

Prótesis de Mano Robótica a Bajo Costo para Pacientes con Amputación del Miembro Superior

Corredor Ávila, Andrés Felipe^{1(*)}

¹Universidad de Boyacá, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Tunja, Colombia

Resumen: A partir de un análisis comparativo, teórico y experimental, entre la mano humana, el prototipo a desarrollar y modelos ya construidos en fuentes de consulta. Es presentado el diseño a bajo costo de una prótesis de mano robótica que replica características funcionales para pacientes con amputación del miembro superior. Por lo que, con ayuda del programa CAD SolidWorks es realizada una simulación en conjunto a partir de cinco fases de desarrollo (modelo 2D, modelo 3D, conjunto, simulación, y construcción), con el objetivo de determinar el ensamble adecuado. El proyecto se encuentra en fase de prueba y construcción con el fin de evaluar la funcionalidad y mejoras en el diseño. Es necesario, además, hacer una relación de costos y en futuras investigaciones una fase adicional de programación y adaptación del paciente al dispositivo.

Palabras clave: Prótesis. Componentes electrónicos. Funcionalidad. Mecanismo. Diseño CAD.

Recibido: 15 de febrero de 2023. Aceptado: 26 de febrero de 2024

Received: February 15th, 2023. Accepted: February 26th 2024

Low-Cost Robotic Hand Prosthesis for Patients with Upper Limb Amputation

Abstract: From the theoretical and experimental comparative analysis between the human hand, the prototype to be developed and models already built in reference sources. The low-cost design of a robotic hand prosthesis that replicates functional characteristics for patients with upper limb amputation is presented. With the SolidWorks CAD program, a joint simulation is performed from five development phases (2D model, 3D model, assembly, simulation, and construction), with the aim of determining the appropriate assembly. The project is in the testing and construction phase in order to evaluate the functionality and design improvements. It is also necessary to make a list of costs and in future research an additional phase of programming and adaptation of the patient to the device.

Keywords: Prosthesis. Electronic components. functionality. Mechanism. CAD design.

1. INTRODUCCIÓN

“En nuestros días 5 de cada 1000 personas (35 a 40 millones) requieren prestación ortoprotésica y rehabilitación. Según las perspectivas estadísticas de futuro se prevé que aumenten al doble las cifras en los próximos años, según la Organización Mundial de la Salud” (Valero, 2020). En la figura 1 se presenta la etiología de amputaciones para el año 2020.

Asimismo, de acuerdo a Stokes (2021) existen 4 principales causas por las cuales se realiza un procedimiento de amputación: Enfermedad vascular, cáncer, lesión, y anomalía gastrointestinal congénita. Siendo que, en Estados Unidos “Un poco más del 0.5 % de las personas viven actualmente con la pérdida de un miembro, y se realizan alrededor de 500 amputaciones al día”.

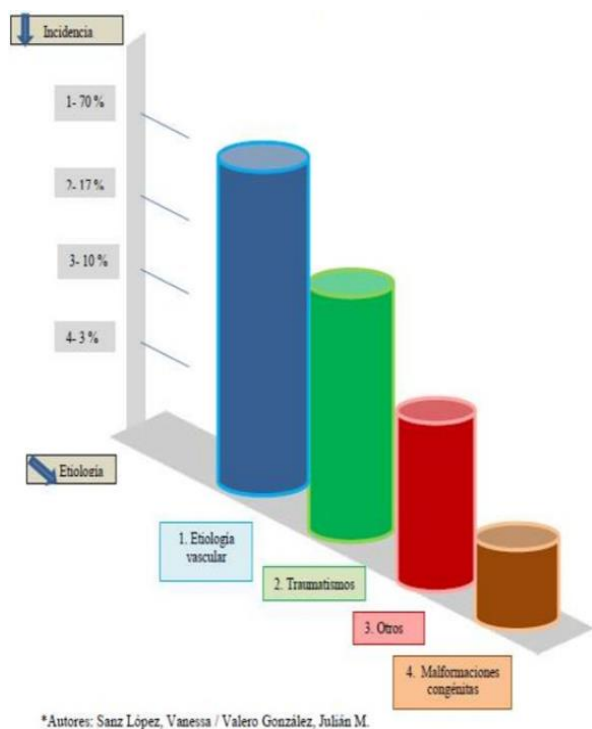


Figura 1: Etiología de amputaciones, tomado de:(L.Gila, 2020)

De tal manera que, una rehabilitación exitosa por amputación implica una adaptación tanto física como mental de las nuevas condiciones del paciente, con ayuda de un equipo de médicos, protistas, terapeutas, fisioterapeutas, trabajadores sociales, y psicólogos. Por esta razón, la compra de una prótesis es una limitante para muchas personas, porque se debe asumir costos operatorios y postoperatorios, dentro de los que se encuentran el adquirir un dispositivo que pueda suplir los movimientos del miembro faltante.

Por otra parte, la prótesis es una “pieza o aparato empleado para sustituir un órgano o miembro del cuerpo” (RAE, 2021) Su objetivo es sustituir la funcionalidad de acuerdo a necesidades propias del usuario. Para Galli (2017) son clasificadas en dos tipos de acuerdo a si es posible remover el dispositivo (exoprótesis) o, por el contrario, requieren de un procedimiento quirúrgico (endoprótesis). Siendo que, los materiales empleados en la actualidad son principalmente plásticos, láminas de titanio, resinas, y metales.

Por lo anterior, replicar la mano a través de la robótica conlleva a un pensamiento en conjunto de todos los elementos que la componen para que el prototipo funcional sea lo más aproximado a uno biológico. Siendo que, la impresión 3D, la implementación de servomotores, y la captación de señales electromiográficas, surgen como una alternativa económica que en conjunto sirven como puente entre la prótesis y el cerebro humano. De tal manera que, es necesario detectar, analizar y procesar las señales emitidas por la contracción de los músculos y transmitir las a un mecanismo que responda adecuadamente.

Por último, según el sitio web es machina (2022) la prótesis, netamente mecánica y limitada al cierre y apertura de la mano, puede variar su costo desde \$2000 a \$5000 USD, que para aquellas más complejas como la de la compañía Brainco que utiliza tecnología de inteligencia artificial puede llegar a los \$10 000 USD.

Del mismo modo, es necesario proponer un prototipo a bajo costo de mano robótica funcional y asequible, además, realizar pruebas controladas del modelo y un análisis comparativo entre la biomecánica de la mano y diversos autores y proyectos desarrollados, de tal manera que se determine si es un modelo que satisface las necesidades del paciente.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Anatomía

La mano está formada por 27 huesos diferenciados en 3 zonas (carpo, metacarpo y falanges) y una estructura conformada por huesos, músculos y nervios que permiten el movimiento y sentido del tacto, además de una serie de venas y arterias que facilitan el paso de la sangre a través de todo el sistema Rodríguez (2020), figura2.

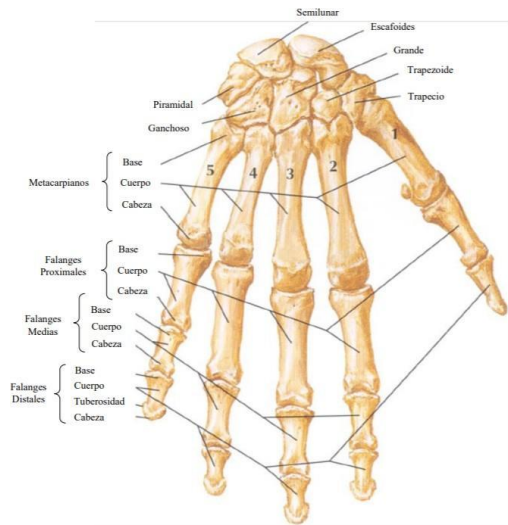


Figura 2: Estructura ósea de la mano humana, tomado de: Pérez (2011)

De tal manera que, “la zona del carpo está formada por 8 huesos cortos dispuestos en dos hileras: una superior o antebraquial y otra inferior o metacarpiana. En conjunto forman un canal de concavidad anterior por donde se deslizan los tendones de los músculos flexores de los dedos” Panigua (2015). Como se evidencia en la figura 4 los huesos de la fila distal son el trapecio, trapezoide, grande y ganchoso; mientras que los huesos de la fila proximal son el escafoides, semilunar y piramidal.

Por otro lado, la zona del metacarpo “es formado por 5 huesos largos también conocidos como metacarpianos, los cuales en conjunto con los huesos del carpo forman el esqueleto de la palma de la mano y se articulan en su parte superior con la segunda hilera de huesos del carpo y en la parte inferior con las primeras falanges de los dedos” Pérez (2011). Siendo que, constituye el esqueleto de la palma y el dorso de la mano.

La zona de falanges forma el esqueleto de los dedos y cada uno (a excepción del pulgar) constituye de 3 segmentos óseos. En la figura 4 se evidencia que se clasifican en falange distal media y proximal Panigua (2015). Finalmente se enumeran del hueso radial a cubital por (1) pulgar, (2) índice, (3) medio, (4) anular y (5) meñique.

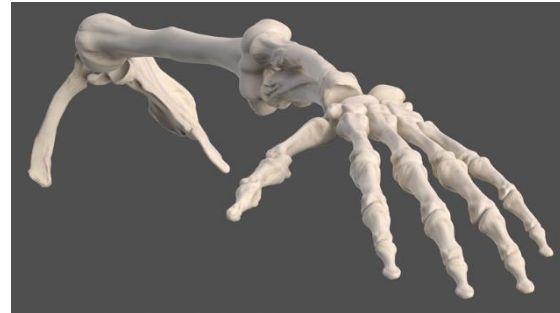


Figura 3: Render de la estructura ósea, tomado de:turbosquid.com

2.2 Articulaciones, ligamentos y tendones

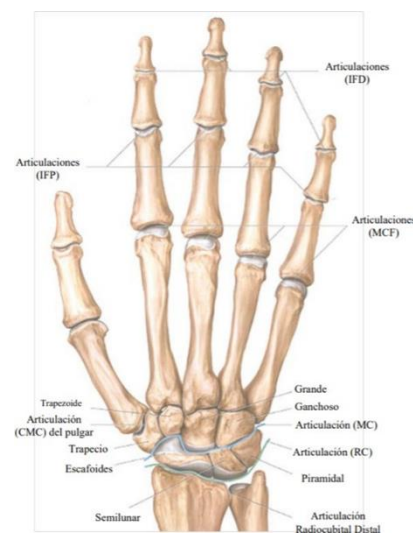


Figura 4: Articulaciones de la mano, tomado de: Pérez (2011)

Se define la articulación como órgano de unión entre dos o más huesos que permiten su desplazamiento, estas son estabilizadas por ligamentos y movilizadas por los músculos Vásquez (2010). Por lo tanto, al cerrar la mano se visualizan los nudillos que son las articulaciones metacarpo falángicas, compuestas por la unión de la falange proximal y el metacarpo correspondiente a cada dedo Rodríguez (2020). La función de los ligamentos es mantener estable la estructura ósea. Se presenta la vista dorsal y palmar en la figuras 5 y 6.

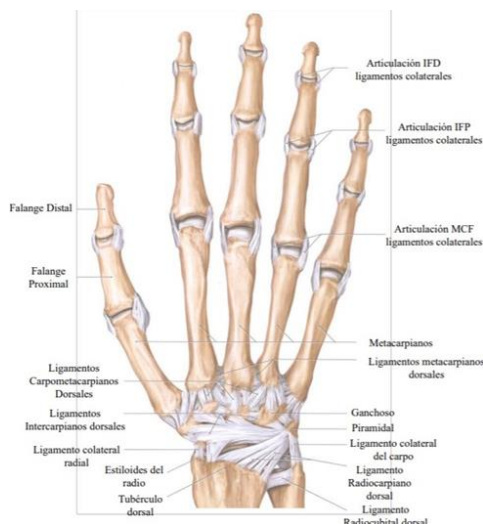


Figura 5: Ligamentos de la mano, vista dorsal, tomado de: Pérez (2011)

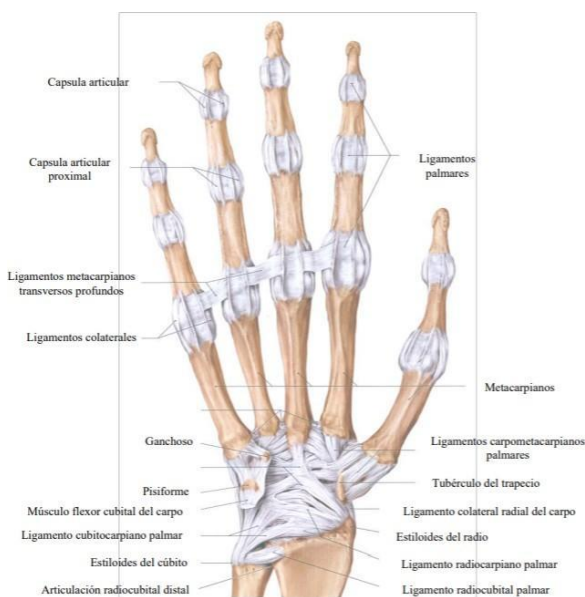


Figura 6: Ligamentos de la mano, vista palmar, tomado de: Pérez (2011)

Asimismo, “La función de los ligamentos del carpo es limitar el movimiento articular, tomando en cuenta que estos ligamentos pueden inducir desplazamientos óseos y transmitir fuerza” Pérez (2011), por lo que, los ligamentos en la palma son más fuertes y gruesos que los del carpo. En la figura 7 se presenta el sistema de ligamentos de los dedos en vista palmar (A) y (B) vista lateral.

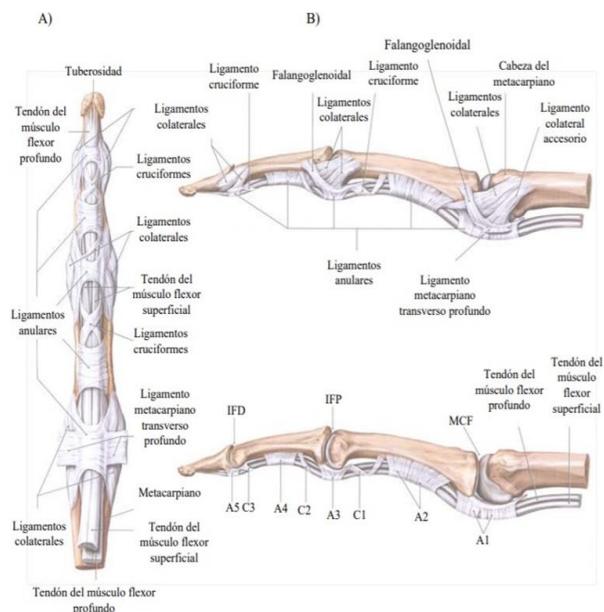


Figura 7: Ligamentos de los dedos de las manos, vista palmar (A) y lateral (B), tomado de: Pérez (2011)

Para el caso de los tendones estos “transmiten las fuerzas que mantienen el equilibrio estático y dinámico en los diversos requerimientos del trabajo” Riihimaki (2000), por lo que su principal función es mover el hueso de tal manera que se transmita fuerza a través de los músculos. En la figura 8 se presentan los tendones de la mano en vista posterior, palmar y lateral izquierdo y derecho.

De la misma manera, para los dedos una estructura relevante son los tendones extensores los cuales se encargan de la función contráctil de los mismos”. Comienzan como músculos que surgen de la parte trasera del hueso del antebrazo, viajan hacia la mano, donde finalmente se conectan a los tendones extensores antes de cruzar la parte posterior de la articulación de la muñeca.

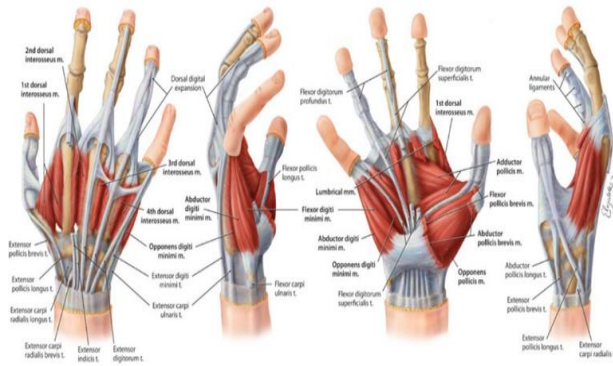


Figura 8: Tendones de la mano, vista palmar, dorsal y lateral, tomado de Pérez (2011)

Mientras viajan hacia los dedos, los tendones extensores se convierten en la campana extensora”. (Grupo, 2015). En la figura 9 se representa los tendones extensores, así como los flexores de los dedos de la mano, las flechas negras indican la dirección que tiene la tracción del tendón extensor mientras que las flechas rojas indican la dirección de la tracción de los músculos interóseos y lumbricales Pérez (2011).

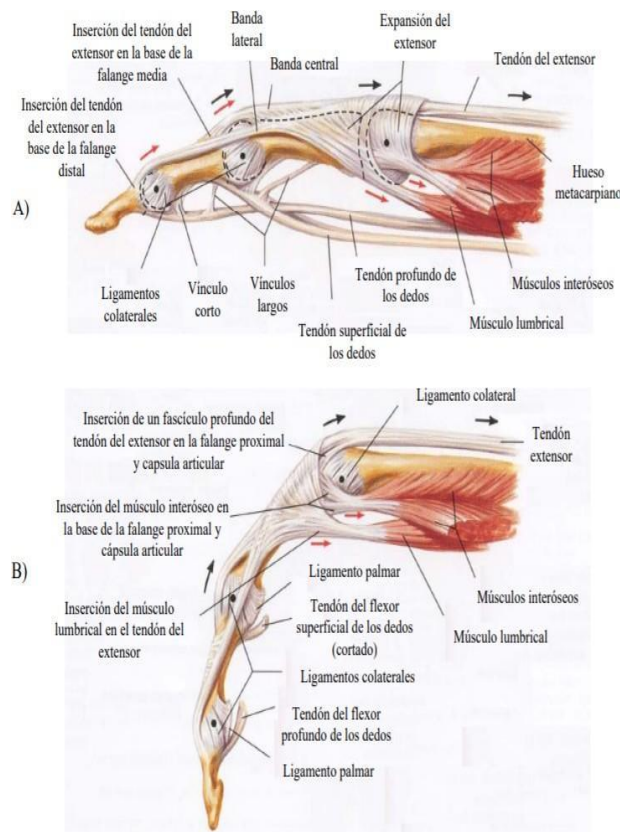


Figura 9: Tendón extensor (A) y flexor (B) de los dedos tomado de Pérez (2011)

2.3 Sistema muscular

Los músculos intrínsecos, es decir aquellos que tienen origen en algún sector de la mano, se encargan de realizar pequeños movimientos. En la figura 10 se presentan los músculos intrínsecos superficiales y profundos en vista palmar, y dorsal de la mano.

Los músculos extrínsecos, es decir aquellos que tienen origen en el brazo o antebrazo son de mayor tamaño y su función es la de suministrar una mayor fuerza a la mano. Se clasifican de acuerdo a su función y estructura teniendo músculos anteriores (flexores de los dedos) y posteriores (extensores). En la figura 11 y 12 presentan los músculos extrínsecos de la mano en vista superior, posterior y lateral.

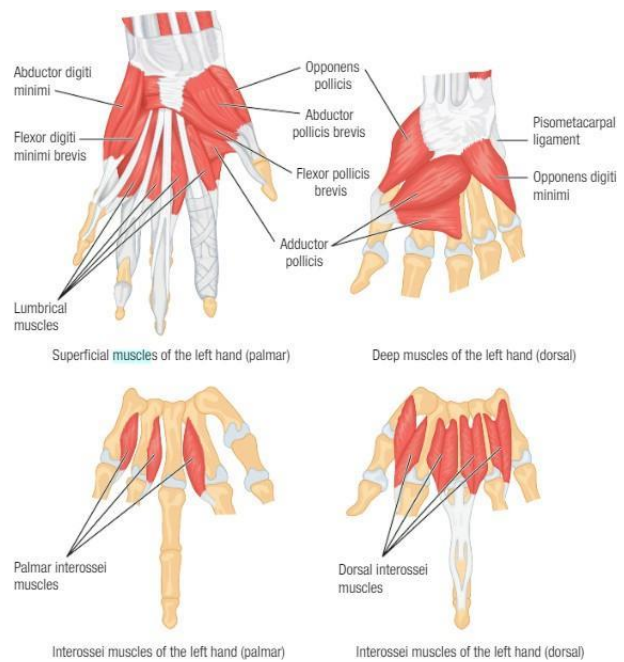


Figura 10: Músculos intrínsecos de la mano, vista palmar y dorsal, tomado de: Maw et al. (2016)

En la figura 13 se presenta un listado de los músculos intrínsecos y extrínsecos y la función que cumple cada uno.

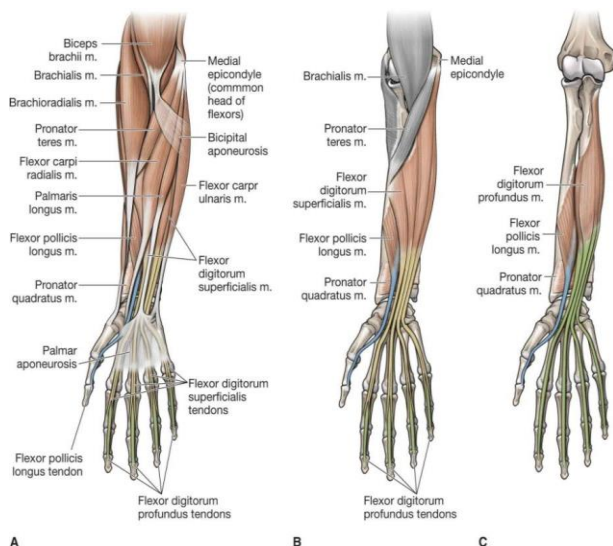


Figura 11: Músculos extrínsecos de la mano, tomado de: Morton D.A. (2011)

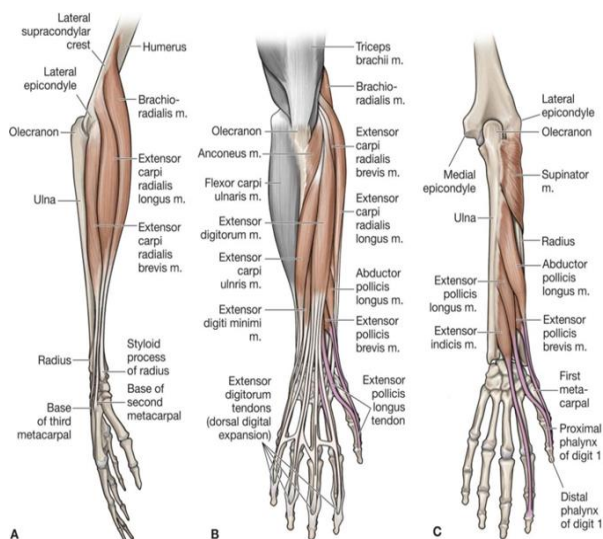


Figura 12: Músculos extrínsecos de la mano, tomado de Morton D.A. (2011)

	Músculo	Actividad
Extrínsecos	Flexor superficial de los dedos	Flexión de las articulaciones IFP y MCF
	Flexor profundo de los dedos	Flexión de las articulaciones IFD, IFP y MCF
	Flexor largo del pulgar	Flexión de las articulaciones IF y MCF del pulgar
	Extensor largo del pulgar	Extensión de las articulaciones IF y MCF del pulgar
	Extensor corto del pulgar	Extensión de la articulación MCF del pulgar
	Abductor largo del pulgar	Abducción del pulgar
	Extensor propio del índice	Extensión del índice
	Extensor común de los dedos	Extensión de los dedos
	Extensor propio del meñique	Extensión del meñique
Intrínsecos	Interóseos (todos)	Extensión de las articulaciones IFP e IFD y flexión de las articulaciones MCF
	Interóseos dorsales	Separa los dedos índice y anular del dedo medio
	Interóseos palmares	Aducción del índice, anular y meñique hacia el dedo medio
	Lumbricales	Extensión de las articulaciones IFP e IFD y flexión de la articulación MCF del segundo al quinto dedo
	Tenar abductor corto del pulgar	Abducción del pulgar
	Tenar flexor corto del pulgar	Flexión y rotación del pulgar
	Tenar oponente del pulgar	Rotación del primer metacarpiano hacia la palma
	Hipotenar abductor del meñique	Abducción del meñique (Extensión de las articulaciones IFP e IFD)
	Hipotenar flexor del meñique	Flexión de la falange proximal del meñique
Aductor del pulgar	Aducción del pulgar	

Figura 13: Músculos extrínsecos e intrínsecos de la mano, tomado de: Pérez (2011)

2.4. Rangos de movimiento

La principal función de la mano es realizar actividades prensiles por lo que el movimiento está enfocado en ángulos de flexión y extensión. Siguiendo a Pérez (2011) algunas de las características son:

- Cuando los dedos adoptan una posición natural, sus ejes no convergen en ningún punto.
- Los ejes del dedo medio, anular y meñique son paralelos, no así con el pulgar y el índice.
- Al desarrollar un movimiento de cierre palmar los ejes de cada dedo se encuentran en un punto céntrico cercano al Radio.
- El movimiento del antebrazo es medido como grado de pronación y supinación.
- En la vista palmar se identifican varios pliegues o líneas de flexión longitudinal y transversal, donde los 4 pliegues palmares principales forman una geometría similar a la letra "M"
- El movimiento de extensión (flexión dorsal) en condiciones normales del carpo presenta un ángulo de entre 40° y 60° figura 14.

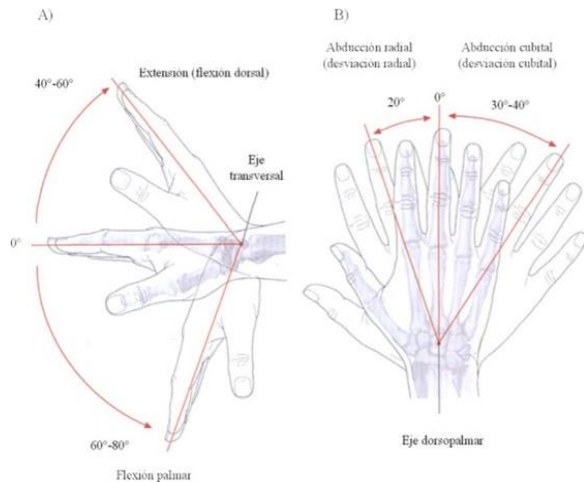


Figura 14: Flexión palmar, tomado de: Pérez (2011)

- g. El ángulo del arco de flexión palmar se encuentra aproximadamente entre 60° y 80°
- h. La desviación cubital tiene un arco aproximado de 30° a 40° y la desviación radial es de 20°
- i. La flexión de los dedos a la altura de las articulaciones MCF puede formar un ángulo aproximado de 90° desde el origen, figura 15

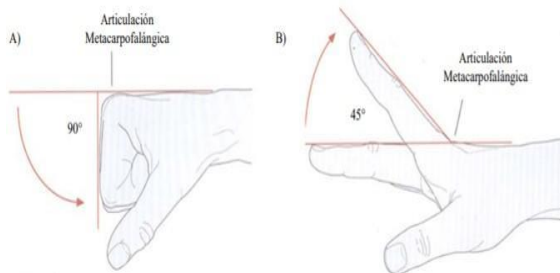


Figura 15: Flexión y extensión de las articulaciones MCF, tomado de: Pérez (2011)

- j. La extensión de los dedos es hasta 45° aproximadamente en dirección opuesta
- k. Las articulaciones IFP no pueden desarrollar movimientos de extensión. Sin embargo, La flexión de los dedos se puede dar hasta por 100° aproximadamente, figura 16.

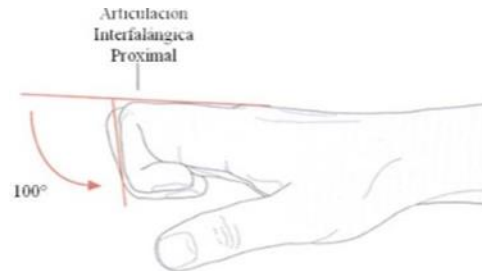


Figura 16: Flexión de las articulaciones IFP, tomado de: Pérez (2011)

- l. La abducción y aducción de las articulaciones MCF es de aproximadamente 20°, figura 17.

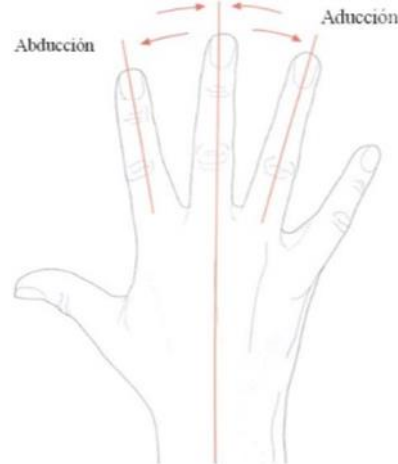


Figura 17: Abducción y aducción de las articulaciones MCF, tomado de Pérez (2011)

- m. La flexión y extensión de la articulación MCF transcurren de forma transversal y desarrolla un ángulo de movimiento aproximado de 50°. El rango de movilidad de flexión en la articulación IF es aproximadamente de 90° mientras que la extensión del dedo es de 20°, figura 18.

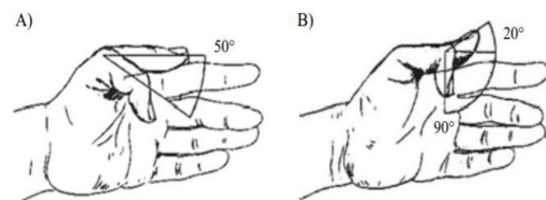


Figura 18: Abducción y aducción de las articulaciones MCF, tomado de Pérez (2011)

- n. Los huesos y articulaciones ubicados en la mano, forman entre si 3 arcos conocidos como el arco transversal proximal, el arco transversal distal y el arco longitudinal, figura 19.

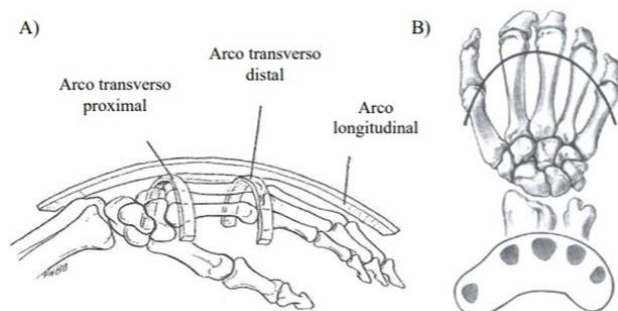


Figura 19: Arcos de la mano (A), Arco distal proximal(B), tomado de Pérez (2011)

Articulaciones	Rango de movimiento
Muñeca	<ul style="list-style-type: none"> • Flexión 0° - 80° • Extensión 0° - 60° • Radial 0° - 20° • Cubital 0° - 40°
Articulación MCF de los dedos	<ul style="list-style-type: none"> • Hiperextensión 0° - 45° • Flexión 0° - 90°
Articulación IFP de los dedos	<ul style="list-style-type: none"> • Extensión 0° • Flexión 0° - 100°
Articulación IFD de los dedos	<ul style="list-style-type: none"> • Extensión 0° - 10° • Flexión 0° - 90°
Pulgar Metacarpofalángica	<ul style="list-style-type: none"> • Hiperextensión 0° - 10° • Flexión 0° - 50°
Pulgar Interfalángica	<ul style="list-style-type: none"> • Hiperextensión 0° - 20° • Flexión 0° - 90°
Pulgar Carpometacarpiana	<ul style="list-style-type: none"> • Aducción Palmar 0° • Abducción Palmar 0° - 45° • Aducción Radial 0° • Abducción Radial 0° - 60°

Figura 20: Resumen rango de movimientos de la mano,tomado de: Pérez (2011)

2.5. Patrones funcionales

“La función prensil de la mano depende de la integridad de la cadena cinética de huesos y articulaciones extendida desde la muñeca hasta las falanges distales. La interrupción en los sistemas de arcos transversales y longitudinales resulta en inestabilidad, deformidad y pérdida de función”. Arias (2012), de tal manera que las funciones prensiles se definen como movimientos en los que se agarra un objeto y este se mantiene en la mano.

La eficiencia de la función prensil según Arias (2012) son:

- Eficacia de la primera articulación carpo metacarpiana y, en menor grado, de la cuarta y quinta MCF
- Rigidez relativa de la segunda y tercera articulaciones carpo metacarpianas.
- Estabilidad de los arcos longitudinales del pulgar de los otros dedos.

- Sinergismo y el antagonismo equilibrado entre los músculos extrínsecos e intrínsecos de la mano.
- Aferencia sensorial adecuada de las áreas de la mano.
- Precisas relaciones entre la longitud, movilidad y posición de cada hilera de dedos.

Según Vergara (2013) se pueden clasificar los tipos de agarre como se muestra en la figura 21 con su definición

Agarre cilíndrico (Cyl)	Interviene la palma. El pulgar está en oposición directa a los dedos (en abducción o posición neutra)
Agarre palmar oblicuo (Obl)	Variante del cilíndrico. Interviene la palma, pero el pulgar está en aducción.
Agarre de gancho (Hook)	No intervienen ni el pulgar ni la palma. El peso del objeto lo soportan los dedos.
Agarre lumbrical (Lum)	Interviene el pulgar y la parte más proximal de los dedos (hasta la base de los nudillos), pero no interviene la palma
Agarre intermedio de potencia-precisión (IntPP)	Interviene algo la palma pero tanto el pulgar como el índice estabilizan el agarre
Pinza (Pinch)	Se utiliza el pulgar y las yemas de los dedos (uno o varios)
Pinza lateral (LatP)	Se utiliza la parte lateral de los dedos (uno o varios) y normalmente también el pulgar.
Pinza especial (EspP)	Se utiliza el pulgar, para algunos dedos la parte lateral y para otros las yemas
Movimiento no prensil (NonP)	Se manipulan objetos sin ser agarrados

Figura 21: Clasificación de los tipos de agarre, tomado de: Vergara (2013)



Figura 22: Representación de los tipos de agarre, tomado de: Vergara (2013)

2.6. Diseños disponibles

2.6.1. Open Bionics



Figura 23: Hero arm, prototipo de Open Bionics, tomado de: Uncrate.com

Hero arm es el prototipo desarrollado por la compañía inglesa Open Bionics el cual le apuesta a un diseño en impresión 3D, con versiones tanto para adultos como niños. Según su sitio web, es capaz de reducir costes de fabricación gracias a que cuenta con un aplicativo capaz de escanear la zona amputada y de esta manera crear a medida el modelo en 3D. Es una prótesis cómoda y ligera según opiniones de usuarios; viene además en dos especificaciones diferentes, una con 4 motores y otra con 3 más pequeña, pero con menos capacidad de agarre; cuenta además con una batería interna o externa a preferencia del usuario; el principal atractivo es la posibilidad de personalizar la cubierta exterior con variedad de diseños, siendo que, no está diseñada para soportar actividades pesadas o que requieran de un esfuerzo extra del aparato, figuras 24 y 25.

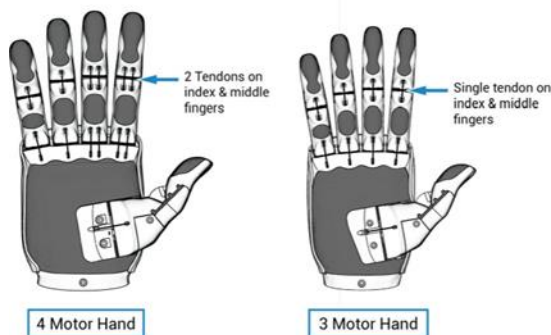


Figura 24: Hero arm, prototipo de Open Bionics, tomado de: openbionics.com

2.6.2. Bebionic



Figura 25: Prototipo de Bebionic, tomado de: bebionics.com

Las principales características de este modelo son:

- La muñeca EQD permite retirar la mano con una acción rotatoria. El usuario puede rotar rápidamente y quitar o conectar los dispositivos terminales según sea necesario.
- La longitud de la muñeca es ajustable a preferencia del usuario.
- La muñeca Multiflex ofrece movimiento pasivo de en todas direcciones y la capacidad de bloquear en flexión de 30 °, extensión de 30 ° o en una posición neutra.
- Permite al usuario bloquear o desbloquear fácilmente la posición de la muñeca y reposicionarla en flexión o extensión.

2.6.3. John Hopkins University

Las principales características son:

- Fuerza y destreza similar a la humana con 100 sensores incorporados en la mano y en la parte superior del brazo, figura 26.



Figura 26: Prototipo John Hopkins University, tomado de: jhuapl.edu

- Detección táctil y de posición en alta resolución.
- Interfaz neuronal.

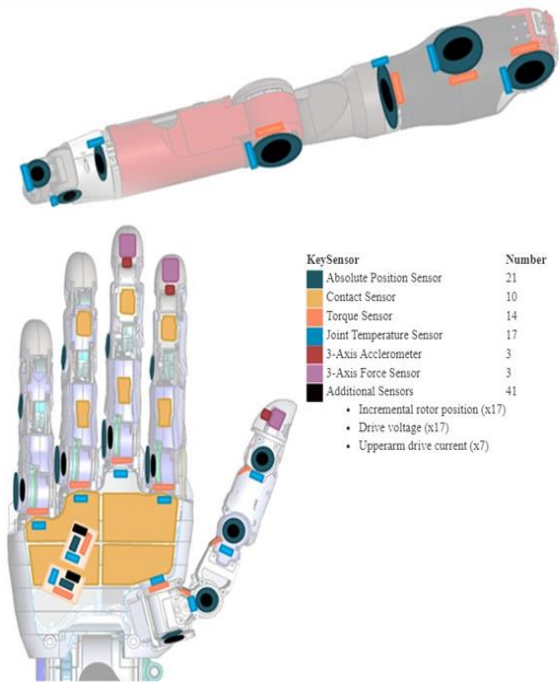


Figura 27: Distribución de los sensores prototipo John Hopkins University, tomado de: jhuapl.edu

2.6.4. Vincent Systems



Figura 28: Prototipo VINCETevolution4, tomado de: vincentsystems.de

Las principales características que este modelo ofrece son:

- Prototipo completamente a prueba de agua.
- Material elástico.
- 4 canales de control por EMG.
- 390g de peso.

2.7. Mecanismos

Pérez (2012) a partir de un análisis cinemático propone un diseño estándar en donde la acción de flexión y extensión de los dedos se realiza a través de un mecanismo de eslabones o barras de transmisión y tres puntos de giro desde la palma hasta la falange distal como se muestra en la figura 29 y presenta un modelo CAD como se ve en la figura 30.

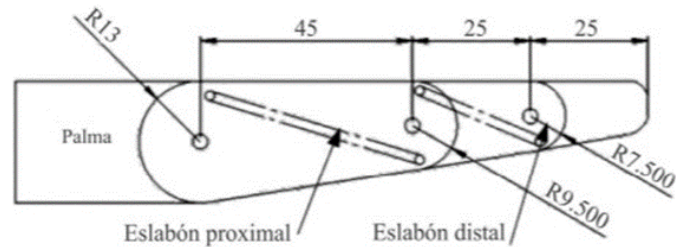


Figura 29: Mecanismo estándar para los dedos de Pérez (2012)

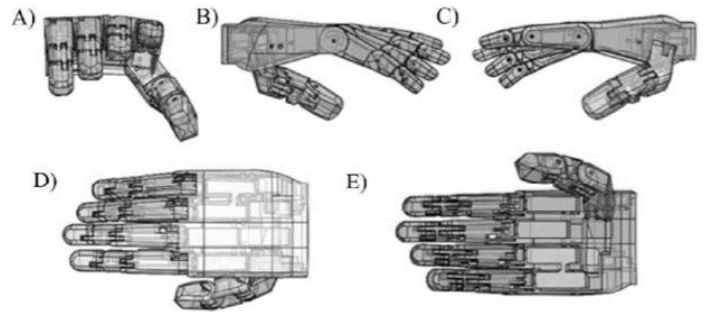


Figura 30: Modelo CAD mecanismo de Pérez (2012) por vista (A) Frontal (B) Lateral exterior (C) Lateral interior (D) Dorsal y (E) Palmar.

Por otro lado, Espinosa (2019) propone un mecanismo para la palma que modifica el diseño de tal manera que se deja de lado la superficie sólida y se opta por optimizar el movimiento del pulgar a través de una serie de eslabones y juntas que en conjunto realizan movimiento de flexión-extensión, abducción- aducción como se muestra en la figura 31 y 32.

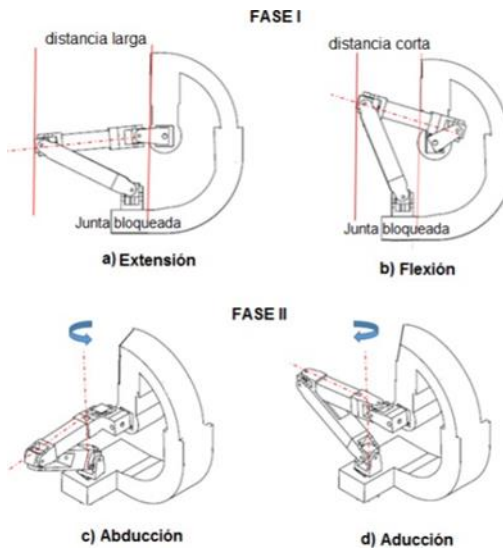


Figura 31: Mecanismo de Espinosa (2019) para la palma

N° DE ELEMENTO	N° DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	AMHSP001	PALMA PARTE INFERIOR	1
2	AMHSP002	PALMA PARTE SUPERIOR	1
3	AMHSP002	MICROMOTOR 20RPM 1301	3
5	AMHSP003	ACOPLADOR	1
6	AMHSP004	JUNTA CORTA	2
7	AMHSP005	ACOPLADOR DE JUNTAS	3
8	AMHSP006	BASE PARA PULGAR	1
9	AMHSP007	BASE PARA ANULAR	1
10	AMHSP008	BASE PARA MEDIO	1
11	AMHSP009	BASE PARA INDICE	1
12	AMHSP003	TORNILLO SIN FIN PHILIPS-PABO 2	1
13	AMHSP001	BASE DEL ENGRANE	4
14	AMHSP006	PERNO Ø17	4
15	AMHSP005	ENGRANE M=2, N=12	1
16	AMHSP009	MECAL DEL DEDO	1
17	AMHSP008	DISTA. DE DEDO	1
18	AMHSP007	PERNO Ø16	2
19	AMHSP010	PALANCA TRANSMISIÓN	1
20	AMHSP014	PERNO Ø10	1
21	AMHSP010	JUNTA LARGA	3

Figura 34: Componentes mecanismo para el dedo de Espinosa (2019)

Para la muñeca, Coogley (2018) presenta un mecanismo el cual con ayuda de un sistema de 2 servomotores MG90S se logra un movimiento en sentido izquierda-derecha, arriba-abajo y rotatorio, figura 35.

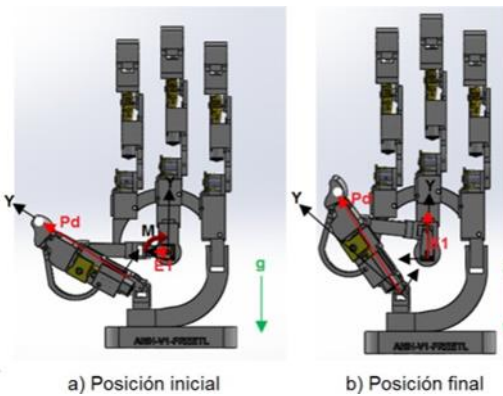


Figura 32: Posición inicial y final para el movimiento del pulgar, Espinosa (2019)

Espinosa (2019) para el mecanismo de los dedos propone el ensamblaje como se muestra en la figura 33 de tal manera que cada uno de los componentes se enumeran en la figura 34.



Figura 35: Mecanismo para la muñeca con servomotores de Coogley (2018)

Siguiendo con Coogley (2018) presenta un mecanismo de extensión para las falanges como se muestra en la figura 36 y un ensamble que sustituye el movimiento de los metacarpianos con las proximales como se muestra en la figura 37.

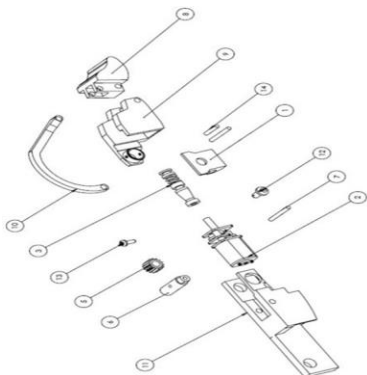


Figura 33: Posición inicial y final para el movimiento del pulgar, Espinosa (2019)

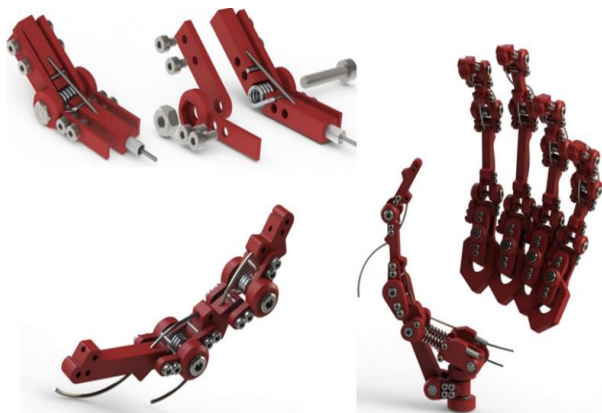


Figura 36: Mecanismo para extensión de falanges, Coogley (2018)

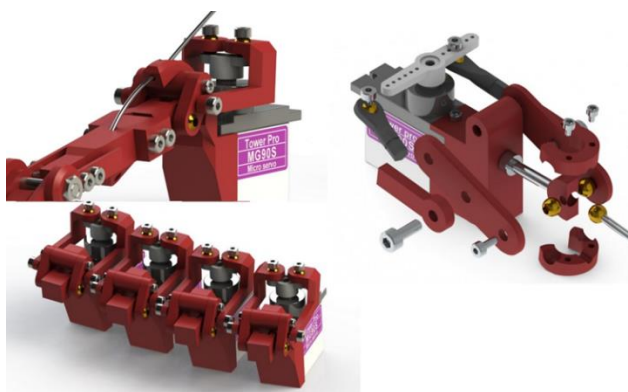


Figura 37: Mecanismo movimiento metacarpianos-falanges Coogley (2018)

3. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de la investigación

La investigación es desarrollada con un enfoque cualitativo, por lo que se busca evaluar el problema a partir de parámetros en el diseño y especificaciones del sistema propuestas por Coogley, (2018) y Espinosa (2019).

3.2. Estructura metodológica

Son planteadas cinco fases de desarrollo:

1. Modelo en 2D: Abocetado y dimensionamiento de medidas en el programa de diseño.
2. Modelo de piezas en 3D: Diseño dimensional aplicando operaciones 3D.
3. Conjunto de piezas: Diseño de piezas en 3D ensambladas en archivo ensamblaje.

4. Simulación: Definición de relaciones de posición para comprobar movimiento en conjunto.
5. Construcción: Impresión 3D e implementación de componentes, con pruebas en laboratorio.

Para la construcción del prototipo se opta por seguir las especificaciones de Pérez (2011) mostradas en la figura 38.

Especificaciones		Requerida	Deseada
Características generales	5 Dedos	X	
	14 articulaciones	X	
	Sujeción puntual, palmar, lateral, gancho, cilindrico y esférico	X	
	Rango de movimiento en articulaciones (Tabla II.3)	X	
Dimensiones	Longitud máxima de la mano 200 mm		X
	Ancho máximo de la mano 140 mm		X
	Longitud de los dedos (Tabla II.4)	X	
Peso	Peso neto máximo del modelo 500 g	X	
	Capacidad de carga 400 g		X
Características del mecanismo	Cumplir con la trayectoria deseada	X	
	3 articulaciones por dedo (2 en pulgar)	X	
	Síntesis ideal del mecanismo	X	
Actuador	Torque adecuado y capacidad de carga	X	
	Velocidad	X	
	Compatible con las dimensiones de la mano	X	
	Disponibilidad comercial		X
Sensor	Resolución aceptable	X	
	Resolución aceptable	X	
Sistema de control	Autonomía	X	
	Capacidad para interpretar y procesar señales	X	
	Disponibilidad comercial		X
	Elemento rígido y estable	X	
Acoplamiento	Apto para proporcionar la fuerza adecuada	X	
	Portátil	X	
Fuente de alimentación	Capacidad para alimentar actuadores y sistema de control	X	
	Disponibilidad comercial	X	
	Resistente a impacto	X	
Material de soporte	Ligero	X	
	Disponibilidad comercial		X
	Mínimo y sencillo		X
Mantenimiento	Acceso total a elementos		X
	Bajo desgaste en partes móviles		X
Seguridad	Tan alta como sea posible	X	
Estética	Similitud con la extremidad		X

Figura 38: Especificaciones del sistema, tomado de: Pérez (2011)

3.2. Fuentes de información

Para el desarrollo de la investigación se utiliza información primaria la cual se obtendrá a partir de la fase de construcción del sistema propuesto en la fase 5. Asimismo, para la información secundaria, se utilizan

fuentes como Google Académico, libros, trabajos de grado, base de datos (Scopus, Latindex, Redalyc, Springer link), entre otros.

3.3. Técnicas y herramientas de recolección de información

Las técnicas y herramientas utilizadas para la recolección de información primaria serán obtenidas a partir de las fases posteriores a la construcción, estas incluyen una propuesta de diseño en conjunto del sistema.

Para obtener la información secundaria se realizará una revisión bibliográfica de diferentes libros, trabajos de grado y artículos donde se evidencia metodologías a aplicar sobre el análisis de la biomecánica de la mano humana, incluyendo anatomía, articulaciones, ligamentos, tendones, sistema muscular, rangos de movimiento, y patrones funcionales. Conceptos como electromiografía, sensores, señales, cadena cinemática, síntesis de mecanismo, grados de libertad, y criterio de Denavit- Hartenberg y Kutzbach son también aplicados.

7.3.3 Técnicas para la evaluación de resultados

Para la evaluación de resultados se utilizará un análisis cualitativo comparando el modelo obtenido y proyectos similares hasta la fecha.

4. RESULTADOS Y/O DISCUSIÓN

Inicialmente se identificada la necesidad de proponer una alternativa de bajo costo utilizando impresión 3D, sistema por servomotores y sensores musculares, que en conjunto plantean elementos que son capaces de reducir el costo de implementación hasta a 1/3 parte de su precio base en el mercado actual de las principales marcas que se especializan en desarrollar prótesis de brazo robótico, de acuerdo a fuentes consultadas.

También, es desarrollado un acercamiento al prototipo ideal de mano robótica haciendo un análisis teórico y funcional entre el modelo obtenido y los autores de consulta, de tal manera que es llevada a cabo una amplia revisión bibliografía y estado del arte con proyectos similares desarrollados en los últimos 5 años donde, además, se realiza un análisis cinemático y de señales para diferentes modelos aplicados.

De la misma manera, es obtenido un primer prototipo que mecánicamente posee movimiento capaz de suplir la necesidad de agarre, flexión, extensión, abducción, y aducción de la mano; por lo que cumple con las especificaciones de funcionalidad biológica en un nivel

básico pero lo suficiente para desempeñar tareas cotidianas sin mucho esfuerzo.

Asimismo, se da inicio a la fase de construcción, en donde se evalúa el diseño preliminar por impresión 3D y se incorporan elementos tanto mecánicos (rodamientos, ejes, piñones, poleas, servomotores, entre otros), como electrónicos (potenciómetros, microcontroladores, placas, entre otros).

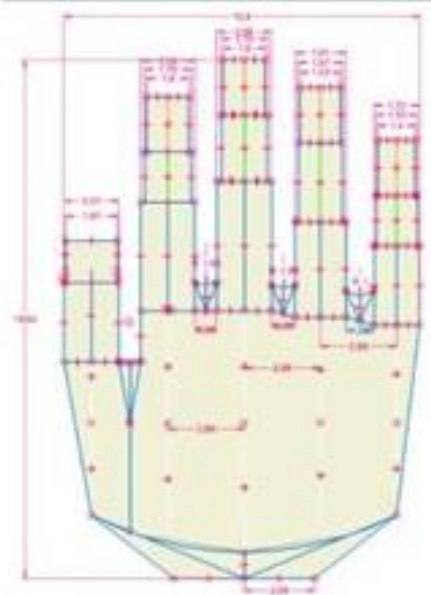


Figura. 39. Dimensionamiento del modelo en 2D

Como se observa en la Fig. 39 se plantea inicialmente el dimensionamiento en el programa a través de un modelo 2D, que tiene como propósito entender las características dimensionales de una mano promedio en el programa de diseño asistido.



Fig. 40. Dimensionamiento del modelo 3D

En la Fig. 40 se busca pasar del dimensionamiento 2D a 3D, esto con el fin de ampliar el entendimiento de las características de una mano promedio. Es implementado, además, un mecanismo sencillo de flexión y extensión de las falanges.



Fig. 40. Conjunto de piezas

Para la Fig. 40 se observa el mecanismo implementado a través del conjunto de piezas. Se sitúan rodamientos, potenciómetros, piñones, y poleas. Además, es realizada la simulación de mecanismos para comprobar su funcionamiento.



Fig. 41. Vista detallada al mecanismo de engranajes, dedos anular y meñique



Fig. 42. Vista detallada del mecanismo de engranajes, dedo pulgar

5. CONCLUSIONES

La ciencia y la tecnología permiten la mejora de la calidad de vida de las personas, en este caso, a través de una prótesis que sustituye la funcionalidad de miembros faltantes, sin embargo, uno de los mayores inconvenientes en su adaptación son los altos costos para la mayoría de personas, lo que conlleva desarrollar e implementar prototipos que logren sustituir funciones faltantes con el máximo grado de eficiencia y que además puedan cumplir, si bien no totalmente su propósito, si aquellas funciones más básicas.

Como se evidencia en los resultados obtenidos e ilustrados en las figuras 39 a 42, para la fase de construcción aún hace falta el diseño de cobertura, en donde, la distribución de cables que conectan cada uno de los componentes electrónicos no sea visible, y, además, ofrezca un diseño agradable para el paciente. De igual forma es necesario implementar un sistema de seguridad para los engranajes y poleas en la superficie.

Por otra parte, se evidencia que el sistema que implementa señales electromiográficas, impresión 3D y servomotores es hoy en día el más accesible a bajos costos, sin embargo, la oferta se ve limitada por unas cuantas empresas localizadas que escalan el precio de sus productos de 2000 USD - 5000 USD, con resultados no del todo satisfactorios en muchas ocasiones.

Para esta investigación es necesario hacer una relación de costos por cada pieza empleada en el diseño que permita identificar el valor total de la puesta en marcha y si este está por debajo del precio del mercado y de los referentes, además, de identificar oportunidades de mejora.

Asimismo, es necesario incorporar en futuras investigaciones una fase adicional de programación que permita evaluar mejoras en la implementación del ensamblaje en conjunto, y explorar el uso del aprendizaje máquina como herramienta que facilite la lectura de señales electromiográficas, y por lo tanto la adaptación del paciente al dispositivo.

6. REFERENCIAS

- Arias, L. (2012). Biomecánica y patrones funcionales de la mano. *Revista Universidad Nacional de Colombia-UNAL*.
- Coogley, W. (2018). Biomimetic mechatronic hand. *Nilheim Mechatronics*.
- Espinosa, F. (2019). Desarrollo de un prototipo de mano robótica utilizando mecanismos metamórficos. *Universidad Tecnológica De La Mixteca*.
- Group, T. C. O. (2015). A patient's guide to hand anatomy.
- L.Gila (2020). Procesamiento y análisis de señales electromiográficas. *Anales del Sistema Sanitario de Navarra*, 32:27 – 43.
- Maw, J., Wong, K. Y., and Gillespie, P. (2016). Hand anatomy. *British Journal of Hospital Medicine*, 77:C34–C40.

Morton D.A., & Foreman K, . A. K. (2011). *The Big Picture: Gross Anatomy*. McGraw Hill.

Pérez, M. (2011). Análisis cinemático e implementación de una mano robótica servoarticulada aplicable como prótesis. *Instituto Politécnico Nacional*.

Panigua, Fredy & Ramos, M. (2015). Prótesis de mano robótica adaptada para movimientos simples Útil a pacientes con amputación transradial. *Universidad de San Carlos de Guatemala*.

Pérez, R. (2012). Prototipo de mano robótica antropométrica sub-actuada. *Universidad de Antioquia*.

Riihimäki, Hilkka & Viikari, E. (2000). Sistema musculoesquelético.

Vergara, & Serrano J, . C. P. . R. C. . P. A. (2013). Resultados de un trabajo de campo sobre agarres utilizados en tareas cotidianas. XIX Congreso Nacional De Ingeniería Mecánica.