales del pulgar e índice, sin embargo, podemos usar posición cilíndrica o de disco para tomar

objetos de uso básico como el agarre de un vaso, o de una hoja de papel.



Figura 3: Abducción y aducción de los dedos.

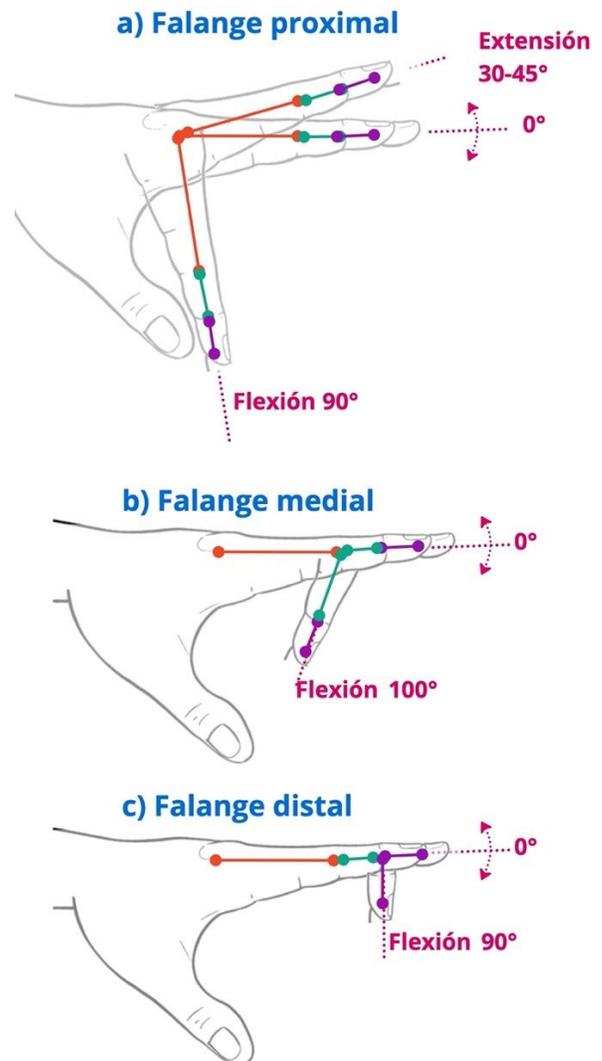


Figura 4: Flexión y extensión de las falanges proximales (a), mediales(b) y distales de los dedos.

También, se considera un solo motor de actuación, que estaría situado en la articulación proximal, es decir un actuador por dedo. Así, se considera el sistema de los dedos en 2 partes: transmisión en articulación proximal y mecanismo de flexión de falange distal. El diseño de un dedo puede verse en la figura 5.

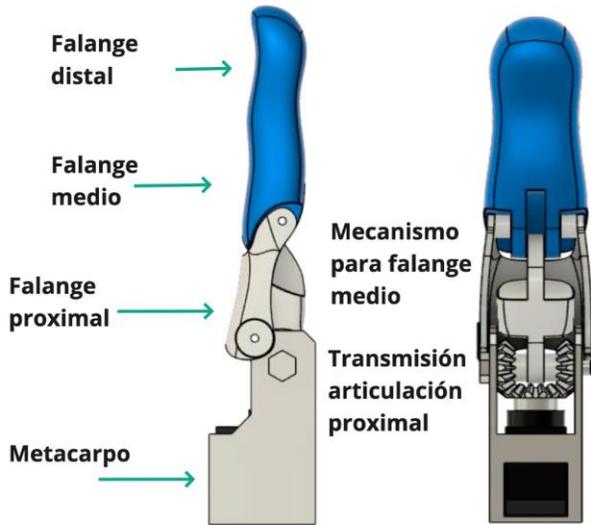


Figura 5: Diseño CAD de mecanismo de los dedos.

2.3.1 Transmisión en articulación proximal

Se propone una transmisión con engranajes cónicos, lo que permite cambio de movimiento de los falanges a 90°, con respecto del eje principal del metacarpo, como en la figura 6.

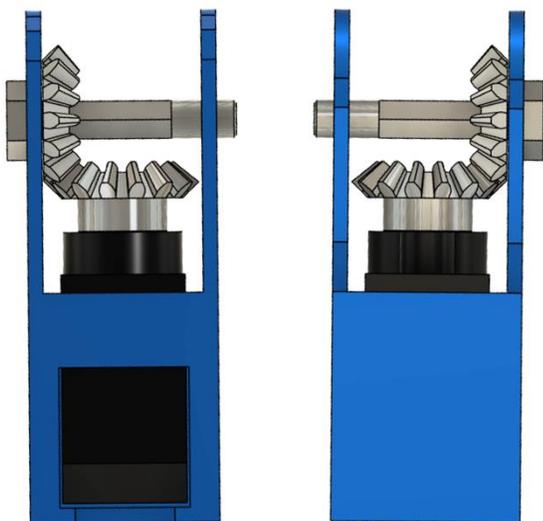


Figura 6: Transmisión de falanges, vista superior e inferior de palma.

Los actuadores serían instalados en la palma, formando el espacio de los actuadores parte de las falanges de metacarpo, con la siguiente relación,

$$q_{k,m} = q_{k,1} \tag{3}$$

donde $q_{k,m}$ es el giro del eje del motor de actuación para el dedo k .

Para el movimiento de los falanges distales, se diseñó un mecanismo que permite el movimiento medio y distal (al mismo tiempo) mientras ocurre el movimiento del falange proximal.

2.3.2 Mecanismo de extensión-flexión de falanges

Para cada uno de los dedos k , donde $k = \{\text{índice, medio, anular, meñique, pulgar}\}$ las falanges medias y distales cumplen las siguientes restricciones,

$$q_{k,3} = 0 \tag{2}$$

$$Ld_2 = L_{k,2} + L_{k,3} \tag{3}$$

donde, Ld_2 es el eslabón nuevo distal considerando como un solo eslabón. El movimiento de los falanges distales, se diseño via CAD, mediante un mecanismo que permite el movimiento medio y distal mientras ocurre el movimiento del falange proximal, como puede verse en la figura 6. Por lo anterior, los falanges distales son articulaciones pasivas que dependen del movimiento de los proximales,

$$q_{k,2} = f(q_{k,1}) \tag{4}$$

donde las articulaciones de falanges distales $q_{k,2}$ ahora son articulaciones pasivas dependientes de $q_{k,1}$, los cuales ahora se mueven de acuerdo con un mecanismo, como en la figura 6. Así, los ángulos de actuación se encuentran ahora en las articulaciones proximales, es decir, $q_{k,1}$. Finalmente, se tiene los parámetros de Denavit-Hartenberg en la Tabla 2, de cada dedo k , para obtener la cinemática directa de las falanges, como se puede ver en la figura 8.

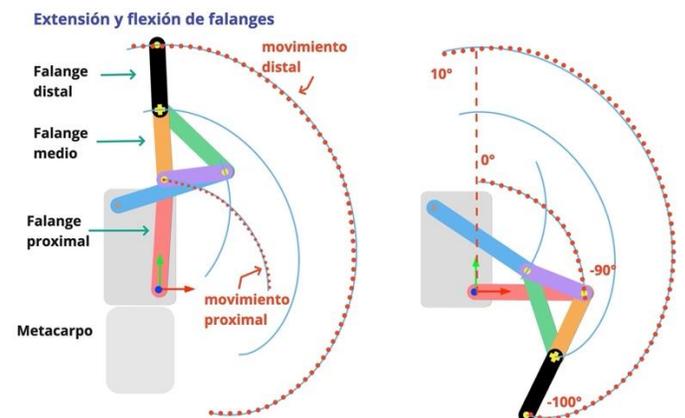


Figura 7: Mecanismo de flexión y extensión de las falanges.

Tabla 2: Denavit-Hartenberg de cada dedo k

Cadena k	θ_i	d_i	a_i	α_i
1 (metacarpiano)	0	d_2	0	$\frac{\pi}{2}$
2 (proximal)	$q_{k,1} + \frac{\pi}{2}$	0	$L_{k,1}$	0
3 (media + distal)	$q_{k,2} = f(q_{k,1})$	0	Ld_2	0

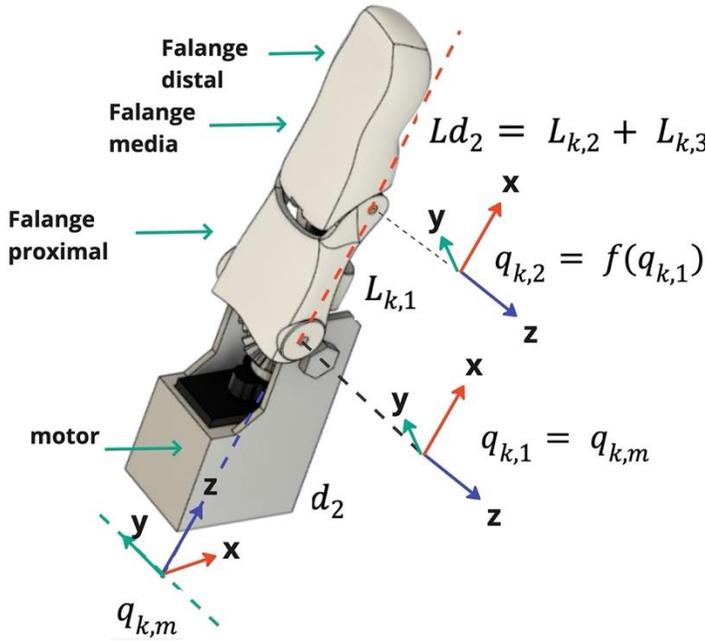


Figura 8: Modelo cinemático de cada dedo de la mano

2.3.3 Palma y falanges metacarpianos

La palma de la mano fue diseñado para dar estabilidad a los movimientos de los dedos, a diferentes distancias de los falanges metacarpianos que sostiene a sus vez a los actuadores de los dedos (el diseño CAD puede verse en la figura 9).

2.3.4 Ensamble CAD y realidad virtual

Para el ensamble se utilizó el programa Fusion 360, que cuenta con herramientas de simulación de conjuntos mecánicos, conocido como "simmechanics" que permite observar el funcionamiento simultaneo de la mano y observar movimiento de cada dedo, así como propiedades físicas y geométricas de cada eslabón. La propuesta final de estructura mecánica de la mano puede verse en la figura 10. En esta propuesta se consideró una muñeca fija, en lugar se diseño una base (ver figura 11) que ofrece paso de cables del sistema, y al mismo tiempo, estabilidad durante el movimiento.



Figura 9: Diseño CAD de palma.

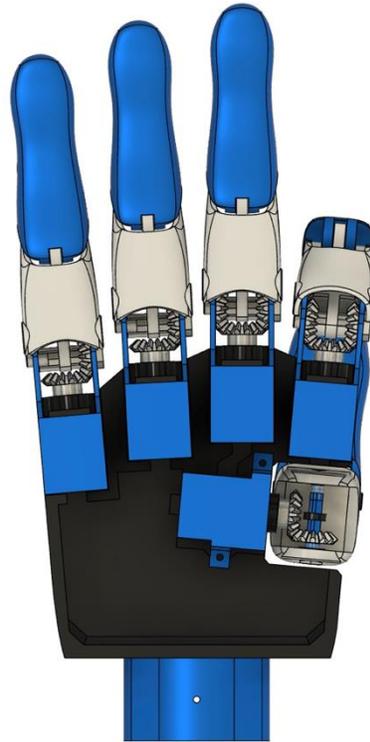


Figura 10: Diseño CAD de ensamble total.



Figura 11: Diseño CAD de base para mano robótica.

Mediante herramientas de Fusion360, se obtuvo el modelo CAD en realidad virtual (figura 12), lo que permite visualizar, y en su caso, escalar el sistema o modificar y evaluar el espacio del sistema propuesto de manera virtual antes de construirlo físicamente.

2.4 Instrumentación

Para el diseño del controlador, se propone usar Arduino Nano, ya que contiene las señales de entrada y salida suficientes para la cantidad de actuación que requiere la mano, además de su compacto tamaño y bajo costo.

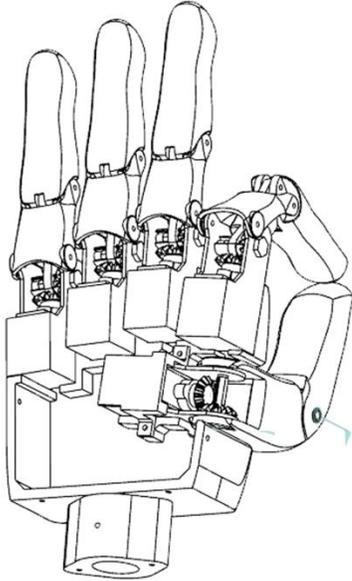


Figura 12: Diseño ensamblado de mano robótica en realidad virtual.

Sistema de control: Para la interacción entrada/salida de señales, se propone usar un módulo de desarrollo “Shield” para Arduino Nano, ya que proporciona pines para 14 entradas/salidas digitales, pines para 6 salidas PWM y pines para 8 salidas analógicas, permite controlar 6 actuadores de la mano, con alimentación externa y establecer la comunicación USB con la computadora para la interacción vía software.

Actuadores: Se propone los mini servomotores MG90S, ya que destacan por su directa relación de par-corriente, con un consumo constante de 200 [mA], y una alimentación de 6-9 [v] para la alimentación externa. Estos servomotores funcionan con la mayoría de tarjetas electrónicas con microcontroladores y además con la mayoría de los sistemas de radio control comerciales. Es utilizado principalmente en proyectos de robótica y modelismo de pequeña escala.

Fuente de alimentación: Se considera una fuente externa de 9 [v] y se recomienda de al menos 2000 [mA] de consumo en operación constante (en caso de usar una batería), para alimentar a los servos y a la placa de control.

Software: Arduino IDE es de uso libre, usando éste como interfaz de control de bajo nivel, ya que es posible realizar monitoreo de señales, con opción a co-comunicarse con MATLAB, o SIMULINK, en el caso de querer probar alguna diferente estrategia de control.

El diagrama electrónico de la mano puede verse en la figura 12, y el diagrama de sistema de control de la mano robótica se muestra en la figura 13.

3. Resultados

En esta sección se muestra el proceso de fabricación, construcción y ensamble real de la mano robótica, para validar la propuesta teórica, en espacio, ensamble, funcionamiento y movilidad de los mecanismos.

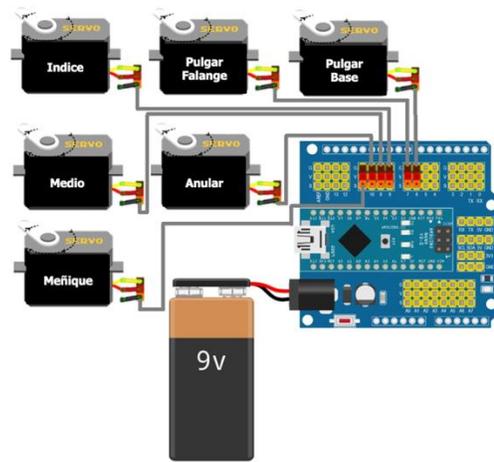


Figura 13: Diseño electrónico de mano robótica.

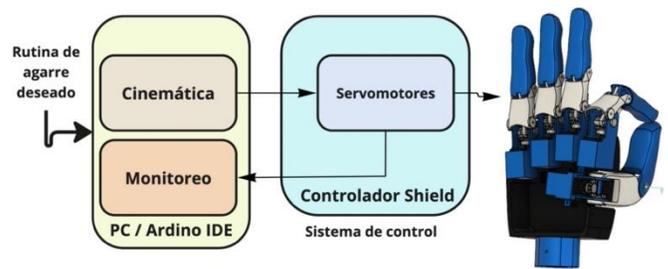


Figura 14: Esquema de control.

Impresión 3D de engranes de transmisión: Se fabrican 2 engranes helicoidales por dedo, y un tornillo especialmente diseñado para hacer sujeción y permitir movilidad de los dedos, como puede verse en la figura 15. Para esta propuesta se utilizó PLA al 50% de relleno hexagonal, lo cual, ha permitido buena resistencia en los puntos de articulación, como puede verse en la figura 16.

Simulación de falanges: De acuerdo con la Tabla 2 de Denavit-Hartenberg, la cinemática directa de la mano y el CAD resultante final, se realizan resultados de simulación de las falanges de la mano.

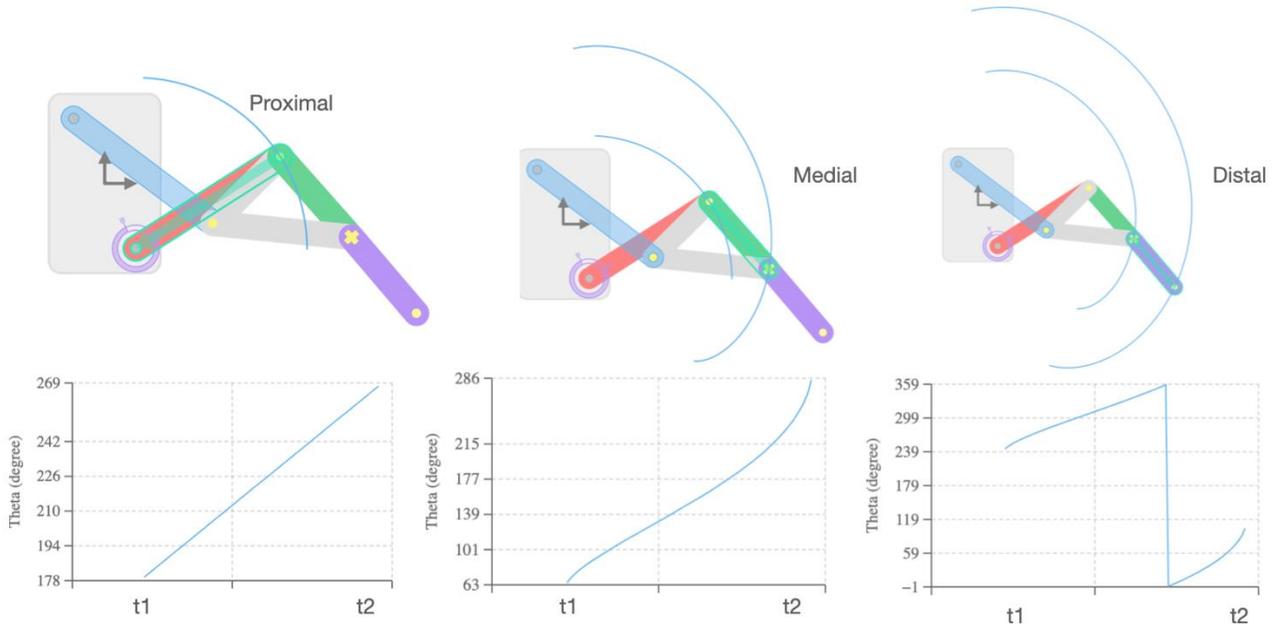


Figura 15: Ángulos y recorridos en simulación de las falanges de la mano.

Considerando que todos los dedos tienen las mismas distancias para las falanges, se muestra la simulación de un solo dedo, asumiendo que las posiciones resultantes, cinemática y movimientos de los dedos serían iguales para cada dedo. Los ángulos de flexión y extensión de las falanges se detallan en la sección 2.3.2, y los ángulos y recorridos de posición y movimiento de las falanges se muestran en simulación en la figura 15. Dichos resultados de simulación fueron realizados en el simulador de Software MotionGen (Lyu, 2023; Purwar, 2017). MotionGen es una plataforma de inteligencia artificial que se usa mediante un ambiente de simulación y diseño de mecanismos planos, actuación rotatoria y lineal, desarrollado por *Stony Brook University* y *Mechanismic Inc.* con la financiación de la *National Science Foundation*. Esta herramienta puede usarse vía internet y asiste a los usuarios en la configuración de mecanismos, longitudes, puntos de conexión y elementos de diseño de sistemas de transmisión y movimiento.

Impresión 3D de Falanges: Las falanges, se fabrican utilizando PLA al 30% de relleno hexagonal, lo cual, a permitido buena resistencia en los puntos de articulación con poco material de fabricación, y se ajustan según las especificaciones del diseño. Se realizan 12 piezas en total de las falanges, como se muestra en la figura 17.

Impresión 3D de palma: Se fabrican utilizando PLA y se ajustan según las especificaciones del diseño, cuidando las opciones de impresión como la expansión, ya que esto permite el ensamblaje y garantizar que no haya problemas en el movimiento de los dedos. La palma impresa se muestra en la figura 18.

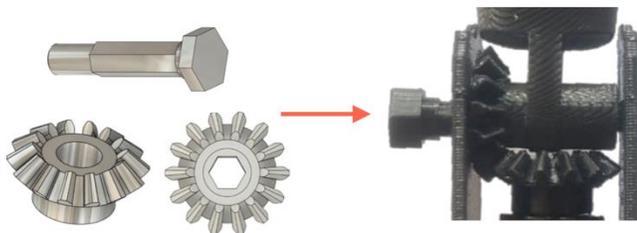


Figura 16: Impresión 3D, material PLA, de Falanges de la mano.



Figura 17: Impresión 3D, material PLA, de Falanges de la mano.



Figura 18: Impresión 3D, material PLA, de palma de la mano.

Ensamble de mano: Cada dedo tiene un engrane que se ajusta a la transmisión de flexión de falange proximales. Se ensambla mecanismo de falanges distales, en conjunto con las piezas de cada dedo, y finalmente se en la palma de la mano (ver figura 19). Los cables de los actuadores deben pasar a través de la muñeca.

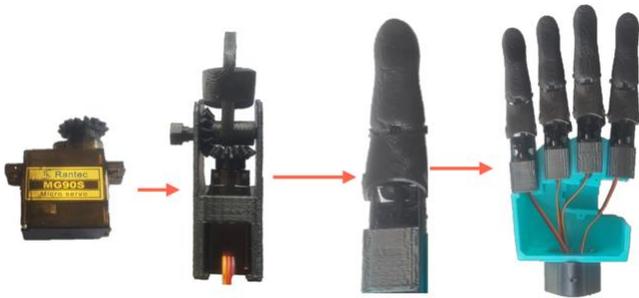


Figura 19: Ensamble de actuador en mecanismo de falanges y dedos.

Conexión de mano con propuesta electrónica:

Ensamble final de base con mano ensamblada, y falanges del pulgar, para que finalmente se pueda conectar al circuito electrónico, como se muestra en la figura 20.

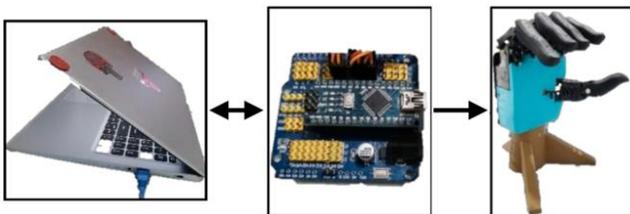


Figura 20: Ensamble final de mano robótica.

Pruebas de agarre: El rango de movilidad es muy similar a la propuesta teórica, lo que muestra que el diseño por manufactura aditiva resulta ser muy conveniente al momento de la fabricación de las piezas y el prototipado rápido de la mano. A continuación se muestra la rutina realizada de agarre en la figura 21, donde se prueban posiciones cilíndricas y se

mencionan las observaciones de la tarea realizada, para posteriormente abarcar la sección de discusiones.

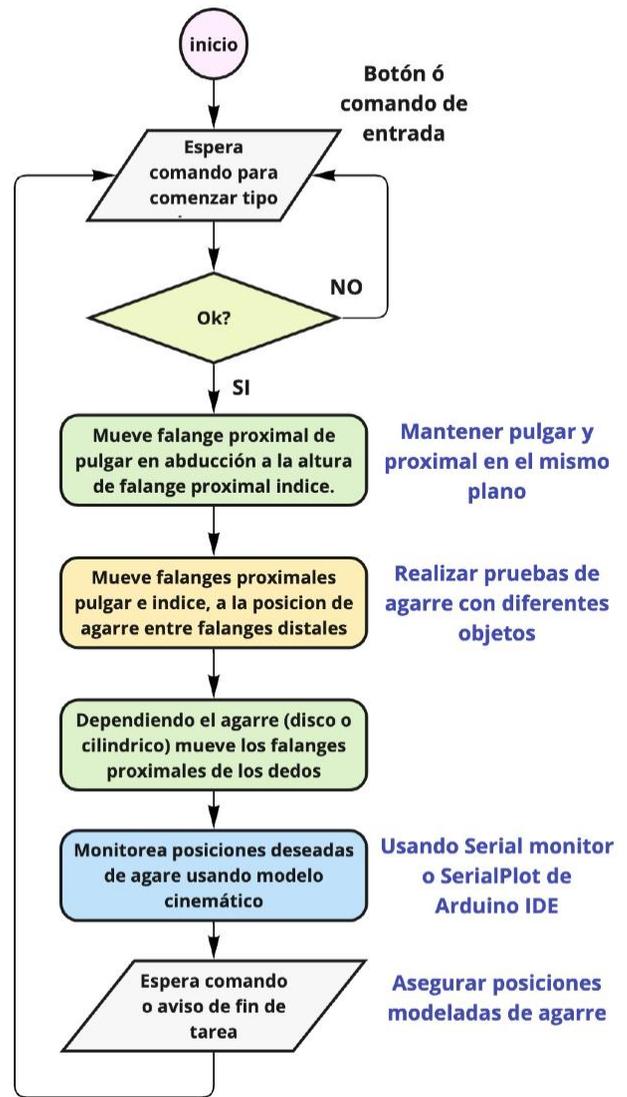


Figura 21: Diagrama de flujo de rutina de agarre.

Se prueban ambos tipos de agarre, dependiendo del objeto y se logra sujeción suave pero sin soltar el objeto (figura 22, inciso a). Para el agarre discal, una vez que la abducción del pulgar y la flexión proximal de la flange índice están en el mismo plano, se prueba diferentes grosores o distancias entre flexiones distales (ver figura 22, inciso b), y probar diferentes grosores para diferentes objetos.

Considerando que usamos servomotores, es posible obtener las posiciones deseadas sin problema como si fuera control en lazo abierto, ya que los servomotores mantienen un control en lazo cerrado que tiene relación directa entre voltaje mínimo (posición mínima de los dedos) y voltaje máximo (posición máxima de los dedos), sin embargo, si hay un obstáculo que impida el contacto entre distales, ese grosor (obstáculo), éste se verá reflejado en fuerza de agarre,

teniendo la combinación posición/fuerza. Por un lado, cabe mencionar que es una fuerza muy pequeña de agarre ya que los servomotores tienen un consumo continuo de corriente de hasta 200 [mA], lo que permite un agarre pero no una sujeción que pudiera doblar un material. Así, para un agarre de mucha fuerza se requeriría usar otro tipo de motores, y el control de corriente para tener la relación con la fuerza deseada. Por otro lado, la transmisión de PLA comienza a modificarse con el uso de la transmisión, lo que genera backlash en las falanges, y debido a la deformación constante cuando los grosores son menores a 5 [mm], por ejemplo: una caja de cartón de max 5 [mm] de grosor, una hoja de papel, una tapa de plástico, y objetos parecidos. Por lo cual solo se ajustaron agarres (sin fuerza) de diferentes objetos ligeros por debajo del máximo grosor, pero usando una o más falanges para evitar la caída del objeto.

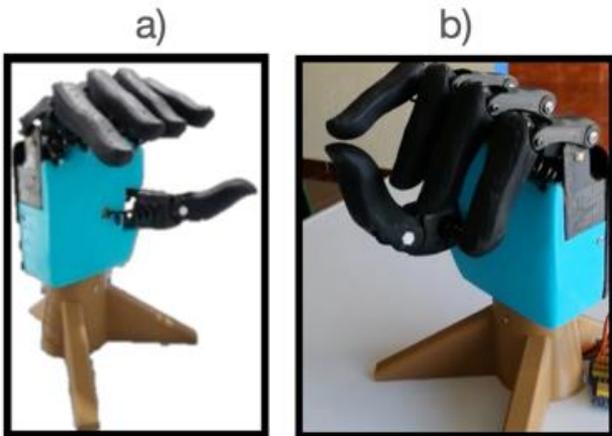


Figura 21: Tipos de agarre de sistema: a) agarre cilíndrico; b) Agarre discal.

Como trabajo a futuro, se busca tener sensores para las flexiones distales para probar nuevos agarres y fuerzas. Como primer acercamiento, se valida el mecanismo con agarre de diversos objetos, como puede verse en la figura 21. En estos experimentos, cuentan con posiciones específicas de falanges.

De esa forma, es posible tener diferentes agarres para otros tipos de objetos. Para dicho fin se hicieron los siguientes experimentos:

1. Considerar agarre discal de otras falanges además de las distales pulgar e índice, como en inciso a.
2. Se considero una rutina de agarre discal para objetos de plástico regulares, donde a nueva modificación para lograr el agarre está en posicionar la proximal media.
3. Se prueban nuevos objetos con diferentes materiales, lo cual es posible obtener un agarre con posiciones proximales medias cercanas entre sí, generando más o menos fuerza por la posición final deseada.
4. Se probó un agarre discal de un trozo de papel, el cual tiene mayor dificultad por su grosor pequeño, ligero peso y facilidad de deslizarse entre los dedos. Por ello, se hicieron diversas pruebas de agarre donde las distales no choquen.

Finalmente, se propone como trabajo a futuro, perfeccionar las rutinas de agarre y más tareas o tipos de agarre para la mano diseñada.

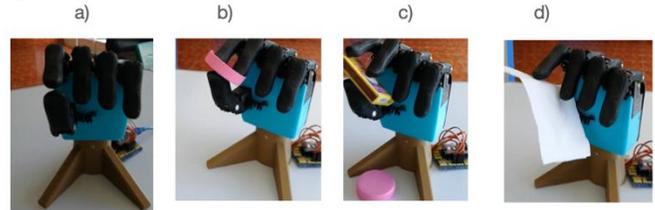


Figura 22: Experimentos de agarre discal: a) rutina de agarre con más falanges; b) Agarre discal de un objeto plástico; c) agarre discal de un objeto de cartón prismático; c) agarre discal de un objeto ligero y de mínimo grosor.

3.1 Aspectos financieros

Para esta propuesta de diseño frugal, se debe tener en cuenta el costo, la factibilidad, accesibilidad y aplicación en diferentes entornos. Se debe buscar un equilibrio entre rendimiento, de bajo costo y libre acceso de programación, teniendo en cuenta la eficiencia productiva y la disponibilidad de materiales. Los costos de fabricación de la mano como se presenta en este artículo se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3: Costo de fabricación y ensamble de mano robótica

Elemento	Cantidad	Costo [MXN]
Dedos (Índice, medio, anular, meñique) en PLA		
Falange proximal	4	\$ 60
Falange distal	4	\$ 100
Engranajes transmisión	8	\$ 80
Mecanismo	4	\$ 80
Dedo pulgar en PLA		
Piezas palma en PLA	2	\$ 125
Muñeca en PLA	1	\$ 40
Base de mano en PLA	1	\$ 60
Instrumentación		
Micro servomotor MG90S	6	\$ 540
Arduino NANO + cable USB	1	\$ 550
SHIELD expansión para Arduino NANO	1	\$ 100
Tornillería de ensamble	20	\$ 100
TOTAL		\$ 1835 .00

4. Discusión

Gran parte de la parte teórica de diseño y movilidad corresponde con realidad. Sin embargo, la mano tiene una sujeción suave en los agarres, sin soltar el objeto. El agarre es programado hasta ciertos puntos cinemáticos, es decir, no detecta de manera automática hasta donde mantener la flexión de las falanges. Si el usuario requiere fuerza y no manipulación, tendrá que hacer ajustes a este diseño.

Parte del enfoque frugal es lograr un dispositivo accesible de bajo costo, de libre programación con el menor recurso

posible, pero es posible balancear mejores elementos (aumento de costo) para fortalecer piezas o funcionamiento. Por ejemplo, los engranes a piezas de metal, ya que de PLA tiene una durabilidad menor y menor vida útil. Sin embargo, hacerlos de metal requerirá no solo más costo, sino una apropiada lubricación entre elementos de los mecanismos. Dado que la fuerza no ha sido objetivo del proyecto, sino la manipulación de las falanges, éste podría considerarse con posibles ventajas. Para obtener una evaluación completa y precisa, es importante considerar otros aspectos, como la precisión, la durabilidad, la eficiencia energética, la usabilidad y la seguridad, entre otros.

En esta propuesta de diseño, sólo es el comienzo del análisis de resultados, con pocos tipos de agarres, ya que otros requieren movibilidades más complejas y más independientes de las falanges, es decir, más actuadores, lo que puede debatirse con el costo, aumento de actuadores, variaciones al modelo cinemático, y más. Sin embargo, está contemplado como trabajo a futuro. Con respecto, a los engranes de transmisión, ya que, si aumentamos tamaño de los dientes, se tiene más fuerza de agarre, pero más backlash, y si disminuimos tamaño se tendrían más dientes, más precisión, pero menos fuerza (al menos en PLA), menos vida útil. Si cambiamos de material, esto repercutiría directamente en costo, peso, lo cual, hemos considerado PLA como parte inicial de un prototipado rápido de mostrar la movilidad del CAD y posteriormente ir analizando nuevas ventajas y desventajas, partiendo de esta referencia.

5. Conclusiones

Se presenta el diseño CAD y ensamble de una mano robótica, la cual se obtuvo mediante la aplicación de una metodología de diseño mecatrónico, proponiendo recursos y materiales que permitan repetibilidad, escalabilidad, libre programación y elementos asequibles como lo es el prototipado rápido a través de la impresión 3D, estando al alcance de la comunidad académica, estudiantes y profesores que deseen comenzar a estudiar sistemas robóticos de este tipo. Cumpliendo así con un diseño frugal de su tipo.

Se ha mostrado que mediante la aplicación de una metodología de diseño mecatrónico para obtener sistemas multidisciplinarios factibles. Se logra validar el diseño teórico mediante la fabricación y ensamble real, con los elementos de actuación y control propios para su funcionalidad.

6. Agradecimientos

Se agradece el apoyo de la Universidad Politécnica de Atlacomulco, especialmente al Ing. Axel Zuriel Martínez Marín, por la construcción y pruebas experimentales de la mano robótica durante su Estadía profesional. También, se agradece el apoyo de la UNAM con el proyecto PAPIME PE104125.

7. Referencias

- Arias-Vanegas, V. A., et al. (2017). Innovación frugal: un nuevo paradigma de desarrollo sostenible en la base de la pirámide. de La base de la pirámide y la innovación frugal en América Latina, U. d. Zulia, Ed, 393-408.
- G. Cannata and M. Maggiali, "An embedded tactile and force sensor for robotic manipulation and grasping," 5th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 2005., Tsukuba, Japan, 2005, pp. 80-85, <https://doi.org/10.1109/ICHR.2005.1573549> .
- Galcerán Montaña, I. (2017). Estudio de la funcionalidad y eficiencia en el control y uso de prótesis mioeléctrica en niños y adolescentes. <http://hdl.handle.net/10115/14800>
- León, M. I. G. (2023). Avances de la robótica del desarrollo en el diseño de robots educativos empáticos. Educación, tecnología, innovación y transferencia del conocimiento, 149-162.
- López, L. A. A. (2012). Biomecánica y patrones funcionales de la mano. *Morfología*, 4(1). <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/41933>
- Morelos, D. O. R., et al. (2019). Metodologías para diseño de prácticas didácticas en sistemas de control. *Serie Científica de la Universidad de las Ciencias Informáticas*, 12(11), 90-106. <http://cathi.uacj.mx/20.500.11961/9492>
- Lyu, Z., Purwar, A., and Liao, W. (December 15, 2023). "A Unified Real-Time Motion Generation Algorithm for Approximate Position Analysis of Planar N-Bar Mechanisms." *ASME. J. Mech. Des.* June 2024; 146(6): 063302. <https://doi.org/10.1115/1.4064132>
- Ortega, A. B., et al. (2018). Diseño de sistemas mecatrónicos: prototipos virtuales (design of mechatronic systems: virtual prototypes). *Pistas Educativas*, 40(130).
- Padilla-García, E. A., Cruz-Morales, R. D., González-Sierra, J., Tinoco-Varela, D., & Lorenzo-Gerónimo, M. R. (2024). Design, Assembly and Control of a Differential/Omnidirectional Mobile Robot through Additive Manufacturing. *Machines*, 12(3), 163. <https://doi.org/10.3390/machines12030163>
- Pérez Duque, L. M., & Abaunza Barón, L. P. (2022). Innovación frugal, cómo hacer más con menos. <https://hdl.handle.net/10614/14682>
- Purwar, A., Deshpande, S., and Ge, Q. J. (March 9, 2017). "MotionGen: Interactive Design and Editing of Planar Four-Bar Motions for Generating Pose and Geometric Constraints." *ASME. J. Mechanisms Robotics*. April 2017; 9(2): 024504. <https://doi.org/10.1115/1.4035899>
- Rodríguez Caycedo, L. C. (2021). Diseño de un prototipo de prótesis en impresión 3D del miembro anterior derecho de una canina.
- Sosa, J. V. G., & Carranco, S. M. G. (2023). Análisis de varianza en manufactura aditiva con impresión 3D. *DYNA: revista de la Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín*, 90(227), 167-175. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9119008>
- Zheng, C., Hehenberger, P., Le Duigou, J., Bricogne, M., & Eynard, B. (2017). Multidisciplinary design methodology for mechatronic systems based on interface model. *Research in Engineering Design*, 28, 333-356. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00163-016-0243-2>