

# Biomecánica de la mano

Mauricio Martinez Tovar  
Monica Rangel Guerra

Diego Alexis Limón Báez  
Idalia Rivera Del Angel

Alan Magdiel Villa Herrera  
Adrian Isaac Gomez Ocon

2 de septiembre de 2022

## Resumen

La mano es un órgano de gran importancia ya que nos ayuda tanto a sentir como a manipular diferentes elementos de nuestro entorno. En este trabajo nos centraremos en conocer su estructura y funcionamiento para así entender cómo funcionan las prótesis de mano y cuales son los diferentes tipos de prótesis que existen.

## 1. Introducción

La mano humana ha sido considerada una de las herramientas más precisas y versátiles de la historia, es por esto, que ante la ausencia de una de estas extremidades, se hace necesario el desarrollo de la prótesis y de técnicas de ingeniería que permitan aproximar estos elementos externos al funcionamiento de la mano humana.

En este trabajo hablaremos sobre la biomecánica de la mano y sobre como es que esta se compone internamente, buscando entender las estructuras de los músculos, huesos y tendones que hacen posible el movimiento de esta. Para ello hablaremos de las diferentes partes que componen la anatomía de la mano y veremos cuales son algunas de las limitaciones de movimiento que tiene. Posteriormente hablaremos sobre como es que se realiza el movimiento de esta parte del cuerpo y como es que este puede ser reproducido por medio de diferentes mecanismos para la creación de prótesis.

Por otro lado, discutiremos los diferentes tipos de prótesis y las diferentes formas en las que estas pueden ser clasificadas. Veremos las clasificaciones más importantes y que es lo que hace que una prótesis entre en una categoría u otra, para esto veremos algunos ejemplos de prótesis y hablaremos también sobre la electrónica requerida para la creación de prótesis.

## 2. Desarrollo

### Biomecánica de la mano

La mano humana se reconoce como un órgano sensorial y motor necesario para el trabajo, en la manipulación de objetos volumétricos, controlado desde la corteza cerebral[4].

#### Eje de los dedos.

Los componentes necesarios para la flexión – extensión, son las falanges que cuentan con una distancia de separación entre sí y su eje neutro como referencia que atraviesa por el dedo medio. Con esta teoría sobre el eje, se pueden interpretar los ángulos de flexión entre los 30 a 40 grados, esto depende de las variaciones individuales fisiológicas[6].

#### Dedo Pulgar.

El pulgar tiene como función generar diferentes tipos de movimientos para flexión llegando a ser el más útil para, el movimiento de pinzas, debido a la localización estratégica que ocupa dentro de la mano humana, se mueve de forma independiente alcanzando ángulos de 50 a 90 grados en el plano YZ, y de 40 a 50 grados al plano XZ, respecto al eje neutro, además la rotación en su propio eje[4].

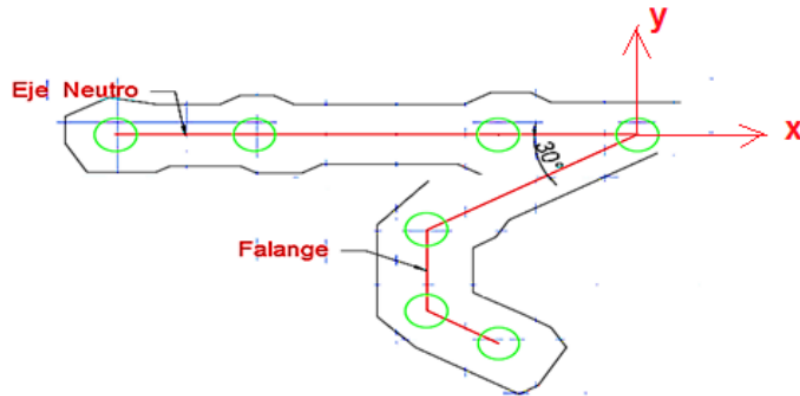


Figura 1: Ángulo de flexión respecto al eje neutro de la mano humana [6].

#### Falanges.

Las falanges son fundamentales para el diseño del mecanismo de la prótesis, puesto que se utilizará como puntos de referencia para el estudio de fuerzas de flexión – extensión, dinámica y cinemática. La mano humana cuenta con tres tipos de falanges estas son distal, medial, proximal[2].



Figura 2: Arquitectura básica de la mano[2].

#### **Mecanismos para mover los dedos**

##### Moviente para la extensión y flexión corta de los falanges.

Las prótesis mecánicas utilizan el mecanismo de poleas, ya que el movimiento de extensión y flexión en los dedos actúan entre las poleas (A) y los cables que tensan (B). Es adecuado colocar las poleas en la posición de las articulaciones, sobre ellas atraviesa el cable, que en uno de sus extremos está fijo al falange, el otro extremo está conecta a la salida del sistema. Algunos diseños de prótesis optan por utilizar un solo cable en cada dedo con el objetivo de disminuir los componentes y que sean más ligeras para el usuario. Se puede reemplazar dicho mecanismo de poleas con el uso de resortes para extensión del dedo solo trasmite cargas relativamente pequeñas además se debe revisar continuamente la tensión del cable ya que con el constante uso pierde las propiedades del material[4].

##### Mecanismo para mover el dedo pulgar.

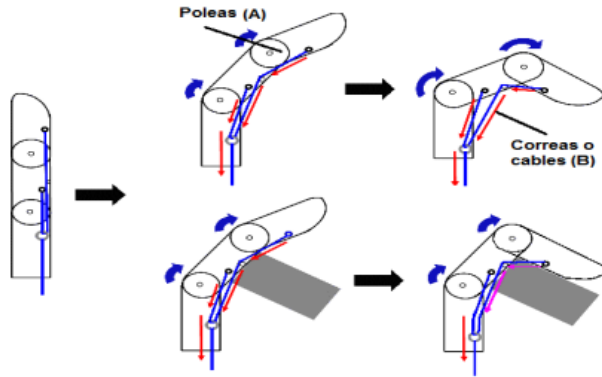


Figura 3: Articulaciones de acoplamiento por cables para los cables[4].

Un actuador, que puede ser un motor eléctrico, acciona tres articulaciones y sus movimientos entre conectada por un mecanismo de Rueda de Génova o también se le conoce como la Cruz de Malta, la misma que hace que el pulgar se flexione y por el otro lado, se ponga en posición opuesta a los dedos[4].

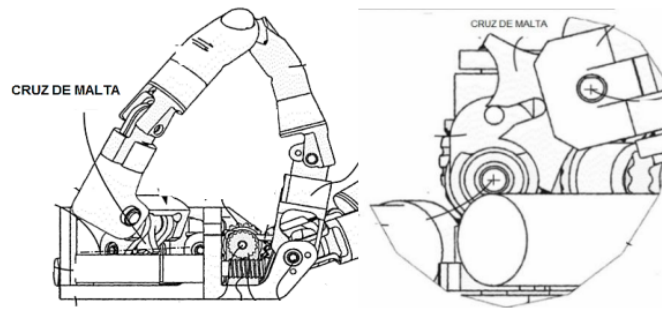


Figura 4: Esquema de la Rueda de Génova en el accionar del dedo pulgar[4].

Por la complejidad para generar el movimiento de rotación y traslación del dedo pulgar se opta por acudir a varios diseños de mecanismos que se encuentran presentes dentro de las prótesis mecánicas, esta acción puede simular llegando un conjunto de componentes que involucra engranes, poleas y una guía para ejecutar un movimiento similar[4].

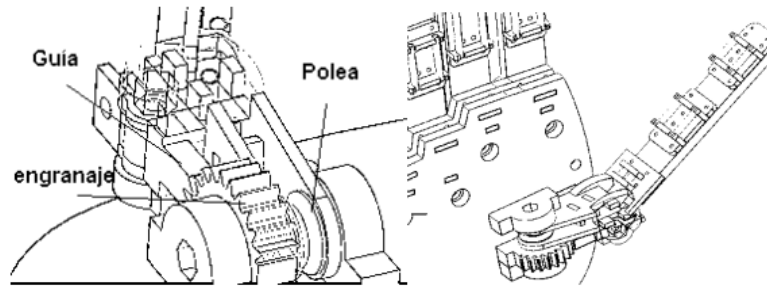


Figura 5: Esquema de la Rueda de otro mecanismo para mover el dedo pulgar[4].

## Tipos de prótesis

Las prótesis de mano se pueden clasificar según el material, la funcionalidad, el mecanismo de actuación, la apariencia, el nivel de amputación o por el precio[1].

Las prótesis van diseñadas a las capacidades físicas y cognitivas del paciente, la selección inicial de los componentes protésicos es muy importante, las prótesis de los miembros pueden ser exoesqueléticas o endoesqueléticas:

Cuadro 1: Comparación de prótesis exoesqueléticas y prótesis endoesqueléticas.

Prótesis exoesqueléticas	Prótesis endoesqueléticas
Tienen una estructura plástica externa rígida con la forma del miembro. Son fijas en forma permanente y no son ajustables. Las prótesis exoesqueléticas son más duraderas y se prefieren principalmente cuando la prótesis puede estar expuesta a condiciones ambientales adversas, como daños por impacto durante el trabajo físico o un entorno cáustico[8].	Tienen una estructura esquelética interna central que incluye componentes modulares y acoplamientos que proporcionan un ángulo ajustable en los tres planos y facilitan la extracción de los componentes dañados. El sistema endoesquelético a menudo está cubierto con un material blando que posee la forma del miembro y una piel sintética aplicada sobre la forma anatómica[8].

Como se está hablando de la prótesis de una mano, está dentro de las prótesis de miembro superior, la mano humana es compleja y usualmente se necesitan dos prótesis diferentes para una función óptima para las actividades diarias generales y para actividades específicas.

Hay 5 tipos generales de prótesis del miembro superior:

- Prótesis pasivas:  
Ayudan al equilibrio, la estabilización de objetos (como un papel al escribir) o actividades recreativas/vocacionales. Parecen un miembro natural, son las más ligeras y económicas, pero no permiten la prensión activa de las manos.
- Prótesis de control corporal:  
Tienden a ser menos costosas, más duraderas y requieren menos mantenimiento. Un sistema de cable con arnés suspende la prótesis y captura el movimiento escapular y humeral para operar la articulación del gancho, la mano o el codo. Algunos sistemas usan el brazo opuesto para activar una función particular; un extremo de una correa rodea el brazo opuesto en la axila, y el otro extremo se conecta a un cable que controla el dispositivo terminal (gancho, mano o dispositivo especializado para una función en particular). Las personas que realizan trabajo físico suelen preferir este tipo.
- Prótesis mioeléctricas alimentadas externamente:  
Permiten movimientos activos de las manos y las articulaciones sin necesidad de movimientos escapulares,

humerales o del tronco. Los sensores y otras entradas detectan el movimiento muscular del miembro residual o la parte superior del cuerpo y controlan actuadores eléctricos que proporcionan una mayor fuerza de prensión que las prótesis de control corporal.

- Prótesis híbridas:

Por lo general, se prescriben para amputaciones de las porciones proximales de los miembros superiores. Combinan características específicas de las prótesis de control corporal y las mioeléctricas, por ejemplo, un codo de control corporal podría combinarse con una mano activada por energía externa o un dispositivo terminal.

- **Prótesis específicas para cada actividad:**

Diseñadas para permitir la participación en actividades que de otro modo dañarían el miembro residual del paciente o la prótesis habitual, o en situaciones en las cuales la prótesis habitual no funcionaría de manera eficaz. Estas prótesis a menudo incluyen diseños especiales para la interfaz, el receptáculo, el sistema de suspensión y el dispositivo terminal. Los dispositivos terminales específicos para la actividad pueden permitir al paciente sostener un martillo y otras herramientas, un palo de golf o un bate de béisbol, o colocarse un guante de béisbol. Otros ayudan en diversas actividades específicas (p. ej., natación, pesca). Estos dispositivos pueden ser pasivos o controlados por el amputado.

Por último las prótesis se pueden clasificar todavía dependiendo de su tamaño:

1. **Prótesis de mano parcial:**

Las amputaciones de mano parcial varían desde un solo dedo o múltiples dedos hasta amputaciones carpo-metacarpianas; la flexión y la extensión de la muñeca generalmente se conservan. La restauración protésica funcional es posible cuando falta toda la mano o uno o más dedos utilizando energía mecánica o externa. La prensión y la oposición a menudo se pueden lograr si se oponen de alguna manera los dedos naturales y los protésicos.



Figura 6: *Prótesis de mano parcial.*

2. **Prótesis para la desarticulación de la muñeca:**

La amputación de desarticulación de la muñeca elimina todos los huesos del carpo, sin dejar capacidad para flexionar o extender la muñeca. La pronación y la supinación se retienen en su mayor parte. Se puede utilizar una prótesis de mano, un gancho o un dispositivo terminal de actividad especial. Se pueden usar dispositivos pasivos, de control corporal o de control externo (mioeléctricos).



Figura 7: *Prótesis para la desarticulación de la muñeca*

3. **Prótesis por debajo del codo:**

Las amputaciones transradiales/cubitales pueden ser largas , medianas o cortas. Las amputaciones largas y medianas pueden retener parte de la pronación y la supinación. Se pueden usar dispositivos pasivos, de control corporal o de control externo.



Figura 8: *Prótesis por debajo del codo*

4. **Desarticulación del codo y prótesis por encima del codo:**

La desarticulación del codo y las prótesis por encima del codo requieren un codo mecánico. Las prótesis para la desarticulación del codo generalmente emplean la potencia del cuerpo para flexionar el codo (la gravedad extiende el codo) y el control mioeléctrico del dispositivo terminal. Dos bisagras externas en el codo están unidas al exterior del receptáculo de plástico. Hay muchas combinaciones de sistemas de codo y de control.

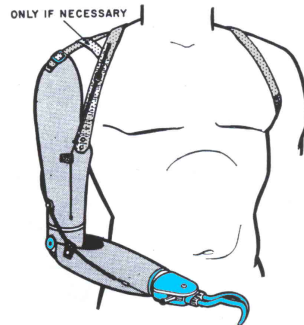


Figura 9: *Desarticulación del codo y prótesis por encima del codo*

5. **Desarticulación del hombro y prótesis interescapular/para el cuarto delantero:**

La disipación de calor, la distribución del peso y la comodidad son de suma importancia. La superficie de contacto puede ser de plástico rígido o flexible, o un material de almohadilla de gel como la silicona. Las prótesis más funcionales para estos niveles de amputación generalmente incluyen control mioeléctrico de una o más articulaciones y del funcionamiento de la mano.



Figura 10: *Desarticulación del hombro y prótesis interescapular/para el cuarto delantero*

### **Electrónica de la prótesis**

La electrónica de las prótesis de manos es medianamente compleja pues para que se puedan realizar o simular los movimientos realizados por una mano común se necesitan de muchos actuadores, motores y servomotores de alta precisión además de contar con cierto grados de libertad dependiendo del modelo de la prótesis los cuales hacen que los falanges puedan moverse como deben. Dependiendo de la fuerza que se necesite en las articulaciones de la mano y será el toque necesario el cual será proporcionado por un servomotor con las especificaciones necesarias en torque.

Cuando se tiene prótesis de manos es necesario primero captar las señales de control del antebrazo el en el cual se encuentran los tendones que mueven los dedos de las manos. Estas señales electromiográficas (EMG) necesitan de un circuito eléctrico el cual capte y convierta esas señales EMG en señales de voltaje que puedan ser captadas por los motores y servomotores.

En la figura 11 se muestra un diseño de un circuito de amplificadores INA128 para la señal de electrodos, un OPA6204 para reducir ruidos además de un filtro pasabandas de pasa altas de 20 Hz y un pasa bajas de 452 Hz de segundo orden con respuesta Butterworth [1].

La función principal de filtro pasabandas es limitar el ancho de banda de la señal dependiendo del diseño de los dos filtros pasa bajas y pasa altas. El amplificador en configuración no inversora OPAMP TL084 genera una ganancia de 160 veces la entrada. Se necesitan tener ganancias muy altas debido a que hay que pasar de valores de micro volts a valores de 2.5 V aproximadamente los cuales son necesarios para el activamiento de circuitos electrónicos. La lectura para la conversión de señales analógicas a digitales para el posterior movimiento de los servomotores se puede hacer por medio de una placa controladora Arduino.

Una de las formas más simples para hacer que los servomotores se activen según los grados que deseamos es haciendo uso de placas controladoras Arduino con las cuales brindan mucha versatilidad para este tipo de aplicaciones de prótesis. Los servomotores necesitan una señal de reloj o PWM por medio del cual pueden funcionar. Es necesario también cargar un programa el cual le diga al microcontrolador del Arduino cuántos grados moverse al servomotor por medio de las señales ya procesadas por el arreglo de OPAMP [5]. Los microcontroladores son el cerebro de toda prótesis de manos y el código el cual da las instrucciones para mover cada parte del dedo es parte fundamental junto con la electrónica para que el sistema funcione correctamente. En la figura 12 se muestra un ejemplo de prótesis haciendo uso de Arduino y servomotores.

En la mayoría de los modelos mioeléctricos de manos se hace uso de los amplificadores operaciones y de sus diferentes configuraciones ya sea como amplificadores, divisores o reguladores. Los motores tipo servo son un mecanismo



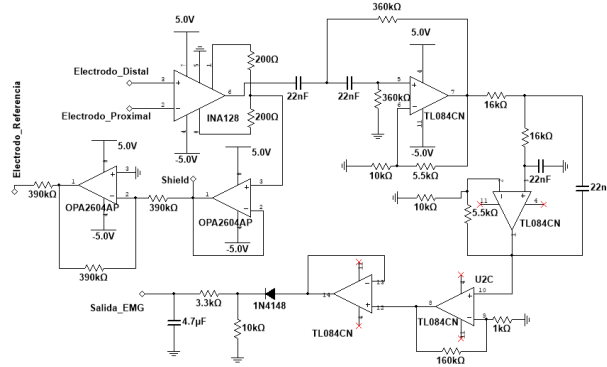


Figura 11: Circuito receptor EMG con amplificadores

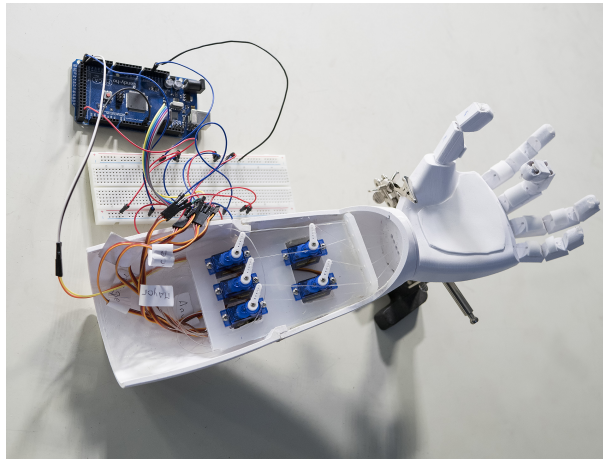


Figura 12: Prótesis mioeléctrica con servomotores y Arduino

primordial y también todo aquel circuito o que haga la función de regulador y amplificador de voltaje. Algunas prótesis incluyen sensores en sus diseños como por ejemplo sensores de fuerza para conseguir una retroalimentación.

### 3. Simulación

Con el uso de softwares de ingeniería y las simulaciones dinámicas, se destaca el artículo “ OVERALL DESIGN AND IMPLEMENTATION OF THE VIRTUAL GLOVE” (Placidi, Avola, Iacoviello, Cinque, 2013), en el cual los autores presentan el diseño e implementación de un guante virtual para rehabilitación, para esto se parte de la caracterización de la mano humana empleando un modelamiento por estructuras y juntas, el cual como se observa en la Figura 13, permite realizar el análisis cinemático y dinámico tal como a un robot articulado de 3 grados de libertad, posterior a esto se generan las respectivas simulaciones estáticas y dinámicas, para la validación del modelo. De este artículo se destaca el método obtención del modelo matemático de la mano humana y sus diferentes representaciones.

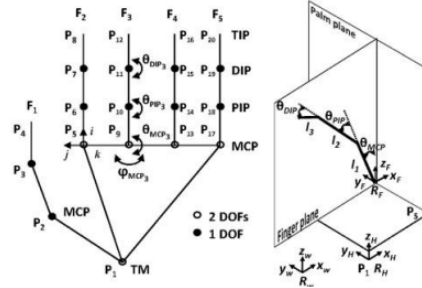


Figura 13: Representación del método de obtención del modelo cinemático de la mano humana.

También se destaca el artículo “ANALYZING, MODELING AND SIMULATION OF HUMANOID ROBOT HAND MOTION” (Virgala, Kelemen, Varga, Kurylo, 2014), en el cual se observa el proceso de análisis, modelamiento y simulación del movimiento de una mano robótica, para lo cual los autores parten del análisis morfológico, posteriormente se genera un modelo dinámico, el cual es expresado en forma de diagrama de bloques en el entorno Simulink (Figura 14). En este se observa que los elementos que componen la estructura mecánica son representados como bloques, también los sensores, los actuadores lineales y rotacionales, y los métodos de generación de las simulaciones dinámicas (Figura 15), los cuales permiten validar el funcionamiento del modelo propuesto mediante la visualización del comportamiento de la estructura diseñada ante diferentes entradas al sistema.

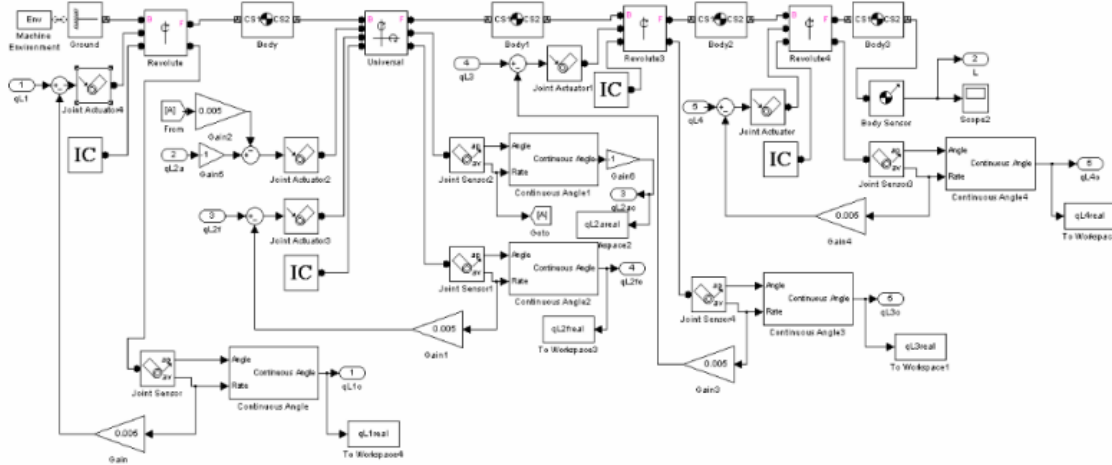


Figura 14: Representación gráfica del modelo cinemático de la mano humana.

Se desarrolla un modelo cinemático y dinámico de la mano humana, para esto se plantea una representación esquemática que facilite el proceso de análisis e interpretación de la estructura, respetando su funcionamiento.

La imagen médica permite realizar la evaluación del crecimiento del paciente basado en las longitudes, espesores y separaciones entre los huesos de la mano. Por ello, se desarrollan atlas que indican los procedimientos de análisis de las dimensiones de la mano y exponen imágenes de referencia para determinadas edades. Teniéndose el carpograma de referencia, se importa dicha imagen a SolidWorks, con el fin de realizar el análisis de dimensiones correspondiente. Primero se determinan los puntos de análisis para cada hueso de la mano, acorde a las recomendaciones dadas en “Hand Bone Age – A Digital Atlas of Skeletal Maturity”, obteniéndose una imagen con puntos de referencia (Figura 16).

Posteriormente, se extienden líneas entre los puntos de análisis para cada una de las cadenas cinemáticas que componen la mano, esto con el fin de aproximar la imagen del carpograma de referencia a la representación esquemática, y así poder dimensionar la representación esquemática. Una vez hecho esto, se obtiene la imagen que se observa en la Figura 17.

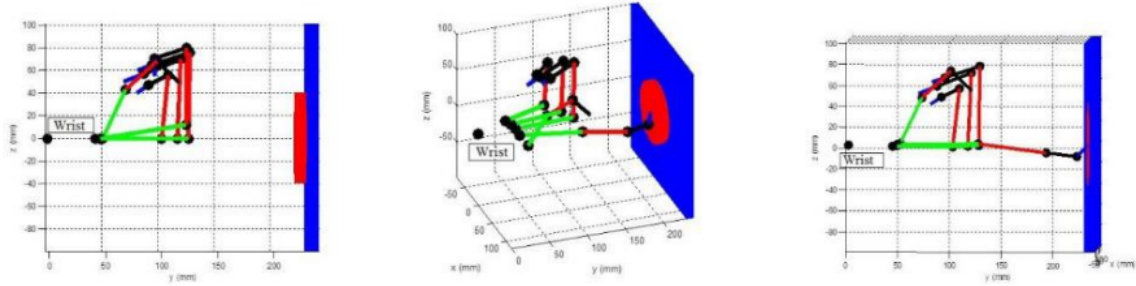


Figura 15: Simulaciones del posicionamiento de la mano robótica diseñada.

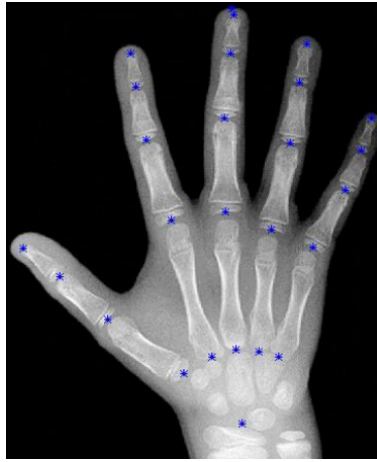


Figura 16: Carpograma de referencia con adición de puntos de análisis.

Una vez que se tiene el modelo cinemático que representa el comportamiento de la mano humana, se genera una estructura CAD, que cumpla con el modelo cinemático desarrollado.

La programación se basa en el principio de análisis de “Eslabón-Juntura” y los parámetros de Denavit-Hartenberg, en donde es necesario establecer los puntos de junta o “Link”, sobre los cuales se establecen los parámetros; además de definir el funcionamiento físico de la junta (rotación o traslación). Posteriormente, se establece una conexión entre las juntas definida “SerialLink”, construyéndose así la cadena cinemática abierta.

Para lograr la ubicación de la cadena cinemática dentro de una estructura, se hace necesario definir un punto de ubicación y una orientación para la base de dicha cadena. Este procedimiento, se realiza para cada una de las 5 cadenas cinemáticas abiertas que componen la mano, teniendo presente que debe definirse una base diferente para cada cadena cinemática, ya que cada una posee una orientación diferente, posteriormente, se enlaza cada base con un punto de referencia (muñeca), mediante un vector en el espacio con origen en la muñeca.

Una vez generadas todas las cadenas cinemáticas con su respectiva base, y enlazadas con el punto de referencia (muñeca), se emplean las herramientas de simulación en 3D ‘SerialLink.plot’ para visualizar los resultados. De igual manera, se calculan las coordenadas en el espacio del elemento terminal de cada dedo de la estructura CAD, respecto al punto de referencia muñeca, evaluando así, si se cumple el modelo cinemático planteado.

La Figura 18 muestra la simulación de la estructura CAD de una cadena cinemática desde el punto de referencia hasta el efector final del dedo.

Una vez se unen las demás cadenas cinemáticas y se ubican correctamente en el espacio, se obtiene una simulación como la mostrada en la Figura 19 [7].

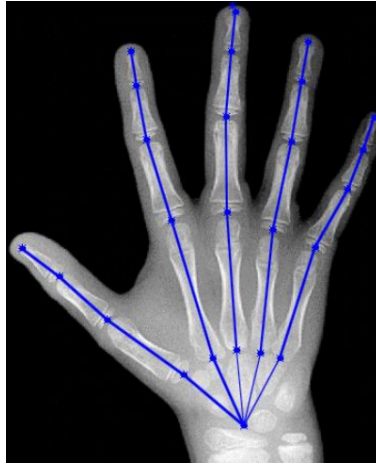


Figura 17: Carpograma de referencia con adición de líneas representando cada cadena cinemática.

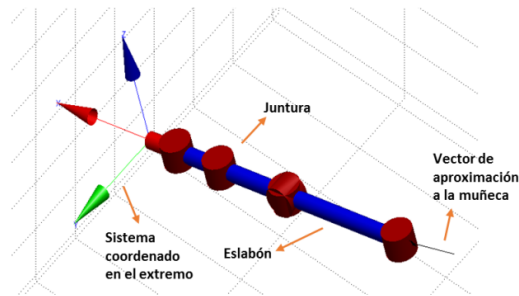


Figura 18: Estructura CAD de una cadena cinemática abierta.

## 4. Costos

Como hemos visto existe una gran variedad de prótesis, cada una con sus ventajas, desventajas y capacidades específicas, por lo que los precios de las prótesis varía dependiendo de si es una prótesis parcial, de mano, o si se requiere también prótesis para el codo u hombro. Pero también dependerá en gran medida de la tecnología que la prótesis implemente. En la actualidad existen muchas tecnologías tales como la impresión 3D, las cuales han abaratado mucho los costos de las prótesis, permitiendo incluso la creación de prótesis de muy bajo costo. Sin embargo, una prótesis profesional puede llegar a tener un costo muy elevado, el cual puede ir de los 4,000 a los 75,000 dólares [3]. Este alto costo es en muchas ocasiones una gran barrera para muchas personas que buscan obtener una de estas prótesis, por lo que a lo largo de los años se han realizado diseños, y estudios para la creación de prótesis, un ejemplo de esta es la prótesis impresa en 3D con interfaz mioeléctrica de un solo canal llamada Mark V. Esta es una prótesis con un precio relativamente bajo de 1,500 dólares [3]. Esto nos muestra que pese a no tener la misma tecnología que las prótesis más caras, actualmente se pueden fabricar prótesis de un costo relativamente bajo que permite a los usuarios recuperar una gran cantidad de movilidad por una fracción de precio de las prótesis de alta gama.

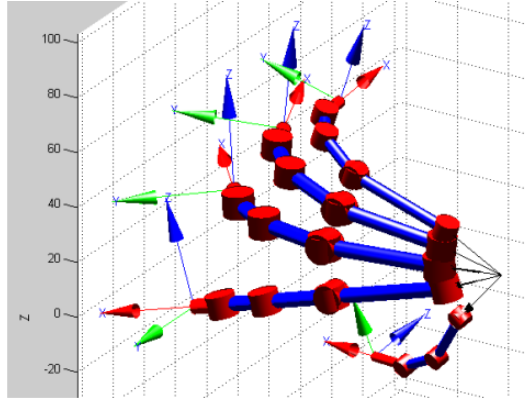


Figura 19: Simulación estructura CAD mano humana.

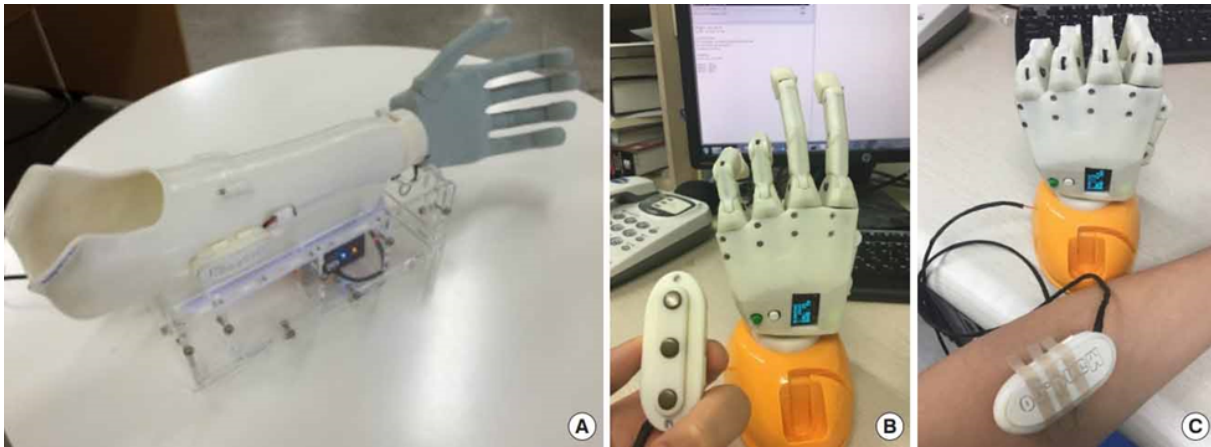


Figura 20: Prótesis impresa en 3D MarkV

## 5. Conclusiones

El desarrollo de las prótesis, así como la evolución en su diseño y los procesos de manufactura concernientes en su fabricación está directamente relacionado con el avance en el desarrollo y manipulación de materiales empleados por el hombre, así como también al desarrollo tecnológico y la comprensión de la mecánica del funcionamiento del cuerpo humano.

En el desarrollo de este trabajo pudimos aprender la importancia que tiene la mano tanto sensorial como motrizmente, además de que pudimos aprender sobre las diferentes partes que la componen y como es que las fuerzas generadas por los músculos generan la flexión y movimiento de esta. Al ser un órgano tan importante a nivel motriz, existe una gran variedad de prótesis, las cuales hacen uso de una gran variedad de instrumentos y métodos para lograr reproducir el movimiento de este órgano y también para detectar los posibles movimientos que se quieran hacer. Actualmente debido a la gran cantidad de tecnología que existe es posible realizar prótesis funcionales que puedan imitar el movimiento del órgano perdido, sin embargo, estas están lejos de ser perfectas debido a varios factores, siendo algunos de ellos que la prótesis no es capaz de reaccionar de la misma forma y a la misma velocidad que la mano original, además de que aquellas que tienen mejores capacidades tienden a ser muy costosas, por lo cual aún existe una gran área de oportunidad de mejora para estos instrumentos.

## Referencias

- [1] EsMachina. Prótesis de mano en la actualidad, Enero 2021.
- [2] D. Guzmán. Sistema mecánico para prótesis mioeléctricas de mano, Mayo 2003.
- [3] P. Chan Yong J. Lee E. Jeong I. Ku, G. K Lee. Clinical outcomes of a low-cost single-channel myoelectric-interface three-dimensional hand prosthesis, Octubre 2017.
- [4] Thalia San Antonio Luis Alejandro Garcés Yancha. Diseno de un mecanismo para controlar el movimiento de flexión extensión corta para los dedos de una protesis de mano), Febrero 2018.
- [5] Maria J. Lopez Morrillo. Diseño de protesis de mano servoactuada y fabricacion de prototipos con tecnicas de impresion 3d, Junio 2019.
- [6] G. Puchhamer. Hand prosthesis comprising two drive device, Enero 2013.
- [7] C. D Rodríguez Rincón. Modelamiento y simulación del movimiento de la mano humana, empleando herramientas cae, Octubre 2016.
- [8] Jan J. Stokosa. Opciones para las prótesis de los miembros, Enero 2021.