



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE  
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**DESARROLLO MECATRÓNICO DE UNA MANO ARTIFICIAL  
CON PROPÓSITOS BIOMÉDICOS: PARTE MECÁNICA**

# **T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**PRESENTA:**

**ING. JOSÉ ÁNGEL ESPINOZA ARCEO**

**ASESOR:**

**DR. IGNACIO JUÁREZ CAMPOS**

**COASESOR:**

**DR. MARCELO LÓPEZ PARRA**



**MORELIA, MICHOACÁN,**

**AGOSTO 2008**

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

---

## AGRADECIMIENTOS

Primeramente quiero agradecer a *Dios*, por acompañarme 27 años de mi vida y darme fortaleza para cumplir uno más de mis sueños.

A mi madre *Ma. Elena* quien es la luz de mi vida, por su apoyo incondicional en los momentos más difíciles de mi vida, **GRACIAS MAMÁ**. A mi padre *José Angel* que en gloria esté, quien fue mi gran amigo y por enseñarme que el esfuerzo vale la pena. También quiero agradecer con todo mi corazón a mis hermanos *José Juan* y *Erendirá Soraya* por confiar en mí, muchas gracias.

A la familia *Arceo Valencia*, muy en especial a mi tía *Elpidia*, gracias por su apoyo y por creer en mí.

Como podría olvidar a la familia *Espinoza Jacobo*, gracias por su confianza y consejos que me han ayudado a fortalecerme como persona.

A mis inolvidables compañeros *Carlos, Edgar, Edgar Eduardo, Mauricio, Hugo, Edmundo, Alejandro, Paola*, y al resto de mis amigos quienes saben que si los nombro a todos necesitaría otras dos hojas, gracias por la experiencias compartidas y por el apoyo infalible que me brindaron en los momentos difíciles.

Al *Dr. Ignacio Juárez Campos* y al *Dr. Marcelo López Parra*, asesor y coasesor del presente trabajo por su valiosa colaboración y el tiempo empleado en la elaboración de este proyecto. Gracias por su apoyo y comprensión ante las distintas dificultades acontecidas durante todo este periodo.

A la *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*, que es cuna de grandes nicolaítas, por el apoyo recibido durante mi formación profesional y por permitirme ser parte de esta gran casa de estudios.

Gracias a todas las personas que de alguna manera han contribuido en el desarrollo de este proyecto.

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

---

## ÍNDICE

### Resumen

<b>Capítulo I. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Perspectiva histórica	2
1.1.1 Arquitectura de los robots	3
1.1.2 Historia de las prótesis	6
1.1.3 Marco teórico	
1.1.3.1 La mano humana	8
1.1.3.2 Movimientos de la mano humana	11
1.1.4 Estado del arte	13
1.2 Justificación	16
1.3 Objetivo	
1.3.1 Objetivo general	17
1.3.2 Objetivos específicos	17
1.4 Establecimiento de hipótesis	18
1.5 Estructura de la tesis	18

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

---

## Capítulo II. Diseño del Sistema Mecánico 19

2.1 Metodología de Diseño para la Mano Artificial	20
2.2 Análisis de la Necesidad	32
2.3 Especificaciones	32
2.4 Diseño de la mano artificial	34
2.5 Estructura cinemática de la mano artificial	38
2.6 Mecanismo de cuatro barras articuladas	39
2.6.1 Ley de Grashof	40
2.6.2 Síntesis del mecanismo de cuatro barras cruzado	40
2.6.3 Algoritmo genético	51

---

---

## Capítulo III. Pruebas de Laboratorio 56

3.1 Experimentos	
3.1.1 Análisis por computadora del movimiento de la mano artificial	57
3.1.2 Prensión que realiza la mano artificial	58
3.2 Resultados	
3.2.1 Resultado del algoritmo genético	61
3.2.2 Comparación de la mano artificial con el órgano terminal antropomorfo desarrollado en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la UMSNH	62

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

---

3.3 Discusión	64
<b>Capítulo IV. Conclusiones</b>	<b>66</b>
4.1 Conclusiones generales	67
4.2 Trabajo a Futuro	68
<b>Referencias</b>	<b>69</b>
<b>Apéndices</b>	<b>72</b>

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

1.1, Fotografía de robot androide	3
1.2, Modelo de robot móvil	4
1.3, Fotografía robot industrial	4
1.4, Fotografía de prótesis de mano	5
1.5, Humanoide festo	5
1.6, Cinemática de la mano humana	9
1.7, Estructura ósea de la mano humana	10
1.8, La mano humana	12
1.9, Fotografía de ma-I	13
1.10, Fotografía shadow dexterous hand	14
1.11, Fotografía de gifu hand III	15
1.12, Fotografía the i-limb hand	15
2.1, Diagrama de IDEF0	20
2.2, Diagrama del diseño de una mano artificial	21
2.3, Diagrama de las actividades perteneciente al diseño de una mano artificial	23
2.4, Diagrama de las actividades perteneciente a la clarificación de la tarea	24
2.5, Diagrama de las actividades perteneciente al diseño Conceptual	25

## **Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.**

---

---

2.6, Diagrama de las actividades perteneciente a la optimización del concepto seleccionado	28
2.7, Diagrama de las actividades perteneciente al diseño de Detalle	30
2.8, Esquema final de la prótesis	36
2.9, Modelo de la mano artificial	37
2.10, Algunas configuraciones del mecanismo de cuatro barras	39
2.11, Configuración del mecanismo de cuatro barras cruzado	40
2.12, Representación del mecanismo de cuatro barras cruzado en un dedo de la mano artificial	41
2.13, Diagrama del mecanismo	42
2.14, Diagrama del mecanismo en posición inicial	42
2.15, Diagrama del mecanismo en posición intermedia	43
2.16, Diagrama del mecanismo en posición final	44
3.1, Modelo virtual de la mano artificial	57
3.2, Oposición pulgar-índice de la mano humana	58
3.3, Prensión cilíndrica	59
3.4, Prensión esférica	59
3.5, Prensión palmar	60
3.6, Algoritmo genético	61
3.7, Mano artificial	62
3.8, Órgano terminal antropomorfo	62

**Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con  
propósitos biomédicos: Parte mecánica.**

---

---

**ÍNDICE DE TABLAS**

2.1, Dimensiones de la mano artificial	34
2.2, Articulaciones y rangos de movimiento de la mano artificial	38
3.1, Posición de los elementos de la mano artificial para realizar la presión cilíndrica	59
3.2, Posición de los elementos de la mano artificial para realizar la presión esférica	60
3.3, Posición de los elementos de la mano artificial para realizar la presión palmar	60
3.4, Longitud de los eslabones del mecanismo de cuatro barras Cruzado	61

# **Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.**

---

---

## **RESUMEN**

En este trabajo se analizan los movimientos que realiza la mano humana para asir objetos, esto con la finalidad de diseñar una prótesis con propósitos biomédicos que tenga la funcionalidad equiparable a las funciones que realiza la mano del hombre, obteniendo una aproximación en funcionalidad comparable con la mano humana. El diseño está acotado por las limitaciones de una prótesis convencional, tales como bajo peso, durabilidad y una buena apariencia.

La mano artificial cuenta con cuatro dedos, que en total suman once grados de libertad (GDL); la prótesis es accionada por cables, los cuales simulan a los tendones de la mano humana. En la configuración de tres de los cuatro dedos de la anatomía de la mano artificial, se implementa un mecanismo cruzado de cuatro barras articuladas que cumple con ciertas características de movimiento.

Tomando en cuenta el diseño antes mencionado, se manufacturó un primer prototipo de uno de los dedos de la mano artificial, en el cual se hicieron pruebas para corroborar los resultados del diseño, esto es, la flexión debido al trabajo efectuado sobre el tendón artificial. En esas pruebas se detectaron ciertos puntos débiles, los cuales se corrigieron y con esto se produjo otro nuevo diseño y su resultante prototipo con una forma más antropomorfa.

*CAPÍTULO I.*

**INTRODUCCIÓN**

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

## 1.1 Perspectiva histórica

La palabra robot se usó por primera vez en el año 1920, cuando el escritor checo Karel Capek (1890 -1938) estrena en el teatro nacional de Praga su obra **Rossum's Universal Robot (R.U.R.)**. Su origen es de la palabra eslava **robot**, que se refiere al trabajo realizado de manera forzada y en ruso significa trabajo. La trama era sencilla: los robots son máquinas que se asemejan a los seres humanos, pero que trabajan sin descanso, creados en un principio para sustituir a los operadores humanos y que posteriormente, se vuelven contra la raza humana, exterminándola por completo de la faz de la tierra [1].

La mayoría de los expertos en Robótica afirmarían que es complicado dar una definición universalmente aceptada. Las definiciones son tan dispares como se demuestra en la siguiente relación:

- Ingenio mecánico controlado electrónicamente, capaz de moverse y ejecutar de forma automática acciones diversas, siguiendo un programa establecido.
- Máquina que en apariencia o comportamiento imita a las personas o a sus acciones como, por ejemplo, en el movimiento de sus extremidades.
- Un robot es una máquina que hace algo automáticamente en respuesta a su entorno.
- Un robot es un puñado de motores controlados por un programa de ordenador.
- Un robot es un ordenador con músculos.

Es indudablemente cierto, como se puede observar, que los robots son difíciles de definir. Sin embargo, no es necesariamente un problema el que no esté todo el mundo de acuerdo sobre su definición. Joseph Engelberg (padre de la robótica industrial) lo resumió inmejorablemente cuando dijo: *"Puede que no sea capaz de definirlo, pero sé cuándo veo uno"*[2].

La robótica es relativamente un nuevo campo dentro de la tecnología moderna que cruza los límites de la ingeniería tradicional [1]. Entendiendo la complejidad de los robots y sus aplicaciones que requieren conocimientos de ingeniería eléctrica, ingeniería mecánica, ingeniería industrial, informática, economía, y matemáticas, entre otras.

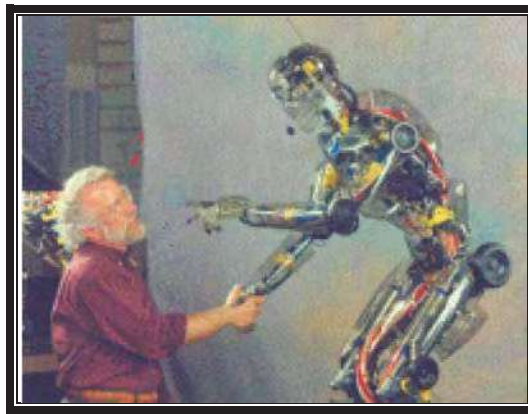
# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

## 1.1.1 Arquitectura de los robots

### ➤ Androides

Los androides son artilugios (aparatos de poca importancia) que se parecen y actúan como seres humanos (Fig. 1.1). Los robots de hoy en día vienen en todas las formas y tamaños, pero a excepción de los robots que aparecen en las ferias y espectáculos, no se parecen a las personas y por tanto no son androides. Actualmente, los androides reales sólo existen en la imaginación y en las películas de ficción.



*Fig. 1.1, Fotografía de robot androide*

### ➤ Móviles

Los robots móviles están provistos de patas, ruedas u orugas que los capacitan para desplazarse de acuerdo a su programación. Elaboran la información que reciben a través de sus propios sistemas de sensores y se emplean en determinado tipo de instalaciones industriales, sobre todo para el transporte de mercancías en cadenas de producción y almacenes (Fig. 1.2). También se utilizan robots de este tipo para la investigación en lugares de difícil acceso o muy distantes, como es el caso de la exploración espacial y de las investigaciones o rescates submarinos.

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---



*Fig. 1.2, Modelo de robot móvil*

## ➤ Industriales

Los robots industriales (Fig. 1.3) son mecánicos y electrónicos destinados a realizar de forma automática determinados procesos de fabricación o manipulación.



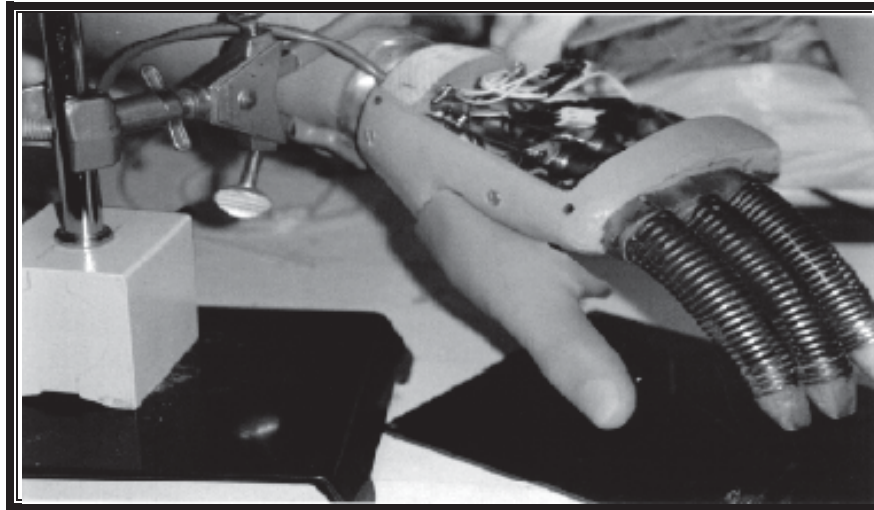
*Fig. 1.3, Fotografía robot industrial*

## ➤ Médicos

Los robots médicos son, fundamentalmente, prótesis para disminuidos físicos que se adaptan al cuerpo y están dotados de potentes sistemas de mando (Fig. 1.4). Con ellos se logra igualar con precisión los movimientos y funciones de los órganos o extremidades que suplen.

## Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

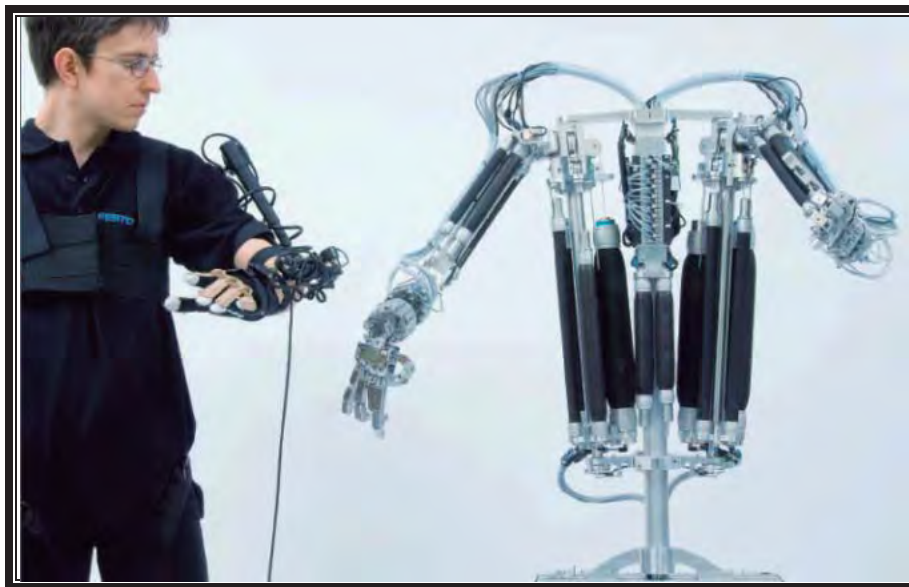
---



*Fig. 1.4, Fotografía de prótesis de mano*

### ➤ **Teleoperadores**

Los teleoperadores se controlan remotamente por un operador humano. Cuando pueden ser considerados robots se les llama "telerobots" (Fig 1.5). Cualquiera que sea su clase, los teleoperadores son generalmente muy sofisticados y extremadamente útiles en entornos peligrosos tales como residuos químicos y desactivación de bombas [3].



*Fig. 1.5, Humanoide festo*

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

---

## 1.1.2 Historia de las prótesis

Tomar un objeto y manipularlo es una actividad que parece muy natural, y hasta simple, ya que los humanos la realizan sin esfuerzo. Pero la realidad es que todo aquel que ha querido darle esta capacidad a una máquina ha descubierto que se trata de una tarea para nada fácil de implementar. Además de la cantidad de articulaciones que se necesitan para darle versatilidad a una mano artificial, se necesita sensibilidad táctil.

Una prótesis es un elemento desarrollado con el fin de mejorar o reemplazar una función, una parte o un miembro completo del cuerpo humano afectado, por lo tanto, una prótesis para el paciente y en particular para el amputado, también colabora con el desarrollo psicológico del mismo, creando una percepción de totalidad al recobrar movilidad y aspecto.

La primera prótesis de miembro superior registrada data del año 2000 a. C., fue encontrada en una momia egipcia; la prótesis estaba sujeta al antebrazo por medio de un cartucho adaptado al mismo.

*Marcus Sergius*, durante la Segunda Guerra Púnica (218-202 a. C.) fabricó una mano de hierro para él, con la cual portaba su espada, ésta es la primera mano de hierro registrada. En 1400 se fabricó la mano de *alt-Ruppin* construida también en hierro, constaba de un pulgar rígido en oposición y dedos flexibles. El uso del hierro en la fabricación de manos era tan demandante, que hasta *Goethe* da nombre a una de sus obras inspirado en el caballero germano *Götz von Berlichingen*, por su mano de hierro.

En el siglo XVI, el diseño del mecanismo de las prótesis de miembro superior se mejoró formidablemente, gracias al médico militar francés *Ambroise Paré*, quien desarrolló el primer brazo artificial móvil al nivel de codo, llamado "*Le petit Loraine*". Esta prótesis fue realizada para un desarticulado de codo. *Paré* lanzó la primera mano estética de cuero, con lo que da un nuevo giro a la utilización de materiales para el diseño de prótesis de miembro superior.

Con el manejo del cuero, los polímeros naturales y la madera en el siglo XIX el hombre logró fabricar prótesis de miembro superior; los resortes también contribuyeron en el desarrollo de nuevos mecanismos para la fabricación de

## Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

elementos de transmisión de fuerza, para la sujeción, entre las innovaciones más importantes al diseño de las prótesis, se encuentra la del alemán *Peter Beil*.

En el siglo XX, el objetivo era que los amputados regresaran a su vida laboral, entonces fue *Gripoulleau*, el que fabricó diferentes accesorios que podían ser usados como unidad terminal, tal es el caso de anillos, ganchos y diversos instrumentos metálicos, que brindaban la capacidad de realizar trabajo de fuerza o de precisión.

En el año de 1912, *Dorrance* desarrolló el *Hook*, que es una unidad terminal que permite abrir activamente, mediante movimientos de la cintura escapular, además se cierra pasivamente por la acción de un tirante de goma. Casi de manera simultánea fue desarrollado en Alemania el gancho *Fischer* cuya ventaja principal era que poseía una mayor potencia y diversidad en los tipos de prensión y sujeción de los objetos.

Cinco años más tarde en Estados Unidos se fundó la "*American Limb Makers Association*", lo que produjo una revolución en los materiales empleados para la construcción de prótesis, volviéndose estos metales más ligeros y dúctiles. En esta época se generaliza la utilización de fibras sintéticas, polímeros y aleaciones de aluminio. El origen de las prótesis activadas por los músculos del muñón se da en Alemania gracias a *Sauerbruch*, quien logra idear como conectar la musculatura flexora del antebrazo con el mecanismo de la mano artificial, mediante varillas de marfil que hacía pasar a través de túneles cutáneos, haciendo posible que la prótesis se moviera de forma activa debido a la contracción muscular.

En 1946 se crean sistemas de propulsión asistida, dando origen a las prótesis neumáticas y eléctricas. Un sistema de propulsión asistida es aquel en el que el movimiento es activado por algún agente externo al cuerpo.

Las prótesis mioléctricas surgen en el año de 1960 en Rusia. Esta opción protésica funciona con pequeños potenciales extraídos durante la contracción de las masas musculares del muñón, siendo éstos conducidos y amplificados para obtener el movimiento de la misma.

En 1962 surgen las prótesis de esqueleto cilíndrico, las cuales poseen un armazón formado por tubos metálicos o de diferentes materiales sintéticos, cubiertos de una sustancia esponjosa, logrando así una apariencia más cercana a la de un brazo sano. Esta prótesis se desarrolló en la Universidad de Münster, Alemania [4].

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

---

## 1.1.3 Marco teórico

### 1.1.3.1 La mano humana

Es una herramienta maravillosa, capaz de ejecutar innumerables acciones gracias a su función principal: la **prensión** *es el conjunto de movimientos efectuados por la mano con la intención de asir un objeto. En realidad, la prensión es una función que interesa a la totalidad del miembro superior. Es una función delicada, precisa, pero también potente. Todos los elementos anatómicos del miembro superior concluyen a asegurar a la prensión su máximo de perfección y de potencia [5]*, es “el instrumento de los instrumentos” decía Aristóteles.

La mano está dotada de una gran riqueza funcional que le proporciona una superabundancia de posibilidades en las posiciones, los movimientos y las acciones. La facultad de prensión se debe a la disposición tan particular del pulgar, que se puede oponer a todos los demás dedos.

Desde el punto de vista fisiológico, la mano representa la extremidad efectora del miembro superior que constituye su soporte y le permite adoptar la posición más favorable para una acción determinada. Sin embargo, la mano no es únicamente un órgano de ejecución, también es un receptor funcional extremadamente sensible y preciso cuyos datos son impredecibles para su propia acción. Por último, gracias al conocimiento del grosor y de las distancias que le proporciona a la corteza cerebral. Es la educadora de la vista, permitiéndole controlar e interpretar las informaciones: sin la mano nuestra visión del mundo sería plana y sin relieve. Constituye la base de ese sentido tan específico que es la *estereognosia*, conocimiento del relieve, de la forma, del espesor, *en una palabra del espacio*. También es la educadora del cerebro debido a las nociones de superficie, peso y temperatura. Es capaz, por sí sola, de reconocer un objeto, sin recurrir a la vista [6].

Por lo tanto, la mano constituye junto con el cerebro una pareja funcional indispensable, donde cada término reacciona dialécticamente sobre el otro, y es gracias a la proximidad de esta interrelación que el hombre puede modificar la naturaleza según los designios e imponerse a todas las especies terrestres vivientes.

La mano cuenta con cuatro dedos similares que son: índice, medio, anular y meñique, siendo la longitud la única diferencia existente entre ellos. Los cuatro cuentan con tres falanges, llamadas proximal, medial y distal.

## Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

Las articulaciones de estos dedos se le llaman articulaciones interfalángicas distales y proximales. Las articulaciones interfalángicas distales permiten un movimiento relativo entre la falange distal y la falange media, así como las interfalángicas proximales que de igual manera permiten el movimiento relativo de las falanges medial y proximal. En la articulación metacarpofalángicas las falanges proximales se acoplan con los huesos del metacarpo para lograr los movimientos de flexión y extensión, y la aducción y abducción (Fig. 1.6).

El dedo restante es el pulgar, el cual sólo está dotado de dos falanges proximal y distal, es decir, el pulgar no cuenta con la falange medial, por lo que sólo cuenta con una articulación interfalángica, y las articulaciones metacarpofalángica y trapeciometacarpal. Las dos articulaciones primeras permiten que el dedo pulgar tenga movimientos de flexión y extensión, mientras que la restante permite los movimientos de aducción y abducción [7].

El esqueleto de la mano está formado por ocho huesos cortos, cuyo conjunto constituye el esqueleto de la muñeca o *carpo*, cinco huesos largos que forman el *metacarpo*; por último, catorce huesos, también largos, llamados *falanges*, que constituyen el esqueleto de los dedos (Fig. 1.7).

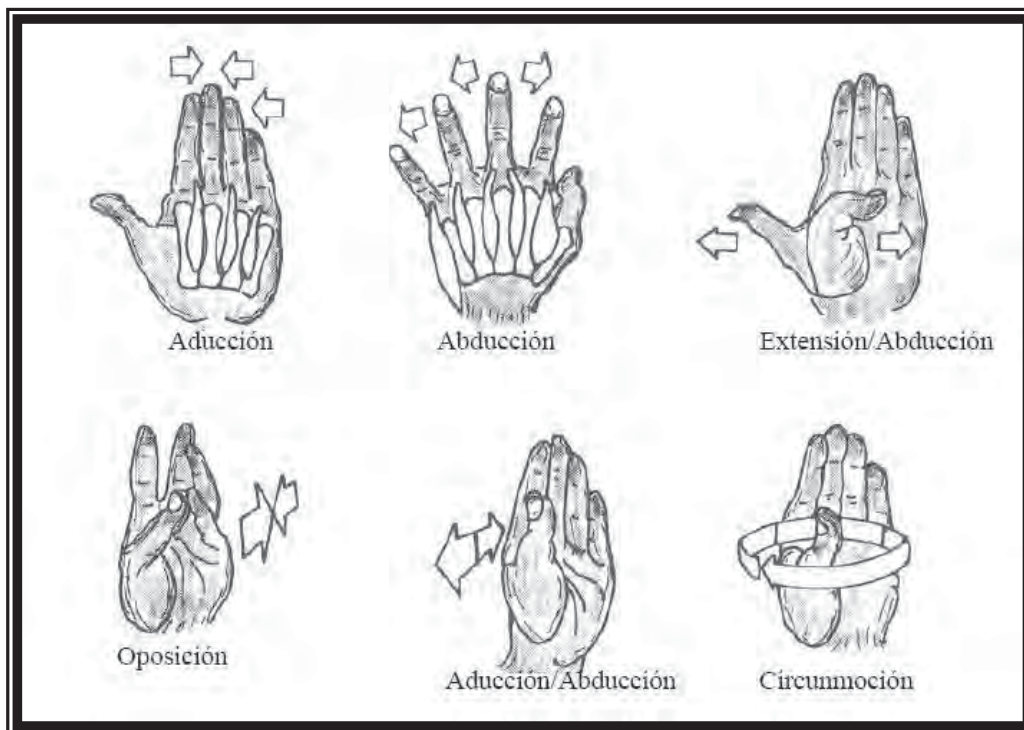


Fig. 1.6, Cinemática de la mano humana

## Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

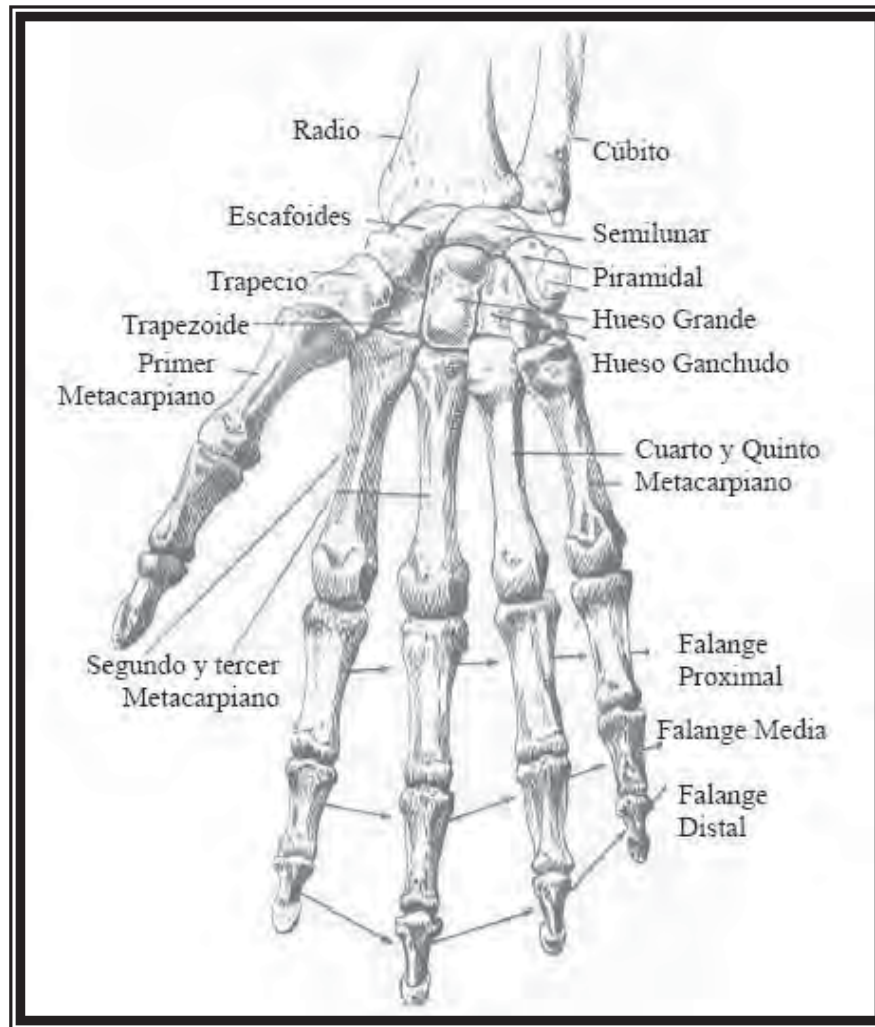


Fig. 1.7, Estructura ósea de la mano humana

### *Carpó*

Los ocho huesos que lo integran están colocados en dos hileras superpuestas que, en conjunto, forman una masa ósea convexa por su cara posterior y cóncava, transversalmente, por la anterior; ésta última constituye una especie de canal por donde pasan los tendones de los músculos flexores de los dedos. La hilera superior se haya formada, procediendo de afuera adentro, por los siguientes huesos; escafoides, semilunar, piramidal y pisiforme; en la hilera inferior procedido de la misma manera, se encuentran los siguientes; trapezio, trapezoide, hueso grande y hueso ganchudo. En general, los huesos del carpo poseen forma cúbica, distinguiéndose por eso en cada uno de ellos seis caras.

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

## *Metacarpo*

Está formado por cinco huesos largos o huesos metacarpianos, que se designan como primero, segundo, tercero, cuarto y quinto, partiendo del pulgar, y forman el esqueleto de la palma y el dorso de la mano. Estos huesos se articulan proximalmente con huesos de la segunda fila del carpo. Se separan los unos de los otros para servir de base a cada uno de los cinco dedos.

## *Falanges*

Son las que conforman los dedos, muy móviles, exceptuando el pulgar, los dedos restantes están conformados por tres falanges proximal, medial y distal, mientras que el pulgar sólo cuenta con dos falanges proximal y distal [8].

### **1.1.3.2 Movimientos de la mano humana**

La articulación de la muñeca tiene dos grados de libertad de movimientos. Y soporta la totalidad de cualquier esfuerzo que se hace con la mano (más el propio peso de ella).

Los dedos también tienen dos grados de libertad en su articulación con la palma (llamada metacarpofalángica en nuestra anatomía, ya que articula la falange proximal con el hueso metacarpiano). Uno de los movimientos (el lateral, que los permite abrir los dedos) es muy limitado, pero el otro (llamado de flexión) es extremadamente amplio (Fig. 1.6).

El pulgar tiene una movilidad excepcional, por esto es absolutamente clave en las habilidades de manipulación, y los otros cuatro dedos se mueven de manera limitada en sentido lateral, aunque su capacidad de flexión (para abrir y cerrar la mano) es muy buena. Esta capacidad de flexionar así los dedos es muy importante para la habilidad de atrapar objetos y mantenerlos con seguridad [3].

*La mano del hombre, en su complejidad, se descubre como una estructura perfectamente lógica y adaptada a sus distintas funciones. Su arquitectura refleja el principio de economía universal. Es uno de los más bellos logros del universo.*

## Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

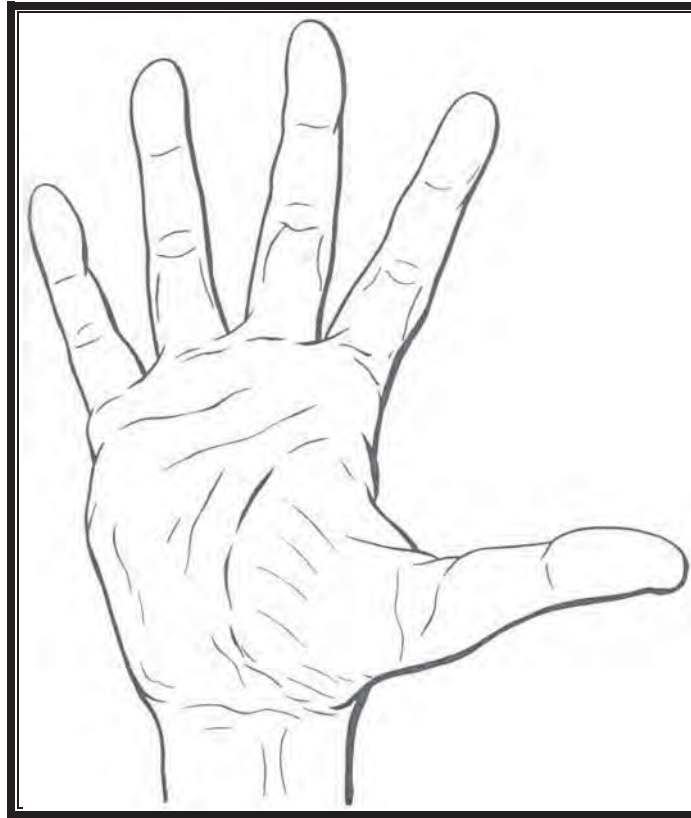


Fig. 1.8, La mano humana

En total son veintisiete elementos rígidos llamados huesos los que conforman la mano humana, que son los ocho huesos que forman la *muñeca* de la mano o *carpo* (escafoides, semilunar, piramidal, pisiforme, trapecio, trapecoide, hueso grande y hueso ganchudo), cinco huesos con los que está conformado el *metacarpo* (primero, segundo, tercero, cuarto y quinto metacarpianos), de los cinco metacarpianos el primero es el más importante, ya que es de suma importancia en la manipulación tan excepcional de la que es capaz de realizar la mano humana ya que este elemento permite la oposición del pulgar, los otros cuatro se pueden considerar como uno solo ya que, estos cuatro metacarpianos restantes son los que constituyen la palma de la mano. Y las *falanges* las cuales le dan la estructura a los dedos muy móviles (cinco falanges proximales, cuatro falanges mediales y cinco distales).

La palma de la mano es el soporte de los dedos humanos, los cuales tienen cuatro GDL cada uno, y es debido a esto que la mano humana es altamente funcional, en total la mano cuenta con veinte GDL.

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

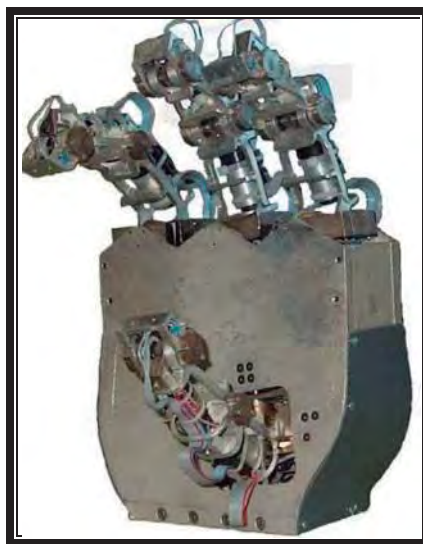
---

## 1.1.4 Estado del arte

En la actualidad existe un gran interés entre universidades para desarrollar manos artificiales que sean lo suficientemente diestras para sustituir a la mano humana, pero debido a la complejidad de su cinemática, los logros que han obtenido hasta el momento en funcionalidad están muy lejos comparados con la funcionalidad de la mano humana. Por tal motivo, los investigadores se encuentran en una gran lucha para desarrollar manos artificiales que sean lo suficientemente cosméticas así, como altamente funcionales, las cuales puedan reemplazar la mano humana.

### ❖ *Ma-I*

Esta mano artificial fue diseñada y construida en el Instituto de Organización y Control de Sistemas Industriales (IOC) de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) como parte de un sistema integrado para la experimentación y prueba de estrategias de aprehensión y manipulación de objetos. La configuración básica de la mano es de 4 dedos con 4 GDL cada uno. La MA-I pesa 4 kilogramos, sin contar con los cables que salen de la mano hasta la etapa de potencia. Sus dimensiones son aproximadamente 36 cm de alto, 25 cm de ancho y 30 cm de profundidad (Fig. 1.9). Las articulaciones interfalángicas están formadas por un conjunto de engranes sinfín-corona movidos por un moto-reductor montado en la falange anterior a la articulación, los moto-reductores son de corriente continua, y utilizan uno por cada GDL [9].



# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

*Fig. 1.9, Fotografía de MA-I*

## ❖ *Shadow dexterous hand*

La mano shadow dexterous es un sistema avanzado de mano humanoide robusta que produce tan cerca como es posible 24 GDL de la mano humana. Se ha diseñado para proporcionar movimientos, sensibilidad y fuerza de salida comparable con los de la mano humana. Esta mano artificial es un sistema autónomo debido a que en la región del antebrazo están acoplados los músculos y las múltiples válvulas que conducen el movimiento de la mano artificial. Ya que fue diseñada para utilizar tecnología de músculos de aire requiere de energía eléctrica y una fuente de aire comprimido. La mano es conducida por 40 músculos de aire montados en el antebrazo (Fig. 1.10), los cuales proporcionan los movimientos obedientes, los tendones acoplan los músculos de aire con las articulaciones [10].



*Fig. 1.10, Fotografía shadow dexterous hand*

## ❖ *Gifu hand III*

Esta mano artificial fue desarrollada en Japón, cuenta con 5 dedos, 20 articulaciones con 16 GDL. El pulgar tiene 4 articulaciones con 4 GDL, los 4 dedos restantes tienen 4 articulaciones y 3 GDL, esta mano artificial se ha desarrollado con el objeto de asir y manipular objetos, es pequeña y ligera con un peso de 1.4 kilogramos. Los movimientos de las articulaciones están dirigidos por pequeños servomotores acoplados dentro de las falanges, por lo que la hace ligera (Fig. 1.11) [11].

## Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

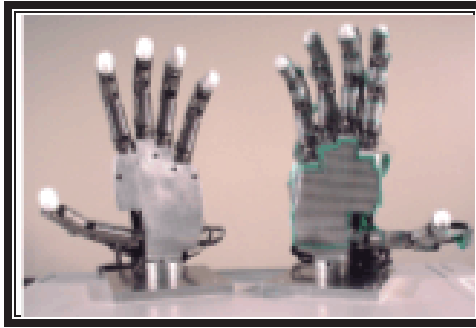


Fig. 1.11, Fotografía de gifu hand III

### ❖ *The i-limb hand*

Es una prótesis de miembro superior cosmética, la cual consta de cinco dedos que son accionados individualmente. Se desarrolló utilizando técnicas marginales de ingeniería mecánica, y fue fabricada con plásticos de alta resistencia. Esta prótesis de mano es muy parecida y actúa como una mano humana y representa un avance generacional en biónica [12]. The i-limb hand es controlada mediante mando mioeléctrico.

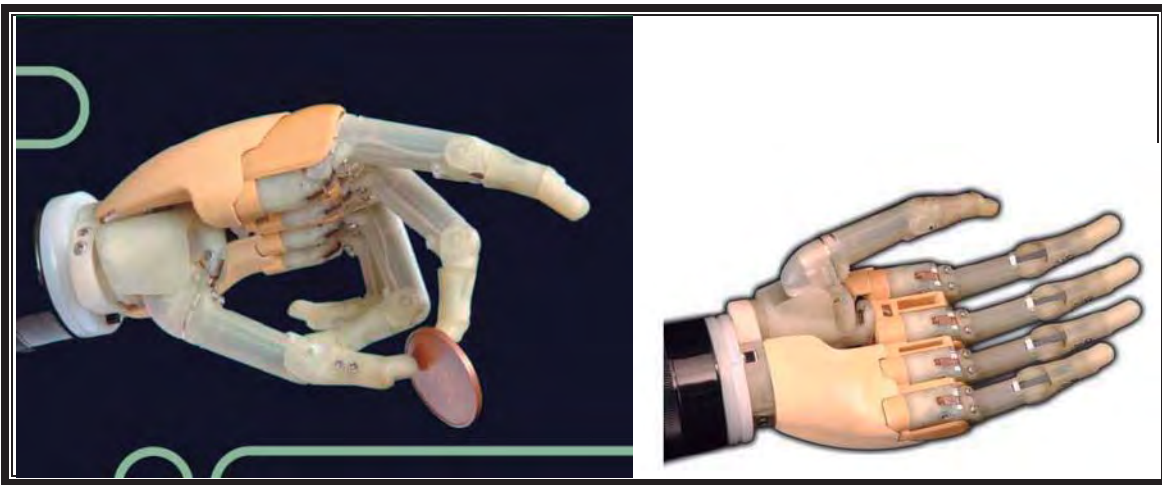


Fig. 1.12, Fotografía THE i-LIMB HAND

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

---

## 1.2 Justificación

### ¿Por qué es importante este proyecto?

Datos registrados en el año 2000 por el INEGI señalan que existen 1, 795, 300 personas en México que sufren de alguna discapacidad. De estas, 813, 000 padecen de alguna discapacidad motriz [13]. Los datos mencionados anteriormente hacen referencia al año 2000 debido a que los censos de población son realizados cada 10 años por el INEGI.

Alrededor de 35 mil personas han sufrido amputaciones de manos y brazos. Los niveles de amputación señalados para brazos y manos son: a nivel de muñeca, a nivel de hombro y a nivel de codo. Las causas de las amputaciones pueden incluir algunas de las siguientes:

**Enfermedades.-** Como la enfermedad de los vasos sanguíneos (Llamada enfermedad vascular periférica), la diabetes, los coágulos de sangre o la osteomielitis (una infección de los huesos).

**Heridas.-** Especialmente en los brazos. El 75% de las amputaciones de las extremidades superiores están relacionadas con un traumatismo, los traumatismos constituyen uno de los principales problemas de salud pública, ocupando el tercer lugar como causa de muerte y el segundo como causa de discapacidad. Las principales fuentes de los traumatismos son los accidentes automovilísticos y laborales, heridas por arma blanca y de fuego, en guerras.

**Cirugía.-** Para extirpar tumores de los huesos o los músculos.

**Envenenamiento.-** El envenenamiento origina muerte de los tejidos de las extremidades las cuales dan origen a amputaciones, estos envenenamiento son ocasionados por mordeduras de animales ponzoñosos, tal es el caso de las serpientes.

De lo anterior señalado es la importancia de este proyecto ya que el desarrollo de tecnología como benefactora de la sociedad debería ser una de las principales preocupaciones de los centros de investigación, así como de las universidades, por lo cual con este proyecto se pretende dominar la técnica para así poder llegar al sector productivo con este tipo de prótesis, que ayuden a personas con amputaciones de mano a mejorar su estilo de vida.

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

---

## *¿Cual es el origen del proyecto?*

Por iniciativa del Dr. Ignacio Juárez Campos (UMSNH) y en colaboración directa con del Dr. Marcelo López Parra (UNAM), y bajo el nombre del proyecto de investigación: *“Desarrollo de Manos Artificiales con Propósitos Biomédicos”*, se lleva a cabo el trabajo tendiente a producir una prótesis de la mano humana con las características siguientes:

- Que sea accesible económicamente para la población que sufra de amputaciones de mano.
- Que no sea simplemente una prótesis cosmética, si no que tenga la mayor funcionalidad posible equiparable con las funciones de la mano humana.

## 1.3 Objetivo

### 1.3.1 Objetivo General

- ❖ Diseñar una mano artificial capaz de realizar con la mayor similitud posible las acciones realizadas por una mano humana, teniendo en cuenta aspectos relacionados con funcionalidad, estética y peso.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar un profundo estudio de los movimientos que ejecuta la mano humana en toda su capacidad.
- Evaluar cuáles de los movimientos de la mano humana se pueden despreciar al diseñar una mano artificial.
- Diseñar los elementos que conforman la mano artificial capaz de realizar los movimientos fundamentales de la mano humana.
- Valorar el funcionamiento correcto de la prótesis al ejecutar los movimientos característicos de una mano humana.

# **Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.**

---

---

## **1.4 Establecimiento de hipótesis**

Se puede realizar una mano artificial que sea capaz de reproducir las habilidades motrices como las que realiza la mano humana, con un alto grado de flexibilidad adaptando diferentes formas de sujeción en las que se requiere precisión.

## **1.5 Estructura de la tesis**

El presente trabajo consta de cuatro capítulos y un apéndice. El capítulo I hace referencia a la importancia de este proyecto, también a los antecedentes que se tienen para el desarrollo del mismo. Con lo concerniente a los antecedentes se hace una extensa investigación bibliográfica sobre los robots y lo relevante a la historia de las prótesis. En este apartado también se presenta una amplia explicación de la mano humana, así como los movimientos que realiza, además muestra lo relevante al estado del arte, en el cual se puede encontrar prótesis muy funcionales de miembro superior que han sido desarrolladas en el mundo.

El capítulo II recoge la investigación documental del capítulo I y la analiza de manera detallada para el desarrollo de la mano artificial, tomando en cuenta la necesidad de la cual se desarrolló este proyecto, así como las especificaciones para lo que fue planteado. Y con todo ello se obtiene el diseño de la mano artificial.

El capítulo III presenta el análisis de movimiento de la mano artificial, este apartado es sin duda muy importante, esto ayuda a observar las capacidades motrices de las que está dotada la mano artificial. Generando una serie de resultados y discutiendo por que sí es factible.

Finalmente el capítulo IV, muestra las conclusiones obtenidas mediante el desarrollo de este trabajo, así como el posible trabajo a futuro a desarrollar.

El apéndice muestra los dibujos de detalle de la mano artificial útiles para su fabricación.

CAPÍTULO II.

DISEÑO DEL SISTEMA  
MECÁNICO

El término diseño claramente abarca una amplia gama de significados. La palabra diseño proviene del vocablo latino *designare*, que significa designar, marcar. Los textos incluyen varias definiciones de la palabra diseño siendo la más aplicable delinear, trazar o planear como acción o como trabajo, concebir, inventar o idear.

**Diseño en Ingeniería**

Se puede definir como el proceso de aplicar las diversas técnicas y los principios científicos con el objeto de definir un dispositivo, un proceso o un sistema con suficiente detalle para permitir su realización [14].

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

## 2.1 Metodología de diseño para la mano artificial

Se propone una metodología de acuerdo a Pahl and Beitz [15], para el diseño de una mano artificial, utilizando las técnicas de modelado de IDEF0.

### *Qué es IDEF0?*

Es un método diseñado para modelar las decisiones, las acciones, y las actividades de una organización o de un sistema. Este método se derivó de una lengua gráfica establecida, del análisis estructurado y de la técnica de diseño (SADT). Los modelos eficaces de IDEF0 ayudan a organizar el análisis de un sistema y a promover la buena comunicación entre el analista y el cliente. Es útil para establecer el alcance de un análisis, especialmente para un análisis funcional.

Como herramienta de comunicación, IDEF0 realza la implicación del dominio y la toma de decisión expertas del consenso a través de los dispositivos gráficos simplificados. Como herramienta del análisis, IDEF0 asiste al modelador para identificar qué funciones se realizan, cómo es necesario realizar esas funciones, qué hay que cambiar del sistema actual, y qué hay que mantener del sistema actual. Así, los modelos de IDEF0 se crean a menudo como una de las primeras tareas del esfuerzo para el desarrollo del sistema. La guía en la descripción de cada proceso (o actividad) considerada como combinación de cinco magnitudes básicas (Fig. 2.1), éstas se representan gráficamente como [16], [17], [18]:

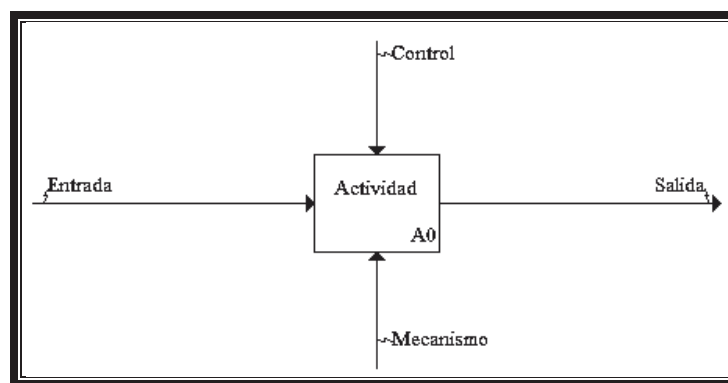


Fig. 2.1 Diagrama de IDEF0

**A0.-** Es el identificador del nodo o actividad que se va a desarrollar.

**Actividad.-** Es la acción que se desarrollará para llevar a cabo un paso del método.

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

**Entrada.-** Son los elementos necesarios para realizar una actividad, ya que ésta sólo será ejecutada por completo si tiene los elementos necesarios para realizarse.

**Salida.-** Son los resultados obtenidos al término de la actividad.

**Control.-** Regula o acota el desarrollo de la actividad, por lo que sólo usa la información que requiere la actividad, a partir de una serie de datos que pueden o no ser útiles.

**Mecanismos.-** Proporcionan las herramientas, recursos y conocimientos necesarios, para realizar la actividad.

El modelo de diseño propuesto, parte de la actividad llamada *diseño de una mano artificial* (Fig. 2.2). La cual tiene como objetivo primordial obtener el diseño de una mano artificial a partir de la gran problemática que existe para el desarrollo de manos artificiales altamente funcionales.

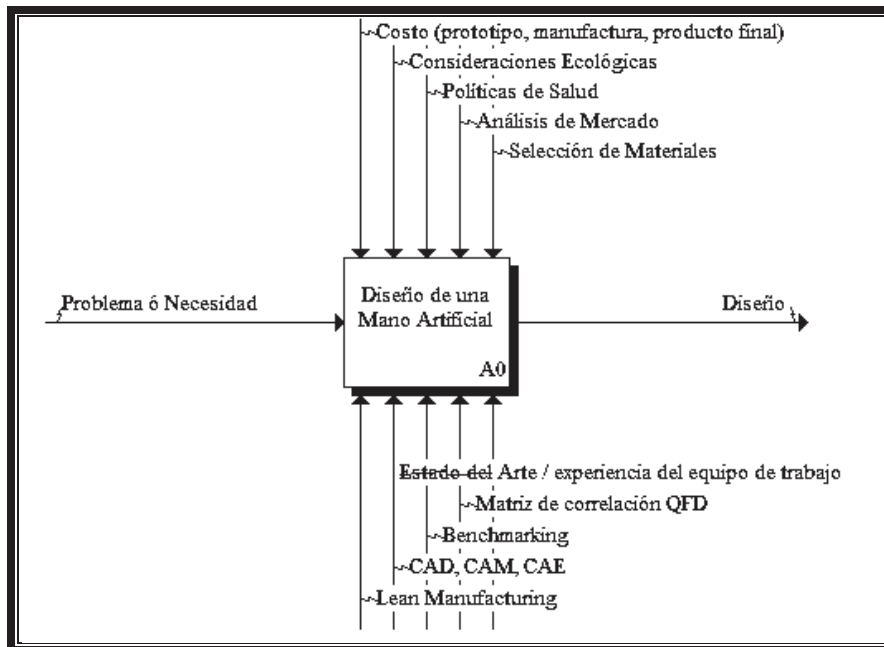


Fig. 2.2, Diagrama del diseño de una mano artificial

*Nodos ordenados de manera jerárquica para la metodología propuesta*

A0, Diseño de una Mano Artificial

A1, Clarificación de la Tarea

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

---

A11, *Escuchar al Paciente o Estudiar el Problema*

A12, *Procesamiento de la Información*

A13, *Elaborar Especificaciones*

A2, *Diseño Conceptual*

A21, *Identificar el Problema o la Necesidad*

A22, *Generación de Solución*

A23, *Retroalimentación con el Paciente*

A24, *Evaluación Técnica Contra el Criterio Económico*

A3, *Mejoras del Concepto*

A4, *Optimización del Concepto Seleccionado*

A41, *Desarrollo Preliminar y Formas de Diseño*

A42, *Selección del Mejor Diseño Preliminar*

A43, *Diseño Final Preliminar*

A44, *Chequeo y Verificación*

A45, *Dibujos y Listas de Partes Preliminares*

A5, *Diseño de Detalle*

A51, *Detalles Finales*

A52, *Lista de Materiales y Dibujos Finales del Diseño*

A53, *Documentación Final del Diseño*

A6, *Prototipo*

A7, *Revisión del Prototipo*

En el diseño de manos artificiales se parte del problema o las necesidades del paciente amputado, se realiza el diseño. Se establece las condiciones bajo las que el

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

paciente requiere la prótesis final. En las actividades necesarias para realizar el diseño de la mano artificial, están implícitos factores importantes como son: software CAD, CAE y CAM, estado del arte/ experiencia del equipo de trabajo, matriz de correlación QFD, Bechmarking, Lean Manufacturing, costo (Prototipo, manufactura, producto final), consideraciones ecológicas, políticas de salud y selección de materiales.

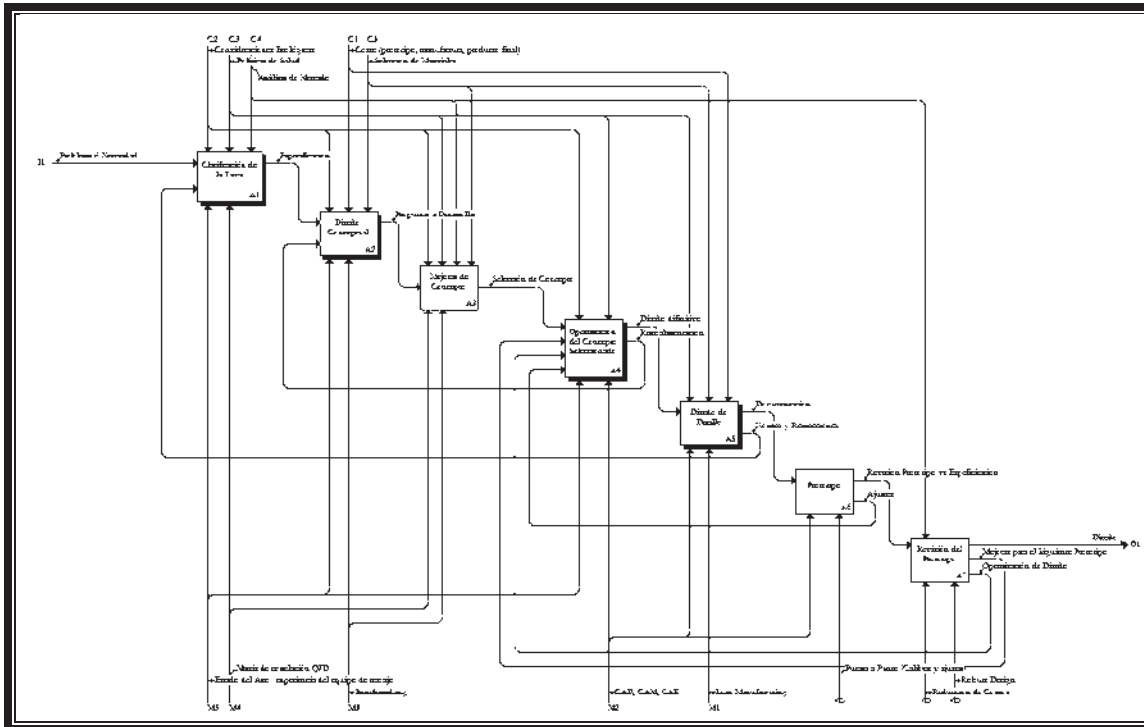


Fig. 2.3, Diagrama de las actividades perteneciente al diseño de una mano artificial

## Clarificación de la Tarea

Proceso para realizar la actividad A1. Clarificación de la Tarea (Fig. 2.4)

Clarificación de la tarea. Incluye la recopilación de información acerca de los requerimientos del amputado para ser incluidos en la solución y desarrollar la idea.

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

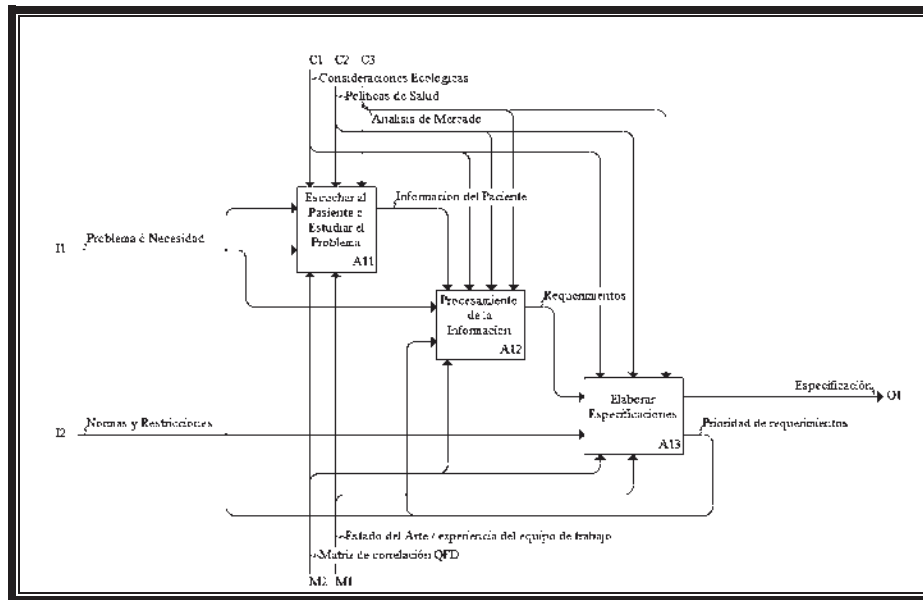


Fig. 2.4, Diagrama de las actividades perteneciente a la clarificación de la tarea

## ➤ Elemento A11

Escuchar el cliente o estudiar el problema, es muy importante para así poder definir las preferencias de éste. Para esto existen varias metodologías que nos ayudarán a resolverlo, por ejemplo: lean manufacturing, Matriz de correlación QFD, además de esto existe mucha información que ya ha sido investigada (Internet), y la experiencia del equipo de trabajo que será crucial para una mejor comprensión del problema.

## ➤ Elemento A12

Procesamiento de la Información, se refiere al balance entre las características funcionales, los deseos del paciente y el desarrollo particular de soluciones en el diseño. En esta fase se obtendrán los requerimientos para la solución del problema, la información para esto se obtendrá en gran parte al estado del arte existente del problema, así como de la experiencia del equipo de trabajo y de la información del paciente amputado obtenida en la fase anterior.

## ➤ Elemento A13

Elaborar especificaciones, permite tomar decisiones que serán cruciales durante el desarrollo del proyecto. Se lleva a cabo mediante un procesamiento de la

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

información utilizando diferentes metodologías como el QFD (¿Como?, ¿Cuándo?, ¿Con qué?). De tal manera que se puedan expresar estos términos de una manera clara en lenguaje de ingenieros. Estas se obtendrán a partir de la información obtenida anteriormente y de la experiencia del equipo de trabajo sin dejar atrás las restricciones para la solución del problema.

## Diseño Conceptual

Proceso para realizar la actividad A2. Diseño Conceptual (Fig. 2.5)

El diseño conceptual, se construye utilizando la información que se encuentra en la especificación de los requisitos del usuario. El diseño conceptual es completamente independiente de los aspectos de implementación, los programas de aplicación, los lenguajes de programación, el hardware disponible a cualquier otra consideración física. Durante todo el proceso de desarrollo del diseño conceptual, éste se prueba y se valida con los requisitos del usuario. El diseño conceptual es una fuente de información para el diseño lógico de la base de datos.

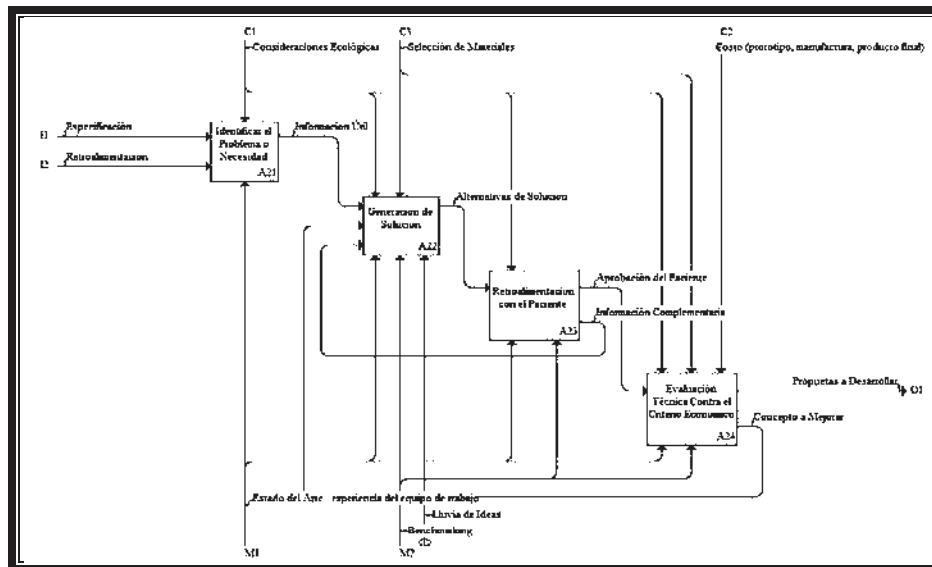


Fig. 2.5, Diagrama de las actividades perteneciente al diseño conceptual

- **Elemento A21**

Identificar el problema o la necesidad, como su nombre lo indica en esta fase se debe identificar el problema esencial de acuerdo con las consideraciones ecológicas propuestas y los requisitos del paciente.

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

---

- **Elemento A22**

Generación de solución, una vez que se ha ubicado el problema esencial se busca la solución que mejor se adapte a las especificaciones del paciente. Un método para llegar a la solución es la tormenta de ideas: El problema debe ser específico, el grupo común para esta técnica, consiste de seis a diez personas estimulando la creatividad del grupo por medio de la tormenta de ideas (para la solución). Las ideas comienzan a fluir, una idea sigue a la otra y en una hora es probable grabar cien o más ideas. Se señalan cuatro principios para que una deliberación alcance una máximo de eficacia:

1. No se permite la crítica (los comentarios negativos deben dejarse para después).
2. Es bienvenida la espontaneidad (Mientras más original sea la idea mejor).
3. Estimular la cantidad (más ideas para la solución, mayor probabilidad).
4. Estimular la combinación y mejora de ideas (Debe sugerir la forma de integrar las ideas a otros aún más nuevos).

- **Elemento A23**

Retroalimentación con el paciente, una vez identificado el problema y encontrado la solución a éste se debe tener una retroalimentación con el paciente amputado para así direccionar el trabajo hacia el mismo objetivo, complementando la información nueva o detallar aun más la información del paciente. Obteniendo así la aprobación de éste o en caso contrario regresar a una nueva búsqueda de la solución.

- **Elemento 24**

Evaluación técnica contra el criterio económico, en esta etapa del diseño será de suma importancia contar con al menos una solución que haya sido aprobada por el paciente, además de la evaluación técnica contra el criterio económico, también se evaluará funcionalidad, el rendimiento y calidad para corroborar que es la mejor propuesta.

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

---

## *Mejoras del Concepto*

En esta fase se realizará una evaluación minuciosa del concepto para tener las opciones y soluciones más convenientes en base a las consideraciones ecológicas, políticas de salud, esto será en base a las propuestas a desarrollar obtenidas de la fase anterior, con ayuda de los métodos como: la matriz de correlación QFD y el Benchmarking, para así obtener la mejor selección del concepto.

## *Optimización del Concepto Seleccionado*

*Proceso para realizar la actividad A4 (Fig. 2.6). Optimización del Concepto Seleccionado*

Optimización de concepto seleccionado, durante esta etapa, el diseñador, empezando del concepto determina el diseño y las formas, y desarrolla un producto técnico de acuerdo con la técnica y consideraciones económicas.

Es a menudo necesario producir varios diseños a escala simultáneamente o sucesivamente en orden para obtener mayor información sobre las ventajas y desventajas de las diferentes variantes y así pasivamente el sentido para una evaluación técnica y económica.

Frecuentemente, las evaluaciones de variantes individuales puede llevar a la selección de uno de esos aspectos particularmente prometedores, pero que no obstante puedan beneficiar y mejorar más allá, incorporando ideas y soluciones de otros. Con combinaciones apropiadas y la eliminación de los lazos débiles, entonces el mejor diseño puede ser obtenido.

El diseño definitivo proporciona un control de funciones, firmeza, etc., y es también en esta fase, a más tardar, que la viabilidad financiera del proyecto debe evaluarse.

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

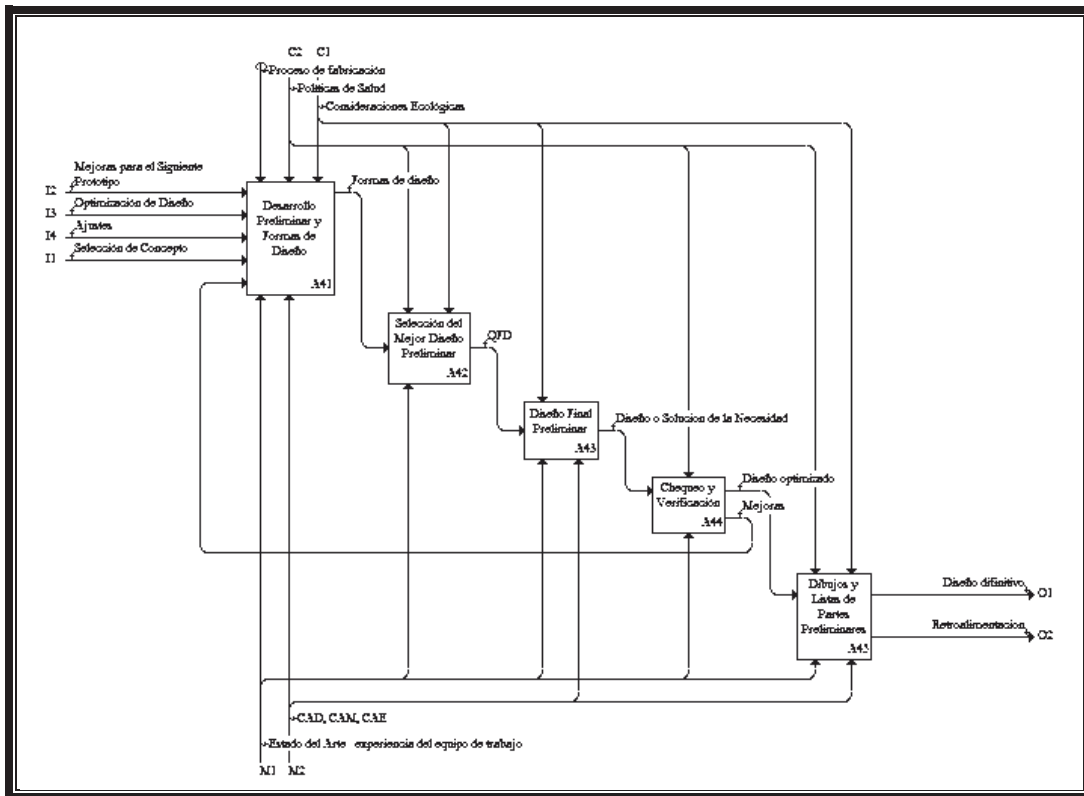


Fig. 2.6, Diagrama de las actividades perteneciente a la optimización del concepto seleccionado

## ✓ Elemento A41

Desarrollo preliminar y formas de diseño, en esta etapa del proceso del diseño se relaciona con el desarrollo del mejor diseño para la idea. Cuando se aprueba un diseño preliminar, se puede construir un prototipo o prototipos para someterlos a pruebas adicionales y análisis. En el diseño preliminar se toma en cuenta un gran número de compensaciones entre costo, calidad y rendimiento del diseño. El resultado debe ser un diseño que resulte. Los objetivos de diseño son, por supuesto, difíciles de satisfacer.

## ✓ Elemento A42

Selección del mejor diseño preliminar, en caso de obtener varios diseños, se seleccionará el mejor diseño en base a la experiencia del diseñador, esto con el fin de obtener la mejor propuesta de diseño, sin dejar atrás las políticas de salud, consideraciones ecológicas. El diseño preliminar entonces identifica por completo el diseño de la Mano Artificial.

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

---

## ✓ Elemento A43

Diseño final preliminar, una vez obtenido el diseño preliminar con la mejor propuesta se procederá a hacer dibujos del diseño preliminar para pasar a la siguiente fase que es el chequeo de errores y efectividad de costos. El resultado debe ser un diseño de producto que resulte competitivo en el mercado.

## ✓ Elemento A44

Chequeo y verificación, para obtener un diseño óptimo se realiza un análisis de chequeo de errores, así como la efectividad de costos.

## ✓ Elemento A45

Dibujos y listas de partes preliminares, en esta fase del diseño se generan los dibujos sobre el diseño preliminar así como la lista de las partes preliminares que conformarán dicho diseño. Los dibujos deberán contemplar las restricciones apiladas al problema.

## *Diseño de Detalle*

*Proceso para realizar la actividad A5 (Fig. 2.7). Del Diseño de Detalle*

En el diseño de detalle, el arreglo, formas y dimensiones y las propiedades aparecen de todas las partes individuales son finalmente extendidas, la especificación del material y la técnica de viabilidad económica revisadas y así como todos los dibujos.

Es importante que el diseñador no deba relajar su vigilancia a esta fase, para que sus ideas y planes no se cambien fuera de su reconocimiento. Es un error pensar que el diseño de detalle plantea problemas subordinados que carezcan en importancia e interés. Las dificultades a menudo surgen de la falta de atención en el detalle, muy a menudo deben hacerse correcciones en esta fase. Las correcciones no deben ser en cuanto a la solución global del producto si no en base a componentes.

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

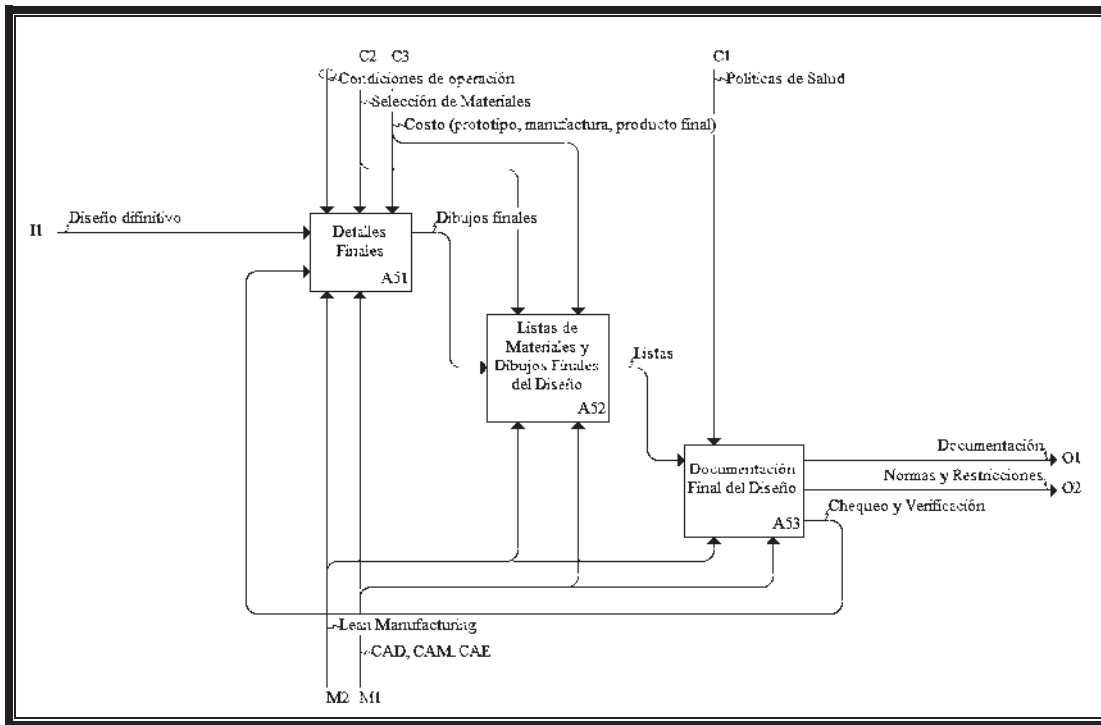


Fig. 2.7, Diagrama de las actividades perteneciente al diseño de detalle

## ❖ Elemento A51

Detalles finales, se generan los dibujos, detalles, especificaciones, listas de materiales, procesos de manufactura.

## ❖ Elemento A52

Lista de materiales y dibujos finales del diseño, se realizará la verificación y chequeo de dibujos y listas de materiales contra concepto o prototipo final. Además se obtendrán listas de componentes comerciales y componentes a manufacturar.

## ❖ Elemento A53

Documentación final del diseño, se obtendrá documentación de dibujos (ensamble, componentes), manuales (operaciones, mantenimientos y servicios), rangos de operación, recomendaciones de seguridad.

Sin embargo, la investigación y desarrollo no sólo debe desarrollar especificaciones de diseño para operaciones. Se debe asegurar la factibilidad de la prótesis.

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

## *Prototipo*

En esta fase se tendrá la documentación necesaria para la construcción del prototipo de la Mano Artificial. La construcción del prototipo puede tener diferentes formas. Primero, se pueden fabricar varios prototipos que se parezcan al producto final. Por ejemplo, en la industria automotriz es normal hacer modelos de arcilla de los automóviles nuevos.

Éstos permiten testar el objeto antes de que entre en producción, detectar errores, deficiencias, etcétera. Cuando el prototipo está suficientemente perfeccionado en todos los sentidos requeridos y alcanza las metas para las que fue pensado, el objeto puede empezar a producirse.

Un prototipo es también un modelo a escala o facsímil (copia o imitación perfecta de un dibujo) de lo real, pero no tan funcional como para que equivalga a un producto final, ya que no lleva a cabo la totalidad de las funciones necesarias del sistema final, proporcionando una retroalimentación temprana por parte de los usuarios acerca del sistema.

Hay tres clases genéricas de métodos y herramientas para el desarrollo de prototipos:

1. Técnicas de cuarta generación: permite generar código ejecutable rápidamente, son ideales para la creación rápida de prototipos.
2. Generadores de programas, código reutilizable, paquetes de aplicación y computadores personales, entre otros.
3. Generadores de informes, pantallas.

## *Revisión del prototipo*

Cuando el prototipo está suficientemente perfeccionado en todos los sentidos requeridos y alcanza las metas para las que fue pensado, el objeto puede empezar a producirse. Aun así se podrán tener mejoras para el siguiente prototipo o una optimización del diseño, esto se podrá realizar con la reducción de costos, además de aplicar alguna metodología como robust design.

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

---

## *Ventajas de esta metodología de diseño*

Se propone una metodología apropiada para el diseño de manos artificiales, esto, con el fin de regresar a la vida cotidiana a cientos de amputados que perdieron su extremidad superior derecha. Esta metodología pretende incorporar más rápidamente a los ingenieros en el diseño de manos artificiales y sin duda alguna, de gran ayuda para expertos en el tema que les pueda servir de referencia para verificar sus procedimientos de diseño.

## **2.2 Análisis de la necesidad**

Como la prótesis a diseñar va a ser utilizada para labores únicamente cotidianas, tal es el caso de tomar un vaso de agua, lavarse los dientes, tomar una cuchara para comer, por mencionar sólo algunas actividades, la mano artificial debe ser altamente funcional. Pero también se deben tomar en cuenta aspectos de estética, para una mejor apariencia de la prótesis.

## **2.3 Especificaciones**

La prótesis a diseñar debe cumplir con ciertos estándares de diseño como son:

- *Performance*

Esté se refiere al desempeño que puede realizar la prótesis. El desempeño y resultados que se espera tener para la mano artificial, es que la persona que la utilice desarrolle el mayor número de actividades cotidianas posibles como son: asir objetos, además de que la mano artificial sea bastante ligera y lo más cosmética posible para evitar el rechazo de las personas.

- *Mantenimiento*

Ya que la mano artificial se pretende utilizar en actividades cotidianas, el mantenimiento para ella debe ser mínimo o incluso que la misma persona que lo utiliza sea capaz de darle mantenimiento.

- *Costo de producción esperado*

El costo de producción de la mano artificial deberá ser de entre un 50 % y 60 % de las que actualmente existen en el mercado, para así cumplir con un bajo costo y

## Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

---

poder llegar a las personas que las necesitan, pero que no cuentan con recursos económicos para adquirir las actuales.

- *Peso*

La mano artificial debe ser lo más ligera posible, por lo que se espera que no rebase el 1.5 Kg de peso.

- *Estética, apariencia y acabado*

Este punto lo debemos de tomar en cuenta ya que uno de los objetivos, en el cual se pretende que la mano artificial sea lo más estética posible, esto, sin afectar la funcionalidad de la misma.

- *Materiales*

Los materiales a utilizar en la fabricación del prototipo deben cumplir con la característica de no ser conductores de electricidad. Además, debe presentar buenas propiedades mecánicas.

- *Perfil del cliente*

La persona a la que se le adaptará la mano artificial debe ser de una estatura media, tomando como estatura media a 1.67 m de altura, y dicho paciente debe de carecer de la extremidad superior derecha (*mano derecha*).

- *Tamaño*

El tamaño final de la mano artificial fue obtenido haciendo mediciones con diferentes personas de estatura media en México y tomando un valor promedio entre ellas. La siguiente tabla muestra las dimensiones finales para el prototipo de la mano artificial.

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

Parámetros	Longitud en (mm)
Longitud de la falange proximal dedo índice	39
Longitud de la falange media	28
Longitud de la falange distal	22
Longitud total del dedo índice	89
Longitud de la falange proximal dedo medio	45
Longitud total del dedo medio	95
Longitud de la falange proximal dedo anular	42
Longitud total del dedo anular	92
Longitud de la falange proximal dedo pulgar	36
Longitud de la falange distal dedo pulgar	34
Longitud total del dedo pulgar	70
Alto palmar	20
Ancho palmar	68
Largo palmar	94

Tabla 2.1, Dimensiones de la mano artificial

## 2.4 Diseño de la mano artificial

Toda prótesis por simple que esta sea surgió de una necesidad, la necesidad de servir, y ser utilizada para realizar algunas actividades, como lo hacen las maravilla de extremidades superiores con las que cuenta el ser humano. Por lo cual la mano artificial propuesta en este trabajo pretende alcanzar el mayor número de capacidades motrices de la mano humana, tomando en cuenta que es impredecible conocer por completo las habilidades con las que cuenta ésta para poder hacer los movimientos a los que es sometida, de igual manera el número de partes que permiten tales movimientos.

En la mayor parte de las sujeciones de objetos que realiza el hombre con su mano primordialmente utiliza solamente tres dedos y estas sujeciones las hace de manera muy funcional y eficiente, siendo estos dedos los llamados pulgar, índice y medio.

Los dedos restantes (anular y meñique) tienen como función la de orientar el objeto, siendo el anular el correspondiente a realizar la mayoría del trabajo en la función de orientar los objetos. Se cree que en la evolución natural del hombre, el dedo meñique tienda a desaparecer debido a la poca utilidad que se le da a éste.

El aspecto de la desaparición del dedo meñique se debe de tomar muy en cuenta en el desarrollo de manos artificiales, ya que se podrá reducir el número de

## **Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.**

---

---

movimientos a controlar de manera independiente y esto sería de gran ayuda para el control de dicha mano.

Observando los movimientos de la mano y la necesidad que se tiene para el desarrollo de la mano artificial y, además, contando con un estudio extra que es el estado del arte se cree que no es necesaria la utilización de cinco dedos. El movimiento de Abducción y adducción de los dedos medio y anular se puede omitir debido que es muy limitado, pero en el dedo índice no podemos descartar dicho movimiento ya que este dedo presenta un movimiento muy útil.

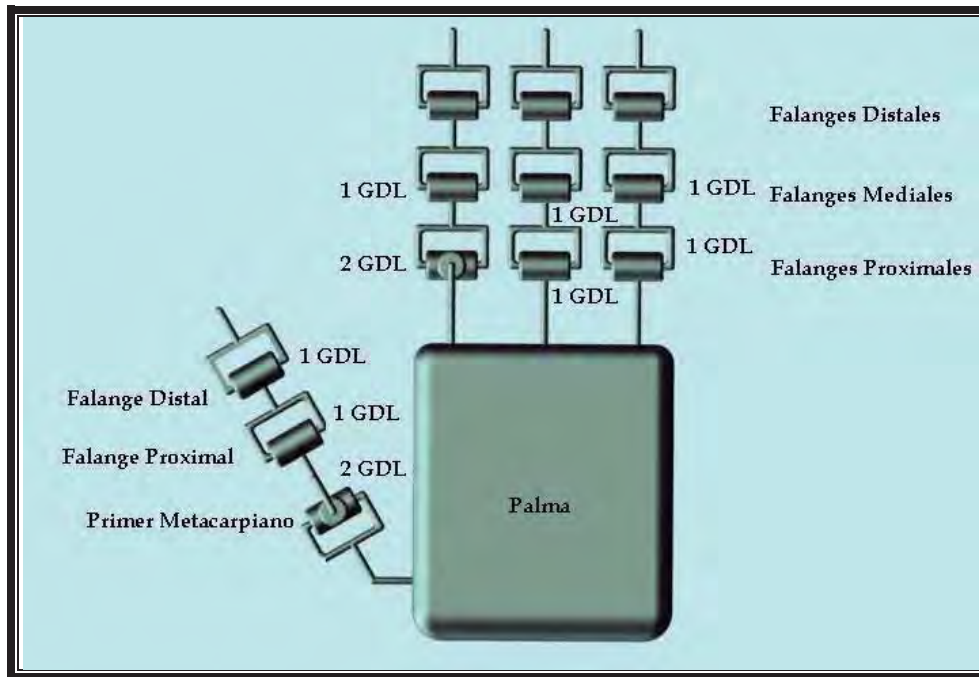
Omitiendo este movimiento en los dedos medio y anular se pueden quitar dos juntas que necesitan 2 GDL cada una para realizar su función, lo cual ayudaría a simplificar el número de GDL. Por otro lado, podemos notar también que existen ciertos movimientos relativos entre articulaciones, siendo los más relevantes los existentes en las articulaciones interfalángicas proximales y distales de los dedos índice, medio y anular.

Tal es el caso que cuando se flexiona la articulación interfalángica proximal permite la flexión en la articulación interfalángica distal, esto ocurre al momento de flexionar la articulación proximal, la articulación distal se flexiona cierto ángulo dirigido hacia la palma de la mano que es de aproximadamente dos tercios de dicho ángulo.

Tomando en cuenta el movimiento relativo existente entre las articulaciones interfalángicas se puede anclar y con esto se reduciría el número de GDL para el desarrollo de la prótesis.

La figura 2.8 muestra los movimientos que se deben generar y es el modelo a seguir para el diseño de la mano artificial. Las falanges proximales al igual que las mediales tiene un movimiento posible que es de 0 a 90° en flexión hacia la palma de la mano. Cabe señalar que para asignarle el movimiento a las distales de los dedos índice, medio y anular se cuenta con un sistema acoplado a las articulaciones proximales en una relación de ángulo 1.5 a 1. Es decir, cuando hacemos flexionar la articulación interfalángica proximal 90° la articulación interfalángica distal rotará solamente 60°.

## Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

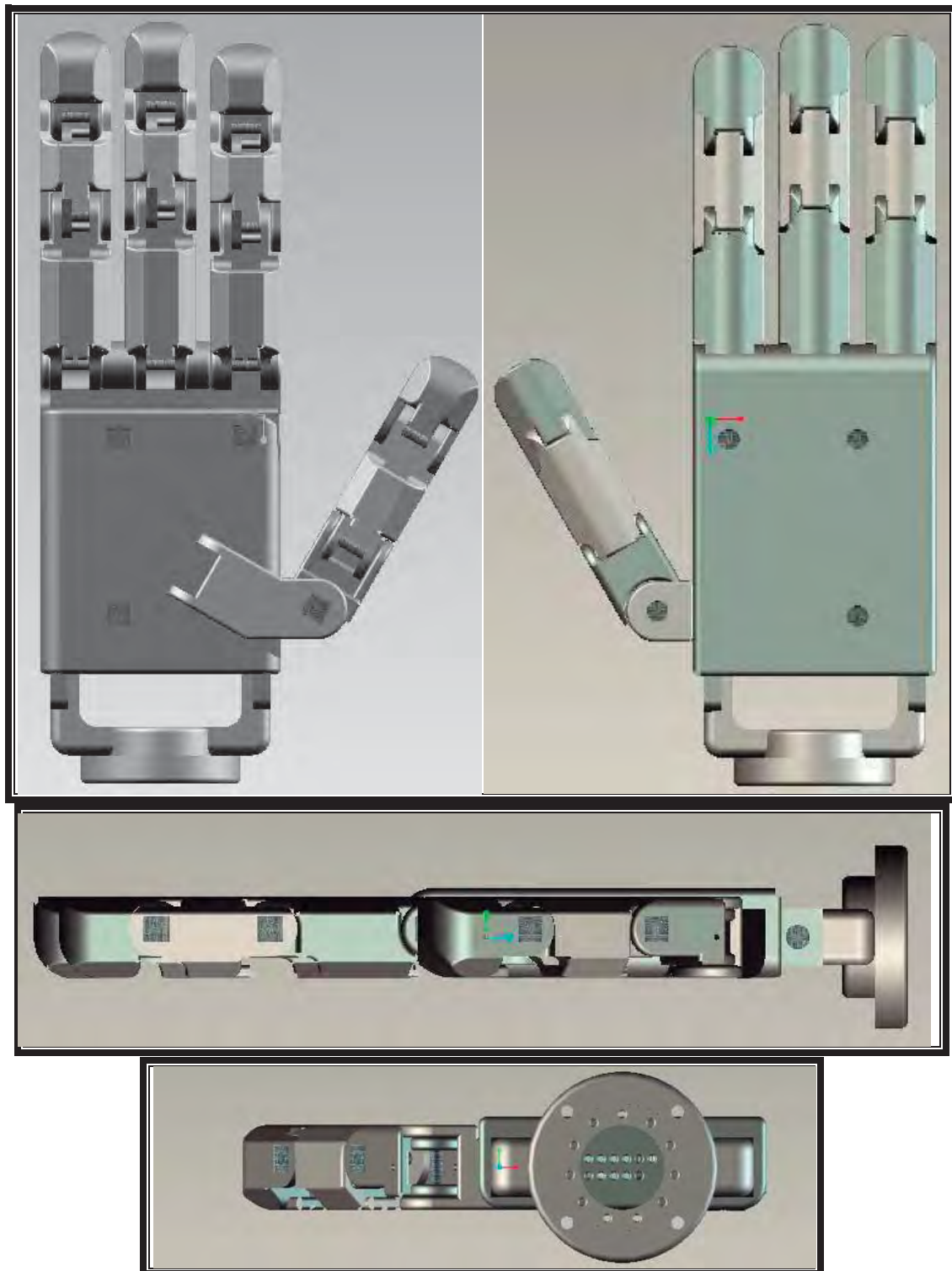


*Fig. 2.8, Esquema final de la prótesis*

Para el mecanismo, se optó por un mecanismo de cuatro barras donde la falange medial se considera como eslabón fijo, la falange distal como eslabón conductor y la falange distal como eslabón conducido de los dedos índice, medio y anular respectivamente.

La decisión de usar un mecanismo de cuatro barras articuladas es debido a que en cuanto menor sea el número de elementos necesario para realizar un trabajo, esté se hace de manera más rápida y eficiente. La Fig. 2.9, muestra el modelo de la mano artificial obtenido.

## Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.



*Fig. 2.9, Modelo de la Mano Artificial*

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

## 2.5 Estructura cinemática de la mano artificial

Articulación	Conexión	Rango
--------------	----------	-------

### *Dedos Anular y Medio*

1	Distal- Medial	0-60°
2	Medial-Proximal	0-90°
3	Proximal-Palma	0-90°

### *Dedo Índice*

1	Distal-Medial	0-60°
2	Medial-Proximal	0-90°
3	Proximal-Abductor	0-90°
4	Abductor-Palma	0-30°

### *Dedo Pulgar*

1	<b>Distal-Proximal</b>	<b>0-90°</b>
2	Proximal-Abductor	0-90°
3	Abductor-Metacarpo	0-60°
4	Metacarpo-Palma	0-90°

Tabla. 2.2, Articulaciones y rangos de movimiento de la mano artificial

El dedo pulgar tiene 4 GDL y cuatro juntas.

El dedo índice tiene 3 GDL y cuatro juntas.

Los dedos medio y anular cuentan con 2 GDL y tres juntas.

En total los dedos suman 11 GDL los cuales dotan las capacidades motrices a la mano artificial.

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

## 2.6 Mecanismo de cuatro barras articuladas

Una de las cosas que se deben tomar muy en cuenta al momento de estar construyendo una maquina la cual sea útil para sustituir en alguna tarea al hombre, es la sencillez ya que ésta es la marca distintiva entre un buen diseño y por lo tanto, genera una solución menos costosa y sin duda la más confiable.

Para solucionar el problema del movimiento relativo existente entre las articulaciones interfalángicas proximales y distales, se optó por una síntesis de eslabonamiento generalizada ya que las falanges medias y distales de los dedos índice, medio y anular son las mismas. Se prefirió la utilización de un mecanismo de cuatro barras cruzado, el cual servirá para dotar de movimiento a dichas falanges.

Algo muy importante que se debe tomar en cuenta en los problemas de diseño de este tipo en la generación de la función ya que esta define cual es la correlación existente entre un movimiento de entrada con un movimiento de salida de un mecanismo.

La figura 2.10 muestra las diferentes configuraciones en las que puede trabajar el mecanismo de cuatro articuladas siendo la primera en paralelogramo, esta configuración es muy útil debido a que duplica exactamente el movimiento de la manivela impulsora en la manivela impulsada, este tipo de movimiento era característico de la transmisión de las locomotoras de vapor [19]. La segunda configuración corresponde al antiparalelogramo, en esta configuración la diferencia que radica en que la manivela de salida tiene un movimiento angular diferente al de la manivela de entrada.

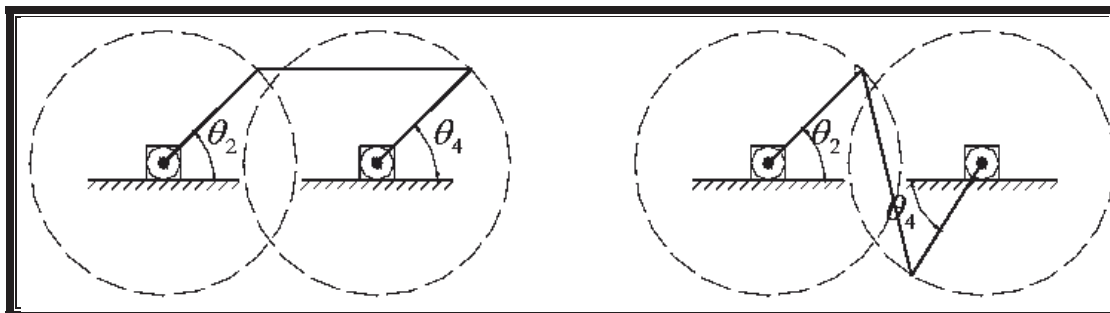


Figura 2.10, Algunas configuraciones del mecanismo de cuatro barras

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

El eslabonamiento de cuatro barras, es la cadena más básica de eslabones conectados por pasadores que permite movimiento relativo entre los eslabones. No obstante que se trata de un mecanismo simple, las cuatro barras forman un mecanismo muy versátil usado en miles de aplicaciones.

## 2.6.1 Ley de grashof

La condición de Grashof es una relación muy simple que pronostica el comportamiento de las inversiones de un eslabonamiento de cuatro barras articuladas.

Esta establece que *la suma de las barras más corta y más larga de un mecanismo de cuatro barras articuladas, no puede superar la suma de las otras dos barras, cuando entre dos miembros se desea una rotación completa* [20]. Sean:

S= Longitud del eslabón mas largo

L= Longitud del eslabón mas corto

P= Longitud de un eslabón restante

Q= Longitud de otro eslabón restante

$$S+L \leq P+Q \quad (2.1)$$

## 2.6.2 Síntesis del mecanismo de cuatro barras cruzado

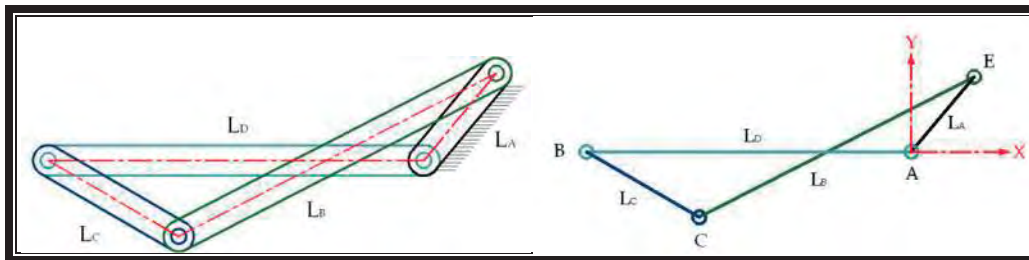


Fig. 2.11, Configuración del mecanismo de cuatro barras cruzado

A continuación se describe brevemente la síntesis del mecanismo para la obtención de la configuración de éste. El método de síntesis consiste en los siguientes pasos:

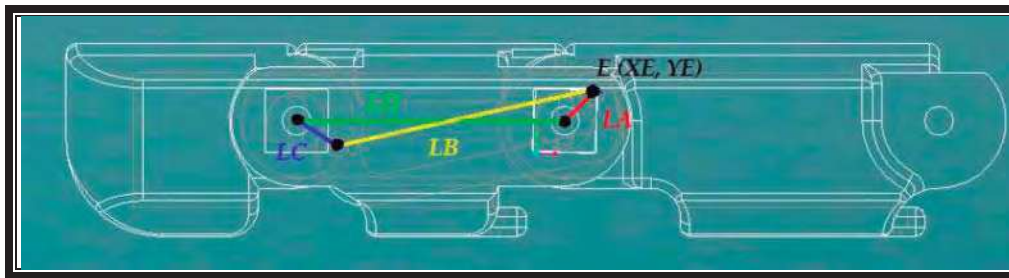
**Paso (a).** Colocar la barra conducida (barra  $L_c$  en la Fig. 2.12) en tres posiciones coincidentes con la trayectoria que debe seguir, Fig. 2.13.

## Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

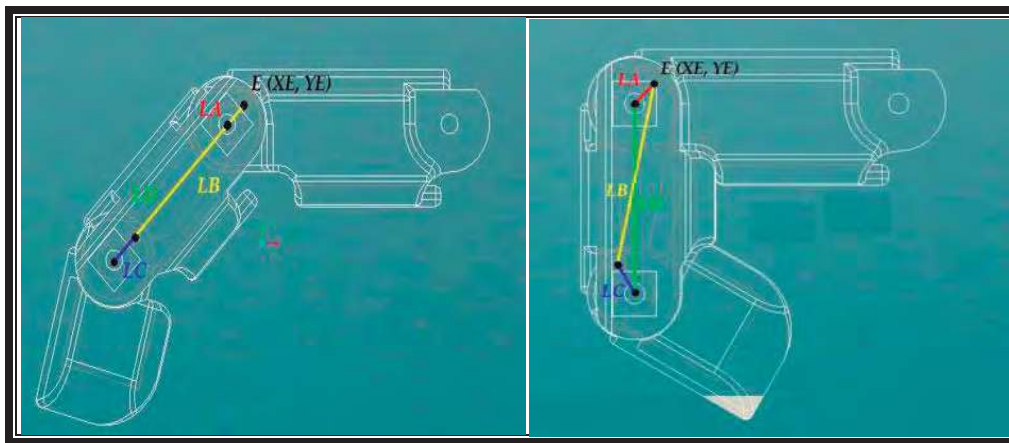
**Paso (b).** Obtener dos rectas, las cuales se generan al unir los puntos definidos por  $C$ ,  $C_1$  y  $C_1$ ,  $C_2$ , Fig. 2.13.

**Paso (c).** Encontrar los puntos medios de las dos rectas generadas ( $C-C_1$  y  $C_1-C_2$ ). Estos puntos se describen con las letras  $D_1$  y  $D_2$  en la Fig. 2.13.

**Paso (d).** Trazar rectas perpendiculares a  $C-C_1$  y  $C_1-C_2$  que pasen por los puntos medios,  $D_1$  y  $D_2$ . El cruce de estas recta perpendiculares será la articulación del mecanismo de cuatro barras requerido, punto  $E$  en la Fig. 2.13.



*Posición inicial*



*Posición intermedia*

*Posición final*

Fig. 2.12, Representación del mecanismo de cuatro barras cruzado en un dedo de la mano artificial

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

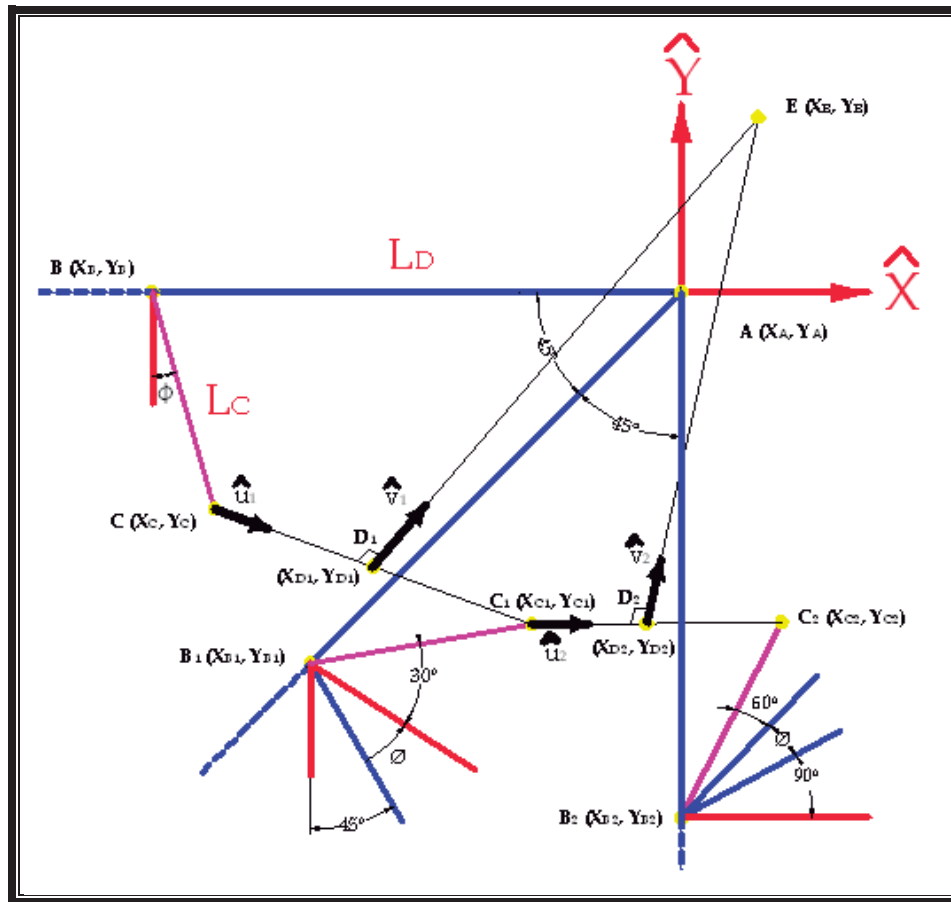


Fig. 2.13, Diagrama del mecanismo

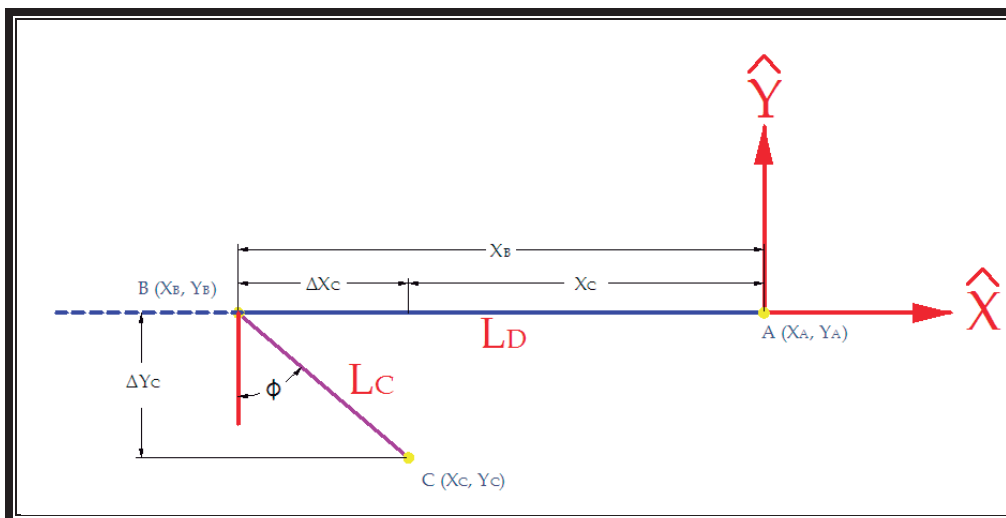


Fig. 2.14, Diagrama del mecanismo en posición inicial

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

Siguiendo la síntesis antes descrito se detallan los pasos matemáticamente.

*Paso (a).*

Observando el diagrama de la Fig. 2.14, que representa al dedo en su posición inicial, se encuentra el punto C ( $X_C$ ,  $Y_C$ ) de la siguiente manera:

$$X_B = X_C + \Delta X_C$$

$$X_C = X_B - \Delta X_C$$

$$\Delta X_C = L_C \sin \varphi$$

$$X_B = -L_D$$

$$X_C = -L_D - L_C \sin \varphi \quad (2.2)$$

$$Y_C = -L_D \cos \varphi \quad (2.3)$$

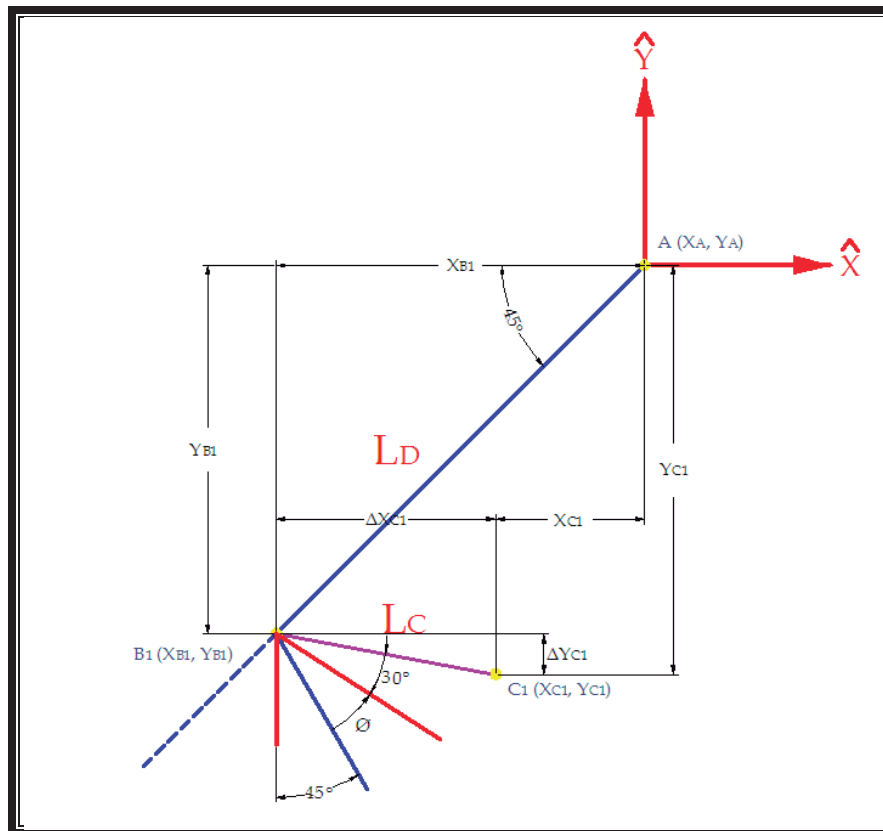


Fig. 2.15, Diagrama del mecanismo en posición intermedia

## Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

De igual manera observando la Fig. 2.15 se encuentra el punto  $C_1 (X_{c1}, Y_{c1})$  del diagrama en la posición intermedia del dedo.

$$X_{B1} = X_{C1} + \Delta X_{C1}$$

$$X_{C1} = X_{B1} - \Delta X_{C1}$$

$$X_{B1} = -L_D \cos 45^\circ$$

$$\Delta X_{C1} = L_C \sin(45^\circ + \varphi + 30^\circ) = L_C \sin(\varphi + 75^\circ)$$

$$X_{C1} = -L_D \cos 45^\circ - L_C \sin(\varphi + 75^\circ) \quad (2.4)$$

$$Y_{C1} = Y_{B1} + \Delta Y_{C1}$$

$$Y_{B1} = -L_D \sin 45^\circ$$

$$\Delta Y_{C1} = -L_C \cos(\varphi + 45^\circ + 30^\circ) = -L_C \cos(\varphi + 75^\circ)$$

$$Y_{C1} = -L_D \sin 45^\circ - L_C \cos(\varphi + 75^\circ) \quad (2.5)$$

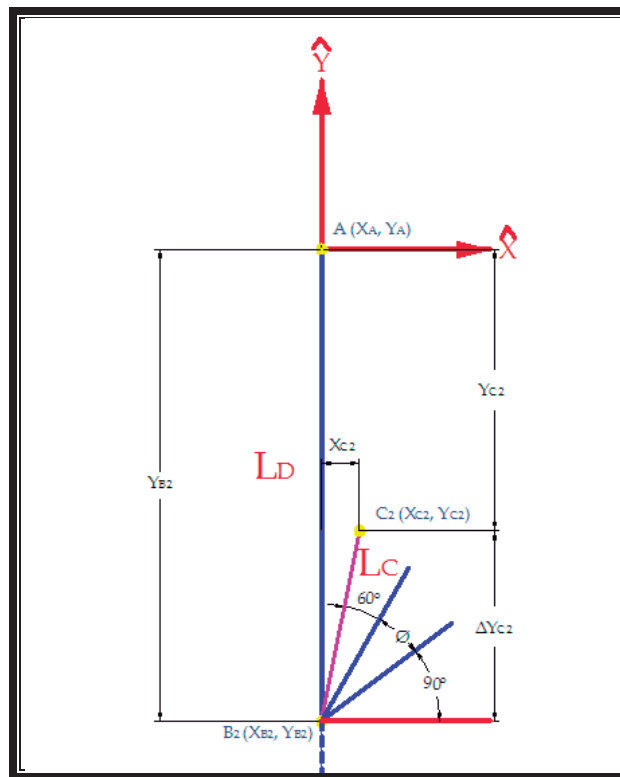


Fig. 2.16, Diagrama del mecanismo en posición final

## Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

Ahora, observando el diagrama de la Fig. 2.16 en la posición final del dedo, se determina el punto  $C_2 (X_{c2}, Y_{c2})$ .

$$X_{B2} = 0$$

$$Y_{B2} = -L_D$$

$$Y_{B2} = Y_{C2} + \Delta Y_{C2}$$

$$Y_{C2} = Y_{B2} - \Delta Y_{C2}$$

$$\Delta Y_{C2} = L_C \sin(90^\circ + \varphi + 60^\circ) = L_C \sin(\varphi + 150^\circ)$$

$$X_{C2} = -L_C \cos(90^\circ + \varphi + 60^\circ)$$

$$\mathbf{X}_{C2} = -L_C \cos(\varphi + 150^\circ) \quad (2.6)$$

$$Y_{C2} = -L_D - L_C \sin(\varphi + 150^\circ) \quad (2.7)$$

**Paso (b).**

Con los puntos encontrados en el Paso (a). Ahora procedemos a conectar estos puntos mediante las rectas descritas por (2.8) y (2.9).

$$\begin{pmatrix} X_{C1} \\ Y_{C1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_C \\ Y_C \end{pmatrix} + \hat{\mathbf{u}}_1 \left( \sqrt{(X_{C1} - X_C)^2 + (Y_{C1} - Y_C)^2} \right) \quad (2.8)$$

$$\begin{pmatrix} X_{C2} \\ Y_{C2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{C1} \\ Y_{C1} \end{pmatrix} + \hat{\mathbf{u}}_2 \left( \sqrt{(X_{C2} - X_{C1})^2 + (Y_{C2} - Y_{C1})^2} \right) \quad (2.9)$$

Donde:

$$\hat{\mathbf{u}}_1 = \begin{pmatrix} a_1 \\ b_1 \end{pmatrix} = \frac{C_1 - C}{\|C_1 - C\|} = \frac{\begin{pmatrix} X_{C1} - X_C \\ Y_{C1} - Y_C \end{pmatrix}}{\sqrt{(X_{C1} - X_C)^2 + (Y_{C1} - Y_C)^2}}$$

$$a_1 = \frac{X_{C1} - X_C}{\sqrt{(X_{C1} - X_C)^2 + (Y_{C1} - Y_C)^2}}$$

$$b_1 = \frac{Y_{C1} - Y_C}{\sqrt{(X_{C1} - X_C)^2 + (Y_{C1} - Y_C)^2}}$$

## Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

$$\hat{u}_1 = \begin{pmatrix} \frac{X_{C1} - X_C}{\sqrt{(X_{C1} - X_C)^2 + (Y_{C1} - Y_C)^2}} \\ \frac{Y_{C1} - Y_C}{\sqrt{(X_{C1} - X_C)^2 + (Y_{C1} - Y_C)^2}} \end{pmatrix}$$

Y,

$$\hat{u}_2 = \begin{pmatrix} a_2 \\ b_2 \end{pmatrix} = \frac{C_2 - C_1}{\|C_2 - C_1\|} = \frac{\begin{pmatrix} X_{C2} - X_{C1} \\ Y_{C2} - Y_{C1} \end{pmatrix}}{\sqrt{(X_{C2} - X_{C1})^2 + (Y_{C2} - Y_{C1})^2}}$$

$$a_2 = \frac{X_{C2} - X_{C1}}{\sqrt{(X_{C2} - X_{C1})^2 + (Y_{C2} - Y_{C1})^2}}$$

$$b_2 = \frac{Y_{C2} - Y_{C1}}{\sqrt{(X_{C2} - X_{C1})^2 + (Y_{C2} - Y_{C1})^2}}$$

$$\hat{u}_2 = \begin{pmatrix} \frac{X_{C2} - X_{C1}}{\sqrt{(X_{C2} - X_{C1})^2 + (Y_{C2} - Y_{C1})^2}} \\ \frac{Y_{C2} - Y_{C1}}{\sqrt{(X_{C2} - X_{C1})^2 + (Y_{C2} - Y_{C1})^2}} \end{pmatrix}$$

**Paso (c).**

Una vez conectados estos puntos encontramos las posiciones intermedias de las rectas que se generaron al unir los puntos con el Paso (b), ecs. (2.10)-(2.13).

$$X_{D1} = X_C + a_1 \left( \frac{\sqrt{(X_{C1} - X_C)^2 + (Y_{C1} - Y_C)^2}}{2} \right)$$

$$X_{D1} = X_C + \frac{X_{C1} - X_C}{\sqrt{(X_{C1} - X_C)^2 + (Y_{C1} - Y_C)^2}} \left( \frac{\sqrt{(X_{C1} - X_C)^2 + (Y_{C1} - Y_C)^2}}{2} \right)$$

$$X_{D1} = X_C + \frac{X_{C1} - X_C}{2} = \frac{2}{2}X_C + \frac{1}{2}X_{C1} - \frac{1}{2}X_C = \frac{1}{2}X_C + \frac{1}{2}X_{C1}$$

$$\mathbf{X}_{D1} = \frac{1}{2}(\mathbf{X}_C + \mathbf{X}_{C1}) \tag{2.10}$$

$$Y_{D1} = Y_C + b_1 \left( \frac{\sqrt{(X_{C1} - X_C)^2 + (Y_{C1} - Y_C)^2}}{2} \right)$$

## Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

$$Y_{D1} = Y_C + \frac{Y_{C1} - Y_C}{\sqrt{(X_{C1} - X_C)^2 + (Y_{C1} - Y_C)^2}} \left( \frac{\sqrt{(X_{C1} - X_C)^2 + (Y_{C1} - Y_C)^2}}{2} \right)$$

$$Y_{D1} = Y_C + \frac{Y_{C1} - Y_C}{2} = \frac{2}{2}Y_C + \frac{1}{2}Y_{C1} - \frac{1}{2}Y_C = \frac{1}{2}Y_C + \frac{1}{2}Y_{C1}$$

$$\mathbf{Y}_{D1} = \frac{1}{2}(\mathbf{Y}_C + \mathbf{Y}_{C1}) \quad (2.11)$$

$$X_{D2} = X_{C1} + a_2 \left( \frac{\sqrt{(X_{C2} - X_{C1})^2 + (Y_{C2} - Y_{C1})^2}}{2} \right)$$

$$X_{D2} = X_{C1} + \frac{X_{C2} - X_{C1}}{\sqrt{(X_{C2} - X_{C1})^2 + (Y_{C2} - Y_{C1})^2}} \left( \frac{\sqrt{(X_{C2} - X_{C1})^2 + (Y_{C2} - Y_{C1})^2}}{2} \right)$$

$$X_{D2} = X_{C1} + \frac{(X_{C2} - X_{C1})}{2} = \frac{2}{2}X_{C1} + \frac{1}{2}X_{C2} - \frac{1}{2}X_{C1} = \frac{1}{2}X_{C1} + \frac{1}{2}X_{C2}$$

$$\mathbf{X}_{D2} = \frac{1}{2}(\mathbf{X}_{C1} + \mathbf{X}_{C2}) \quad (2.12)$$

$$Y_{D2} = Y_{C1} + b_2 \left( \frac{\sqrt{(X_{C2} - X_{C1})^2 + (Y_{C2} - Y_{C1})^2}}{2} \right)$$

$$Y_{D2} = Y_{C1} + \frac{Y_{C2} - Y_{C1}}{\sqrt{(X_{C2} - X_{C1})^2 + (Y_{C2} - Y_{C1})^2}} \left( \frac{\sqrt{(X_{C2} - X_{C1})^2 + (Y_{C2} - Y_{C1})^2}}{2} \right)$$

$$Y_{D2} = Y_{C1} + \frac{(Y_{C2} - Y_{C1})}{2} = \frac{2}{2}Y_{C1} + \frac{1}{2}Y_{C2} - \frac{1}{2}Y_{C1} = \frac{1}{2}Y_{C1} + \frac{1}{2}Y_{C2}$$

$$\mathbf{Y}_{D2} = \frac{1}{2}(\mathbf{Y}_{C1} + \mathbf{Y}_{C2}) \quad (2.13)$$

### **Paso (d).**

En consecuencia se trazan las rectas perpendiculares que pasan por los puntos intermedios,  $D_1$  y  $D_2$ , encontrados en el Paso (c).

La recta perpendicular que se origina del punto medio de la recta C-C<sub>1</sub>,  $D_1$ , está dada por (2.14) y (2.15).

$$\mathbf{X}_E = \mathbf{X}_{D1} + \mathbf{a}_3 \text{ Parámetro} \quad (2.14)$$

$$\mathbf{Y}_E = \mathbf{Y}_{D1} + \mathbf{b}_3 \text{ Parámetro} \quad (2.15)$$

## Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

Donde,  $a_3$  y  $b_3$  son:

$$\hat{v}1 = \hat{Z} \otimes \hat{u}1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} \frac{X_{C1} - X_C}{\sqrt{(X_{C1} - X_C)^2 + (Y_{C1} - Y_C)^2}} \\ \frac{Y_{C1} - Y_C}{\sqrt{(X_{C1} - X_C)^2 + (Y_{C1} - Y_C)^2}} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\hat{v}1 = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{X_{C1} - X_C}{\sqrt{(X_{C1} - X_C)^2 + (Y_{C1} - Y_C)^2}} \\ \frac{Y_{C1} - Y_C}{\sqrt{(X_{C1} - X_C)^2 + (Y_{C1} - Y_C)^2}} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\hat{v}1 = \begin{pmatrix} \frac{Y_C - Y_{C1}}{\sqrt{(X_{C1} - X_C)^2 + (Y_{C1} - Y_C)^2}} \\ \frac{X_{C1} - X_C}{\sqrt{(X_{C1} - X_C)^2 + (Y_{C1} - Y_C)^2}} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$a_3 = \frac{Y_C - Y_{C1}}{\sqrt{(X_{C1} - X_C)^2 + (Y_{C1} - Y_C)^2}}$$

$$b_3 = \frac{X_{C1} - X_C}{\sqrt{(X_{C1} - X_C)^2 + (Y_{C1} - Y_C)^2}}$$

La recta perpendicular que se origina del punto medio de la recta  $C_1-C_2$ ,  $D_2$ , está dada por (2.16) y (2.17).

$$X_E = X_{D2} + a_4 \text{ Parámetro} \quad (2.16)$$

$$Y_E = Y_{D2} + b_4 \text{ Parámetro} \quad (2.17)$$

## Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

Donde,  $a_4$  y  $b_4$  son:

$$\hat{v}2 = \hat{Z} \otimes \hat{u}2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} \frac{X_{C2} - X_{C1}}{\sqrt{(X_{C2} - X_{C1})^2 + (Y_{C2} - Y_{C1})^2}} \\ \frac{Y_{C2} - Y_{C1}}{\sqrt{(X_{C2} - X_{C1})^2 + (Y_{C2} - Y_{C1})^2}} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\hat{v}2 = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{X_{C2} - X_{C1}}{\sqrt{(X_{C2} - X_{C1})^2 + (Y_{C2} - Y_{C1})^2}} \\ \frac{Y_{C2} - Y_{C1}}{\sqrt{(X_{C2} - X_{C1})^2 + (Y_{C2} - Y_{C1})^2}} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\hat{v}2 = \begin{pmatrix} \frac{Y_{C1} - Y_{C2}}{\sqrt{(X_{C2} - X_{C1})^2 + (Y_{C2} - Y_{C1})^2}} \\ \frac{X_{C2} - X_{C1}}{\sqrt{(X_{C2} - X_{C1})^2 + (Y_{C2} - Y_{C1})^2}} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$a_4 = \frac{Y_{C1} - Y_{C2}}{\sqrt{(X_{C2} - X_{C1})^2 + (Y_{C2} - Y_{C1})^2}}$$

$$b_4 = \frac{X_{C2} - X_{C1}}{\sqrt{(X_{C2} - X_{C1})^2 + (Y_{C2} - Y_{C1})^2}}$$

Ahora se encuentran la intersección de las dos rectas C-C<sub>1</sub> y C<sub>1</sub>-C<sub>2</sub>, la cual define al punto E, que será la articulación del mecanismo buscado. El punto E debe estar lo más alejado del punto A, el cual es la articulación entre las falanges proximal y medial. Ésta debe estar alejada para evitar interferencias con el eje de la articulación A, sin embargo, tampoco debe estar muy separada de A porque esto afectaría las paredes de las falanges.

Despejando e igualando las ecuaciones (2.14) y (2.16) obtenemos la coordenada en X del punto E:

$$\frac{X_E - X_{D1}}{a_3} = \text{Parámetro}$$

## Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

$$\frac{X_E - X_{D2}}{a_4} = \text{Parámetro}$$

$$\frac{X_E - X_{D1}}{a_3} = \frac{X_E - X_{D2}}{a_4}$$

$$\frac{X_E}{a_3} - \frac{X_{D1}}{a_3} = \frac{X_E}{a_4} - \frac{X_{D2}}{a_4}$$

$$\frac{X_E}{a_3} - \frac{X_E}{a_4} = \frac{X_{D1}}{a_3} - \frac{X_{D2}}{a_4}$$

$$X_E \left( \frac{a_4 - a_3}{a_3 a_4} \right) = \left( \frac{a_4 X_{D1} - a_3 X_{D2}}{a_3 a_4} \right)$$

$$X_E (a_4 - a_3) = (a_4 X_{D1} - a_3 X_{D2})$$

$$X_E = \left( \frac{a_4 X_{D1} - a_3 X_{D2}}{a_4 - a_3} \right) \quad (2.18)$$

De igual manera se despeja e iguala (2.15) y (2.17) para encontrar la coordenada Y correspondiente al punto E.

$$\frac{Y_E - Y_{D1}}{b_3} = \text{Parámetro}$$

$$\frac{Y_E - Y_{D2}}{b_4} = \text{Parámetro}$$

$$\frac{Y_E - Y_{D1}}{b_3} = \frac{Y_E - Y_{D2}}{b_4}$$

$$\frac{Y_E}{b_3} - \frac{Y_{D1}}{b_3} = \frac{Y_E}{b_4} - \frac{Y_{D2}}{b_4}$$

$$\frac{Y_E}{b_3} - \frac{Y_E}{b_4} = \frac{Y_{D1}}{b_3} - \frac{Y_{D2}}{b_4}$$

$$Y_E \left( \frac{b_4 - b_3}{b_3 b_4} \right) = \left( \frac{b_4 Y_{D1} - b_3 Y_{D2}}{b_3 b_4} \right)$$

$$Y_E (b_4 - b_3) = (b_4 Y_{D1} - b_3 Y_{D2})$$

$$Y_E = \left( \frac{b_4 Y_{D1} - b_3 Y_{D2}}{b_4 - b_3} \right) \quad (2.19)$$

## Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

---

Una vez hecho lo anterior se calcula las longitudes que comprenderán el mecanismo de cuatro barras cruzado de la siguiente manera:

$$L_A = \sqrt{(X_E - X_A)^2 + (Y_E - Y_A)^2} \quad (2.20)$$

$$L_B = \sqrt{(X_C - X_E)^2 + (Y_C - Y_E)^2} \quad (2.21)$$

$$L_C = \sqrt{(X_C - X_B)^2 + (Y_C - Y_B)^2} \quad (2.22)$$

$$L_D = \sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2} \quad (2.23)$$

### 2.6.3 Algoritmo genético

Un algoritmo genético es un método de búsqueda dirigida basada en probabilidad. Bajo una condición muy débil (que el algoritmo mantenga elitismo, es decir, guarde siempre al mejor elemento de la población sin hacerle ningún cambio) se puede demostrar que el algoritmo converge en probabilidad al óptimo. En otras palabras, al aumentar el número de iteraciones, la probabilidad de tener al óptimo en la población tiende a uno [21].

En el desarrollo de la mano artificial, se ha observado que existen movimientos relativos entre las falange mediales y distales (*dedos Índice, Medio, Anular*), que se puede solucionar mediante cadenas cinemáticas, la cual se puede sintetizar con ayuda de los algoritmos genéticos. El propósito de emplear este método de solución es porque existe un gran espacio de búsqueda en donde se encuentra la mejor solución y los algoritmos genéticos han demostrado su efectividad en este aspecto, además de ser bastante robustos.

El algoritmo genético fue confeccionado en Visual Basic, ya que este lenguaje presenta muy buenas herramientas para ello, con el algoritmo se encuentran las mejores dimensiones del mecanismo de cuatro barras cruzado. También servirá como base para futuras modificaciones de la prótesis.

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

---

El algoritmo genético está formado por varias rutinas o subprogramas que tienen una función específica dentro del programa, éstos son [22], [23]:

## *Cromosoma*

Subprograma que asigna el número de cromosomas que tendrá cada individuo en su cadena genética; número que depende del rango de búsqueda del resultado óptimo y de la precisión que se quiere en los resultados.

El cromosoma de los individuos tiene la información de la longitud del eslabón conducido,  $L_c$ , y del ángulo  $\phi$ , los cuales pueden apreciarse en la fig. 3. Por cada par de valores de  $L_c$  y  $\phi$  se obtendrá una solución para la articulación E. Algunas soluciones cumplirán con la ley de Grashof, otras no lo harán.

## *Población*

Subprograma que asigna el valor de los cromosomas de la cadena genética de cada individuo de la primera generación, los valores que puede contener cada cromosoma de la cadena son 0 ó 1 y son asignados al azar, dándole a cada individuo un valor en base binaria.

## *Genotipo base 10*

Subprograma que convierte el valor de la base binaria en un valor en base decimal para cada individuo.

## *Fenotipo*

Subprograma que transforma el valor del genotipo base decimal en una solución del problema; este dato se encuentra comprendido dentro de un rango de valores, por lo que generalmente se tiene que interpolar para conocer cuál es el valor de la solución.

## *Calificación*

Subprograma que se encarga de evaluar los valores de los individuos encontrando cuál individuo tiene el mejor valor y por ende una solución más cercana a la solución real. Para la evaluación de cada valor se tienen que hacer las siguientes consideraciones:

## Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

---

a) Si el valor propuesto es menor al valor obtenido mediante la función entonces:

$$Evaluación = \frac{Valor Propuesto}{Valor Obtenido} \quad (2.24)$$

b) Si el valor propuesto es mayor al valor obtenido mediante la función entonces:

$$Evaluación = \frac{Valor Obtenido}{Valor Propuesto} \quad (2.25)$$

Teniendo en cuenta lo anterior, el mejor individuo que se puede encontrar es aquel cuya evaluación esté más cercana a 1.

Además, este subprograma también suma las calificaciones de los individuos en una generación y en base a esto le asigna un porcentaje a cada individuo hasta llegar al 100 %, por lo que cada individuo tiene un rango del porcentaje, los individuos con mejor calificación serán los que tienen un mayor porcentaje.

### *Padres*

Subprograma que escoge dos individuos al azar para utilizarlos como padres de una nueva generación, la elección se hace al azar asignando un número y el individuo cuyo rango de porcentaje contenga ese número será elegido, es de suponer que los individuos con mayor porcentaje tienen mayores posibilidades de ser escogidos.

### *Hijos*

Subprograma que corta la cadena genética en un punto al azar de los dos individuos antes elegidos y los mezcla para generar dos nuevos individuos los cuales llamamos hijos, el primer hijo contendrá dentro de la primera parte de su cadena genética los cromosomas de la primera parte de la cadena genética del primer padre y la segunda parte de su cadena será la segunda parte de la cadena genética del segundo padre, el segundo hijo contendrá, dentro de la primera parte de su cadena genética, los cromosomas. El segundo hijo se obtiene combinando la primera parte del cromosoma del segundo padre y el resto de su cromosoma es la segunda parte del primer padre, en ese orden.

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

---

## *Nueva generación*

Este subprograma convierte los nuevos individuos generados en la nueva generación con la esperanza de encontrar una solución más próxima a la óptima.

## *Mutación*

Subprograma que genera una mutación en algunos individuos de la nueva generación, lo cual se logra escogiendo al azar una cantidad de individuos y cambiando el valor de uno o más de sus cromosomas; la cantidad de individuos y la cantidad de cromosomas que se modifican depende de un factor de mutación inicialmente proporcionado y de la cantidad de individuos que se tiene por generación.

## *Mejor individuo por generación*

Este subprograma se encarga de mostrar los resultados obtenidos de la manera que se desee, ya sea de forma numérica o de forma gráfica, o de ambas formas, todo depende de los resultados que se quiera desplegar.

## *Integración de Sistemas*

Los diferentes sistemas se integran, teniendo como datos la longitud del eslabón  $L_D$ , la cual corresponde a la dimensión de la falange medial del dedo en cuestión, la cantidad de individuos por generación, el número de generaciones, el factor de mutación a utilizar por generación y la precisión con la que se desea que el programa despliegue los resultados.

Una vez introducidos estos datos se procede a calcular el número de cromosomas que tendrá cada individuo en su cadena genética, después de que se tenga calculado el número de cromosomas, se procede a introducir el valor de los cromosomas que tendrá cada individuos en su cadena, una vez que se tiene el valor de los cromosomas de cada individuo se procede a determinar el valor de cada individuo en base 10. Una vez realizado esto, se procede a determinar una posible solución para el problema o fenotipo por cada individuo, este valor se proporciona en el subprograma calificación, el cual utiliza la ley de Grashof para dar a conocer las longitudes del mecanismo, además de calificar a los individuos para ver cuál es el que se encuentra más cercano a la solución del problema.

## **Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.**

---

---

Después de calificar los individuos de cada generación, se asigna un porcentaje del total de la generación; una vez realizado esto, se escogen al azar dos individuos de la generación, los cuales serán utilizados como padres para generar dos nuevos individuos mezclando sus cadenas genéticas; este último procedimiento se repetirá las veces que sea necesarios hasta tener una cantidad de nuevos individuos igual a la cantidad de individuos de la generación, estos nuevos individuos son los que forman la nueva generación, después se cambian algunos cromosomas de algunos individuos de la nueva generación, esto se hace con el propósito de simular la mutación que implementa la naturaleza en los individuos de una especie, estas mutaciones afectan al individuo produciendo individuos con una mejor calificación o individuos con una calificación más baja. Esto es necesario para enriquecer la diversidad genética evitar los efectos nocivos de la endogamia. Una vez aplicada la mutación, se procede a realizar los mismos procedimientos que se llevaron a cabo con la primera generación sin incluir el cálculo de cromosoma, ya que los nuevos individuos ya contienen esa información dentro de su cadena genética, este procedimiento se repetirá hasta que ya no existan cambios muy grandes entre los mejores individuos de cada generación.

Una vez que se terminaron de hacer los cálculos se procede a encontrar al mejor individuo el cual contiene los resultados más óptimos para la solución del problema y se pueden desplegar mediante el subprograma el mejor individuo por generación el cual muestra la longitud y la posición de cada eslabón.

*CAPÍTULO III.*

**PRUEBAS DE  
LABORATORIO**

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

## 3.1 Experimentos

### 3.1.1 Análisis por computadora del movimiento de la mano artificial

Para el análisis de los movimientos de la mano artificial se utiliza *Pro/Engineer Wildfire 3.0*. La utilización de este software es debido a las ventajas que presenta cuando se requieren hacer trabajos de este tipo. La simulación de los movimientos de la mano artificial por computadora es muy importante ya que con ella se puede observar de manera precisa el desempeño de cada uno de los elementos que conforman la prótesis.

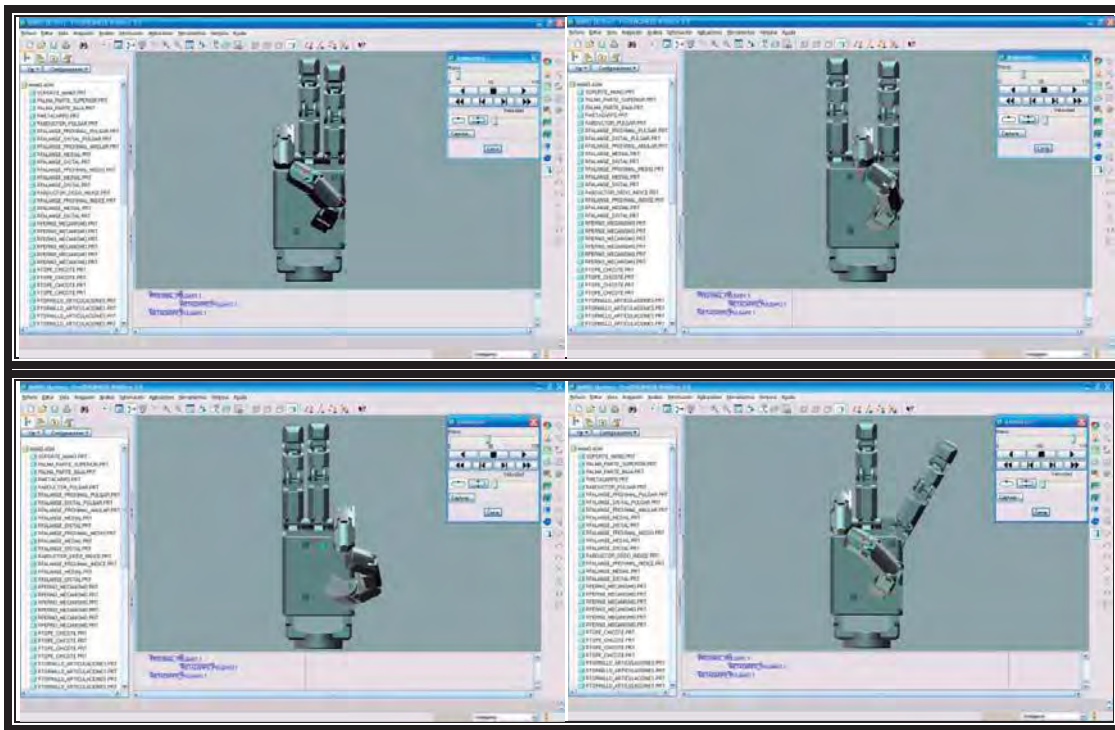


Fig. 3.1, Modelo virtual de la mano artificial

La figura 3.1 muestra al dedo pulgar en oposición con el dedo anular, medio e índice, además también se puede observar el movimiento de abducción del dedo índice de la mano artificial diseñada. De manera concreta esto ayuda a tener una idea clara de las capacidades motrices del modelo a manufacturar.

## Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

La oposición es el principal movimiento del pulgar: es la facultad de desplegar el pulpejo (*parte blanda de los dedos humanos*) en contacto con el pulpejo de los dedos restantes de la mano [6]. Por lo tanto, no existe una única oposición sino toda una gama de oposiciones que realiza una gran variedad de acciones según la cantidad de dedos implicados y su modalidad de asociación. Más sin embargo, el pulgar no adquiere todo su significado funcional más en relación a los otros dedos y viceversa. Sin el pulgar, la mano pierde casi la totalidad funcional hasta el punto que las intervenciones quirúrgicas complejas plantean su reconstrucción partiendo de los elementos restantes: se trata de las operaciones de pulgarización de un dedo y en la actualidad de trasplante en el hombre.

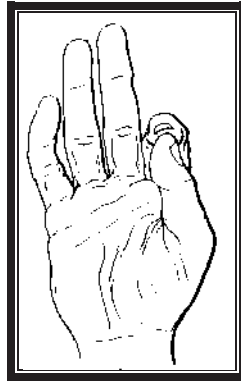


Fig. 3.2, Oposición pulgar-índice de la mano humana

### 3.1.2 Prensión que realiza la mano artificial

La compleja organización anatómica y funcional de la mano humana converge en la prensión [6]; sin embargo, la mano no presenta sólo un tipo de prensión, sino debido a su anatomía natural existe una infinidad de ellas, esto como resultado de la gran riqueza funcional que posee la mano humana.

A continuación se presentan algunos ejemplos de prensión que puede realizar la mano artificial, tal es el caso de asir un vaso, una pelota y un lápiz. Y de manera simultánea se exponen las tablas, las cuales muestran los ángulos de posición de los elementos envueltos en dichas tareas.

## Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

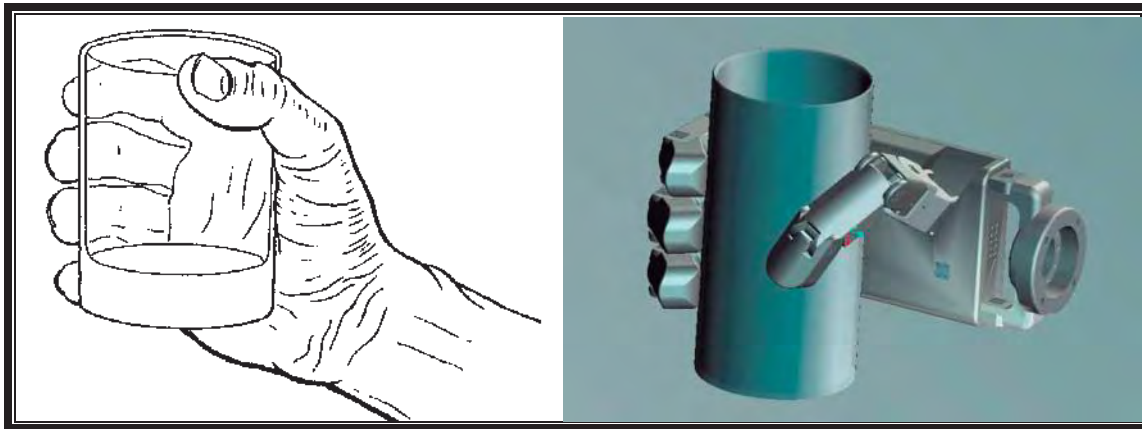


Fig. 3.3, Prensión cilíndrica

FALANGES DE LOS DEDOS DE LA MANO ARTIFICIAL					
	METACARPO	ABDUCTOR	PROXIMAL	MEDIAL	DISTAL
PULGAR	70°	80°	60°	-----	40°
ÍNDICE	-----	0°	35°	54°	36°
MEDIO	-----	-----	35°	60°	40°
ANULAR	-----	-----	36°	57°	38°

Tabla. 3.1, Posición de los elementos de la mano artificial para realizar la prensión cilíndrica

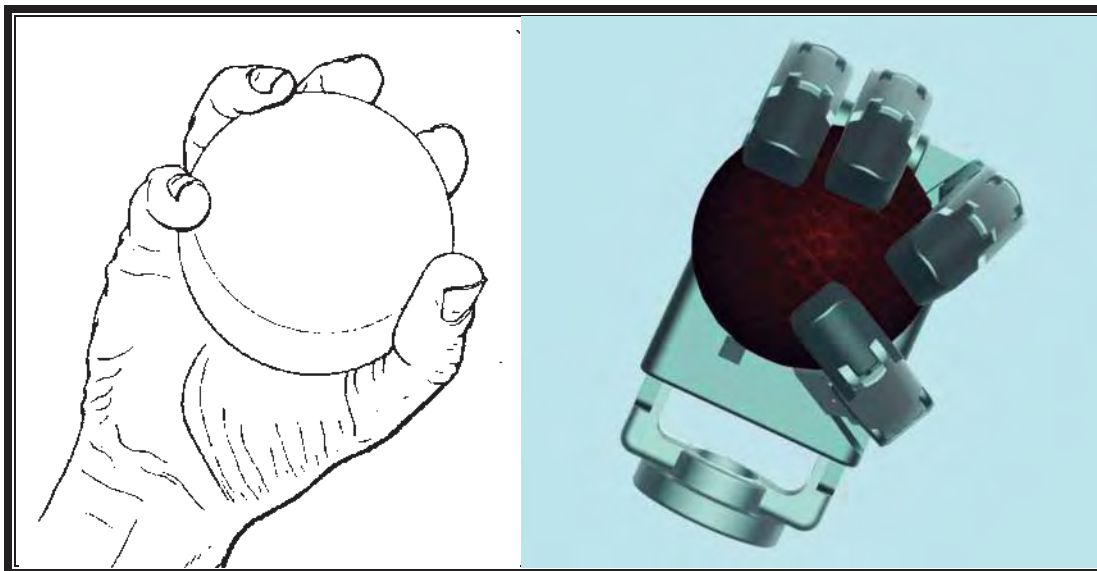
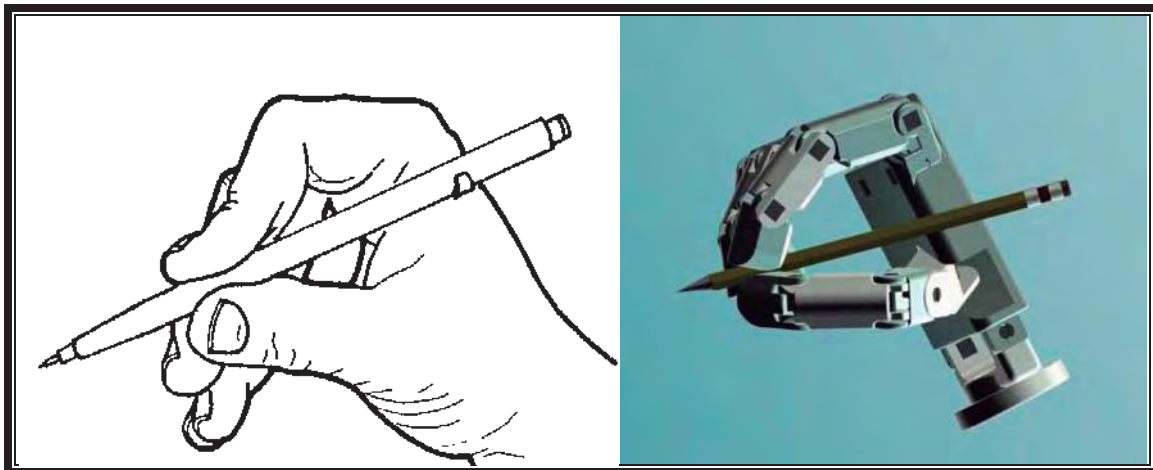


Fig. 3.4, Prensión esférica

## Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

FALANGES DE LOS DEDOS DE LA MANO ARTIFICIAL					
	METACARPO	ABDUCTOR	PROXIMAL	MEDIAL	DISTAL
PULGAR	71°	80°	50°	-----	35°
ÍNDICE	-----	30°	80°	30°	20°
MEDIO	-----	-----	65°	37.5°	25°
ANULAR	-----	-----	67°	37.5°	25°

*Tabla. 3.2, Posición de los elementos de la mano artificial para realizar la prensión esférica*



*Fig. 3.5, Prensión palmar*

FALANGES DE LOS DEDOS DE LA MANO ARTIFICIAL					
	METACARPO	ABDUCTOR	PROXIMAL	MEDIAL	DISTAL
PULGAR	55°	63°	70°	-----	35°
ÍNDICE	-----	20°	80°	37.5°	25°
MEDIO	-----	-----	85°	45°	30°
ANULAR	-----	-----	85°	60°	40°

*Tabla. 3.3, Posición de los elementos de la mano artificial para realizar la prensión palmar*

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

## 3.2 Resultados

### 3.2.1 Resultado del algoritmo genético

El algoritmo genético arrojó el siguiente resultado introduciendo únicamente la longitud  $L_D$ , que es la correspondiente a la dimensión de la falange medial del dedo en cuestión.

Eslabón	Longitud (mm)
$L_A$	4.04338
$L_B$	27.13058
$L_C$	4.91391
$L_D$ (Conocido)	28.0000

Tabla. 3.4 Longitud de los eslabones del mecanismo de cuatro barras cruzado



Fig. 3.6, Algoritmo genético

El resultado del algoritmo genético se comparó con el procedimiento de grashof tradicional y se concluye que el empleo de esta técnica de inteligencia artificial es bastante robusta y permite explorar grandes espacios de búsqueda.

## Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

### 3.2.2 Comparación de la mano artificial con el órgano terminal antropomorfo desarrollado en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la UMSNH.

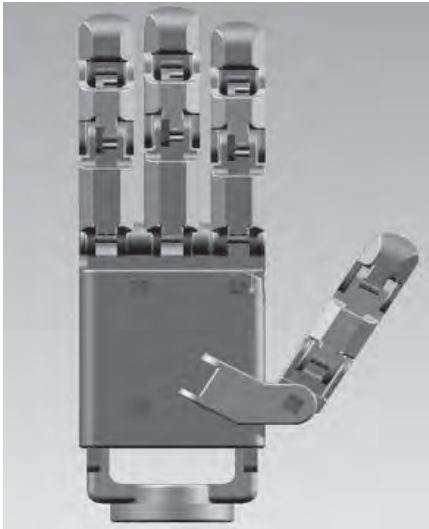


Fig. 3.7, Mano artificial

- ✓ Mano Artificial con cuatro dedos flexibles.
- ✓ Presenta el dedo pulgar oponible a los dedos restantes.
- ✓ Evita tener el la mayor medida posible espaciamentos entre elementos lo que provoca una reducción en peso y tamaño de la Mano Artificial.
- ✓ Reduce al máximo posible los elementos que conforman la Mano Artificial.
- ✓ Uso de cable que simulan el funcionamiento de los tendones, los cuales no presentan estiramiento al momento de estar conduciendo la Mano Artificial.



Fig. 3.8, Órgano terminal antropomorfo

- Órgano con cuatro dedos flexibles.
- Dedo pulgar oponible a los otros tres dedos.
- Presenta espaciamentos muy considerables, lo que contribuye a un agrandamiento del Órgano Terminal Antropomorfo.
- Órgano terminal que presenta un número considerable de elementos que constituyen su morfología, lo cual produce ineficiencia al momento de estar ensamblando está.
- Los cables usados en el Órgano Terminal Antropomorfo presentan estiramiento al ser

## Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

- ✓ Uso de cubiertas para los tendones.
- ✓ Utiliza como elementos para la extensión resortes de acero, los cual hace la tarea de extensión con muy buena eficiencia. Y con esto ayuda a prolongar el ciclo de operación de la Mano Artificial.
- ✓ Utiliza un mecanismo de cuatro barras cruzado, el cual conduce de manera eficiente el movimiento relativo existente entre las falanges mediales y distales de los dedos índice medio y anular.
- ✓ En la síntesis del mecanismo antes mencionado se apego en la mayor medida posible a convención de Grashof.

$$\begin{aligned}L_A &= 4.04338 \text{ mm} \\L_B &= 27.13058 \text{ mm} \\L_C &= 4.91391 \text{ mm} \\L_D &= 28.0000 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$L_A + L_D \leq L_C + L_B$$

$$32.0433 \leq 32.0444$$

Lo que hace una diferencia de 0.0011, lo que implica que cumple en la mayor medida posible con la convención de Grashof ayudando a un funcionamiento óptimo del

accionados.

- No utilizan cubiertas en tendones, lo que origina un sobre estiramiento de éstos al momento de estar operando.
- Utiliza como elementos para extensión ligas, las cuales son degradadas muy rápidamente por el funcionamiento del Órgano. Provocando una reducción considerable en el ciclo de trabajo del mismo.
- El Órgano Terminal también utiliza un mecanismo de cuatro barras articulado cruzado para el mismo propósito.
- En la síntesis del mecanismo utilizado por el Órgano terminal cumple con la ley de Grashof.

$$\begin{aligned}SP &= 30.00 \text{ mm} \\PQ &= 4.41 \text{ mm} \\QR &= 31.42 \text{ mm} \\RS &= 6.02 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$PQ + QR \leq RS + SP$$

$$35.83 \leq 36.02$$

La diferencia es de 0.19 mm, esto origina que cumple con la convención de Grashof, pero de manera muy superficial. Esto implica que el mecanismo de cuatro barras genere un gran número de puntos muerto y esto

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

---

mecanismo de cuatro barras articuladas cruzado.

da resultado a que el mecanismo tienda a romperse y es uno de los problemas más visibles que ha presentado el Órgano Terminal Antropomorfo.

## 3.3 Discusión

Los experimentos realizados muestran que aún se tienen fallas en el diseño, que pueden solucionarse con el trabajo a futuro.

El mecanismo de cuatro barras cruzado, utilizado para restringir el movimiento de las falanges mediales y distales de los dedos índice, medio y anular, genera grandes ventajas para el control de la mano artificial, ya que influye en la disminución de movimientos a controlar. Pero sería más eficiente si la mano artificial estuviera dotada de dedos más adaptables, es decir que cada una de sus falanges tengan movimiento independiente.

Dentro de los experimentos realizados al diseño de la mano artificial, expresados en forma de animaciones, se observó que al hacer presión cilíndrica las falanges mediales de los dedos presentan una área de contacto dactilar muy pequeña e incluso en ocasiones la falange medial no tiene contacto con el objeto. Este problema se puede solucionar fácilmente eliminando el mecanismo de cuatro barras utilizado para restringir el movimiento relativo de las falanges mediales y distales, implementando un tendón más para que la falange distal realice su tarea de manera independiente, lo que ayudaría a mejorar en gran medida la eficiencia de la mano artificial. Con la eliminación del mecanismo también se pueden hacer más esbeltos los dedos artificiales y con esto más eficientes para prensiones palmares.

Sin duda, la implementación de cubiertas en los tendones artificiales ayuda a evitar la elongación de los tendones al momento de estar operando la mano artificial. Lo que origina resultados muy satisfactorios en este diseño.

Dentro de los resultados satisfactorios logrados es el antropomorfismo logrado sobre la mano artificial, ya que en dimensión se puede comparar con la mano humana promedio.

## **Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.**

---

---

Algunas de las manos artificiales encontradas durante la investigación documental exceden en gran medida las dimensiones de la mano humana provocando un aumento de peso y menor antropomorfismo. El peso aproximado de la prótesis es de 185 gr, esto sin tomar en cuenta los tendones artificiales, ni las cubiertas útiles para el funcionamiento de éstos.

El diseño de los dedos está pensado para tolerar posible modificaciones en la implementación de nuevos elementos, que ayuden a ser más eficiente el desempeño de éstos, tal es el caso de la colocación de rodamientos de pequeñas dimensiones para disminuir aún más la fricción de las articulaciones.

En lo correspondiente a la manufactura, los dedos están diseñados para tener flexibilidad de fabricación, ya que pueden ser manufacturados mediante maquinados convencionales, CNC, moldes o máquina de prototipos rápidos con el polímero ABS. Tomando en cuenta que en ésta última es muy fácil la fabricación de la mano artificial, además, el polímero que se utiliza es suficientemente resistente a los esfuerzos a los que va a estar sometido cada uno de los elementos de la mano artificial, tomando en cuenta que esta prótesis es de precisión y no de fuerza.

*CAPÍTULO IV.*

**CONCLUSIONES**

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

---

## 4.1 Conclusiones generales

En base a los objetivos planteados al inicio de este proyecto, y teniendo en cuenta los resultados obtenidos durante el desarrollo del diseño de la Mano Artificial, se puede desplegar las siguientes conclusiones.

1. La mano artificial tiene una morfología más humana. La sección de los dedos presenta tales ventajas anatómicas, que se puede colocar una cubierta de látex para hacerla más cosmética.
2. Al hacer un análisis profundo de los movimientos de la Mano Humana en toda su capacidad, se concluyó omitir el dedo meñique debido al poco trabajo que éste realiza. El eliminar el dedo meñique disminuirá la complejidad del control.
3. Al valorar de manera profunda los movimientos de la Mano Humana, y tomando en cuenta la complejidad que presentan los robots y las leyes de control que los gobiernan, se optó por eliminar los movimientos de aducción y abducción de los dedos medio y anular, debido a que estos movimientos son muy limitados. Otro de los movimientos que es tomado muy en cuenta, es el existente entre la falanges medial y distal de los dedos índice, medio y anular. Para el cual se contempló el uso de un mecanismo, el cual permite realizar dicho movimiento de manera muy eficiente y con ello reducir el número de movimientos a controlar. Es verdad que entre mayor sea el número de articulaciones en una prótesis, ésta es más funcional, versátil y eficiente, pero también es cierto que entre mayor sean los movimientos, el control es más complejo.
4. Observando las habilidades motrices que presenta la mano artificial resultante, se afirma que es una buena aproximación a la mano humana. Sin embargo, aún falta mucho esfuerzo y estudio para acercarse a la funcionalidad y versatilidad tan excepcionales que presenta la mano humana.

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

## 4.2 Trabajo a futuro

Hay mucho por realizar en el desarrollo de prótesis de mano humana, las ideas para los cambios de diseño futuros y metas de gran envergadura tienen que ver con la eliminación de los resortes de torsión, que tienen como función hacer la extensión de los dedos, reemplazándolos por tendones artificiales, los cuales hacen la misma función, pero de manera más eficiente.

Otro aspecto importante es la eliminación del mecanismo de cuatro barras cruzado que, aunque realiza muy bien su trabajo en la conducción de las falanges, requiere de espacio, el cual es necesario para implementar pequeños rodamientos en las articulaciones interfalángicas, esto con el fin de disminuir la fricción en las articulaciones para un óptimo desempeño de la mano artificial.

Tomando en cuenta la poca utilidad que se le da al dedo meñique se cree que es necesario tomarlo en cuenta en diseños futuros, ya que se pretende que en la terminación de este proyecto la prótesis resultante sea lo más cosmética posible comparable con la mano humana. De lo mencionado en párrafos anteriores da como resultado el incremento en el número de tendones artificiales y ello conlleva a un control más complejo de la mano artificial, pero sin duda alguna incrementaría en gran medida el desempeño de las capacidades motrices de la prótesis.

Dentro de trabajos futuros en este proyecto, se piensa dotar de sensores de temperatura en las yemas de los dedos artificiales, esto con la finalidad de evitar daños en la prótesis al momento de asir objetos que presenten altas temperaturas. También se debe tomar en cuenta el uso de sensores de presión para mantener una fuerza de agarre estable y evitar deslizamientos al momento de estar manipulando objetos.

# Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

---

## REFERENCIAS

- [1] W. Spong, Mark; Vidyasagar, M, *Robot Dynamics and Control*, John Wiley & Sons, United States of America.
- [2] [introducciónalarobotica.com.htm](http://introducciónalarobotica.com.htm).
- [3] [robots-argentina.com.arActuadores\\_manos.htm](http://robots-argentina.com.arActuadores_manos.htm).
- [4] Dorador, González, J.M; Ríos Murillo, P.A; Flores, Luna, R.I; Juárez Mendoza, A.M; Armenta Servín, M.S, *Diseño de Prótesis Inteligentes*, Artículo, UNAM.
- [5] Latarjet, Riuz, Liard; *Anatomía Humana*, Panamericana, 1999.
- [6] Fisiología articular.
- [7] Aguilar, Romero, Enrique Fernando; López, Batís, Germán; *Manipulador Antropomórfico Teleoperado II*. Tesis de licenciatura, UNAM, 2001.
- [8] Rodríguez, Navarro, Miguel Angel; *Desarrollo de un Órgano Terminal Antropomorfo para un Robot*, Tesis de Maestría, UMSNH, 2003.
- [9] Suárez, Raúl; Grosch, Patrick; *Mano Mecánica MA-I*, Artículo, Instituto de Organización y Control de Sistemas Industriales (IOC) Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- [10] [www.shadow\\_dextrous\\_hand\\_technical\\_specification\\_C5.com](http://www.shadow_dextrous_hand_technical_specification_C5.com).
- [11] <http://www.kk-dainichi.co.jpegifuhand.html>.
- [12] [www.touchbionics.com](http://www.touchbionics.com).
- [13] Censo de población [www.inegi.com.mx](http://www.inegi.com.mx)
- [14] L. Norton, Robert; *Diseño de Máquinas*, Prentice Hall, México 1994.
- [15] Pahl, Gerhard; Beitz, Wolfgang; *Engineering Desing*, Ken Wallace, Cambridge, 1988.
- [16] <http://www.pdca.espruebasiddef.html>.
- [17] [https://sunwc.cepade.es/~jrivieraorg\\_temasmetodosmodel\\_simulacmodelo\\_idef0.htm](https://sunwc.cepade.es/~jrivieraorg_temasmetodosmodel_simulacmodelo_idef0.htm).

## Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

---

- [18] Ayala, Álvaro; Tapia, Norman; Rodolfo, Castelán; Trujillo, Magdalena, *Metodología para el diseño de moldes de inyección de plástico*. Procedente del XII congreso internacional anual de la Somim, Acapulco, Guerrero, México, 20 al 22 de Septiembre, 2006.
- [19] H. Mabie, Hamilton; F. Reinholtz, Charles; *Mecanismos y Dinamica de Maquinaria*, Limusa, México 1998.
- [20] Edward Shigley, Joseph; *Análisis Cinemática de Mecanismos*, (McGraw-Hill)
- [21] Goldberg, D. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and machine Learning*, Addison-Wesley Publishing company, Inc., united States of America, 1<sup>st</sup> edition, 1989.
- [22] Michalewicz, Z. *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer, United States of America, 3<sup>a</sup> edición, 1999.
- [23] Juárez, C, I., “*Sobre las regiones Geométricas Articulares y su Aplicación en el Mejoramiento del Desempeño de un Manipulador Mediante Estrategias Evolutivas*”. Tesis doctoral, UNAM, 2002.
- [24] Manual de Pro-ENGINEER Wildfire 3.0.
- [25] <http://www.uvigo.es/diseñoindustrialcad.html>.
- [26] <http://www.en.wikipedia.org/wiki/grashof.htm>.
- [27] S. Hall, Allen; R. Holowenko, Alfred; G. Laughlin, Herman; *Teoría y Problemas de Diseño de Máquinas*, McGraw-Hill, México 1986.
- [28] Gran Diccionario Enciclopédico Visual, Panamericana Formas e Impresos S.A, 1995.
- [29] E. Rosheim, Mark; *Robot Evolution: the development of anthropotics*, JOHN WILEY & SONS, INC.
- [30] P. Chironis, Nicholas; Sclater, Neil; *Mechanisms & Mechanical Devices Sourcebook*, McGraw-Hill, Second Edition.
- [31] W. Spong, Mark; M. Vidysagar; *Robot Dynamics and Control*, JOHN WILEY & SONS, INC.

## Desarrollo mecatrónico de una mano artificial con propósitos biomédicos: Parte mecánica.

---

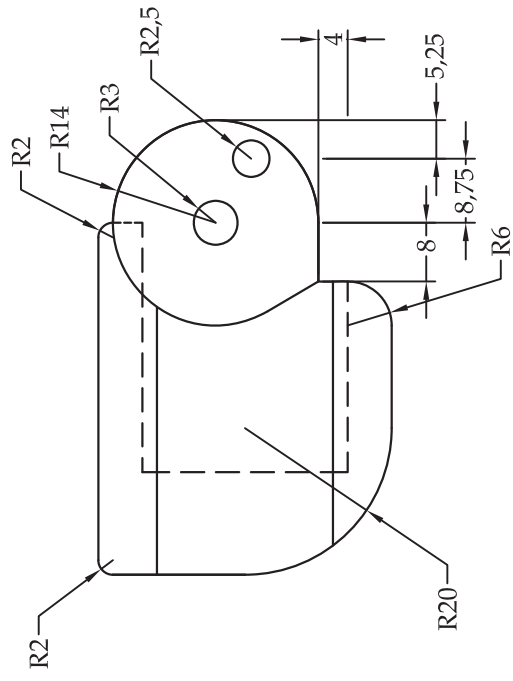
---

- [32] Martín, José, *Cinemática y Estática (teoría y problemas)*, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España 1997.
- [33] Cardona Foix, Salvador; Clos Costa, Daniel, *Teoría de Máquinas*, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España 2001.
- [34] Historia de las máquinas, <http://www.arqhys.com/Trabajo.htm/>.
- [35] Máquina inteligente, <http://www.en.wikipedia.org/wiki/machine.htm>.
- [36] C, W, Ham; E, J, Crane; W, L, Rogers, *Mecánica de Máquinas*, McGRAW-HILL, USA 1964.
- [37] Robot, <http://es.wikipedia.org/wiki/robot.htm>.
- [38] Robótica, <http://es.wikipedia.org/wiki/robotica.htm>.
- [39] Electrónica, <http://es.wikipedia.org/wiki/electrica.htm>.
- [40] Automatización, [http://www.grupo-maser.com/PAG\\_Cursos/Auto/auto2/PAGINA%20PRINCIPAL/Automatizacion/Automatizacion.htm](http://www.grupo-maser.com/PAG_Cursos/Auto/auto2/PAGINA%20PRINCIPAL/Automatizacion/Automatizacion.htm).
- [41] Informática, <http://es.wikipedia.org/wiki/informatica.htm>.

# Apéndices

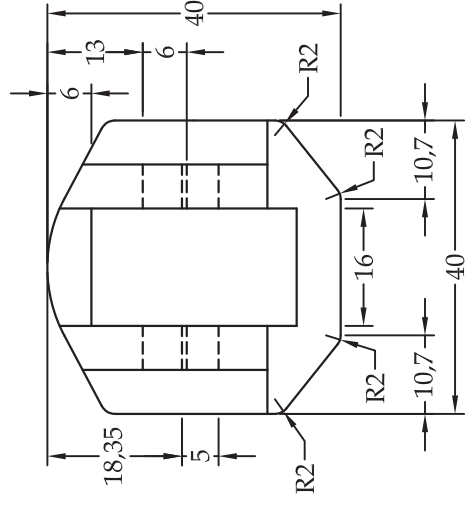
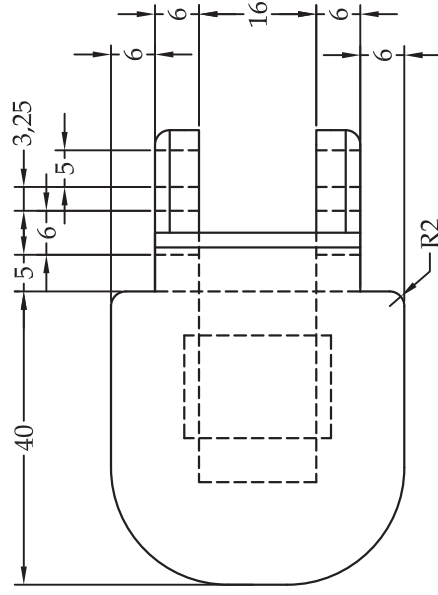
## *Apéndice I, Dibujos de detalle*

Los dibujos de detalle mostrados a continuación fueron realizados con Autocad, ya que este software presenta muy buenas ventajas para realizar dibujos bidimensionales. En los dibujos de detalle se muestra las dimensiones, las cuales son útiles para manufacturar los elementos que componen la mano artificial, así como diferentes vistas de visualización para un mejor entendimiento de ellos.



Vista frontal

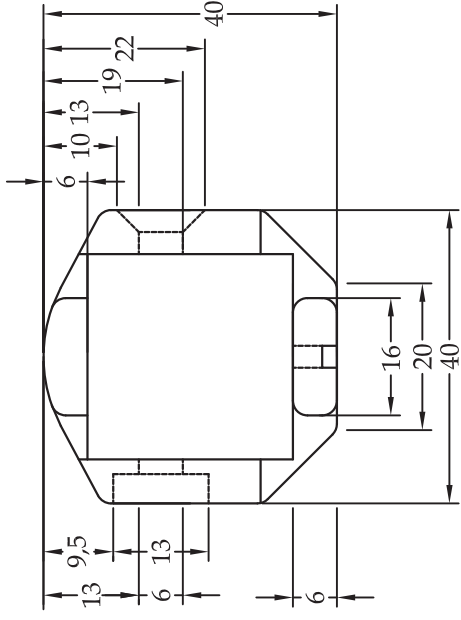
Vista superior



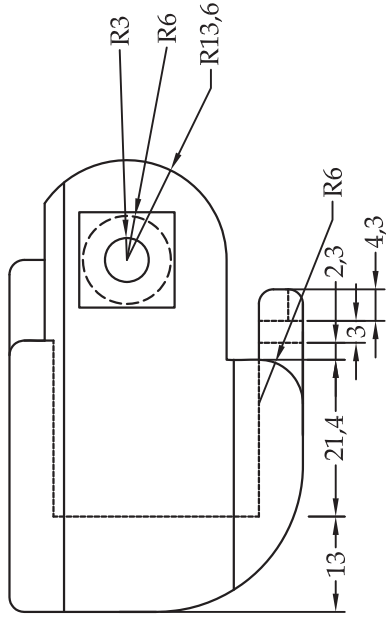
Vista lateral



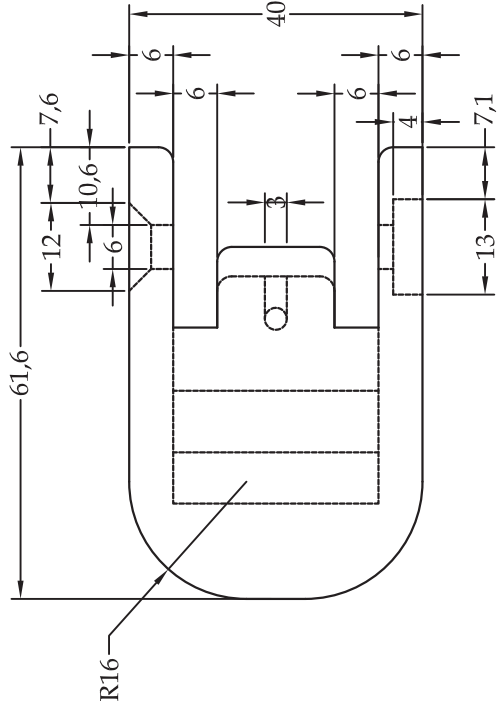
Mano Artificial con Propósitos Biomédicos			
Pieza:	Falange distal dedos índice-medio-anular	Dibujo N°:	001
Diseño:	José Angel Espinoza Arceo	Escala:	1:2
Dibujó:	J A E A	Acotado:	mm
Facultad de Ingeniería Mecánica de la U.M.S.N.H		Cantidad:	3



Vista lateral



Vista frontal

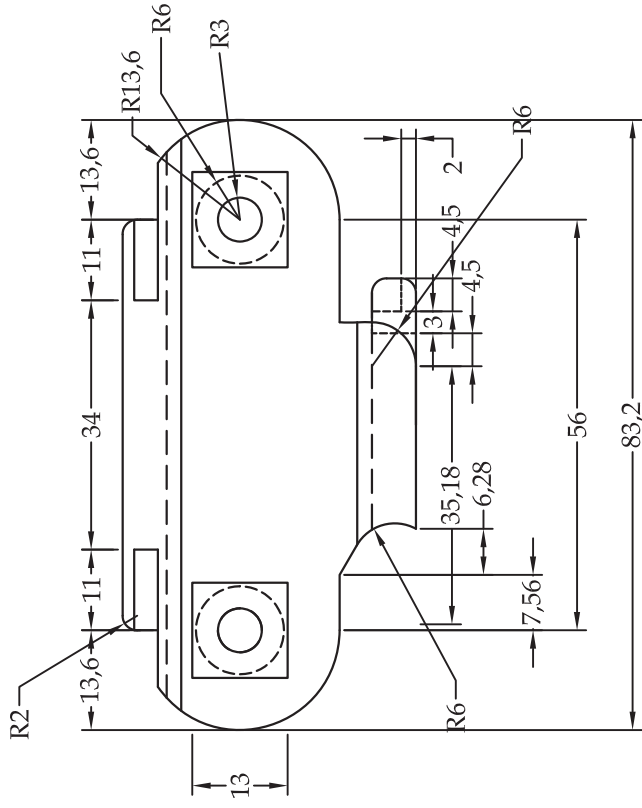


Vista superior

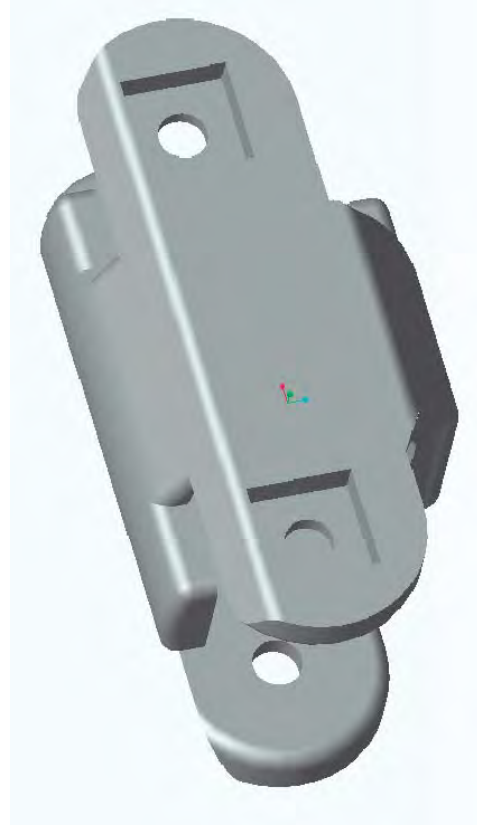
Mano Artificial con Propósitos Biomédicos

Pieza:	Falange distal dedo pulgar	Dibujo N°:	002
Diseño:	José Angel Espinoza Arceo	Escala:	1:2
Dibujó:	J A E A	Acotado:	mm
		Cantidad:	1

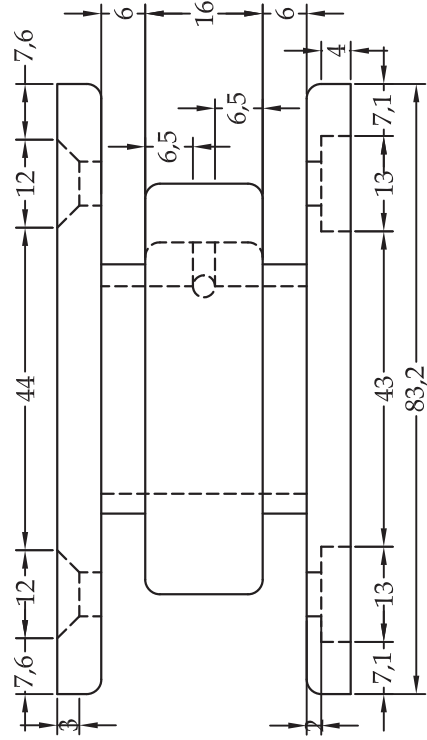
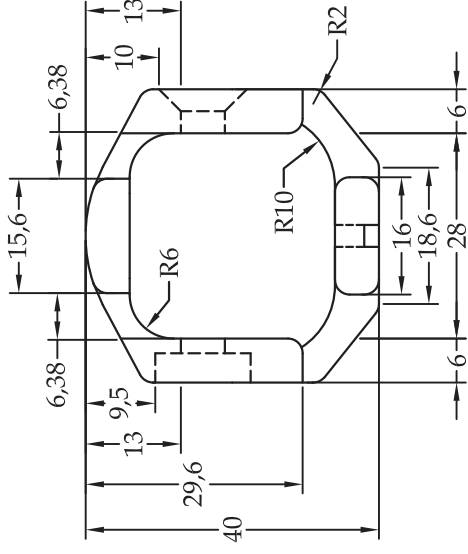
Facultad de Ingeniería Mecánica de la U.M.S.N.H



Vista frontal

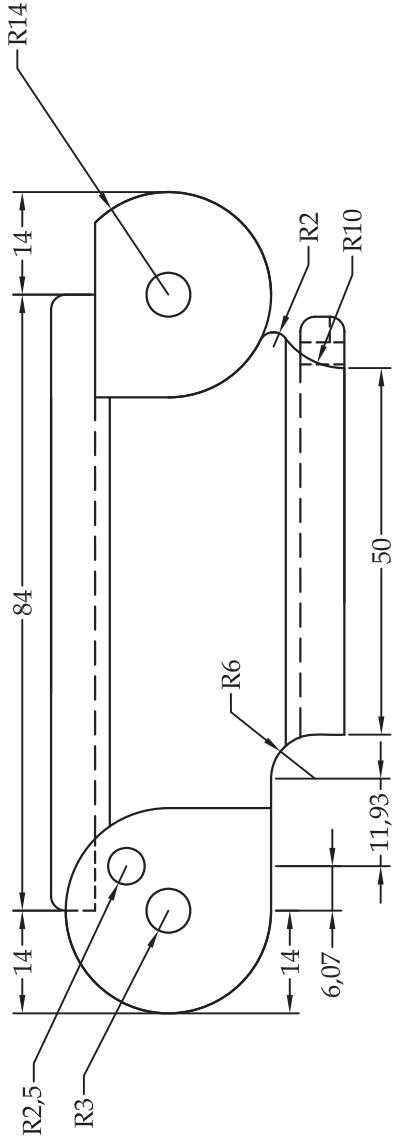


Vista lateral

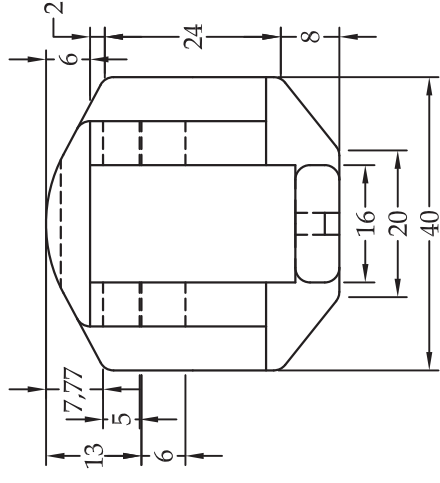


Vista superior

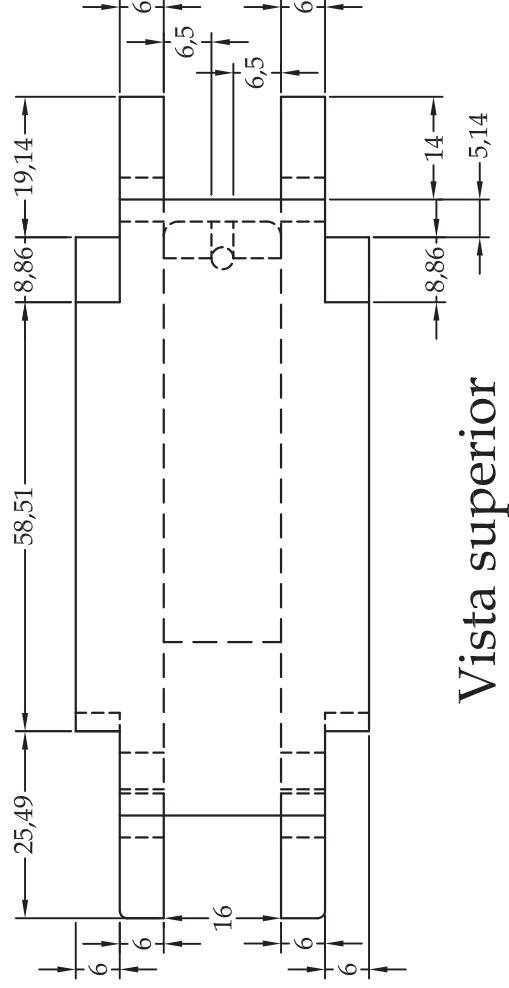
Mano Artificial con Propósitos Biomédicos		
Pieza:	Falange medial dedos índice-medio-anular	Dibujo N°: 003
Diseño:	José Angel Espinoza Arceo	Escala: 1:2
Dibujó:	J A E A	Acotado: mm
		Cantidad: 3



Vista frontal

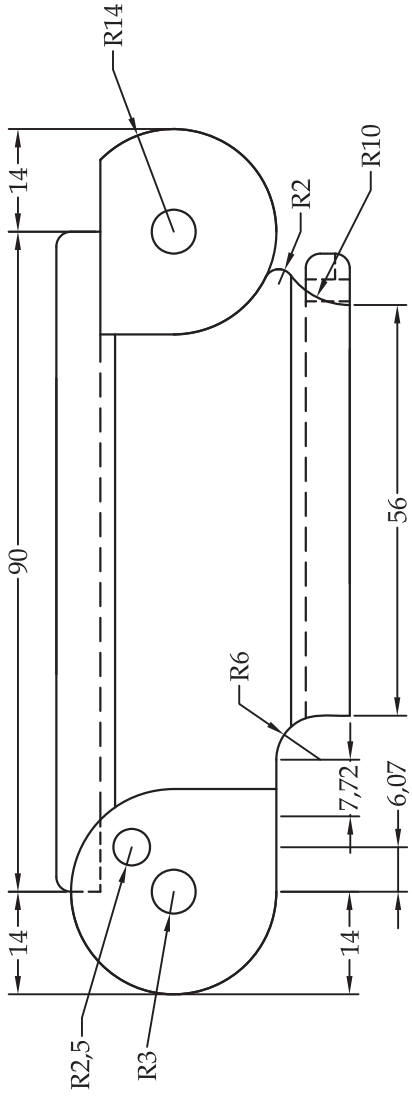


Vista lateral

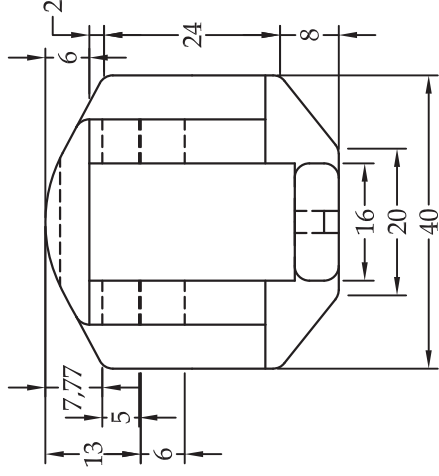


Vista superior

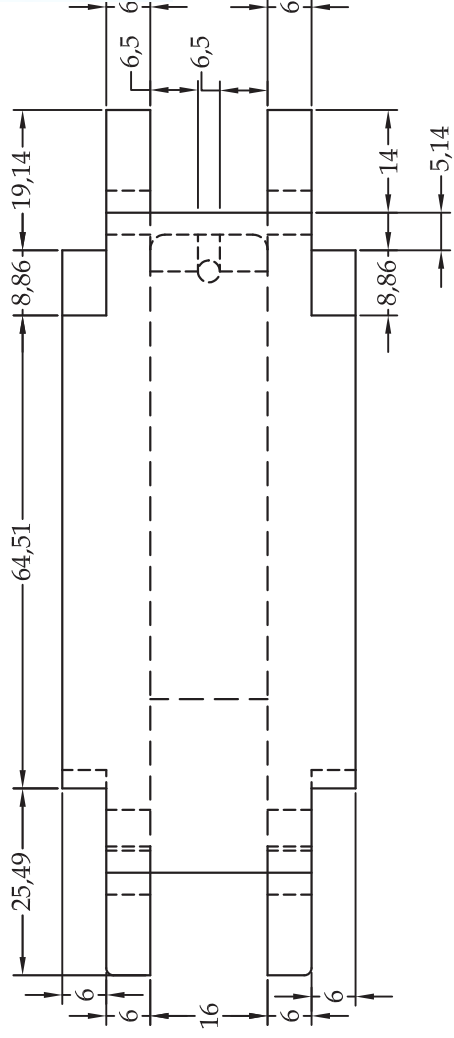
Mano Artificial con Propósitos Biomédicos			
Pieza:	Falange proximal dedo anular	Dibujo N°:	004
Diseño:	José Angel Espinoza Arceo	Escala:	1:2
Dibujó:	J A E A	Acotado:	mm
		Cantidad:	1
Facultad de Ingeniería Mecánica de la U.M.S.N.H			



Vista frontal



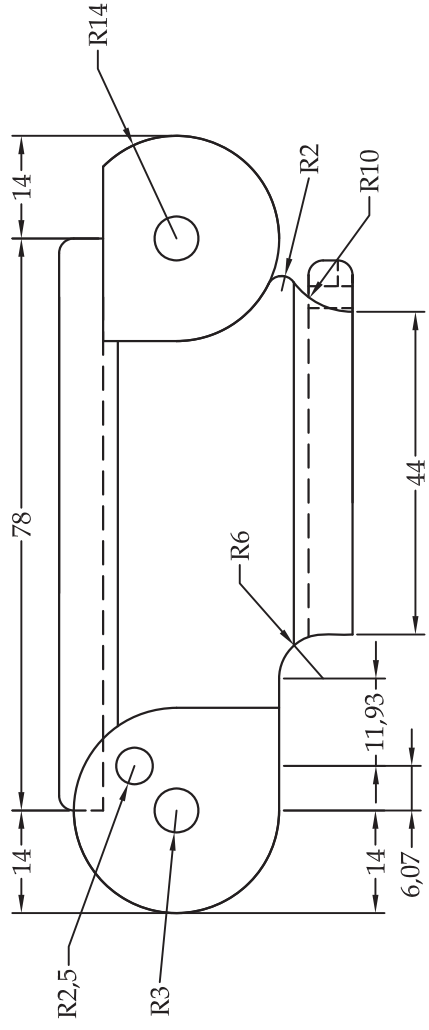
Vista lateral



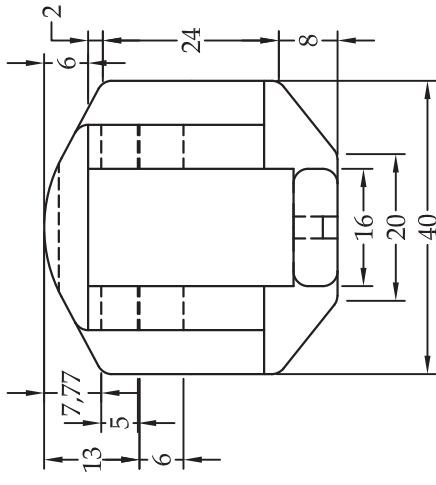
Vista superior

Mano Artificial con Propósitos Biomédicos			
Pieza:	Falange proximal dedo medio	Dibujo N°:	005
Diseño:	José Angel Espinoza Arceo	Escala:	1:2
Dibujó:	J A E A	Acotado:	mm
		Cantidad:	1

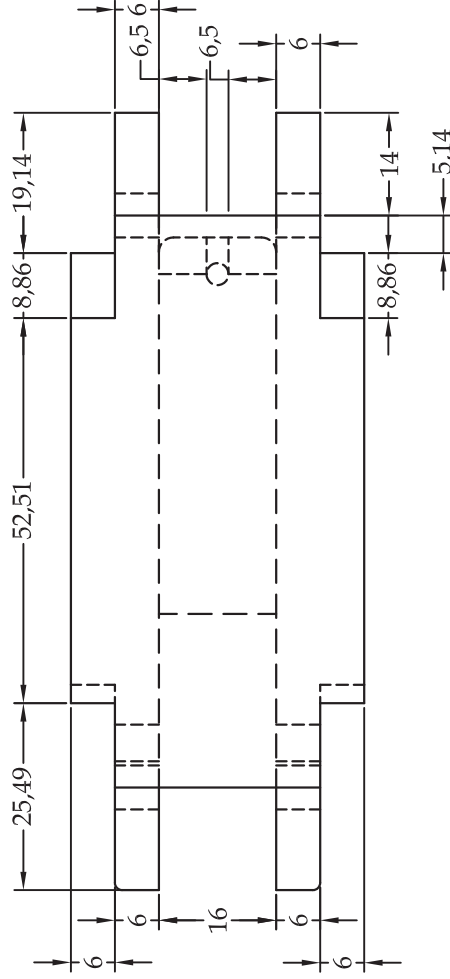
Facultad de Ingeniería Mecánica de la U.M.S.N.H



Vista frontal

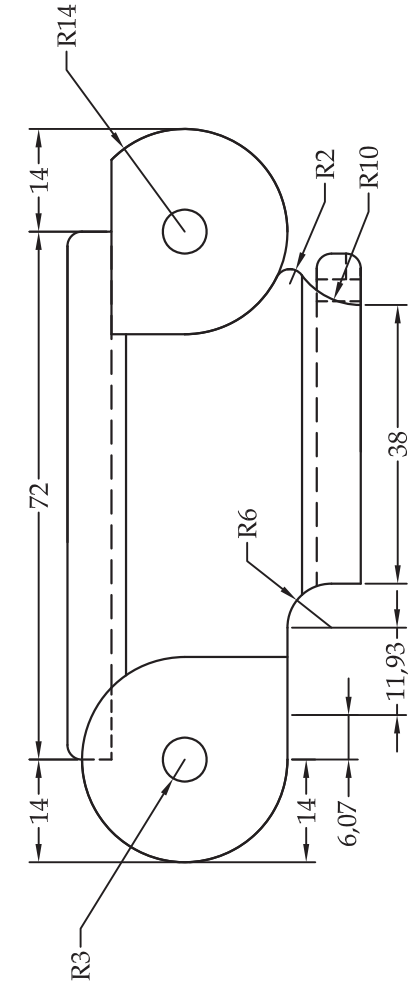


Vista lateral

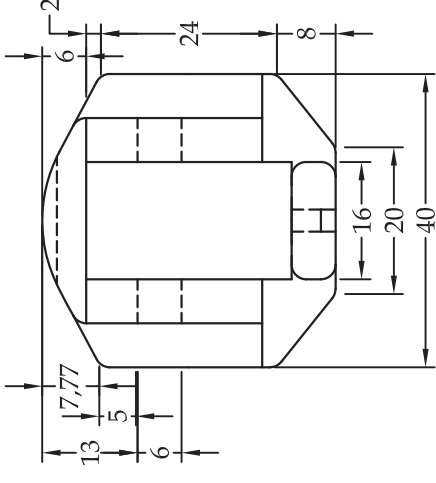


Vista superior

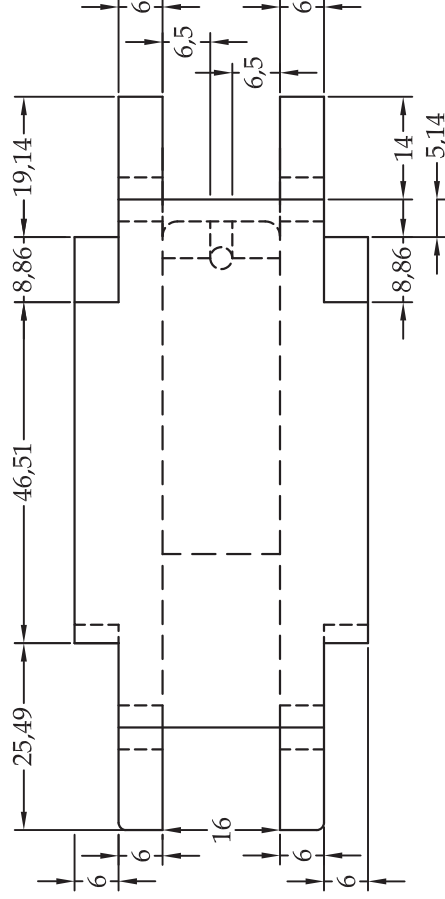
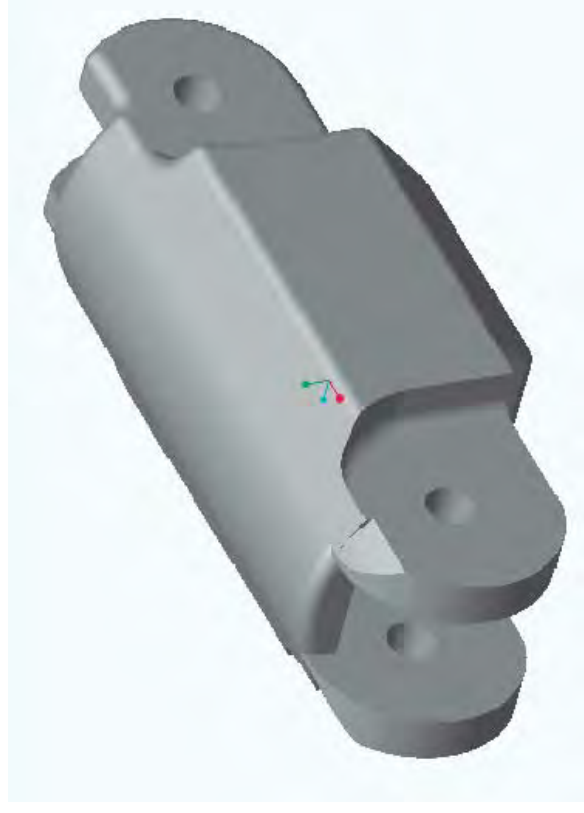
Mano Artificial con Propósitos Biomédicos			
Pieza:	Falange proximal dedo índice	Dibujo N°:	006
Diseño:	José Angel Espinoza Arceo	Escala:	1:2
Dibujó:	J A E A	Acotado:	mm
		Cantidad:	1



Vista frontal

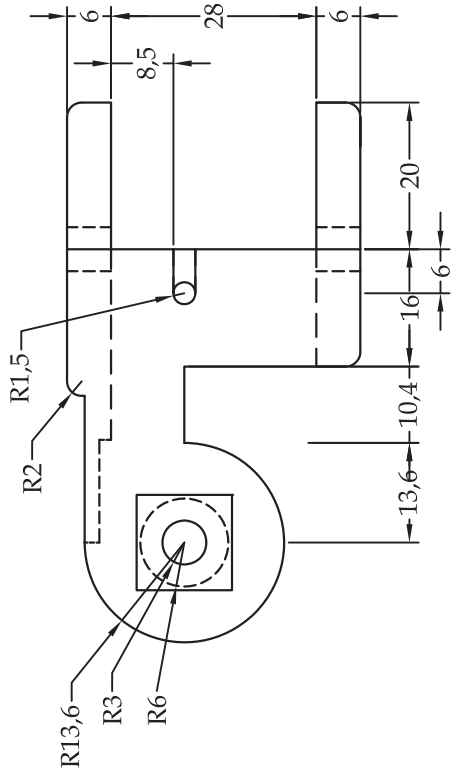


Vista lateral

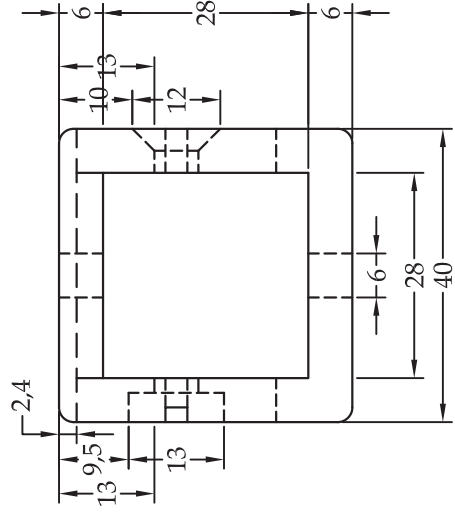


Vista superior

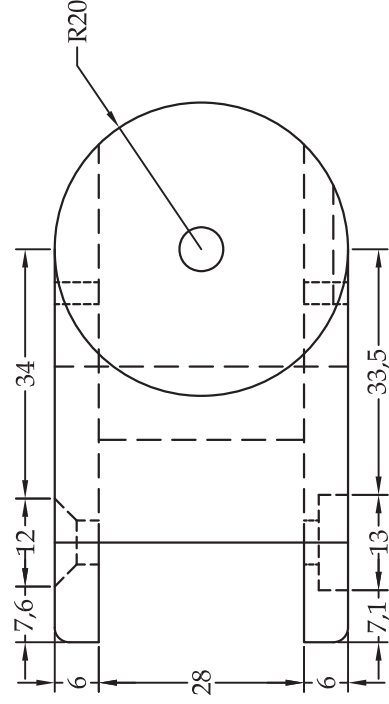
Mano Artificial con Propósitos Biomédicos			
Pieza:	Falange proximal dedo pulgar	Dibujo N°:	007
Diseño:	José Angel Espinoza Arceo	Escala:	1:2
Dibujó:	J A E A	Acotado:	mm
		Cantidad:	1
Facultad de Ingeniería Mecánica de la U.M.S.N.H			



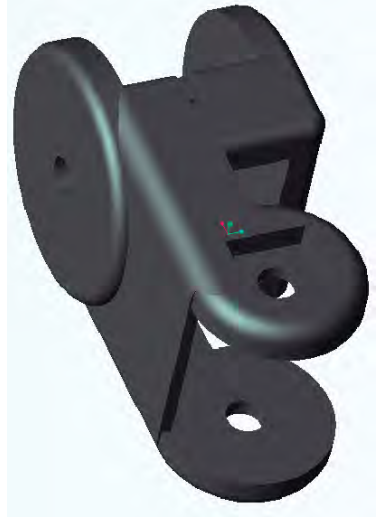
Vista frontal



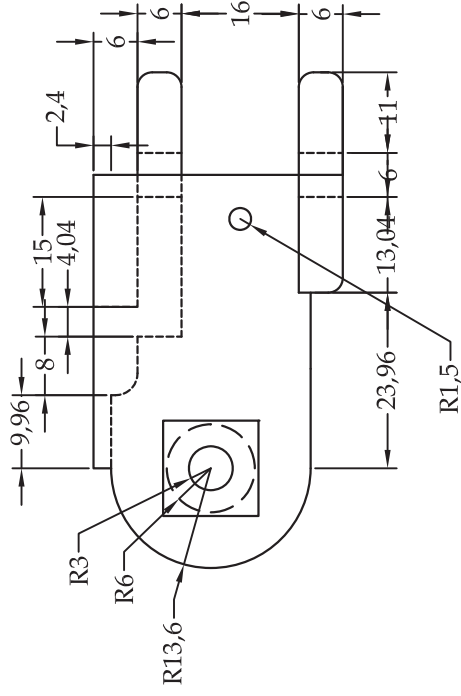
Vista lateral



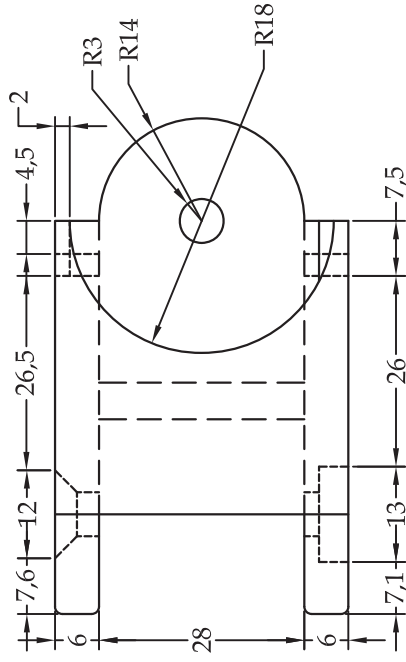
Vista superior



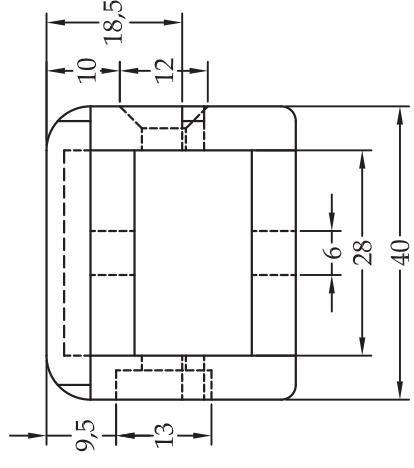
Mano Artificial con Propósitos Biomédicos			
Pieza:	Abductor dedo índice	Dibujo N°:	008
Diseño:	José Angel Espinoza Arceo	Escala:	1:2
Dibujó:	J A E A	Acotado:	mm
		Cantidad:	1
Facultad de Ingeniería Mecánica de la U.M.S.N.H			



Vista frontal



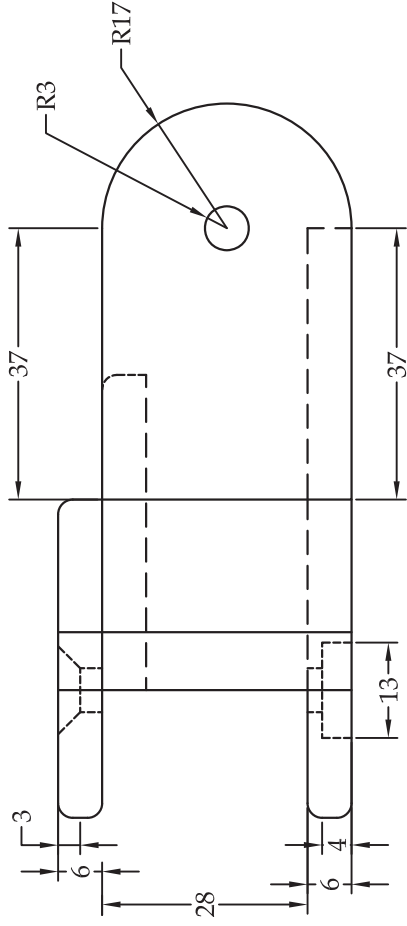
Vista superior



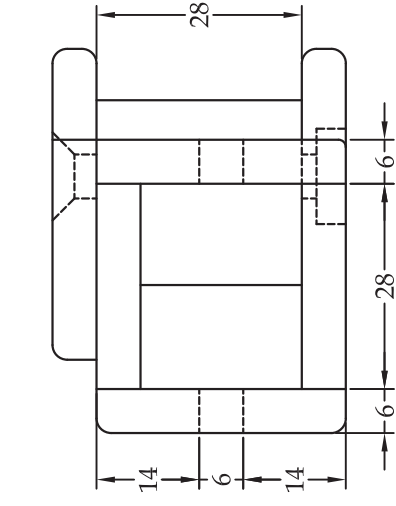
Vista lateral



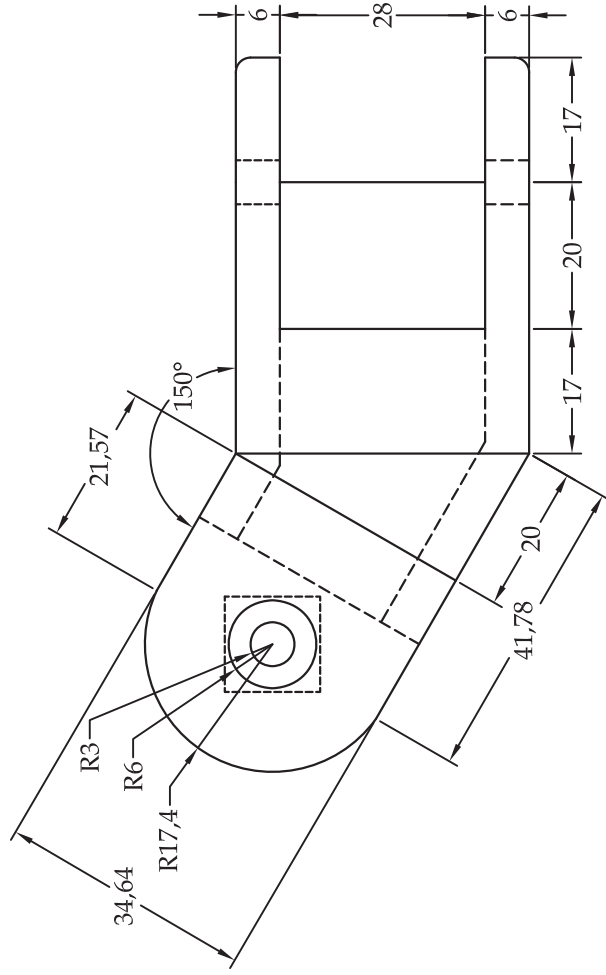
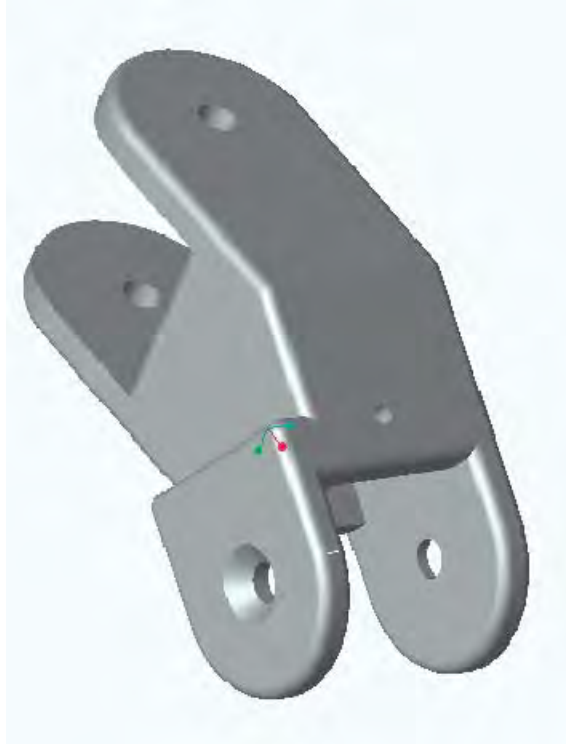
Mano Artificial con Propósitos Biomédicos			
Pieza:	Abductor dedo pulgar	Dibujo N°:	009
Diseño:	José Angel Espinoza Arceo	Escala:	1:2
Dibujó:	J A E A	Acotado:	mm
		Cantidad:	1



Vista frontal

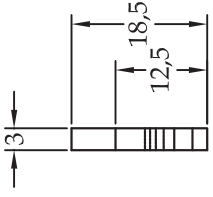


Vista lateral

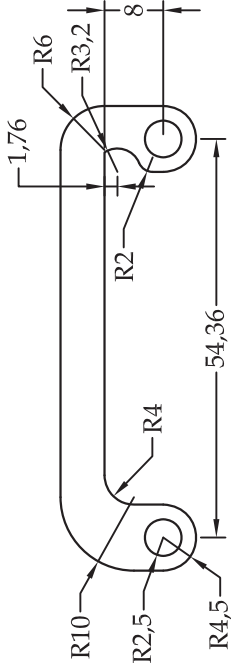


Vista superior

Mano Artificial con Propósitos Biomédicos			
Pieza:	Metacarpo dedo pulgar	Dibujo N°:	010
Diseño:	José Angel Espinoza Arceo	Escala:	1:2
Dibujó:	J A E A	Acotado:	mm
		Cantidad:	1



Vista lateral

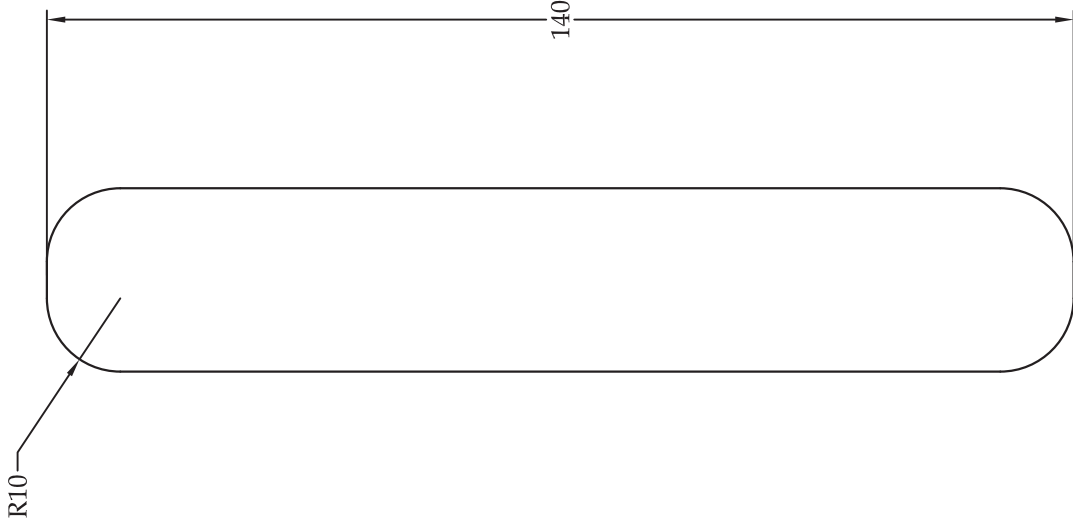


Vista frontal

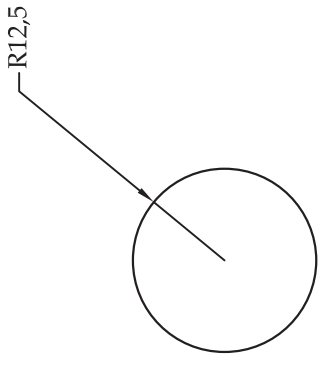


Vista superior

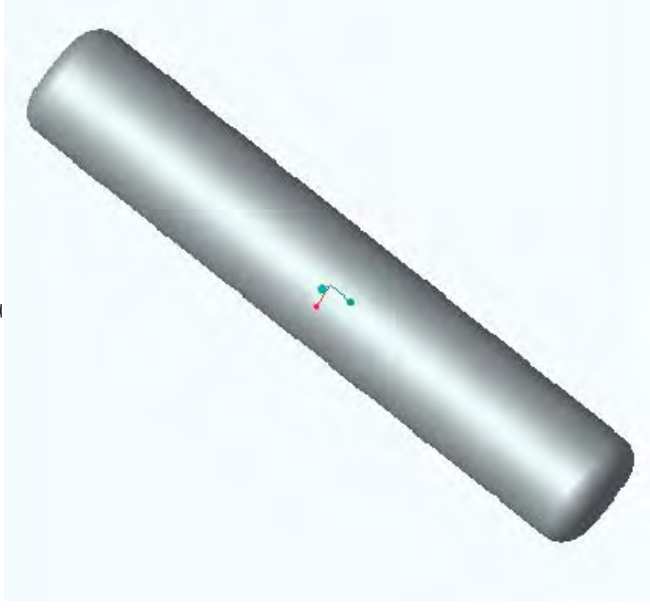
Mano Artificial con Propósitos Biomédicos			
Pieza: Mecanismo falanges dedos índice-medio-anular	Dibujo N°:	011	
Diseñó: José Angel Espinoza Arceo	Escala:	1:2	
Dibujó: J A E A	Acotado:	mm	Cantidad: 3
Facultad de Ingeniería Mecánica de la U.M.S.N.H			



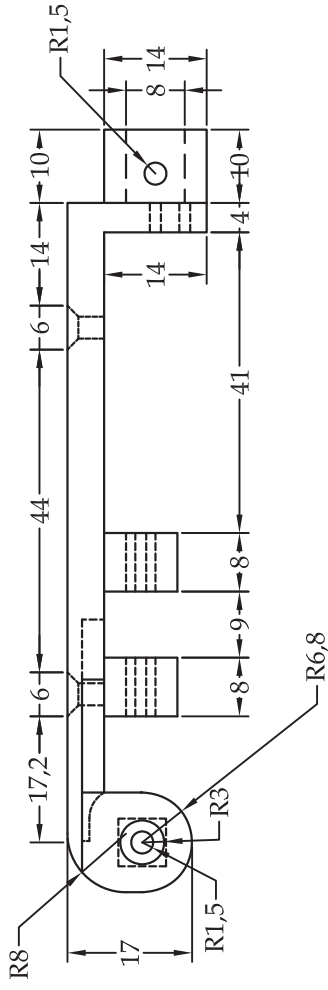
Vista frontal



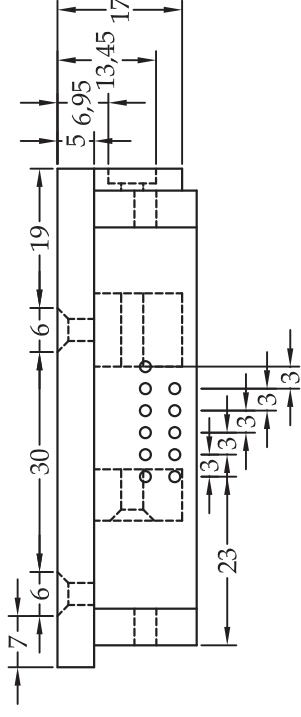
Vista superior



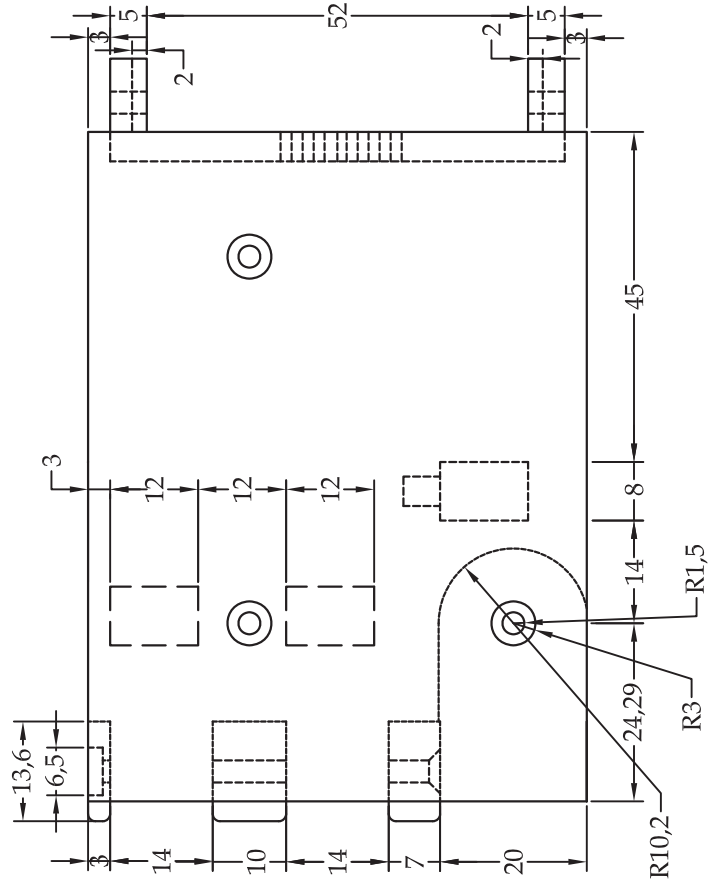
Mano Artificial con Propósitos Biomédicos			
Pieza:	Perno mecanismo	Dibujo N°:	012
Diseño:	José Angel Espinoza Arceo	Escala:	1:10
Dibujó:	J A E A	Acotado:	mm
		Cantidad:	6
Facultad de Ingeniería Mecánica de la U.M.S.N.H			



Vista frontal

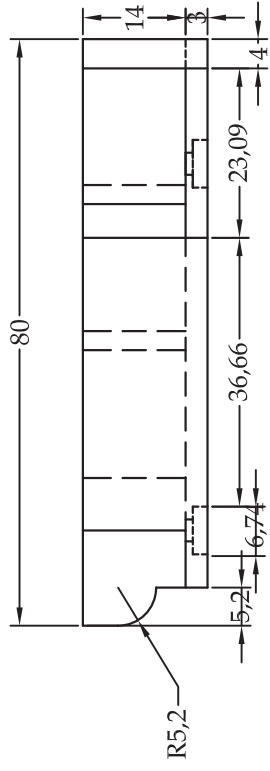


Vista lateral

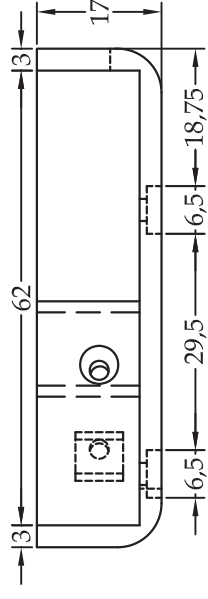


Vista superior

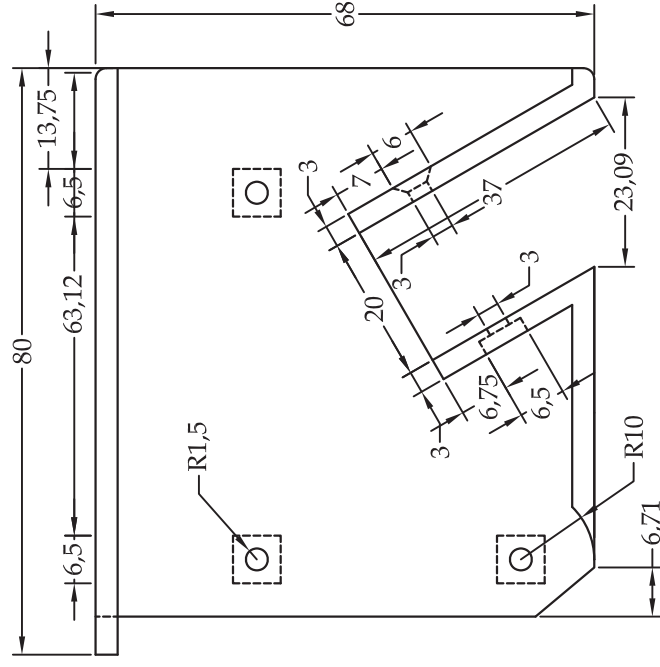
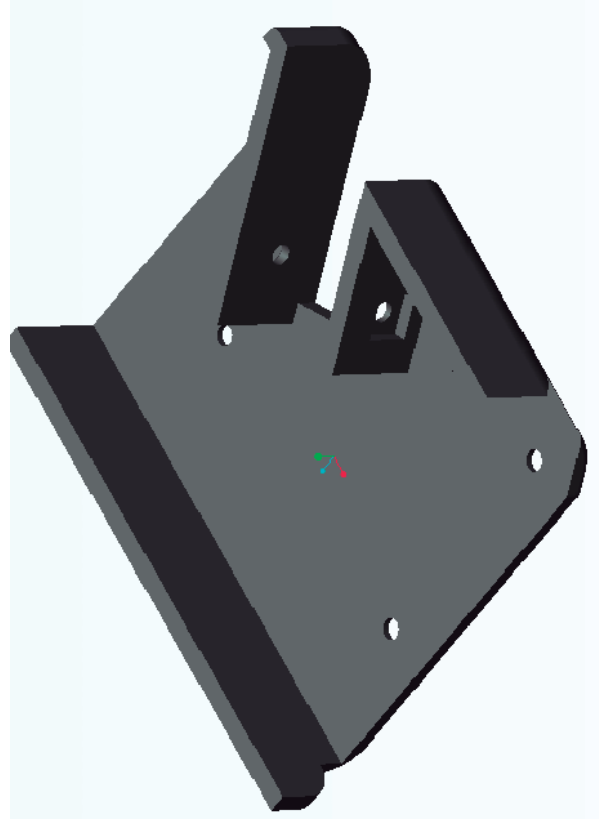
Mano Artificial con Propósitos Biomédicos			
Pieza:	Palma mano parte superior	Dibujo N°:	013
Diseño:	José Angel Espinoza Arceo	Escala:	1:1
Dibujó:	J A E A	Acotado:	mm
		Cantidad:	1
Facultad de Ingeniería Mecánica de la U.M.S.N.H			



Vista frontal

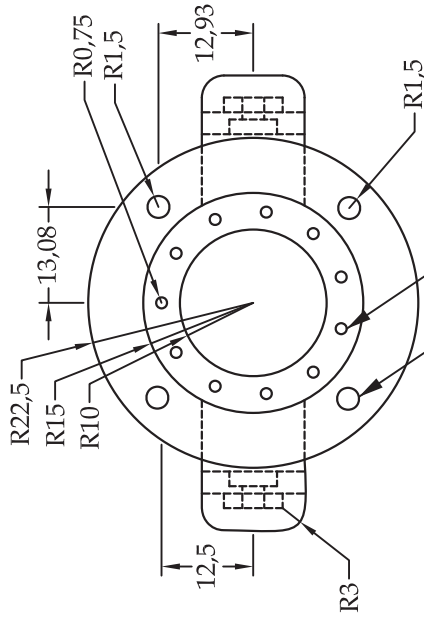


Vista lateral



Vista superior

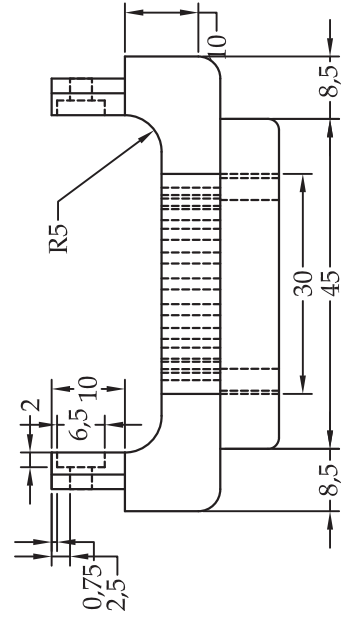
Mano Artificial con Propósitos Biomédicos			
Pieza:	Palma mano parte inferior	Dibujo N°:	014
Diseño:	José Angel Espinoza Arceo	Escala:	1:1
Dibujó:	J A E A	Acotado:	mm
		Cantidad:	1
Facultad de Ingeniería Mecánica de la U.M.S.N.H			



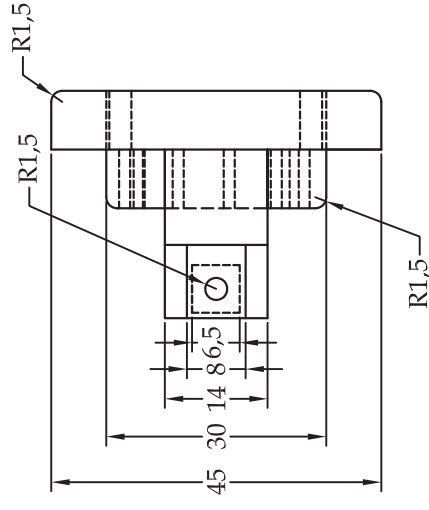
Arreglo de 11 barrenos de R0.75 repartidos de manera simetrica en 360°

Arreglo de 4 barrenos de R1.75 repartidos de manera simetrica en 360°

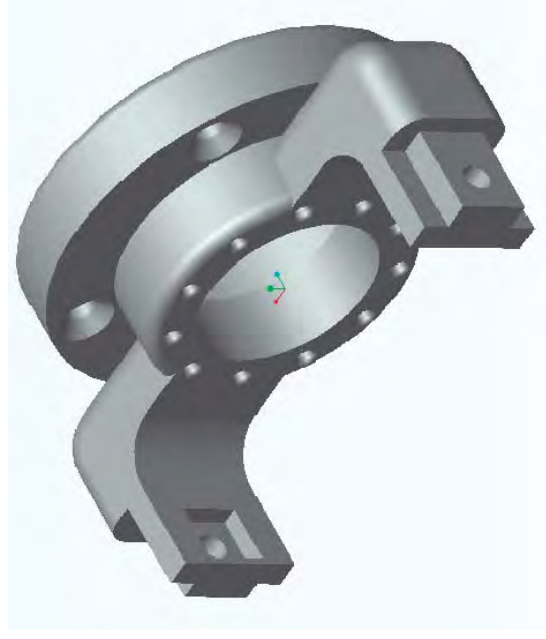
Vista frontal



Vista superior



Vista lateral



Mano Artificial con Propósitos Biomédicos

Pieza: Soporte mano

Dibujo N°: 015

Diseño: José Angel Espinoza Arceo

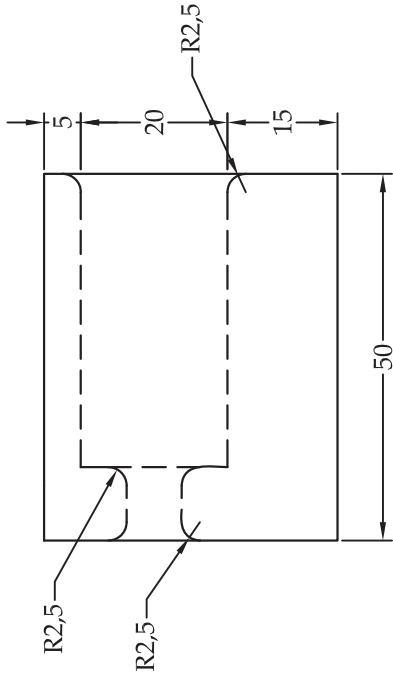
Escala: 1:1

Dibujó: J A E A

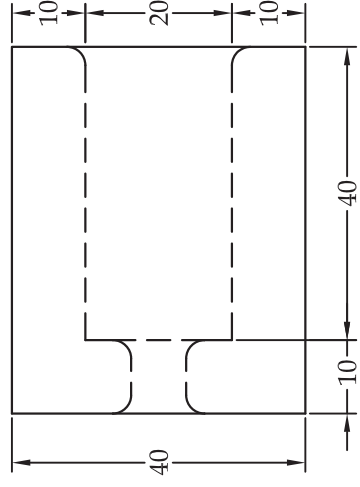
Acotado: mm

Cantidad: 1

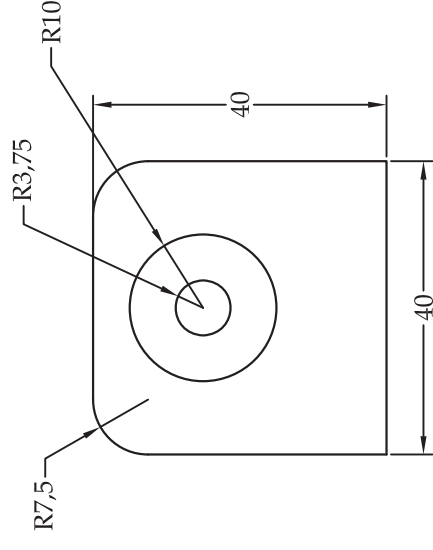
Facultad de Ingeniería Mecánica de la U.M.S.N.H



Vista frontal



Vista superior



Vista lateral

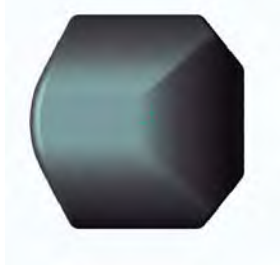
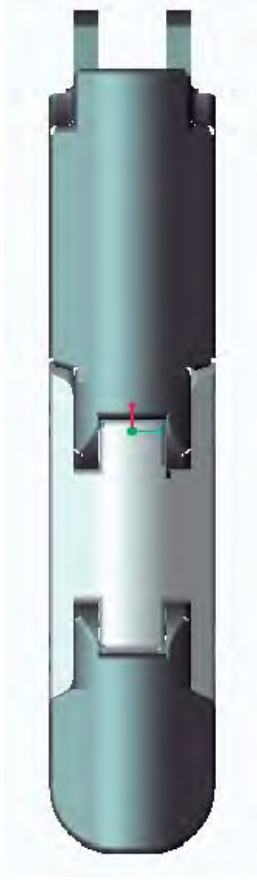


Pieza: Tope		Dibujo N°:	016
Diseño: José Angel Espinoza Arceo		Escala:	1:5
Dibujó: J A E A	Acotado:	mm	Cantidad: 5

Facultad de Ingeniería Mecánica de la U.M.S.N.H

## *Apéndice II, Dibujos de ensamble*

Los dibujos de ensamble muestra en forma 3D los elementos que conforman la mano artificial, éstos fueron realizados con ProEngineer Wildfire 3.0. La utilización de este software es debido a que presenta excelentes ventajas al momento de estar modelando y además con el podemos hacer análisis de movimiento el cual nos ayuda a evitar interferencias entre elementos de la mano artificial.



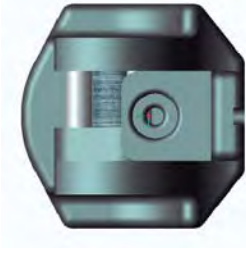
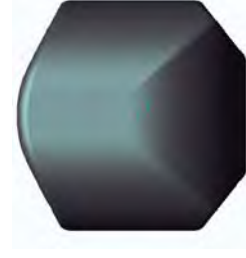
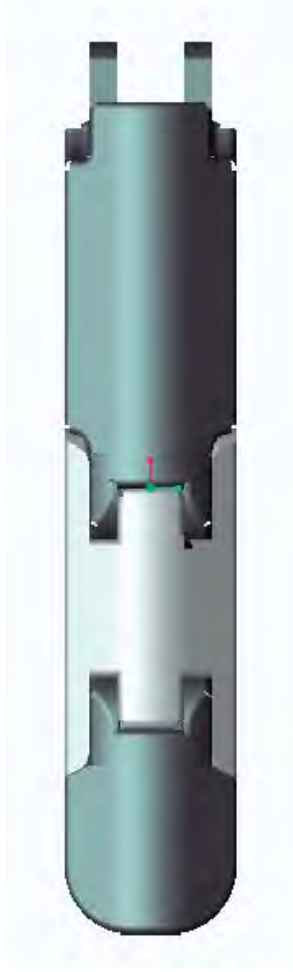
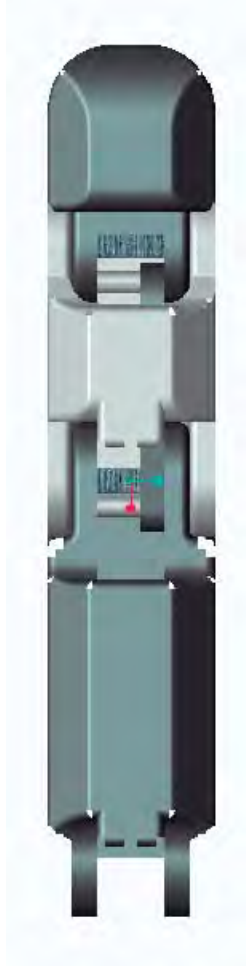
Cantidad	Descripción	Artículo N°
1	Falange distal dedos índice-medio-anular	001
1	Falange medial dedos índice-medio-anular	003
1	Falange proximal dedo anular	004
1	Mecanismo falanges dedos índice-medio-anular	011
2	Pernos mecanismo	012
1	Tope	016

Tornillería		
Cantidad	Descripción	Media
2	Tornillo de cabeza plana	3x20 mm
2	Tuerca cuadrada	3 mm

Mano Artificial con Propósitos Biomédicos

Pieza:	Dedo anular	Dibujo N°:	001
Diseño:	José Angel Espinoza Arceo		
Dibujó:	J A E A	Acotado:	mm
		Cantidad:	1

Facultad de Ingeniería Mecánica de la U.M.S.N.H



Cantidad	Descripción	Artículo N°
1	Falange distal dedos índice-medio-anular	001
1	Falange medial dedos índice-medio-anular	003
1	Falange proximal dedo medio	005
1	Mecanismo falanges dedos índice-medio-anular	011
2	Pernos mecanismo	012
1	Tope	016

Tornillería		
Cantidad	Descripción	Media
2	Tornillo de cabeza plana	3x20 mm
2	Tuerca cuadrada	3 mm

Mano Artificial con Propósitos Biomédicos

Pieza: Dedo medio

Dibujo N°: 002

Diseño: José Angel Espinoza Arceo

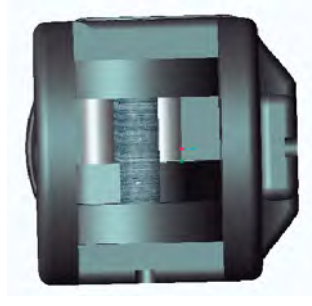
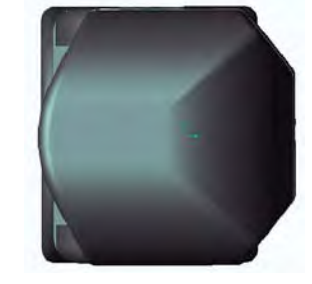
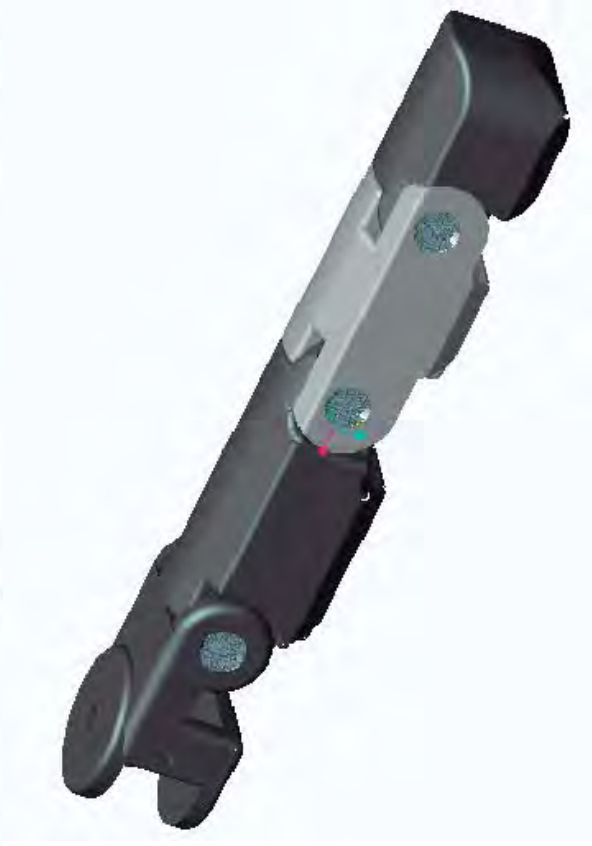
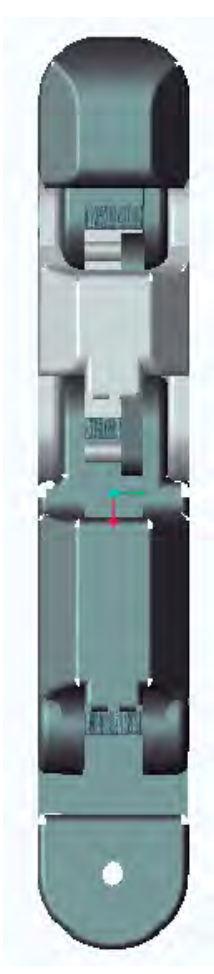
Escala: 1:1

Dibujó: J A E A

Acotado: mm

Cantidad: 1

Facultad de Ingeniería Mecánica de la U.M.S.N.H



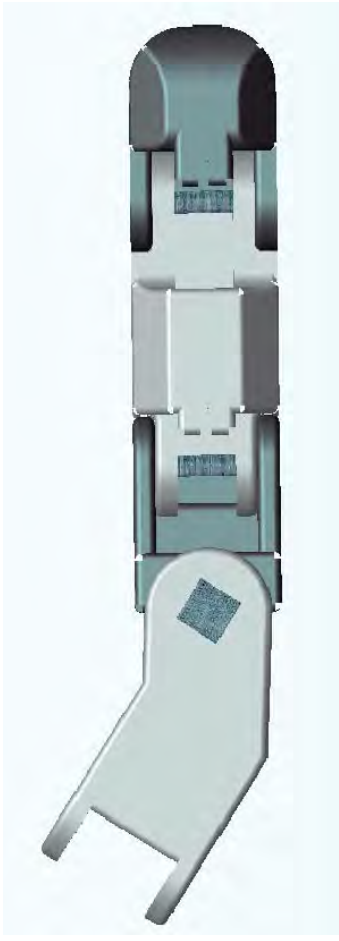
Cantidad	Descripción	Artículo N°
1	Falange distal dedos índice-medio-anular	001
1	Falange medial dedos índice-medio-anular	003
1	Falange proximal dedo índice	006
1	Abductor dedo índice	008
1	Mecanismo falanges dedos índice-medio-anular	011
2	Pernos mecanismo	012
1	Tope	016

Tornillería		
Cantidad	Descripción	Media
3	Tornillo de cabeza plana	3x20 mm
3	Tuerca cuadrada	3 mm

Mano Artificial con Propósitos Biomédicos

Pieza:	Dedo índice	Dibujo N°:	003
Diseño:	José Angel Espinoza Arceo		
Dibujo:	J A E A	Acotado:	mm
		Cantidad:	1

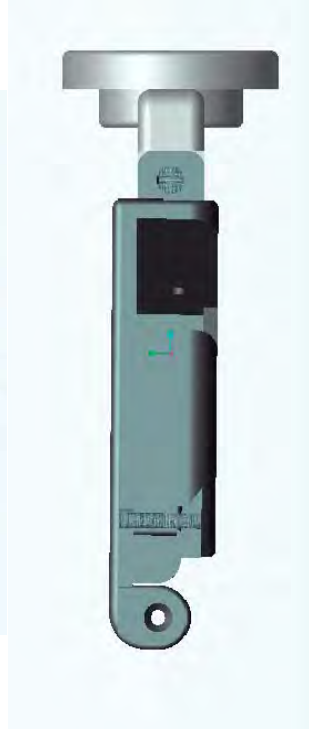
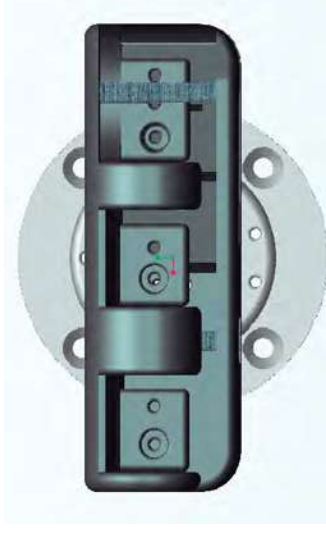
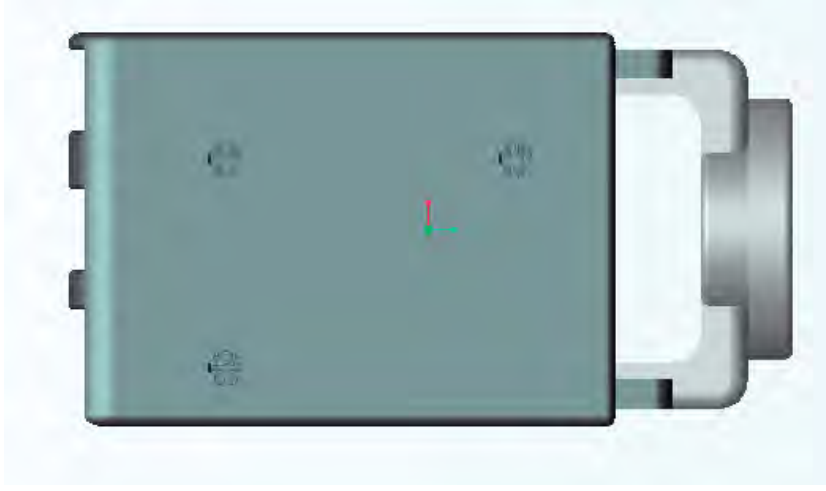
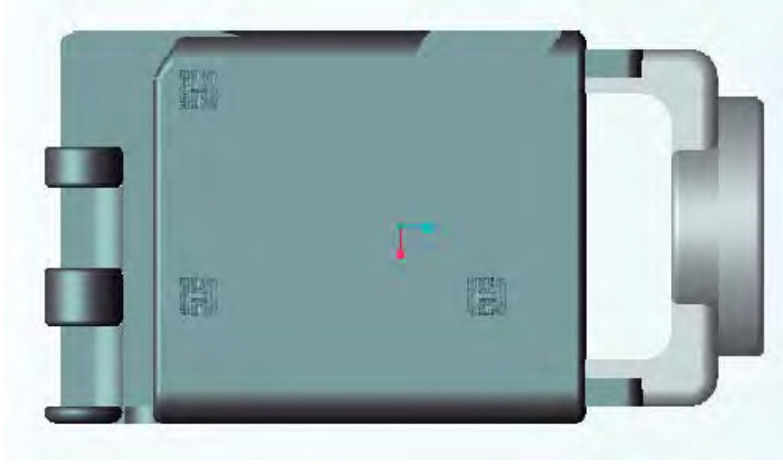
Facultad de Ingeniería Mecánica de la U.M.S.N.H



Cantidad	Descripción	Artículo N°
1	Falange distal dedo pulgar	002
1	Falange proximal dedo pulgar	007
1	Abductor dedo pulgar	009
1	Metacarpo dedo pulgar	010
2	Tope	016

Tornillería		
Cantidad	Descripción	Media
3	Tornillo de cabeza plana	3x20 mm
3	Tuerca cuadrada	3 mm

Mano Artificial con Propósitos Biomédicos		
Pieza:	Dedo pulgar	Dibujo N°: 004
Diseño:	José Angel Espinoza Arceo	Escala: 1:1
Dibujó:	J A E A	Acotado: mm
		Cantidad: 1
Facultad de Ingeniería Mecánica de la U.M.S.N.H		



Cantidad	Descripción	Artículo N°
1	Palma mano parte superior	013
1	Palma mano parte inferior	014
1	SopORTE mano	015

Tornillería		
Cantidad	Descripción	Media
3	Tornillo de cabeza plana	3x22 mm
2	Tornillo de cabeza plana	3x8 mm
3	Tuerca cuadrada	3 mm

Mano Artificial con Propósitos Biomédicos

Pieza: Palma

Dibujo N°: 005

Diseño: José Angel Espinoza Arceo

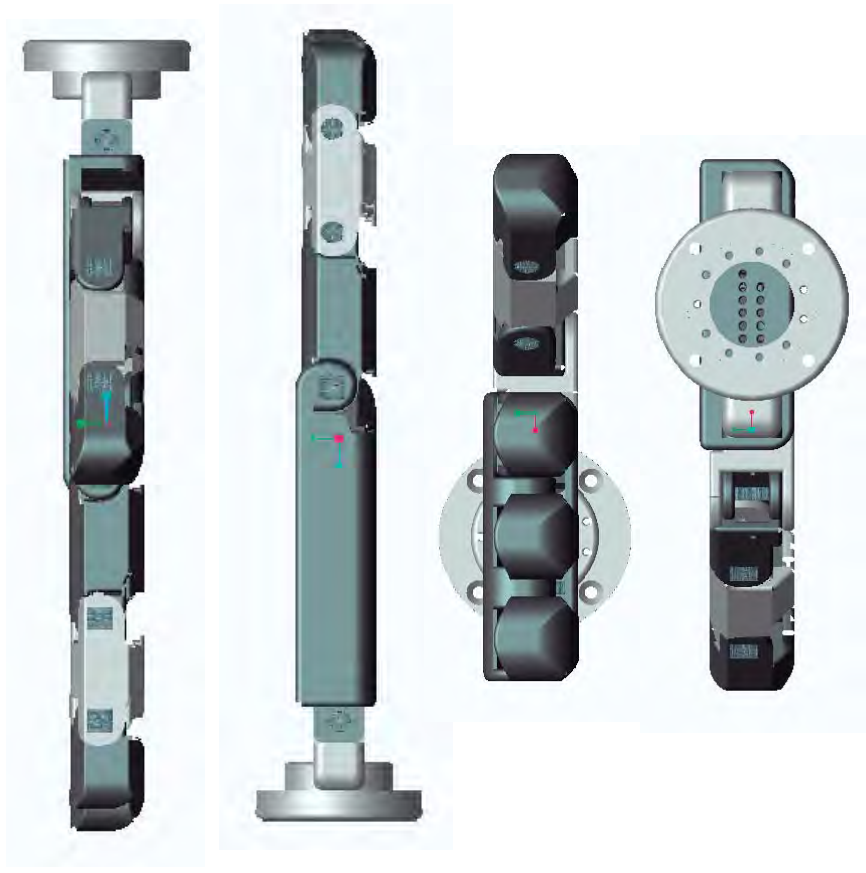
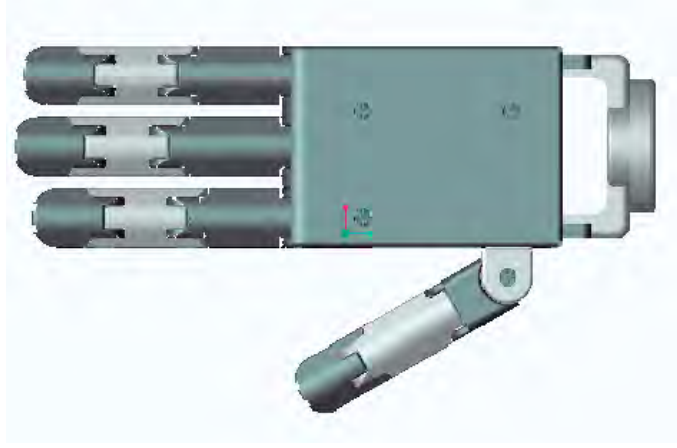
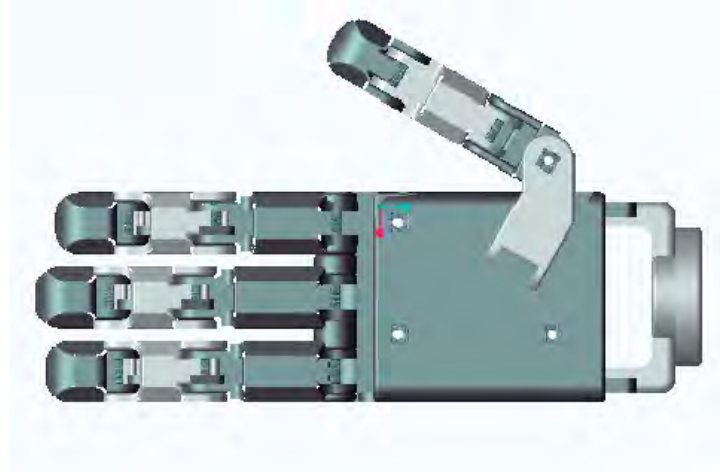
Escala: 1:1

Dibujó: J A E A

Acotado: mm

Cantidad: 1

Facultad de Ingeniería Mecánica de la U.M.S.N.H



Cantidad	Descripción	Artículo N°
1	Dedo anular	001
1	Dedo medio	002
1	Dedo índice	003
1	Dedo pulgar	004
1	Palma	005

Tornillería		
Cantidad	Descripción	Media
1	Tornillo de cabeza plana	3x48 mm
1	Tornillo de cabeza plana	3x26 mm
2	Tuerca cuadrada	3 mm

Mano Artificial con Propósitos Biomédicos

Pieza:	Mano artificial	Dibujo N°:	006
Diseño:	José Angel Espinoza Arceo	Escala:	1:1
Dibujó:	J A E A	Acotado:	mm
		Cantidad:	1

Facultad de Ingeniería Mecánica de la U.M.S.N.H

## *Apéndice III, Programa del algoritmo genético*

El programa que se muestra a continuación fue realizado por el Ing. Hugo Enrique Calderón López, dentro del desarrollo de este proyecto. El programa fue confeccionado en Visual Basic 6.0.

Option Explicit

Const Pi = 3.14159265

Const Lm = 28

Dim a1, a2, b1, b2 As Double

Dim a, b, i, j, k, p, q, fin As Integer

Dim Xa, Ya, Xb, Yb, Xc, Yc, Xd, Yd As Double

Dim Xc1, Yc1, Xc2, Yc2, Xd1, Yd1, Xd2, Yd2 As Double

Dim Pob, Gen, Ex, NCrm, NMC, Cut As Integer

Dim c, d, e, f, CA, CB, PA, PB As Integer

Dim FM, Pre, Rn, NP, NB, NM, Cromo, VGBT, CalT As Double

Dim temp1, temp2, temp3, temp4, temp5, CalGen, High As Double

Dim L1(100000) As Double

Dim L2(100000) As Double

Dim Lo(100000) As Double

Dim LA(100000) As Double

Dim LB(100000) As Double

Dim LC(100000) As Double

Dim LD(100000) As Double

Dim Lmax(100000) As Double

Dim Lmin(100000) As Double

Dim CR(100000) As Double

Dim FT(100000) As Double

Dim Phi(100000) As Double

Dim GBT(100000) As Double

Dim Feno(100000) As Double

Dim Porc(100000) As Double

Dim Best(100000) As Double

Dim BFen(100000) As Double

Dim BAng(100000) As Double

Dim LtOp1(100000) As Double

Dim LtOp2(100000) As Double

Dim CPorc(100000) As Double

Dim Crm(10000, 10000) As Integer

Dim CrmHA(10000, 10000) As Integer

Dim CrmHB(10000, 10000) As Integer

Private Sub Inicio\_Click()

FM = 3 / 100

Pob = 100

Gen = 100

Pre = 10 ^ 6

Rn = 5.5 - 3

NP = Rn \* Pre

If Pob Mod 2 = 1 Then

    Pob = Pob + 1

End If

```

Cromosoma
Poblacion
GenTen
FeTi
Calif
Porciento
Acomodo1

fin = 0
Do
    fin = fin + 1

    For i = 1 To Pob / 2
        Dad
        Child
    Next i

        NewGen
        Mutageno
        GenMut
        GenTen
        FeTi
        Calif
        Porciento
        Acomodo2
    Loop Until fin = Gen

Salida

End Sub

Private Sub Borrar_click()
    Picture1.Cls
End Sub

Private Sub Cromosoma()
    Ex = 0

    Do
        NB = 2 ^ Ex
        Ex = Ex + 1
        NCrm = Ex - 2
    Loop Until NB >= NP

End Sub

Private Sub Poblacion()
    For i = 1 To Pob
        For j = 0 To NCrm
            Cromo = Rnd
            If Cromo <= 0.5 Then

```

```

        Crm(i, j) = 0
    Else
        Crm(i, j) = 1
    End If
Next j
Next i

End Sub

Private Sub GenTen()
    For i = 1 To Pob
        GBT(i) = 0

        For j = 0 To NCrm
            VGBT = Crm(i, j) * 2 ^ j
            GBT(i) = GBT(i) + VGBT
        Next j
    Next i
End Sub

Private Sub FeTi()
    For i = 1 To Pob
        Feno(i) = 5.5 + ((GBT(i) - NB) * (5.5 - 3) / NB)
        FT(i) = Feno(i)
    Next i
End Sub

Private Sub Calif()
    For i = 1 To Pob
        CalcDedo

        If L1(i) > L2(i) Then
            CR(i) = (L2(i) / L1(i)) * 10
        Else
            CR(i) = (L1(i) / L2(i)) * 10
        End If
    Next i
End Sub

Private Sub Porciento()
    CalT = 0

    For i = 1 To Pob
        CalT = CalT + CR(i)
    Next i

    Porc(0) = 0

    For i = 1 To Pob
        CPorc(i) = (CR(i) / CalT) * 100
        Porc(i) = CPorc(i) + Porc(i - 1)
    Next i
End Sub

```

```

Next i

CalGen = CalT / Pob
High = 1500 - CalGen * 100
Picture1.Line (fin * 10, High)-Step(0, CalGen * 100), vbRed
End Sub

```

```

Private Sub Acomodo1()
For i = 1 To Pob - 1
  For j = i + 1 To Pob
    If CR(i) < CR(j) Then
      temp1 = CR(i)
      CR(i) = CR(j)
      CR(j) = temp1
      temp2 = FT(i)
      FT(i) = FT(j)
      FT(j) = temp2
      temp3 = Phi(i)
      Phi(i) = Phi(j)
      Phi(j) = temp3
      temp4 = L1(i)
      L1(i) = L1(j)
      L1(j) = temp4
      temp5 = L2(i)
      L2(i) = L2(j)
      L2(j) = temp5
    End If
  Next j
Next i

```

```

Best(1) = CR(1)
BFen(1) = FT(1)
BAng(1) = Phi(1)
LtOp1(1) = L1(1)
LtOp2(1) = L2(1)
End Sub

```

```

Private Sub Dad()
  CA = Rnd * 100
  CB = Rnd * 100

  c = 1
  d = 0
  e = 1
  f = 0

  Do Until CA > Porc(d) And CA <= Porc(d + 1)
    c = c + 1
    d = d + 1
  Loop

  Do Until CB > Porc(f) And CB <= Porc(f + 1)

```

```

    e = e + 1
    f = f + 1
Loop

PA = c
PB = e

For j = 0 To NCrm
    Crm(PA, j) = Crm(c, j)
    Crm(PB, j) = Crm(e, j)
Next j

End Sub

Private Sub Child()

    NMC = NCrm - 1

    Do
    Cut = Int(Rnd * NMC)
    Loop Until Cut <> 0

    For j = 0 To Cut
        CrmHA(i, j) = Crm(PA, j)
        CrmHB(i, j) = Crm(PB, j)
    Next j

    For j = Cut + 1 To NCrm
        CrmHA(i, j) = Crm(PB, j)
        CrmHB(i, j) = Crm(PA, j)
    Next j

End Sub

Private Sub NewGen()
    a = 1
    b = a + 1

    For i = 1 To Pob / 2

        For j = 0 To NCrm
            Crm(a, j) = CrmHA(i, j)
            Crm(b, j) = CrmHB(i, j)
        Next j

        a = a + 2
        b = a + 1

    Next i

End Sub

```

```
Private Sub Mutageno()  
  NM = Int((NCrm + 1) * Pob * FM)
```

```
  For i = 1 To NM  
    Do  
      j = Int(Rnd * Pob)  
    Loop Until j <> 0  
  
    Do  
      k = Int(Rnd * NCrm)  
    Loop Until k <> 0  
  
    If Crm(j, k) = 1 Then  
      Crm(j, k) = 0  
    Else  
      Crm(j, k) = 1  
    End If  
  Next i
```

```
End Sub
```

```
Private Sub GenMut()  
  For i = 1 To Pob  
    For j = 0 To NCrm  
      Crm(i, j) = Crm(i, j)  
    Next j  
  Next i  
End Sub
```

```
Private Sub Acomodo2()  
  For i = 1 To Pob - 1  
    For j = i + 1 To Pob  
      If CR(i) < CR(j) Then  
        temp1 = CR(i)  
        CR(i) = CR(j)  
        CR(j) = temp1  
        temp2 = FT(i)  
        FT(i) = FT(j)  
        FT(j) = temp2  
        temp3 = Phi(i)  
        Phi(i) = Phi(j)  
        Phi(j) = temp3  
        temp4 = L1(i)  
        L1(i) = L1(j)  
        L1(j) = temp4  
        temp5 = L2(i)  
        L2(i) = L2(j)  
        L2(j) = temp5  
      End If  
    Next j  
  Next i
```

```
Best(1) = CR(1)
BFen(1) = FT(1)
BAng(1) = Phi(1)
LtOp1(1) = L1(1)
LtOp2(1) = L2(1)
```

End Sub

Private Sub CalcDedo()

```
Lo(i) = Feno(i)
```

Do

```
Phi(i) = (Pi / 3) + (Rnd * 100 * Pi / 180)
```

```
Xa = 0
```

```
Ya = 0
```

```
Xb = -Lm
```

```
Yb = 0
```

```
Xc = -Lm - (Lo(i) * Cos(Phi(i)))
```

```
Yc = -Lo(i) * Sin(Phi(i))
```

```
p = Sqr(Xc ^ 2 + Yc ^ 2)
```

```
Xc1 = -Lm * Cos(Pi / 4) - Lo(i) * Cos(((75 * Pi) / 180) + Phi(i))
```

```
Yc1 = -Lm * Sin(Pi / 4) - Lo(i) * Sin(((75 * Pi) / 180) + Phi(i))
```

```
Xc2 = -Lo(i) * Cos(((150 * Pi) / 180) + Phi(i))
```

```
Yc2 = -Lm - Lo(i) * Sin(((150 * Pi) / 180) + Phi(i))
```

```
Xd1 = 0.5 * (Xc + Xc1)
```

```
Yd1 = 0.5 * (Yc + Yc1)
```

```
Xd2 = 0.5 * (Xc1 + Xc2)
```

```
Yd2 = 0.5 * (Yc1 + Yc2)
```

```
a1 = (Yc - Yc1) / Sqr((Xc1 - Xc) ^ 2 + (Yc1 - Yc) ^ 2)
```

```
b1 = (Xc1 - Xc) / Sqr((Xc1 - Xc) ^ 2 + (Yc1 - Yc) ^ 2)
```

```
a2 = (Yc1 - Yc2) / Sqr((Xc2 - Xc1) ^ 2 + (Yc2 - Yc1) ^ 2)
```

```
b2 = (Xc2 - Xc1) / Sqr((Xc2 - Xc1) ^ 2 + (Yc2 - Yc1) ^ 2)
```

```
Xd = ((a2 * Xd1) - (a1 * Xd2)) / (a2 - a1)
```

```
Yd = ((b2 * Yd1) - (b1 * Yd2)) / (b2 - b1)
```

```
LA(i) = Sqr((Xd - Xa) ^ 2 + (Yd - Ya) ^ 2)
```

```
LB(i) = Sqr((Xc - Xd) ^ 2 + (Yc - Yd) ^ 2)
```

```
LC(i) = Sqr((Xb - Xc) ^ 2 + (Yb - Yc) ^ 2)
```

```
LD(i) = Sqr((Xa - Xb) ^ 2 + (Ya - Yb) ^ 2)
```

```
If LA(i) < LC(i) Then
```

```
    Lmin(i) = LA(i)
```

```
Else
```

```
    Lmin(i) = LC(i)
```

```
End If
```

If  $LB(i) > LD(i)$  Then

$L_{max}(i) = LB(i)$

Else

$L_{max}(i) = LD(i)$

End If

$L1(i) = L_{max}(i) + L_{min}(i)$

$L2(i) = LA(i) + LB(i) + LC(i) + LD(i) - L1(i)$

Loop Until  $L1(i) < L2(i)$  And  $L1(i) > 0.975 * L2(i)$

End Sub

Private Sub Salida()

$i = 1$

$Lo(i) = BFen(1)$

$Phi(i) = BAng(1)$

$Xa = 0$

$Ya = 0$

$Xb = -Lm$

$Yb = 0$

$Xc = -Lm - (Lo(i) * Cos(Phi(i)))$

$Yc = -Lo(i) * Sin(Phi(i))$

$Xc1 = -Lm * Cos(Pi / 4) - Lo(i) * Cos(((75 * Pi) / 180) + Phi(i))$

$Yc1 = -Lm * Sin(Pi / 4) - Lo(i) * Sin(((75 * Pi) / 180) + Phi(i))$

$Xc2 = -Lo(i) * Cos(((150 * Pi) / 180) + Phi(i))$

$Yc2 = -Lm - Lo(i) * Sin(((150 * Pi) / 180) + Phi(i))$

$Xd1 = 0.5 * (Xc + Xc1)$

$Yd1 = 0.5 * (Yc + Yc1)$

$Xd2 = 0.5 * (Xc1 + Xc2)$

$Yd2 = 0.5 * (Yc1 + Yc2)$

$a1 = (Yc - Yc1) / Sqr((Xc1 - Xc)^2 + (Yc1 - Yc)^2)$

$b1 = (Xc1 - Xc) / Sqr((Xc1 - Xc)^2 + (Yc1 - Yc)^2)$

$a2 = (Yc1 - Yc2) / Sqr((Xc2 - Xc1)^2 + (Yc2 - Yc1)^2)$

$b2 = (Xc2 - Xc1) / Sqr((Xc2 - Xc1)^2 + (Yc2 - Yc1)^2)$

$Xd = ((a2 * Xd1) - (a1 * Xd2)) / (a2 - a1)$

$Yd = ((b2 * Yd1) - (b1 * Yd2)) / (b2 - b1)$

$p = Sqr((Xc - Xb)^2 + Yc^2)$

$q = Sqr(Xd^2 + Yd^2)$

$LA(i) = Sqr((Xd - Xa)^2 + (Yd - Ya)^2)$

$LB(i) = Sqr((Xc - Xd)^2 + (Yc - Yd)^2)$

$LC(i) = Sqr((Xb - Xc)^2 + (Yb - Yc)^2)$

$$LD(i) = \text{Sqr}((Xa - Xb)^2 + (Ya - Yb)^2)$$

If LA(i) < LC(i) Then

$$Lmin(i) = LA(i)$$

Else

$$Lmin(i) = LC(i)$$

End If

If LB(i) > LD(i) Then

$$Lmax(i) = LB(i)$$

Else

$$Lmax(i) = LD(i)$$

End If

$$L1(i) = Lmax(i) + Lmin(i)$$

$$L2(i) = LA(i) + LB(i) + LC(i) + LD(i) - L1(i)$$

$$TXA.Text = Xa$$

$$TYA.Text = Ya$$

$$TXB.Text = Xb$$

$$TYB.Text = Yb$$

$$TXC.Text = Xc$$

$$TYC.Text = Yc$$

$$TXD.Text = Xd$$

$$TYD.Text = Yd$$

$$TLA.Text = LA(i)$$

$$TLB.Text = LB(i)$$

$$TLC.Text = LC(i)$$

$$TLD.Text = LD(i)$$

$$TL1.Text = L1(i)$$

$$TL2.Text = L2(i)$$

$$TL0.Text = Lo(i)$$

$$TXYC.Text = p$$

$$TXYD.Text = q$$

$$TLMAX.Text = Lmax(i)$$

$$TLMIN.Text = Lmin(i)$$

$$TPHI.Text = \text{Phi}(i) * 180 / \text{Pi}$$

End Sub