



---

# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSRADO E INVESTIGACIÓN  
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y  
ELÉCTRICA

**“ANÁLISIS CINEMÁTICO E IMPLEMENTACIÓN DE  
UNA MANO ROBÓTICA SERVO-ARTICULADA  
APLICABLE COMO PRÓTESIS”**

## TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN  
CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA CON  
ESPECIALIDAD EN DISEÑO MECÁNICO

PRESENTA:

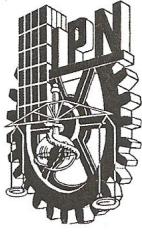
**ING. MAURICIO AARÓN PÉREZ ROMERO**

## DIRECCIÓN DE TESIS

DR. GUILLERMO URRIOLAGOITIA CALDERÓN  
DR. ALEJANDRO TONATIU VELÁZQUEZ SÁNCHEZ



México D. F., Julio de 2011



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

## SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

SIP-14BIS

### ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 13:00 horas del día 28 del mes de Junio del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E. S. I. M. E. para examinar la tesis titulada:

#### **"ANÁLISIS CINEMÁTICO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA MANO ROBÓTICA SERVO-ARTICULADA APLICABLE COMO PRÓTESIS".**

Presentada por el alumno:

**PÉREZ**

Apellido paterno

**ROMERO**

Apellido materno

**MAURICIO AARÓN**

Nombre (s)

Con registro: **B 0 9 1 7 2 6**

aspirante de:

#### **MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA MECÁNICA**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

#### **LA COMISION REVISORA**

Directores de tesis

**DR. GUILLERMO MANUEL URRIOLAGOITIA  
CALDERÓN**  
Presidente

**DR. ALEJANDRO TONATIU VELÁZQUEZ SÁNCHEZ**

Segundo Vocal

**DR. LUIS HÉCTOR HERNÁNDEZ GÓMEZ**  
Tercer Vocal

**DR. ALEJANDRO TONATIU VELÁZQUEZ SÁNCHEZ**  
Secretario

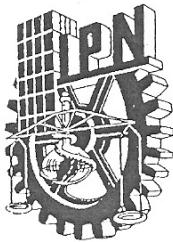
**DR. CARLOS TORRES TORRES**

**DR. GUILLERMO URRIOLAGOITIA SOSA**

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

**DR. JAIME ROBLES GARCIA**

**SECCIÓN DE ESTUDIOS DE  
POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

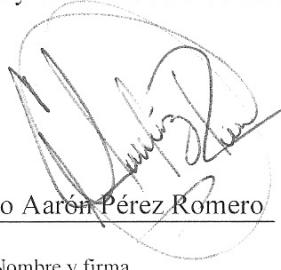


**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de México el día 25 de Julio del año 2011, el que suscribe Ing. Mauricio Aarón Pérez Romero alumno del Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica con número de registro B091726, adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Guillermo Urriolagoitia calderón y el Dr. Alejandro Tonatiu Velázquez Sánchez, cede los derechos del trabajo intitulado: **“Análisis cinemático e implementación de una mano robótica servo-articulada aplicable como prótesis”**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Edificio 5 3er piso, Col. Lindavista, C. P. 07738 México D. F. Tel: 57296000 ext. 54740. Sus comentarios pueden ser recibidos al correo prma@live.com.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.



Ing. Mauricio Aarón Pérez Romero

Nombre y firma

*El presente escrito está dedicado a mi madre Ma. Teresa Romero Sánchez, por su apoyo, consejos y valores que me han enfocado a ser una persona de bien, pero sobre todo por enseñarme a ser un hombre responsable a base de sacrificios, esfuerzo y cariño. A mi padre Salvador Pérez Rodríguez por su apoyo y enseñanzas en todo momento. A mis hermanos Sara y Juan que están siempre a mi lado de forma incondicional. A mis abuelitas, tíos y tías, por la confianza que han depositado sobre mí para impulsarme a cumplir un objetivo más.*

*Agradezco al Dr. Guillermo Urriolagoitia Calderón y al Dr. Alejandro Tonatiu Velázquez Sánchez por su paciencia, enseñanza y colaboración para desarrollar de este trabajo y llegar a la culminación del mismo. Al Dr. Guillermo Urriolagoitia Sosa por los consejos, apoyo y las continuas revisiones de esta investigación. A los profesores de la sección de Biomecánica: Dr. Luis Héctor Hernández Gómez, Dr. Carlos Torres Torres y Dr. Juan Alfonso Beltrán Fernández por sus comentarios y atinadas correcciones en el desarrollo de este proceso.*

*Un agradecimiento especial a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de ESIME Zácatenco, del Instituto Politécnico Nacional y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.*

*Gracias a mis compañeros, por haberme permitido entrar en su vida durante este tiempo, lográndose concretar una sana convivencia que espero sea por muchos años.*

*Mauricio Aarón Pérez Romero*

## Resumen

En este trabajo de tesis se presenta el inicio, evolución y estado actual del desarrollo de prótesis y dispositivos robóticos para extremidad superior, se muestra también una recopilación de los trabajos más relevantes; a partir de una mano de Hierro hasta llegar a sistemas robóticos de última generación, destacando el valor de la Ingeniería para encontrar solución a las problemáticas del hombre. Además, se abordó la descripción anatómica, biomecánica y patológica de la mano, elementos relevantes para la comprensión y entendimiento de las funciones prensiles para realizar múltiples actividades, en donde se resalta la enorme complejidad que posee la estructura músculo-esquelética de la mano, así como la configuración de cada uno de los dedos para sujetar objetos de diversas geometrías y tamaños.

De igual forma, se planteó una metodología para la implementación de una mano robótica articulada, donde fue indispensable considerar un proceso de diseño creativo, que incorpora diversas herramientas para obtener la clarificación de objetivos, establecimiento de funciones, especificación de requerimientos, determinación de características, generación de alternativas y selección de un esquema general, con lo que se obtuvo un diseño conceptual para obtener un sistema óptimo.

Posteriormente se desarrolló un procesamiento de imágenes a partir de una tomografía, con la finalidad de obtener dimensiones adecuadas para plantear los parámetros iniciales del análisis cinemático, a continuación, se obtuvo la cinemática directa e inversa del sistema empleando los parámetros de *Denavit-Hartenberg* que resultaron en la representación de una matriz de transformación homogénea, expresándose así la orientación y posición del extremo de los eslabones, en función de sus coordenadas articulares, lo que dio solución al problema cinemática directo. El problema cinemático inverso se resolvió para obtener los valores que pueden adoptar las coordenadas articulares, obteniéndose así la orientación y posición de acuerdo a una localización determinada. Asimismo, se propuso un mecanismo de 4 barras que se simplificó para obtener 2 eslabones con diferentes puntos fijos, los cuales fueron analizados de forma individual.

En este sentido, un diagrama vectorial general fue desacoplado en forma cinemática para obtener el análisis de 2 mecanismos independientes. Lo anterior se resolvió utilizando el espaciamiento de *Chebychev*, que consiste en seleccionar un conjunto de puntos de precisión para utilizarlos en la síntesis cinemática, de tal modo que se minimice el error

estructural. Para ello, se sintetizó el eslabonamiento de cuatro barras para generar la función  $y = f(x)$ , donde  $x$  representa el movimiento de la manivela de entrada y el eslabonamiento se diseñó de tal forma que el movimiento del oscilador de salida sea una aproximación de  $y$ . Con este espaciamiento propuesto, se identificaron 21 puntos de precisión lo que dio pie a encontrar un eslabonamiento que logró satisfacer la relación deseada para la síntesis; posteriormente se realizó una segunda aproximación utilizando el método descrito por *Freudenstein* para las funciones de cadena abierta y cerrada respectivamente. Para resolver el conjunto de ecuaciones se utilizó el Método Numérico *de Newton-Raphson*.

La síntesis del mecanismo fue pilar fundamental para la generación detallada de un modelo tridimensional creado en CAD, que posteriormente fue la interface para generar una impresión tridimensional del prototipo. Así también, se hace descripción detallada de la generación del modelo de la mano robótica y su impresión tridimensional a tamaño real, sección del estudio que fue un preámbulo para plantear pruebas correspondientes a cantidad de movimientos y sujeción de objetos.

También se describe el análisis de resultados obtenidos a partir de la metodología de diseño propuesta, al igual que la síntesis del mecanismo y la implementación del prototipo. Asimismo, se realiza un profundo énfasis en la diversidad de movimientos que puede ejecutar el dispositivo, aunado a la sujeción de objetos en forma palmar, puntual, lateral, cilíndrica y esférica. Por último, se presentan las conclusiones, recomendaciones y propuestas para realizar trabajo futuro a esta investigación.

**Abstract**

This thesis presents the beginning, evolution and current state of the development of prosthetic and robotic devices for upper human extremity, also shows a compilation of the most important, from an iron hand to the latest robotic systems generation, highlighting the significance of Engineering to find solutions of the human kind problems. Further, it is studied the anatomical description, biomechanics and pathology of the hand, this elements are relevant to understand the prehensile functions for multiple activities, where the enormous complexity that has the musculoskeletal structure of the hand and the configuration of each finger to hold objects of different geometries and size very complex study.

Similarly, it is proposed a methodology for the implementation of an articulated robot hand, where it was necessary to consider a creative design process that incorporates several tools to clarify the objectives, establishing functions, requirements specification, determination of characteristics, generation of alternatives and the selection of a general scheme, which results a conceptual design for an optimal system.

Subsequently, it was developed an image processing from a CT scan, with the finality of obtain a suitable size to determine the initial parameters of the kinematic analysis, then it was obtained the direct and inverse kinematics of the system using the *Denavit-Hartenberg* parameters, which were represented in a homogeneous transformation matrix, expressing the orientation and position of the last link, according to their joint coordinates, which provide the direct kinematic solution to the problem. The inverse kinematic problem was solved to obtain the values that could assume the joint coordinates, thus obtaining the orientation and position according to a given location. It is also proposed a 4 bar mechanism previously simplified, to get 2 links with different fixed points, which were analyzed individually.

In this sense, a general vector diagram was decoupled by its kinematics form for the analysis of the 2 independent mechanisms. It was solved using the *Chebychev* spacing, which consists in the selection of a set of precision points using them in the kinematic synthesis, to minimize the structural error. For this, it was synthesized the four-bar linkage for generate the function  $y = f(x)$ , where  $x$  represents the movement of the input crank and the linkage was designed to obtain the output movement of the oscillator is an approximation of  $y$ . With this spacing proposed, it was identified 21 precision points, which led to find a 4 bar-link that will meet the desired ratio for the synthesis, and

subsequently it was used a second approach using the method described by *Freudenstein* for open a close strings functions. To solve the set of equations it is used the numerical method of *Newton-Raphson*.

The mechanism synthesis was a fundamental pillar for the generation of a detailed three-dimensional model created in CAD, which was the interface to generate a three dimensional impression of the prototype. It is detailed a as well description of the generation of the robotic hand model and its three-dimensional printing at actual size, this part of the study was a preamble to propose a set of detailed tests of movements and holding objects.

It is also described the analysis of results from the proposed design methodology, the synthesis of mechanisms and prototype implementation. Also, it was made a deep emphasis on the diversity of movements that the device can performs. Finally, conclusions are reached and recommendations and proposals for future work from this research are made.

**Índice General**

<b>Resumen</b>	i
<b>Abstract</b>	iii
<b>Índice General</b>	v
<b>Índice de figuras</b>	vii
<b>Índice de tablas</b>	x
<b>Simbología</b>	xi
<b>Objetivo</b>	xiii
<b>Justificación</b>	xiv
<b>Introducción</b>	xv
<b>Capítulo I.- Estado del Arte</b>	1
I.1.- Primeros hallazgos históricos	2
I.2.- Últimos avances y manos robóticas	4
I.3.- Prótesis de extremidad superior en México	17
I.4.- Planteamiento del problema	20
I.5.- Hipótesis	20
I.6.- Sumario	20
I.7.- Referencias	21
<b>Capítulo II.- Marco Teórico</b>	26
II.1.- Anatomía de la mano	27
II.1.1.- Superficie de la mano	27
II.1.2.- Estructura ósea	28
II.1.3.- Sistema Articular	31
II.1.4.- Ligamentos y tendones	32
II.1.5.- Sistema extensor de los dedos	34
II.1.6.- Sistema muscular	37
II.2.- Rangos de movimiento de la mano	39
II.2.1.- Movimientos de las articulaciones en la muñeca	40
II.2.2.- Movimientos de los dedos	41
II.2.3.- Movimientos del pulgar	42
II.2.4.- Dimensiones antropométricas	44
II.2.5.- Arcos de la mano	45
II.3.- Sujeción de objetos	45
II.4.- Lesiones y niveles de amputación	47
II.5.- Herramientas matemáticas para el manipulador robótico	49
II.5.1.- Cinemática	50
II.5.2.- Grados de libertad	54
II.5.3.- Síntesis de mecanismos	55
II.6.- Sumario	55
II.7.- Referencias	56

<b>Capítulo III.- Metodología de diseño</b>	<b>59</b>
III.1.- Procesos de diseño	60
III.2.- Método de diseño	61
III.2.1.- Clarificación de objetivos	63
III.2.2.- Establecimiento de funciones	64
III.2.3.- Requerimientos	65
III.2.4.- Características de los componentes	68
III.2.5.- Generación de alternativas	70
III.2.6.- Evaluación de alternativas	71
III.2.6.1.- Recepción de la señal	71
III.2.6.2.- Dispositivo de control	72
III.2.6.3.- Elementos de transmisión	74
III.2.6.4.- Actuadores	76
III.2.6.5.- Suministro de energía	79
III.2.6.6.- Material de soporte	80
III.3.- Diseño conceptual	81
III.4.- Sumario	82
III.5.- Referencias	82
<b>Capítulo IV.- Modelado tridimensional</b>	<b>84</b>
IV.1.- Obtención de dimensiones	85
IV.2.- Síntesis del mecanismo	89
IV.3.- Metodología de modelado	96
IV.3.1.- Falange distal	97
IV.3.2.- Falange media	98
IV.3.3.- Falange proximal	99
IV.3.4.- Palma	101
IV.3.5.- Ensamble completo	102
IV.4.- Implementación del prototipo	104
IV.4.1.- Impresión tridimensional	104
IV.4.2.- Ensamble de los componentes	106
IV.5.- Sumario	108
IV.6.- Referencias	109
<b>Capítulo V.- Análisis de resultados</b>	<b>110</b>
V.1.- Estudio cinemático	112
V.2.- Rangos de movimiento obtenidos en las articulaciones del prototipo	117
V.3.- Sujeción de objetos	121
V.4.- Otros movimientos	123
V.5.- Sumario	124
V.6.- Referencias	124
<b>Conclusiones</b>	<b>125</b>
<b>Trabajo futuro</b>	<b>128</b>
<b>Anexos</b>	<b>130</b>

## Índice de Figuras

I.1.- A) mano de <i>Alt-Ruppin</i> y B) Mano de Hierro <i>Berlichingen</i>	1
I.2.- Mano artificial <i>Le Petit Lorraine</i>	2
I.3.- A) Prótesis de <i>Beaftort</i> y B) Prótesis Actual de gancho <i>Hook</i>	3
I.4.- Prótesis: A) Europea 1850-1910, B) De doble gancho y C) <i>Sauerbruch</i>	4
I.5.- Prótesis cosméticas	5
I.6.- Mano robótica <i>UTAH-MIT</i>	5
I.7.- Manos robóticas: A) <i>UB Hand</i> y B) <i>UB Hand II</i>	6
I.8.- Prótesis endoesquelética de mano	6
I.9.- Mano robótica <i>DLR-Hand</i>	7
I.10.- Mano robótica <i>TUAT/Karlsruhe</i>	7
I.11.-Mano artificial ultraligera	8
I.12.- Mano robótica <i>DLR-HAND II</i>	8
I.13.- Mano antropomórfica <i>GIFU III</i>	9
I.14.- A) Mano preliminar <i>UB Hand III</i> y B) Mano robótica de <i>Geng</i>	9
I.15.- Mano robótica hidráulica	10
I.16.- Mano humanoide adaptable	10
I.17.- <i>Robonaut R2</i>	11
I.18.- Mano NAIST	11
I.19.- Prototipo de mano robótica con datos precargados	12
I.20.- Modelado tridimensional de futura prótesis	12
I.21.- Prototipo de dedo robótico	13
I.22.- Prótesis desarrollada por <i>Andrade</i> y colaboradores	13
I.23.- A) Mano robótica con tensores y B) Mano hidráulica	14
I.24.- Pinza de prótesis mioeléctrica	14
I.25.- Pinza de 3 dedos	15
I.26.- A) Mano robótica antropomorfa y B) Mano robótica	15
I.27.- Prótesis: A) <i>Bebionic</i> y B) <i>i-LIMB</i>	16
I.28.- Prótesis: A) <i>Michelangelo</i> y B) <i>Myo Hand</i>	16
I.29.- Prótesis <i>UTAH ARM</i>	17
I.30.- Mano robótica multiarticulada	19
II.1.- Vista dorsal de la mano	27
II.2.- Vista palmar de la mano	28
II.3.-Huesos del carpo (vista palmar)	29
II.4.-Huesos de mano (vista dorsal)	30
II.5.- Articulaciones de la mano (vista dorsal)	31
II.6.- Ligamentos de la mano (vista dorsal)	32
II.7.- Ligamentos de la mano (vista palmar)	33
II.8.- Sistema ligamentario de los dedos: A) Vista palmar y B) Vista lateral	34
II.9.- Tendones flexores y extensores de los dedos (Vista palmar)	35
II.10.- A) Dedo en extensión y B) Dedo en flexión (Vista lateral)	36
II.11.- Músculos cortos de la mano (vista palmar)	37
II.12.- Cierre palmar	39
II.13.- Movimientos de la muñeca: A) flexión y extensión, B) Cubital y radial	40

II.14.- Movimientos de la articulación MCF	41
II.15.- Flexión de las articulaciones IFP	41
II.16.- A) Flexión y B) Extensión de las articulaciones IFP	42
II.17.- Aducción y Abducción de las articulaciones MCF	42
II.18.- Ejes de movimiento (mano derecha, vista palmar)	43
II.19.- Flexión y extensión del pulgar en: A) MCF y B) IF	43
II.20.- A) Arcos de la mano y B) Arco distal proximal	45
II.21.-Sujeción: A) Puntual, B) Palmar, C) Lateral y D) Gancho	46
II.22.- Sujeción: A) Cilíndrica y B) Esférica	46
II.23.- Desarticulaciones y amputaciones de la extremidad superior	47
II.24.- Amputación parcial	47
II.25.- Sistema <i>tres en raya</i>	48
II.26.- Diagrama de estudio	49
III.1.- Modelo de <i>French</i>	61
III.2.- Método de diseño	62
III.3.- <i>Árbol de objetivos</i> de la mano robótica	63
III.4.- <i>Caja negra</i> para establecer funciones	64
III.5.- Diagrama de función principal	65
III.6.- Metodología <i>Blitz QFD</i>	67
III.7.- Funciones secundarias	70
III.8.- <i>Diagrama morfológico</i> de posibles soluciones	70
III.9.- Sensores adaptables al sistema: A) Mioeléctrico, B) Flexión y C) Presión	71
III.10.- Sistema embebido	73
III.11.- Mecanismo propuesto por <i>Fligiolini y Rea</i>	74
III.12.- Mecanismo propuesto por <i>Jung</i>	75
III.13.- Mecanismo propuesto por <i>Portilla</i> y colaboradores	75
III.14.- Mecanismo propuesto por <i>Velázquez</i>	76
III.15.- Posición inicial de actuadores y barras de transmisión	77
III.16.- Actuadores seleccionados: A) Motoreductor y B) Actuador lineal	79
III.17.- Baterías recargables (portátiles)	79
III.18.- Tipos de Nylamid	80
III.19.- Esquema general de la mano robótica	81
III.20.- Diseño conceptual de la mano robótica	81
IV.1.- Procesamiento de imágenes en <i>ScanIP</i>	85
IV.2.- Tomografía parcial de miembro superior	86
IV.3.- A) Acercamiento dorsal y B) Corte transversal del arco metacarpiano	86
IV.4.- Importación de archivos DICOM al programa <i>ScanIP</i>	87
IV.5.- Imagen tridimensional de parte ósea	87
IV.6.- Imagen del sistema óseo exportada a <i>SolidWorks</i> ®	88
IV.7.- Imagen tridimensional de la mano	88
IV.8.- Imagen tridimensional de la mano Imagen exportada a <i>SolidWorks</i>	89
IV.9.- Asignación del sistema de coordenadas al dedo robótico	90
IV.10.- A) Eslabones propuestos y B) representación de mecanismo de 4 barras	92
IV.11.- Diagrama vectorial del dedo índice	92

IV.12.- Diagrama vectorial: A) Eslabón proximal y B) eslabón distal	93
IV.13.- A) Creación de un documento, B) Representación y C) Plano de trabajo	96
IV.14.- Trazado de falange distal	97
IV.15.- A) Extruido, B) Redondeo, C) Corte y D) Pieza final	97
IV.16.- Trazado de falange media	98
IV.17.- Estructura Primaria de falange media	98
IV.18.- Modelado Falange media	99
IV.19.- Trazado de falange proximal	100
IV.20.- Cortes y seccionado de la falange proximal	100
IV.21.- Trazado de la palma	101
IV.22.- Construcción de la palma: A) Dedo medio y B) Dedo índice	101
IV.23.- Construcción de la palma: A) Dedo anular y B) Dedo meñique	102
IV.14.- Cortes y seccionado de la palma	102
IV.25.- Ensamble de los dedos A) Índice y B) Pulgar	102
IV.26.- Ensamble de los dedos en la palma	103
IV.27.- Vistas del prototipo	103
IV.28.- Proceso para obtener impresiones tridimensionales	104
IV.29.- A) Incorporación de piezas y B) Acomodo de piezas	104
IV.30.- Piezas construidas	105
IV.31.- Piezas para ensamble de los dedos	106
IV.32.- Ensamble de un dedo	106
IV.33.- Ensamble completo de los dedos	107
IV.34.- Instalación de los actuadores lineales en la palma	107
IV.35.- Ensamble completo del prototipo	108
V.1.- Prototipo de mano robótica	111
V.2.- Espacio de trabajo del diseño obtenido	112
V.3.- Espacios de trabajo: A) <i>Figliolini</i> y B) <i>Velázquez</i>	113
V.4.- Desviación de valores de X en el espacio de trabajo	114
V.5.- Desviación de valores de Y en el espacio de trabajo	114
V.6.- Trayectorias en articulación Metacarpofalángica (individuales)	115
V.7.- Trayectorias en articulación Metacarpofalángica (comparación)	116
V.8.- Error estructural	117
V.9.- Movimientos de la articulación MCF	118
V.10.- Movimientos de la articulación MCF	118
V.11.- Flexión de las articulaciones IFP	118
V.12.- Flexión de las articulaciones IFD	119
V.13.- Extensión de las articulaciones IFP	119
V.14.- Oposición del pulgar	120
V.15.-Sujeción: A) Puntual y B) Lateral	121
V.16.-Sujeción: A) Palmar y B) Gancho	122
V.17.- Sujeción: A) Cilíndrica y B) Esférica	122
V.18.- Diversos movimientos	123

**Índice de Tablas**

<b>II.1.-</b> Músculos de la mano	38
<b>II.2.-</b> Músculos de la muñeca	39
<b>II.3.-</b> Rango de movimiento en articulaciones	44
<b>II.4.-</b> Relación porcentual de las falanges con respecto a la mano	44
<b>II.5.-</b> Sistema de clasificación <i>tres en raya</i>	49
<b>III.1.-</b> Especificaciones del equipo	66
<b>III.2.-</b> Ponderación de requerimientos deseables	68
<b>III.3.-</b> Despliegue de requerimientos deseables	69
<b>III.4.-</b> Comparación de motores	77
<b>III.5.-</b> Comparación de actuadores lineales	78
<b>III.6.-</b> Comparación de actuadores lineales	80
<b>IV.1.-</b> Parámetros <i>D-H</i>	91
<b>V.1.-</b> Comparación de rangos de movimiento en articulaciones	113
<b>V.2.-</b> Rango de movimiento en articulaciones	120

## Simbología

$OUVW$	Sistema de coordenadas móviles
$OXYZ$	Sistema de coordenadas de referencia
$P_{uvw}$ y $P_{xyz}$	Mismo punto en el espacio pero con diferentes sistemas de coordenadas
$R$	Matriz de transformación
$i_x$ e $i_u$	Vectores unitarios de X
$j_y$ y $j_v$	Vectores unitarios de Y
$k_z$ y $k_w$	Vectores unitarios de Z
$I^3$	Matriz Identidad
$R_{x,\alpha}$	Matriz de rotación en X
$R_{y,\phi}$	Matriz de rotación en Y
$R_{z,\theta}$	Matriz de rotación en Z
$w$	Factor de escala de unidad
$T_{x,\alpha}$	Matriz de rotación homogénea básica en X
$T_{y,\phi}$	Matriz de rotación homogénea básica en Y
$T_{z,\theta}$	Matriz de rotación homogénea básica en Z
$D-H$	Método matricial propuesto por <i>Denavit y Hartenberg</i>
$a_i$	Distancia más corta entre los ejes $Z_{i-1}$ y $z_i$ .
$\alpha_i$	Es el ángulo formado entre el eje $Z_{i-1}$ y el eje $z_i$ alrededor del eje $x_i$ .
$d_i$	Distancia desde $i-1$ hasta la intersección de los ejes $x_i$ y $Z_{i-1}$ , a lo largo del eje $Z_{i-1}$ .
$\theta_i$	Ángulo de la articulación del eje $x_{i-1}$ al eje $x_i$ respecto al eje $Z_{i-1}$ .
${}^{i-1}A_i$	Matriz de transformación homogénea 4 x 4
$n$	Número de eslabones
$j_1$	Número de pares cinemáticos con un grado de libertad
$j_2$	Número de pares cinemáticos con dos grados de libertad
$m$	Movilidad
$dfd$	Distancia desde la articulación MCF distal al extremo de la falange
$dfm$	Distancia desde la articulación MCF Proximal a la articulación MCF distal
$dfp$	Distancia desde la articulación MCF a la articulación MCF Proximal
$r_i$	Vector del eslabón
$\alpha$	Ángulo secundario de articulación
$\beta$	Ángulo secundario de articulación
$x_i$	Puntos de precisión
$xd$	Coordenada X deseada
$yd$	Coordenada Y deseada
$N$	Puntos específicos para la ecuación de <i>Chebychev</i>
$f$	Cualquier relación funcional deseada
$F$	Función que resuelve la ecuación cinemática de la cadena abierta y cerrada
$E_e$	Error estructural
mm	Milímetro
cm	Centímetro
g	Gramo
Kg	Kilogramo
s	Segundo

A	Ampere
mA	Mili-Ampere
V	Volt
Vcc	Voltaje de Corriente Continua
C. A.	Corriente Alterna
C. D.	Corriente Directa
N	Newton
USB	Puerto Serial Universal (Universal Serial Bus, por sus siglas en inglés)
PWM	Modulación por Ancho de Pulso (Pulse Wide Modulation)
Gnd	Conexión a tierra

**Objetivo**

El objetivo general de este trabajo, tiene como finalidad desarrollar el análisis cinemático, definir trayectorias e implementar un dispositivo robótico que realice la sujeción de objetos en forma cilíndrica, puntual, lateral, esférica y de gancho; con adecuada sincronía de sus componentes, además de poseer dimensiones antropomórficas del ser humano, lo que le permitirá ser un sistema aplicado en un futuro como prótesis de mano. Para lograr lo anterior, se plantea considerar los objetivos particulares enlistados a continuación.

- Analizar el estado del arte correspondiente a las investigaciones y desarrollos relacionados con el diseño e implementación de manos robóticas, efectores finales y prótesis de mano.
- Conocer la anatomía, fisiología, patología y mecánica del movimiento referente al miembro superior, con la finalidad de obtener las bases sólidas correspondientes para establecer un diseño óptimo.
- Plantear una metodología de diseño creativa, así como la clarificación de objetivos y el establecimiento de funciones para determinar las características propias.
- Realizar el estudio cinemático correspondiente al diseño, además de el planteamiento de la forma de transmisión y el desarrollo de su síntesis.
- Crear un modelo tridimensional con apoyo de equipo de cómputo y basado en el procesamiento de imágenes para complementar y facilitar el ensamblaje de un diseño adecuado a la selección de componentes que integran al sistema.
- Implementar el prototipo desarrollado con apoyo de impresiones tridimensionales y desarrollar los análisis correspondientes en forma experimental.

## Justificación

La necesidad de desarrollar un sustituto ideal que se enfoque a la ejecución de movimientos, trayectorias y que además se aplique como prótesis de extremidad superior, ha llevado a gran número de investigaciones en diversas épocas del hombre, con el objetivo principal de emular movimientos, destreza y habilidades con las que cuenta la extremidad en cuestión. Sin embargo, actualmente existen pocos trabajos relacionados con el diseño e implementación de prótesis de mano a nivel nacional, donde la mayoría de ellos quedan inconclusos por múltiples razones y los que se logran finalizar no cumplen en su totalidad con la ejecución de movimientos y trayectorias, sin dejar de lado el nivel de realismo que en conjunto afectan en parte física, emocional y estética a un individuo.

Por lo tanto, adquiere gran relevancia implementar una mano robótica multiarticulada que pueda ser aplicable como prótesis, cumpliendo con las funciones principales y desarrollando movimientos adecuados para realizar actividades rutinarias, sin olvidar la apariencia antropomórfica, accediendo con ello a obtener un prototipo funcional óptimo para la manipulación de objetos.

En este sentido, esta investigación plantea revisar a detalle el estado del arte, conocer la anatomía, fisiología, patología y mecánica del movimiento referente al miembro superior, con la finalidad de obtener las bases sólidas correspondientes para establecer un diseño óptimo. Con lo que se dará inicio al planteamiento de una metodología de diseño creativa, así como a la realización de estudios cinemáticos correspondientes para con ello crear un modelo tridimensional y posteriormente implementar un prototipo con las características idóneas para fungir como sustituto parcial o completo de la extremidad.

## Introducción

El hombre, haciendo uso de su inteligencia ha tratado de hacer más confortable el mundo que lo rodea. En el trayecto de este proceso, construye un mundo artificial a base de ideas que concreta de forma racional, sistemática y confiable. En este andar, desde hace décadas ha realizado intentos por sustituir alguna parte faltante de su cuerpo por otra que otorgue de forma similar la funcionalidad ausente. En esta línea de investigación, está claro que el desarrollo de prótesis es un proceso profundo y complejo, donde los resultados funcionales obtenidos no son a la fecha totalmente satisfactorios.

El objetivo principal de una prótesis es reincorporar al paciente a la vida cotidiana mediante la adaptación de una extensión artificial para recuperar funcionalidad, imagen física y simétrica del cuerpo. El diseño óptimo de un sistema que sea capaz de reproducir secuencias y movimientos en forma natural, es una condición requerida para obtener éxito en la integración de una prótesis al sistema humano.

Asimismo, la mano es una parte de la extremidad superior que posee funciones indispensables, las cuales utiliza para desarrollar actividades diversas en la vida cotidiana, además de ser un instrumento especializado que cuenta con sensibilidad térmica, características versátiles y alta precisión para realizar movimientos. Sin embargo, cuando se pierde esta parte del cuerpo a cualquier nivel, impacta definitivamente en un individuo, además de inducir consecuencias funcionales, emocionales, estéticas y sociales. En ese entorno, la complejidad para el desarrollo de una prótesis de mano, aumenta rápidamente con el nivel de amputación ya que el miembro pierde más funciones y músculos evitándose así extraer señales mecánicas o mioeléctricas que permitan realizar un control del sistema de forma óptima.

A continuación se presenta una descripción de los antecedentes de prótesis de mano de mayor relevancia en las últimas décadas, además de mostrar una idea clara referente a la evolución científico-tecnológica que involucra la implementación de estos desarrollos protésicos, finalizando con una propuesta de apoyo al conocimiento del tema.

# I

## Estado del arte

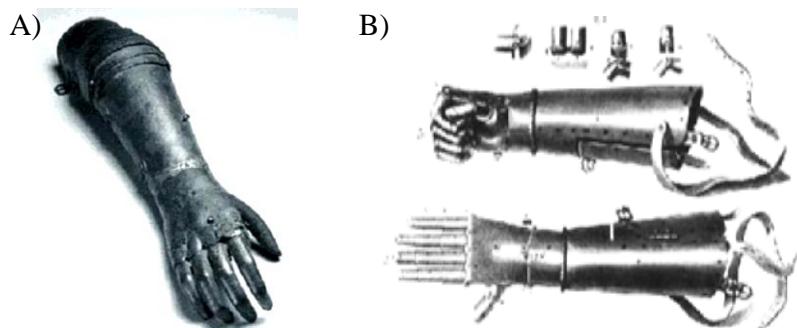
Aquí se presenta el inicio, evolución y estado actual de prótesis y dispositivos robóticos para extremidad superior, mostrando una recopilación de los trabajos más relevantes en los últimos años. Asimismo, se establece la importancia del conocimiento de estos estudios para destacar el valor de la Ingeniería en pro de dar solución a la problemática del ser humano.

### I.1.- Primeros hallazgos históricos

Una prótesis es un elemento fabricado para sustituir de forma parcial o completa, alguna parte afectada del cuerpo [I.1]. Considerando la definición anterior, se entiende a una prótesis robótica como una extensión artificial, dotada de elementos mecánicos, eléctricos, electrónicos y neumáticos capaces de ofrecer cierta autonomía para desarrollar alguna función específica en base a la funcionalidad del miembro perdido.

La evolución de prótesis de extremidad superior es extensa y con abundante historia, teniendo sus inicios en la era primitiva, hasta llegar a las impresionantes visiones a futuro que se tienen en relación al tema [I.2]. Su uso data de tiempos inmemorables [I.3], donde el hombre desde que tiene uso de razón, ha tratado de sustituir la extremidad superior faltante de su cuerpo, por otra que otorgue de forma semejante su versatilidad de manera artificial. Sin embargo, el desarrollo de estas, para la extremidad superior contempla un proceso profundo y complejo, en el que los resultados funcionales obtenidos no son totalmente satisfactorios hasta la fecha [I.4]. Asimismo, el progreso en el diseño e implementación de prótesis está vinculado directamente con los avances tecnológicos y estudios de la biomecánica del cuerpo humano.

Por otra parte, la primera prótesis de extremidad superior registrada es del año 2000 a. C., encontrada en el antebrazo de una momia. La manipulación del Hierro marcó el inicio para el diseño de prótesis; en el año de 1400 d. C. se fabricó la mano de *Alt-Ruppin* [I.5], que constaba de un pulgar rígido con el resto de los dedos y muñeca flexibles (Figura I.1 A), que podían fijarse mediante un mecanismo de trinquete. En 1504, *Götz Von Berlichingen* perdió parte de su extremidad superior derecha en batalla. En consecuencia, le fue reemplazada la mano por un sustituto de Hierro [I.6], que podía fijar la posición de los dedos mediante un sistema mecánico, que le permitió nuevamente blandir su espada y volver a combate (Figura I.1 B).



**Figura I.1.-** A) mano de *Alt-Ruppin* [I.5] y B) Mano de Hierro *Berlichingen* [I.6]

En siglo XVI, el médico militar *Ambroise Paré* de origen francés, desarrolló el primer brazo artificial con movimiento al nivel de codo, llamado *Le Petit Lorraine* (figura I.2). En esta invención, los dedos podían abrirse o cerrarse utilizando una palanca por medio de la cual el brazo realizaba flexión o extensión a nivel de codo [I.1]. De igual forma, *Paré* implementó la primera mano estética de cuero, con lo que dio un avance considerable en la implementación de materiales para el diseño de prótesis de miembro superior.



Figura I.2.- Mano artificial *Le Petit Lorraine* [I.1]

En esa época, los sustitutos artificiales cumplían con el cierre y apertura de los dedos, mediante los movimientos del tronco y hombro, dando origen a las prótesis autopropulsadas [I.7]. La prótesis diseñada *Beaumont* constaba de un brazo con flexión del codo activada al presionar una palanca contra el tórax (figura I.3 A), dispositivo similar a los actuales ganchos *Hook*. Es hasta 1912 cuando *Dorrance* desarrolló un gancho de apertura voluntaria mejor conocido como *Hook* (Figura I.3 B), dispositivo que permite a la persona abrir mediante un leve movimiento de cintura o cerrar el gancho por la acción de uno o varios tirantes de goma. Con este dispositivo, algunos objetos eran sujetados e inclusive permitía desarrollar movimientos para empujar o jalar.

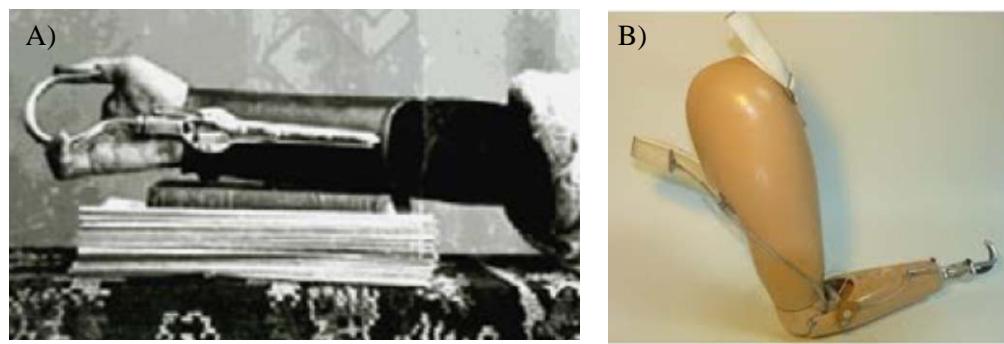
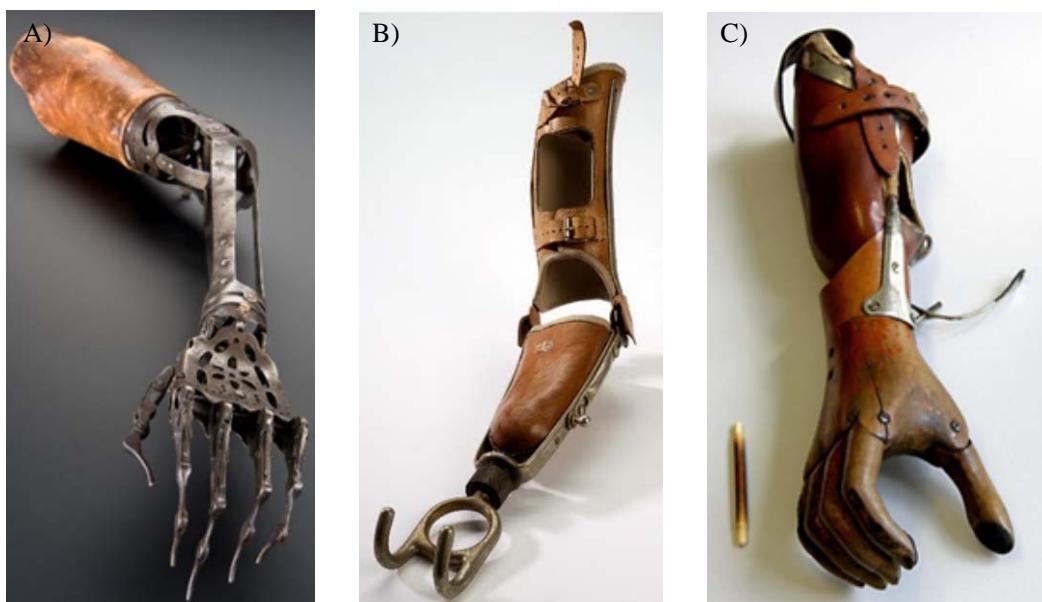


Figura I.3.- A) Prótesis de *Beaumont* [I.7] y B) Prótesis actual de gancho *Hook*

Entre los años de 1850 y 1910, fue utilizado un sustituto de mano y brazo (Figura I.4 A), con la mayoría de articulaciones y grados de libertad pero sin ser funcional [I.8]. En Europa, entre 1914 y 1918, existía una prótesis más usual y común (Figura I.4 B), conformada en su mayoría de cuero y un gancho doble de metal, mostrándose resistente y firme para algunas actividades rutinarias. Posteriormente, *Sauerbruch* dio origen a las prótesis activadas por los músculos del muñón [I.6], dispositivo que consistía conectar la musculatura flexora del antebrazo con el mecanismo artificial, mediante varillas de marfil que hacían pasar a través de túneles cutáneos (Figura I.4 C), haciendo posible que la prótesis se moviera de forma activa debido a la contracción muscular.



**Figura I.4.-** Prótesis: A) Europea 1850-1910 [I.8], B) De doble gancho [I.8] y C) *Sauerbruch* [I.8]

Fue hasta el año 1946 cuando se implementan sistemas de propulsión asistida, siendo estos en los que el movimiento es activado por algún agente externo al cuerpo, dando origen a prótesis neumáticas y eléctricas.

## I.2.- Últimos avances y manos robóticas

En la actualidad, las prótesis de miembros superiores pueden ser clasificadas en pasivas y activas [I.9]. Las primeras, también conocidas como cosméticas, tienen como principal objetivo restablecer apariencia aunque carecen de movimiento [I.10]. Las prótesis cosméticas actuales ofrecen ventajas y desventajas relacionadas con durabilidad, grado derealismo y precio (Figura I.5), producidas comúnmente con silicona o polivinilo clorado, presentando detalles generales como bello, tono de piel, venas y tatuajes.



**Figura I.5.-** Prótesis cosméticas [I.10]

Las prótesis activas se clasifican en mecánicas, eléctricas, neumáticas, hidráulicas, hibridas y mioeléctricas [I.9]. Siendo estas últimas las que ofrecen una mejor solución en cuanto a la versatilidad y alta precisión en la ejecución de movimientos, aunque con mayor peso y costo. Las prótesis con control mioeléctrico surgen en Rusia alrededor de 1960, donde el control se basa en obtener pequeñas señales eléctricas producidas cuando un músculo se contrae o flexiona [I.11]. Estas prótesis son actualmente el sustituto artificial de mayor nivel de rehabilitación, obteniendo un mejor desempeño con fuerza y velocidad de prensión.

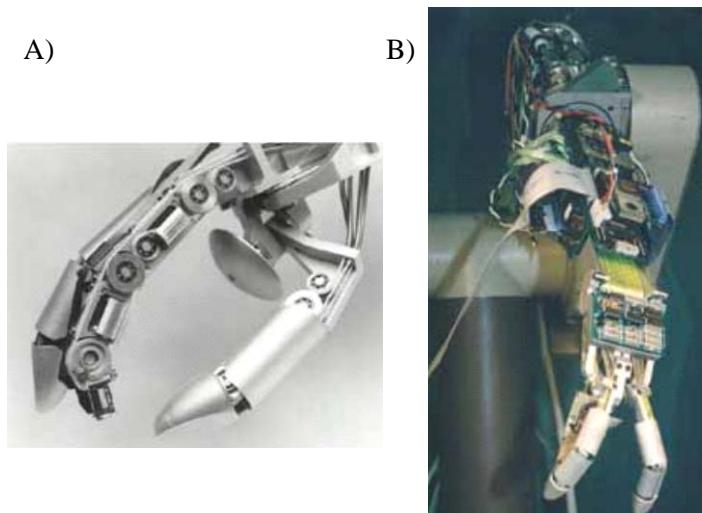
Un punto clave para mejorar la destreza robótica está representado por los efectores finales a través del cual la interacción con objetos y entornos se lleva a cabo. A medida del incremento en el avance tecnológico, se fueron creando manos y brazos robóticos con mayor similitud a la extremidad en cuestión. A continuación se hace mención de los trabajos e investigaciones más relevantes referentes a manos robóticas.

*Jacobson, Wood y Biggers* desarrollaron en 1984 la mano robótica *UTA-MIT* con tres dedos y un pulgar, cada uno con cuatro grados de libertad [I.12]. Contaba con un sistema de cilindros neumáticos para proporcionar movimientos precisos de las articulaciones, así como trayectorias adecuadas para la manipulación de los objetos (Figura I.6).



**Figura I.6.-** Mano robótica *UTAH-MIT* [I.12]

En la *Universidad de Bologna* se desarrolló la mano robótica *UB Hand*, estudios que se han llevado a cabo desde 1985 [I.13]. Los resultados de una primera parte de esta actividad han sido la implementación y estudios experimentales del prototipo *UB Hand I* (Figura I.7 A). La segunda fase de este proyecto dio como resultado un dispositivo conocido como *UB Hand II*, instalado en un manipulador industrial PUMA 560 (Figura I.7 B), dispositivo con un control basado en plataformas de hardware multiprocesador y multicapa [I.14], uno para la interfaz del usuario y otro para la coordinación del sistema en tiempo real.



**Figura I.7.-** Manos robóticas: A) *UB Hand* [I.13] y B) *UB Hand II* [I.14]

En Octubre de 1998, *Doshi, Yeh* y *LeBlanc* elaboraron el diseño y desarrollo de una prótesis endoesquelética de mano, dispositivo ligero y con menor costo en comparación con prótesis de esa época [I.15]. El mecanismo de cierre voluntario ofrecía un agarre con variación de fuerza (Figura I.8), teniendo ubicadas las articulaciones en dimensiones similares a las del sistema natural.



**Figura I.8.-** Prótesis endoesquelética de mano [I.15]

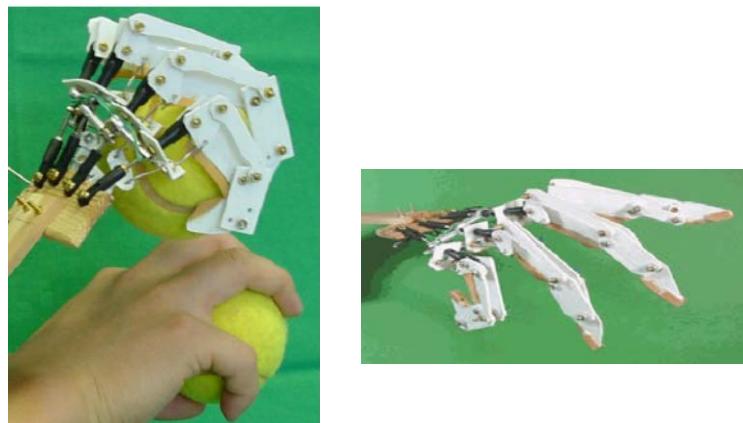
En el mismo año, *Butterfaß, Hirzinger y Knoch* presentan el diseño de una mano robótica con múltiples articulaciones y cuatro dedos [I.16], llamada *DLR-Hand* (Figura I.9). Este diseño cuenta con sensores de torque, fuerza y posición en cada dedo.



**Figura I.9.-** Mano robótica *DLR-Hand* [I.16]

De manera simultánea, *Casalino, Cannata, Caffaz y Bernieri* proponen el diseño de la mano robótica *DIST-HAND* [I.17], que cuenta con 4 dedos antropomórficos y 4 grados de libertad que actúan por medio de 6 tendones de poliéster y 5 motores en cada dedo.

El departamento tecnológico de la *Universidad de Tokio, Japón*, en conjunto con la *Universidad de Karlsruhe, Alemania*, desarrollaron un modelo robótico humanoide con 4 dedos e igual número de grados de libertad cada uno, llamada *TUAT/Karlsruhe* [I.18]. El sistema mecánico es capaz de sostener un objeto con los dedos y palma (Figura I.13), esta última se puede adaptar a la forma del objeto que está sujetando.



**Figura I.10.-** Mano robótica *TUAT/Karlsruhe* [I.18]

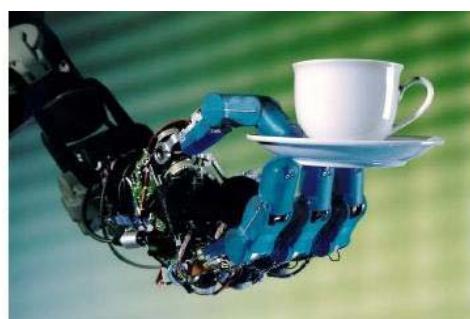
En Marzo de 2001, *Dechev, Cleghorn y Naumann*, presentaron las características de una mano experimental con dedos múltiples para niño de entre 7 y 11 años de edad, dicho sistema es capaz de presentar funciones de agarre pasivo donde los dedos tienen movimiento de forma independiente [I.19].

De igual forma en ese mismo año, *Schulz, Pylatiuk y Bretthauer* implementaron una mano artificial ultraligera [I.20], la cual tenía 13 grados de libertad, impulsados por pequeños actuadores neumáticos (Figura I.11), acoplando una estructura muy compacta permitiendo así, un diseño que pudiera ser utilizado como prótesis de mano.



**Figura I.11.-Mano artificial ultraligera [I.20]**

*Butterfaß, Hirzinger, Grebenstein y Liu* presentaron en el 2001, las mejoras realizadas al primer prototipo de la mano multi-articulada *DLR-HAND* [I.21]. En éste nuevo diseño se presenta una estructura denominada *Esqueleto Abierto* que proporciona mayor facilidad para acceder a los circuitos, mecanismos y sensores de la mano. La palma está equipada con actuadores más poderosos y con sensores de fuerza y torque en cada dedo. En el mismo año *Borst, Fisher y Hirzinger* hacen el análisis de la configuración más adecuada de la mano *DLR-HAND II* [I.22], necesaria para realizar trabajos que requieren una mayor destreza, como lo es el manejo de herramienta especializada (Figura I.12).



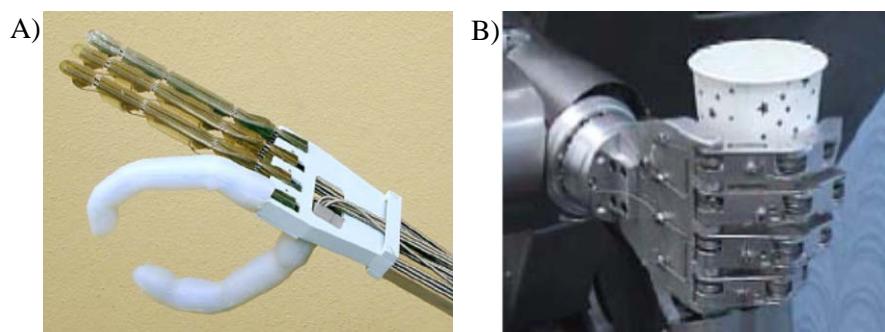
**Figura I.12.- Mano robótica *DLR-HAND II* [I.22]**

En el 2002 *Mouri*, y colaboradores presentaron el diseño llamado *GIFU HAND III* [I.23], que cuenta con cuatro dedos y un pulgar. Todas las articulaciones son actuadas por servo motores colocados dentro de la palma y los dedos (Figura I.18). El dedo pulgar tiene cuatro articulaciones con tres grados de libertad y está equipada con sensores de fuerza de seis grados, colocados en la yema de los dedos y un arreglo matricial de sensores táctiles con 624 puntos de detección en la superficie de la palma.



**Figura I.13.-** Mano antropomórfica *GIFU III* [I.23]

En Mayo del mismo año, *Massa*, y colaboradores realizaron el diseño preliminar de una prótesis de mano, basados en mecanismos sub-actuados. En esta investigación se describe el modelo dinámico que en su momento, representaría una herramienta útil para simular el sistema [I.24], proponiendo estrategias adecuadas de control para el funcionamiento de la mano robótica. Simultáneamente, *Lotti* y copartícipes describieron el diseño de una mano antropomorfa con dedos articulados adaptables a diversas estructuras [I.25]. Dispositivo realizado con enlaces rígidos con bisagras elásticas (Figura I.14 A). Este diseño permitió facilidad para generar trayectorias. Para el 2004, *Geng, Huang, Zhang* y *Zhao* desarrollaron el diseño de una mano robótica con 5 dedos y 14 articulaciones conducidas por dos motores [I.26], utilizando una configuración física sencilla, siendo suficiente para sostener artículos de bajo peso y de pequeñas dimensiones (Figura I.14 B).



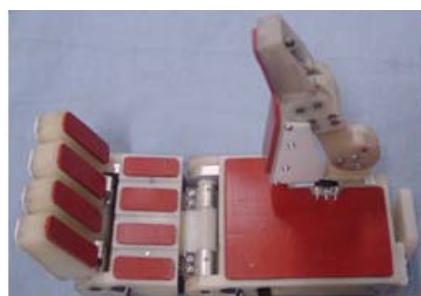
**Figura 14.-** A) Mano preliminar *UB Hand III* [I.25] y B) Mano robótica de *Geng* [I.26]

*Pylatiuk* y colaboradores presentaron también en 2004, un estudio experimental de prótesis mediante la integración de un sistema hidráulico con 8 actuadores en las articulaciones de los dedos (Figura I.15). Esta mano robótica permite realizar sujeción puntual, de gancho y lateral, además de adoptar una postura para operar un teclado con el dedo índice en forma extendida [I.27].



**Figura I.15.-** Mano robótica hidráulica [I.27]

En Abril del mismo año *Zhang, Chen y Sun* dan a conocer el diseño de un sub-robot humanoide con la capacidad de adaptarse a la forma física de algunos objetos [I.28], de tal forma que el sistema puede obtener más grados de libertad con menos actuadores y con menos dispositivos de control (Figura I.16).



**Figura I.16.-** Mano humanoida adaptable [I.28]

De igual forma, *Yang, Peña, Abtel, Patrick y Lindkvist* presentaron el diseño y análisis de una prótesis de mano con dedos multi-articulados, cuatro de ellos con 2 articulaciones y el pulgar con 3. El movimiento rotatorio se transforma a un comportamiento similar al tendón, lo que permite la ubicación de los actuadores lejos del brazo [I.29]. Este diseño, presenta una alternativa de bajo costo, permitiendo el accionamiento y control de los dedos con varios grados de libertad.

También en 2004, *Oswald* y colaboradores presentaron el desarrollo de estrategias para integrar una mano antropomórfica en un robot humanoide a partir de un diseño que se asemeja a la mano del hombre en cuanto al tamaño y movilidad, utilizando un sistema de control de bajo nivel [I.30]. Este sistema proporciona habilidades para comprender el control superior del robot, coordinando los movimientos de la mano y brazo para determinar los patrones de agarre. Dicho sistema está a prueba actualmente.

Por otra parte, científicos de la *NASA* desarrollaron la primera versión del *Robonaut* [I.31], posteriormente ofrecieron una nueva versión conocida como *R2*, siendo un avance tecnológico importante ya que su capacidad ambidiestra le permite usar el mismo tipo de herramientas que los seres humanos, asimismo, levantar cargas de hasta 20 libras (Figura I.17). El *R2* puede trabajar en ambientes peligrosos para los humanos y ha sido diseñado para usarse en las misiones espaciales futuras.

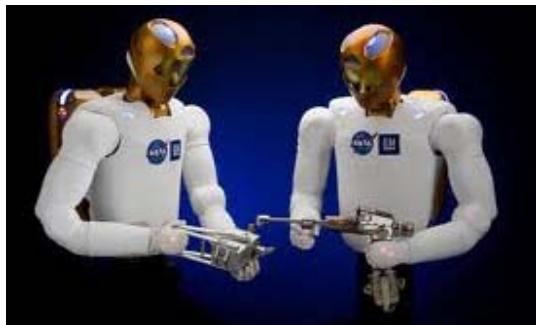


Figura I.17.- *Robonaut R2* [I.31]

*Ueda, Ishida, Kondo* y *Ogasawara* presentaron en 2005 el desarrollo de la mano NAIST [I.32], la cual incluía sensores táctiles en la punta de los dedos (Figura I.18). Además de un control de fuerza de agarre por margen de deslizamiento y un control para 3 motores.



Figura I.18.- Mano NAIST [I.32]

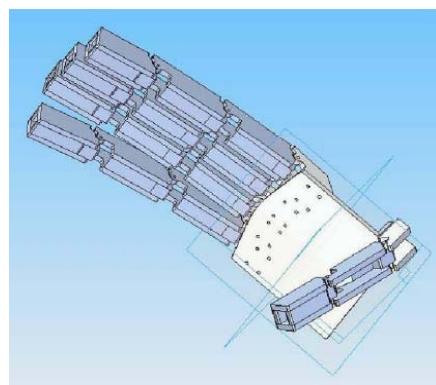
En el 2006 *Sánchez, Loaiza y Cortés* realizaron el diseño y construcción de un prototipo de pinza y rotador para aplicarlo como prótesis mioeléctrica [I.33]. Este dispositivo es capaz de sustituir las funciones de pronación y supinación de forma óptima, siendo evaluada en un paciente con amputación de antebrazo a nivel proximal de codo.

De igual forma, *Cho, Rosemarin y Asada*, dieron a conocer el diseño de una mano robótica con datos precargados de los movimientos más utilizados en la vida diaria [I.34]. Los datos se interpretan como ángulos y posteriormente se transforman en datos para que los 12 actuadores que posee, se desplacen y generen trayectorias (Figura I.19).



**Figura I.19.-** Prototipo de mano robótica con datos precargados [I.34]

Para el 2007, *Dragulescu y Ungureanu* dieron a conocer el proceso de modelado para la estructura de un dispositivo que combina mecanismos y sensores (Figura I.20). Este trabajo cumple con la finalidad de mostrar los desarrollos matemáticos para generar ciertos movimientos y posteriormente ser el preámbulo para crear un sustituto funcional ajustable [I.35].



**Figura I.20.-** Modelado tridimensional de futura prótesis [I.35]

*Vivas y Aguilar* establecieron en el mismo año, un esquema geométrico y dinámico de un sustituto robótico de mano que incorpora un controlador por par calculado con el objetivo de observar diversos movimientos articulares [I.36]. Consta de 3 dedos articulados con 9 grados de libertad en total.

*Aviles, Simanca y Niño* desarrollaron un prototipo de dedo robótico antropomórfico, con un mecanismo adaptado a 3 articulaciones y un grado de libertad (Figura I.21). El sistema antes mencionado consta de un conjunto de palancas donde la entrada es un tornillo sin fin para la conversión de movimiento rotacional en lineal [I.37]. Este diseño ofrece una alternativa a bajo costo, además de permitir el control de una mano artificial con la menor cantidad posible de grados de libertad.



I.21.- Prototipo de dedo robótico [I.37]

*Andrade* y colaboradores dieron a conocer también en 2007, un prototipo de prótesis de mano para su uso en pacientes con problemas congénitos o traumáticos que aun poseen actividad muscular [I.38]. El prototipo es controlado por señales electro-miográficas medidas en la superficie de la piel. La prótesis permite sostener objetos por medio de una pinza de tres dedos (Figura I.22).

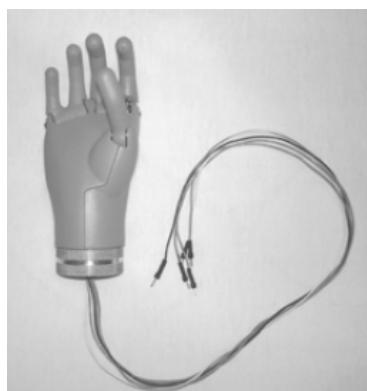
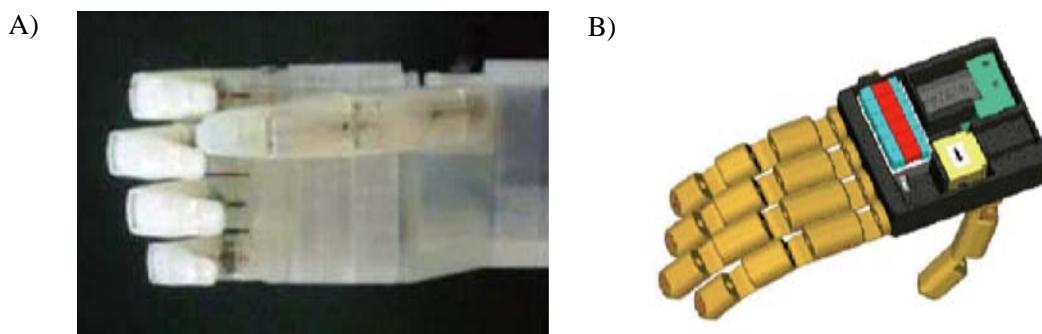


Figura I.22.- Prótesis desarrollada por *Andrade* y colaboradores [I.38]

*Jung, Kang y Moon* dieron a conocer en 2008, la implementación de una mano robótica que realiza la flexión de los dedos mediante un cable que funge como tendón, mientras que la extensión se realiza por un mecanismo compuesto por un resorte (Figura I.23 A). Este dispositivo posee 6 grados de libertad y un peso de 400 g [I.39]. En 2009 se presentó el desarrollo de una mano robótica con 5 dedos y un sistema hidráulico colocado dentro de la palma (Figura I.23 B). Todas las partes de los dedos del prototipo están integrados en una sola unidad [I.40]. Cuenta con 14 articulaciones y mismo número de grados de libertad. La fuerza de agarre es controlada variando el ciclo de trabajo suministrado por un microcontrolador *PWM*.



**Figura I.23.-** A) Mano robótica con tensores [I.39] y B) Mano hidráulica [I.40]

En 2009, *Casamichin* y *Muñoz* presentaron el modelado, diseño y control de un brazo robot antropométrico [I.41], con el objetivo de comprobar movimientos básicos humanos integrando diversas herramientas computacionales, este mecanismo posee 15 grados de libertad. En el mismo año, *Alfaro, Joliat y Vicario* desarrollaron una prótesis mioeléctrica de miembro superior [I.42]. Trabajo enfocado a una malformación congénita del brazo izquierdo por debajo de la articulación del codo, cumpliendo específicamente con la función prensil de la mano (Figura I.24).



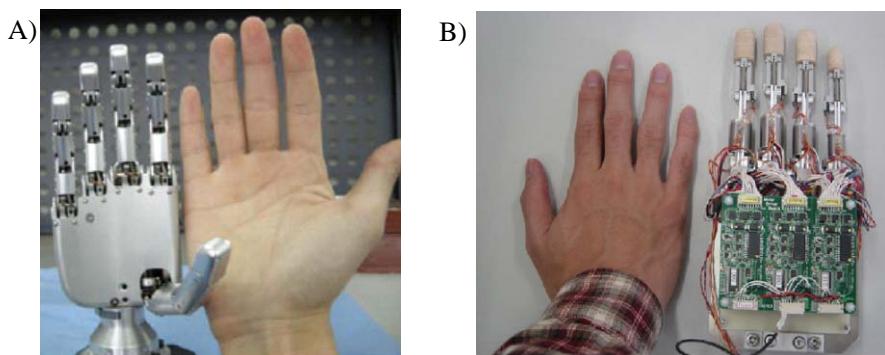
**Figura I.24.-** Pinza de prótesis mioeléctrica [I.42]

*Gómez, Velasco y García* presentaron un escrito que describe el diseño y construcción de un modelo mecánico compuesto de 3 dedos utilizados como medio de contacto para manipular objetos en forma de pinza [I.43]. Este actuador final cuenta con extremos antropomórficos (Figura I.25), sistema que fue implementado en un robot manipulador industrial.



**Figura I.25.-** Pinza de 3 dedos [I.43]

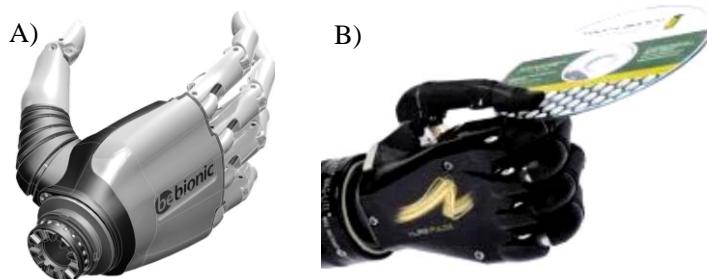
En el 2010, *Wang* y colaboradores presentaron otro prototipo con palma convexa, diseño enfocado a mejorar la estabilidad mientras se sujetaba un objeto [I.44]. Cuenta con sensores de posición en cada dedo (Figura I.26 A), destacando la destreza en comparación con otras prótesis comerciales. En el mismo año, *Sonoda* y *Godler* presentaron los resultados de su investigación que tenía como objetivo desarrollar una mano robótica ligera, de bajo costo, con cinco dedos y un alto nivel de realismo. Las articulaciones de los dedos son alimentadas por cadenas de transmisión [I.45]. El tamaño del prototipo es similar al de la mano de un adulto (Figura I.26 B).



**Figura I.26.-** A) Mano robótica antropomorfa [I.44] y B) Mano robótica [I.45]

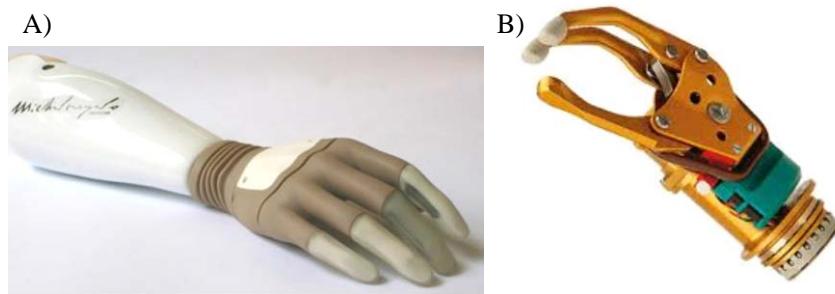
Actualmente existe una gran variedad de modelos en prótesis mioeléctricas para diversos niveles de amputación, donde el tipo de control más usado es el proporcional, sin embargo, tienen altos costos. A continuación se mencionan las patentes con mayor relevancia en cuanto a su funcionamiento y nivel de antropoformismo.

La prótesis mioeléctrica y totalmente articulada *BeBionic* fue presentada oficialmente en el *Congreso Mundial de la Sociedad de Prótesis y Ortosis*. Contiene microprocesadores que monitorean constantemente la posición de los dedos, de manera que las secuencias de agarre sean siempre acertadas [I.46]. Ha sido diseñada con un ensamblaje robusto que le proporciona gran resistencia al impacto y los dedos contienen resortes que le permiten moverse de forma natural cuando se doblan pasivamente (Figura I.27 A). El modelo *i-LIMB* de *TouchBionic* [I.47], tiene como mayor novedad la programación mediante conexión *bluetooth*, gracias a un programa de computo específico que puede usarse en una computadora personal y permite configurar la potencia de agarre dependiendo de la actividad y otros aspectos (Figura I.27 B).



**Figura I.27-** Prótesis: A) *Bebionic* [I.46] y B) *i-LIMB* [I.47]

La prótesis *Michelangelo* de *Otto Bock*, imita con gran similitud a la mano humana en aspecto físico, rapidez y movimientos [I.48]. La prótesis cuenta con un esqueleto de acero y aluminio que sustituye a huesos y articulaciones y de un relleno blando en el lugar de los músculos y tendones de una mano real; se conecta a la musculatura de la extremidad mediante dos electrodos aunque se están realizando pruebas con seis, lo que permitiría aún mayores posibilidades de movimiento (Figura I.28 A). La prótesis *Myo Hand* tiene una fuerza de agarre de 100 N y puede sujetar velozmente y con precisión (Figura I.28 B). Los objetos se fijan mediante señales musculares, ya que el sistema electrónico de la prótesis no reajusta automáticamente la fuerza del agarre.



**Figura I.28.-** Prótesis: A) *Michelangelo* [I.48] y B) *Myo Hand* [I.48]

La compañía *Motion Control*, fabricante de prótesis mioeléctricas establecida en Estados Unidos, presenta un brazo para amputación superior al codo denominado *UTAH ARM* [I.49] donde la mano y la muñeca tienen costo adicional; el brazo se puede mover a velocidad variable (Figura I.29). Utiliza 2 microprocesadores para que exista un control simultáneo del codo y la mano.



**Figura I.29.-** Prótesis *UTAH ARM* [I.49]

Además de las prótesis antes mencionadas, el fabricante americano ofrece otra prótesis mioeléctrica denominada *PROCONTROL*, la cual manipula solamente la mano o la muñeca según sea el caso, posee dispositivos terminales intercambiables que pueden ser pinzas o manos según la necesidad del paciente.

### I.3.- Prótesis de extremidad superior en México

En 1924, algunas fábricas se dedicaban a la producción de miembros artificiales, además de aparatos ortopédicos, sillas de ruedas y equipo de rehabilitación. Sin embargo, fue hasta la década de los 40's, cuando dio comienzo una etapa en México donde grupos clínicos proporcionaron medios para la creación de talleres dedicados al diseño, manufactura e implementación de sustitutos artificiales [I.50]. Dando a conocer a los pocos años, un pequeña variedad de dispositivos, estructuras y componentes que disminuían las carencias protésicas, fabricadas principalmente de madera y Aluminio.

Para la década de los 70's ya se contaba con el *Instituto Mexicano de Rehabilitación*. Además de la *Asociación de Protestitas y Ortesistas de la República Mexicana A. C.*, lo cual marcó una etapa importante para este campo de estudio, utilizando materiales modernos como el Nylon, Aluminio y Poliéster. Para 1983, el *Instituto Mexicano de Rehabilitación* dejó de operar. Posteriormente la educación en prótesis se ubicó en el *Instituto Nacional de Medicina en Rehabilitación conocido actualmente como Instituto Nacional de Rehabilitación*.

Además de los institutos mencionados en el párrafo anterior, alumnos de otras instituciones han contribuido al estudio e investigación para el desarrollo de prótesis, tales es el caso de *Cerón López* egresado de la *Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología del Instituto Politécnico Nacional (UPIBI-IPN)*, que en Mayo de 2002 presentó como trabajo terminal consideraciones para el diseño y construcción de una prótesis experimental de mano con un grado de libertad [I.51], enfocada a la sustitución parcial de la mano realizando solamente movimientos de flexión y extensión de los falanges; utilizando un microcontrolador *PIC16F84* y un circuito de interfaz para poder alimentar a los efectores finales.

En la misma institución pero en 2002, *Pérez Jiménez* presentó como desarrollo de su tesis [I.52], las consideraciones para implementar el diseño de una mano robótica enfocada para sustituir parcialmente la extremidad superior derecha, la cual puede realizar únicamente sujeción de pinza. Este diseño utiliza motores a pasos, representando con ellos las articulaciones y grados de libertad.

*Martínez Colín*, egresado de la *Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas del Instituto Politécnico Nacional (UPIITA-IPN)*, desarrolló en el 2003 el prototipo de una prótesis para pacientes con amputación de una a dos tercios bajo el codo [I.53], sistema que cuenta con el diseño de un control mioeléctrico portátil no invasivo que procesa señales del músculo radial corto. *Cota Monjarás y Espinoza Domínguez* desarrollaron en el mismo año, el prototipo de una prótesis mioeléctrica con control proporcional de miembro apendicular superior y 2 grados de libertad [I.54], con aplicación directa para pacientes con amputación por traumatismo con muñón largo de antebrazo.

En el 2007, *Báez Rivas, Márquez Lázaro y Ríos Ramírez* desarrollaron en la segunda fase de un proyecto terminal, el diseño y construcción de un brazo manipulador aplicable como prótesis [I.55], con un sistema de retroalimentación y la integración de sus componentes, obteniendo un sistema de control que puede operar proporcionalmente un brazo manipulador a través del censado de movimientos de la extremidad superior.

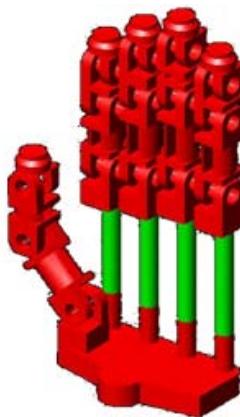
En el *Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV)*, han desarrollado diversos trabajos relacionados con manos robóticas, entre ellos, el proyecto titulado *Mano Robótica Planar* además de una prótesis de extremidad completa, que posee un mecanismo con un arreglo paralelo de actuadores

---

[I.56]. Este desarrollo tecnológico ofrece un incremento en grados de libertad, permitiendo así mayor rango de movimientos.

En la *Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)*, se han desarrollado estudios con el propósito de desarrollar una prótesis inteligente de miembro superior [I.1], la cual será actuada por medio de señales mioeléctricas y auditivas, siendo capaz de reprogramarse para realizar actividades con el control de presión y fuerza. Asimismo, investigadores de dicha institución implementaron un brazo manipulador que posee características parecidas a las de una prótesis, con servomotores que son controlados por señales mioeléctricas interpretadas por un microprocesador para realizar los movimientos correspondientes.

En 2010, *Velázquez Sánchez* y colaboradores presentaron la optimización del diseño y construcción de una prótesis de mano robótica multiarticulada (Figura I.30), trabajo derivado del proyecto de investigación “Desarrollo de sistemas embebidos para la interfaz y control de prótesis robóticas” [I.57], en la *Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME-IPN)*, proyecto que tiene como objetivo la implementación de una mano robótica multiarticulada mediante el análisis estructural de los movimientos de la mano.



**Figura I.30.-** Mano robótica multiarticulada [I.57]

En este capítulo se han descrito brevemente las generalidades referentes a investigaciones más representativas, mostrando un recorrido general obteniendo así una recopilación de los trabajos más relevantes en los últimos años. Asimismo, se pretende utilizar los antecedentes aquí mostrados como punto de partida para el diseño de una mano robótica multiarticulada aplicable como prótesis, que cumpla con la mayoría de formas para sujetar objetos.

#### I.4.- Planteamiento del problema

En la actualidad existen pocos trabajos relacionados con el diseño e implementación de prótesis de mano a nivel nacional, donde generalmente los estudios quedan inconclusos por múltiples razones. Igualmente, los que se logran finalizar no cumplen en su totalidad con la ejecución de movimientos y trayectorias, realizando en su mayoría solamente sujeción cilíndrica de objetos, lo cual es insuficiente, ya que la extremidad puede realizar diversas formas de agarre, sin dejar de lado el nivel de realismo, situación que afecta la parte emocional y estética de la persona afectada.

Por lo tanto, es importante implementar una mano robótica multiarticulada que pueda ser aplicable como prótesis, cumpliendo con las funciones principales y desarrollando movimientos adecuados para la ejecución de actividades rutinarias, sin olvidar la apariencia antropomórfica, accediendo con ello a obtener un prototipo funcional óptimo para la manipulación de objetos. Por lo que es necesario desarrollar la optimización y simplificación del mecanismo, obteniendo un modelado tridimensional para asegurar que las dimensiones correspondan, finalizando con un dispositivo que desempeñe la ejecución de trayectorias y sujeción de objetos con diferentes geometrías.

#### I.5.- Hipótesis

Si se emplea un mecanismo sub-actuado para igualar el movimiento de los dedos de la mano, además de un análisis biomecánico de la extremidad superior, entonces se puede simplificar un modelo tridimensional antropomórfico para ser aplicable como prótesis, que cumpla con las principales formas de sujeción.

#### I.6.- Sumario

Como se ha visto en los antecedentes históricos presentados anteriormente, la necesidad de científicos e investigadores para desarrollar un sustituto que supla de forma semejante a una extremidad faltante, ha sido motivo de bastos diseños en donde los trabajos antes mencionados son una clara muestra de la evolución que se ha tenido conforme al tema, partiendo de una mano de Hierro con bastantes limitaciones hasta llegar a sistemas robóticos con múltiples grados de libertad aplicables como prótesis. En el siguiente capítulo, se aborda la descripción anatómica, biomecánica y patológica de la mano, literatura esencial para la comprensión y entendimiento de la extremidad. Lo anterior es esencial para determinar la relación entre el sistema natural del cuerpo y un dispositivo robótico para implementar un modelo funcional que realice múltiples actividades.

### I.7.- Referencias

- 1.- Dorador-González, J. M., Murillo, P. R., Luna, I. F. y Juárez-Mendoza, A., Robótica y prótesis inteligentes, *Revista Digital Universitaria*, Vol. 6, No. 1, pp 1-15, 2005.
- 2.- Norton, K., Un breve recorrido por la historia de la protésica, *In Motion*. Vol. 17, No. 7, pp 1-5, 2007.
- 3.- Pérez-Romero, M. A., Urriolagoitia-Calderón, G., Hernández-Gómez, L.H., Velázquez-Sánchez, A. T. y Torres-San Miguel, C. R., Relevancia del estudio cinemático de una mano robótica multi-articulada aplicable como prótesis, *5to Congreso Científico Tecnológico de la Carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica*, pp 1-5, 2010.
- 4.- Velázquez-Sánchez A. T., Merchán-Cruz, E. A., y Ramírez-Gordillo, J., De los grippers de pinzas a las manos robóticas multiarticuladas: La evolución de los efectores finales, *4º Congreso Internacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas*, pp 1-9, 2005.
- 5.- Puglisi, L. y Moreno, H., Prótesis robóticas, *Universidad Politécnica de Madrid, departamento de Automática, Ingeniería Electrónica e Informática Industrial*, pp 1-10, 2010.
- 6.- Juárez-Corral, O. M., Velázquez-Sánchez A. T., Pérez-Romero, M. A. y Lugo-González, E., Perspectivas de la robótica en la rehabilitación médica, *XV Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura*, pp 1-6, 2010.
- 7.- Pérez-Romero, M. A., Velázquez-Sánchez A. T., Urriolagoitia-Calderón, G., Hernández-Gómez, L.H., Urriolagoitia-Calderón, S. y Juárez-Corral, O. M., Antecedentes históricos de las prótesis de extremidad superior, *XV Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura*, pp 1-5, 2010.
- 8.- Rehabilitación y Medicina Física, Artículo de divulgación en Internet, recuperado de: <http://www.rehabilitacionymedicinafisica.blogspot.com>, 2010.
- 9.- Mesonero-Romanos, D., Ceres, R., Rodríguez, H., Pons J. L. y Calderón, L., Arquitectura electrónica para el control de una prótesis de mano, *Actas del Congreso IBERDISCAP 2001*, pp 1-11, 2001.
- 10.-Bowers R., El maravilloso mundo de la prótesis cosmética, *In Motion*, Vol. 12, No. 2, pp 1-5, 2002.
- 11.-Jiménez-Pinto, C., Prótesis mioeléctricas revisión bibliográfica, *Labor académico*, Año 1 No. 2, pp 38-43, 2005.
- 12.- Jacobson, S.C., Wood J. E., Knutti D. F. y Biggers K. B., The Utah/MIT dexterous hand: work in progress, *Journal of Robotic Research*, Vo1. 3, pp 21-50, 1984.
- 13.- Laboratory of Automation and Robotics, recuperado de: <http://www-lar.deis.unibo.it/past-activ/ubhand/index.html>, 2010.

- 14.- Eusebi, A., Fantuzzi, C., Melchiorri, C., Sandri, M. y Tonielli, A., The U. B: Hand II control system: Design features and experimental results, *20th International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, pp 1-6, 1994.
- 15.- Rajiv-Doshi, B. S., Clement-Yeh, B. S. y Maurice-LeBlanc, C. P., The design and development of a gloveless endoskeletal prosthetic hand, *Journal of Rehabilitation Research and Development*, Vol. 35 No. 4, pp 388-395, 1998.
- 16.- Butterfass, J., Hirzinger, G., Knoch, S. y Liu, H., DLR's Multisensory Articulated Hand Part 1: Hard and Software Architecture, *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation ICRA98*, pp 2081-2086, 1998.
- 17.- Casalino, G., Cannata, G., Caffaz, A. y Bernieri, S., The design and Development of the DIST-Hand Dexterous Gripper, *Proceedings of International Congress of Robotics and Automation ICRA98*, pp 2075-2080, 1998.
- 18.- Fukaya, N., Toyama, S., Asfour, T. y Dillmann, R., Design of the TUAT/Karlsruhe humanoid hand, *International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS*, pp 1-6, 2000.
- 19.- Dechev, M., Cleghorn, W. L. y Naumann, S., Multiple finger, passive adaptive grasp prosthetic hand, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 36, No. 10, pp 1157-1173, 2001.
- 20.- Sculz, S., Pylatiuk, C. y Bretthauer, G., A new ultralight anthropomorphic hand, *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp 1-5, 2001.
- 21.- Butterfass, J., Hirzinger, G., Grebenstein, M. y Liu, H., DLR-HAND II: Next Generation of a Dexterous Robotic Hand, *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp 1-6, 2001.
- 22.- Borst, C., Fisher, M. y Hirzinger, G., Calculating Hand Configuration for Precision and Pinch Grasp, *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp 1-6, 2001.
- 23.- Mouri, T., Kawasaki, H., Yoshikawa, K., Takai, J. y Ito, S., Anthropomorphic robot hand: Gifu hand III, *ICCAS*, pp 1-6, 2002.
- 24.- Massa, B., Roccella, S., Carrozza, M. C. y Dario, P., Design and development of an underactuated prosthetic hand, *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp 3374-3379, 2002.
- 25.- Lotti, F., Tiezzi, P., Vassura, G., Biagiotti, L. y Melchiorri, C., UBH 3: an anthropomorphic hand with simplified endo-skeletal structure and soft continuous fingerpads, *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp 4736 - 4741, 2004.

- 26.- Geng, J., Huang, Q., Zhang, W. y Zhao , Y., Design of a humanoid hand whit 5 fingers and 14 joints driven by 2 motors, *Proceedings of the 11th World Congress in Mechanism and Machine Science*, pp 1-4, 2004.
- 27.- Pylatiuk, C., Mounier, S., Kargov, A., Schulz, S. y Bretthauer. G., Progress in the Development of a Multifunctional Hand Prosthesis, *Proceedings of the 26th Annual International Conference of the IEEE EMBS*, pp 1-5, 2004.
- 28.- Zhang, W., Chen, Q. y Sun, Z., Design of under-actuated humanoid robot finger with shape adaptation, *Proceedings of the 11th World Congress in Mechanism and Machine Science*, pp1-4, 2004.
- 29.- Yang, J., Peña, E., Abdel, K., Patrick, A. y Lindkvist, L., A multi-fingered hand prosthesis, *Mechanism and Machine Theory*, pp 555-581, 2004.
- 30.- Osswald, D., Martin, J., Burghart, C., Mikut, R., Wörn, H. y Bretthauer, G., Integrating a flexible anthropomorphic robot hand into the control system of a humanoid robot, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 48, No. 4, pp 213-221, 2004.
- 31.- Martin, T. B., Ambrose, R. O., Diftler, M. A., Platt Jr. R. y BGutzer, M. J., Tactile gloves for autonomous grasping with the NASA/DARPA robonaut, *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp 1713-1718, 2004.
- 32.- Ueda, J., Yutaka, I., Kondo, Masahiro y Ogasawara, T., Development of the NAIST-Hand with vision-based tactile fingertip sensor, *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp 2343-2348, 2005.
- 33.- Sánchez, C. M., Loaiza, J. L. y Cortés, C. J., Diseño y construcción de prototipo de pinza y rotador (funciones de pronación y supinación) para prótesis mioeléctrica de mano, *Revista Ingeniería e Investigación*, Vol. 26, No. 3, pp 5-11, 2006.
- 34.- Cho, K., Rosemarin, J. y Asada, H., Design of vast DOF artificial muscle actuators with a cellular array structure and its application to a five-fingered robotic hand, *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp 921-926, 2006.
- 35.- Dragulescu, D. y Ungureanu, L., The modeling process of a human hand prosthesis, *4th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics*, pp 263-268, 2007.
- 36.- Vivas, A. y Aguilar, E., Modelado geométrico y dinámico de una prótesis de mano robótica, *III IEEE Colombian Workshop on Robotics and Automation*, pp 1-6, 2007.
- 37.- Aviles, O. F., Simanca, P.L. y Niño, P. A., Diseño y construcción de un dedo para grippers robóticos, *Revista Colombiana de Rehabilitación*, Vol. 6, No. 6, pp 1-6, 2007.
- 38.- Andrade, N., Borges, G., Nascimento, F., Romariz, A. y Rocha, A.,A new biomechanical hand prosthesis controlled by surface electromyographic signals,

- Proceedings of the 29th Annual International Conference of the IEEE EMBS*, pp 6141-6144, 2007.
- 39.- Jung, S., Kang, S. y Moon, I., Design of Biomimetic Hand Prosthesis with Tendon-driven Five Fingers, *Proceedings of the 2nd Biennial IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, pp 895-900, 2008.
- 40.- Tan, L., Xie, S., Lin, I. y Lin, T., Development of a multifingered robotic hand, *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Information and Automation*, pp 1541-1545, 2009.
- 41.- Casamanchín, J. y Muñoz, M., Modelado y diseño de un brazo robot antropométrico, *V Seminario Internacional Ingeniería Biomédica*, pp 1-4, 2009.
- 42.- Alfaro, M., Joliat, L. y Vicario S., Desarrollo de una prótesis Mioeléctrica de miembro superior, *XVII Congreso Argentino de Bioingeniería, VI Jornadas de Ingeniería Clínica*, pp 1-4, 2009.
- 43.- Gómez-Rivera, W., Velasco-Toledo, N. F. y García, M. F., Modelamiento estructural de un actuador final con extremos antropomórficos, *9º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, pp 133-140, 2009.
- 44.- Wang, X., Zhao, J., Yang, D., Li, N., Sun, C. y Liu, H., Biomechatronic approach to a multi-fingered hand prosthesis, *Proceedings of the 2010 3rd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, pp 209-214, 2010.
- 45.- Sonda, T. y Godler I., Multi-Fingered Robotic Hand Employing Strings Transmission Named “Twist Drive”, *The 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp 2733-2738, 2010.
- 46.- BeBionic®, recuperado de: <http://www.bebionic.com>, Mayo 2010.
- 47.- TOUCH BIONICS®, Transforming the everyday lives of extraordinary people, recuperado de: <http://www.touchbionics.com>, Junio 2010.
- 48.- Otto Bock®, Quality for life, recuperado de: <http://www.ottobock.com.mx>, Junio 2010.
- 49.- Advanced Motion Control® 2001, <http://www.advancedmotioncontrol.com/index.html>, Junio 2010.
- 50.- Castillo-Moreno, A. E., *Breve historia de las Prótesis en México*, Centro de Información Nacional sobre Pérdida de Extremidades, pp 1-4, 2003.
- 51.- Cerón-López, M., *Prótesis experimental de mano con un grado de libertad*, Tesis de Licenciatura, UPIBI, Instituto Politécnico Nacional, México, pp. 1- 25, 2002.
- 52.- Pérez-Jiménez, E. M., *Prótesis de una mano con un grado de libertad*, Proyecto terminal, UPIBI, Instituto Politécnico Nacional, México, pp. 5-27, 2002.

- 53.- Martínez-Colín, J., *Sistema de control mioeléctrico para prótesis de miembro apendicular superior*, Proyecto terminal, UPIITA, Instituto Politécnico Nacional, pp. 2-32 México 2003.
- 54.- Cota-Monjarás, O. F. y Espinoza-Domínguez, N. S., *Prototipo de prótesis mioeléctrica con control proporcional de miembro apendicular superior para amputados por traumatismo con muñón largo de antebrazo de dos grados de libertad*, Proyecto terminal, UPIITA, Instituto Politécnico Nacional, México, pp. 5-33, 2006.
- 55.- Baez-Rivas, L., Márquez-Lázaro, A. P. y Ríos-Ramírez, C., Control mioeléctrico para brazo manipulador, Proyecto terminal, UPIITA, Instituto Politécnico Nacional, México, pp. 6-19, 2007.
- 56.- Ramirez-Garcia, A., Toledo, C., Leija, L. y Muñoz, R., Status of elbow myoelectric prosthesis: CINVESTAV-IPN, *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, Vol. XXX, No. 1, pp. 66-73, 2009.
- 57.- Velázquez-Sánchez, A. T., Lugo-González, E., Torres-San Miguel, C. R. y Escalante-Rodríguez, E., Optimización del diseño y construcción de la prótesis de mano robótica multiarticulada, *Semana de la Ciencia y la Innovación 2010*, México, pp. 1-1, 2010.

# III

## Fundamentos teóricos

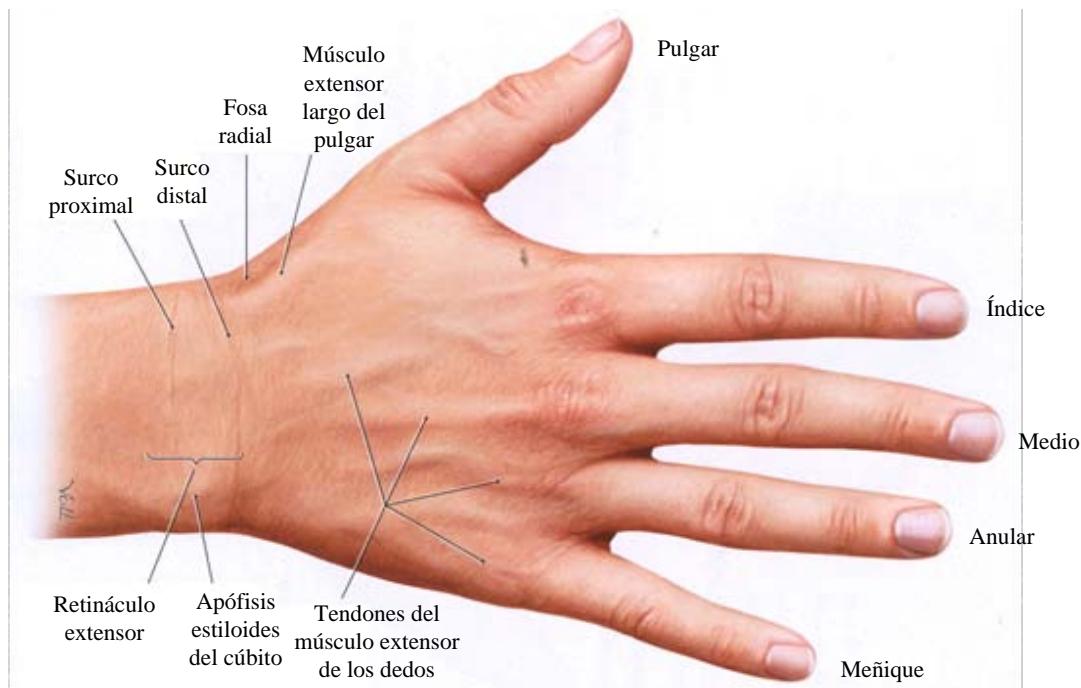
En esta sección se aborda la descripción anatómica, biomecánica y patológica de la mano, literatura esencial para la comprensión y entendimiento de la extremidad. Considerando lo anterior, es posible determinar una relación entre el sistema natural del cuerpo y un dispositivo robótico para implementar un modelo funcional que realice múltiples actividades.

## II.1.- Anatomía de la mano

La mano está ubicada en el extremo final del brazo considerada un órgano con elevada complejidad donde su estructura básica, en general, está compuesta por un conjunto de huesos, ligamentos, tendones, músculos, nervios y vasos sanguíneos [II.1]. A continuación se dará una breve y concisa descripción de la estructura ósea, articulaciones, ligamentos, tendones músculos y arterias. Permitiendo con ello tener una clara visión de la anatomía que posee dicha extremidad.

### II.1.1.- Superficie de la mano

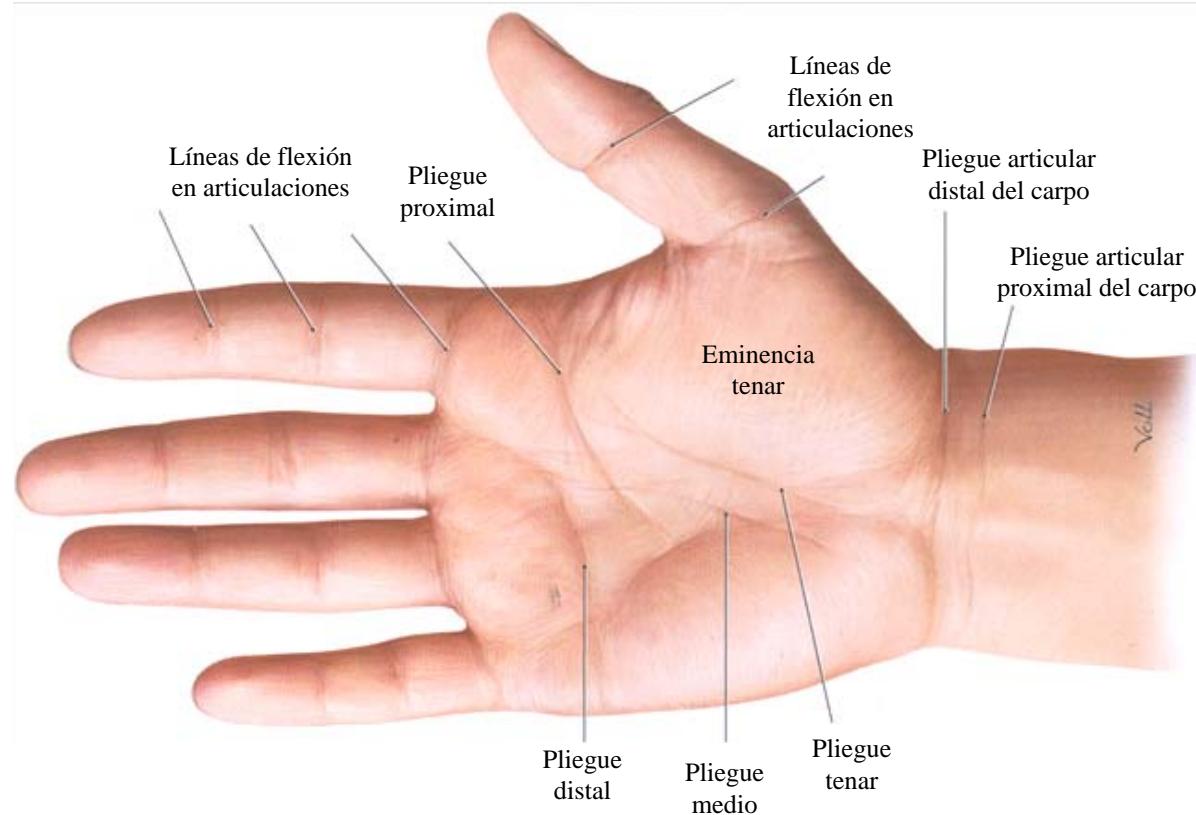
El dorso de la mano está cubierto por piel fina además de pelo en gran parte de su superficie, inclusive en la zona proximal de los dedos. En una vista dorsal se alcanza a apreciar los tendones y músculos extensores de los dedos (Figura II.1) así como la red venosa dorsal siendo lo anterior una característica del dorso de la mano [II.2]. También son visibles los surcos distal y proximal, que suelen hacerse más profundos cuando se realiza extensión de la extremidad.



**Figura II.1.- Vista dorsal de la mano [II.3]**

La piel encontrada en la vista palmar tiene mayor grosor y resistencia que la dorsal, debido a que la palma de la mano está sometida a mayor desgaste continuo para el desarrollo de diversas actividades [II.3], esta sección no contiene pelo ni glándulas sebáceas.

En la vista palmar se identifican varios pliegues o líneas de flexión longitudinal y transversal, donde los 4 pliegues palmares principales forman una geometría similar a la letra “M” (Figura II.2). También se visualizan las líneas de flexión de las múltiples articulaciones de la mano, donde cada uno de los dedos suele mostrar 3 pliegues de flexión a excepción del pulgar que muestra 2 pliegues. El pliegue longitudinal radial rodea la eminencia tenar mientras que el pliegue palmar medio indica la eminencia hipotenar del dorso.

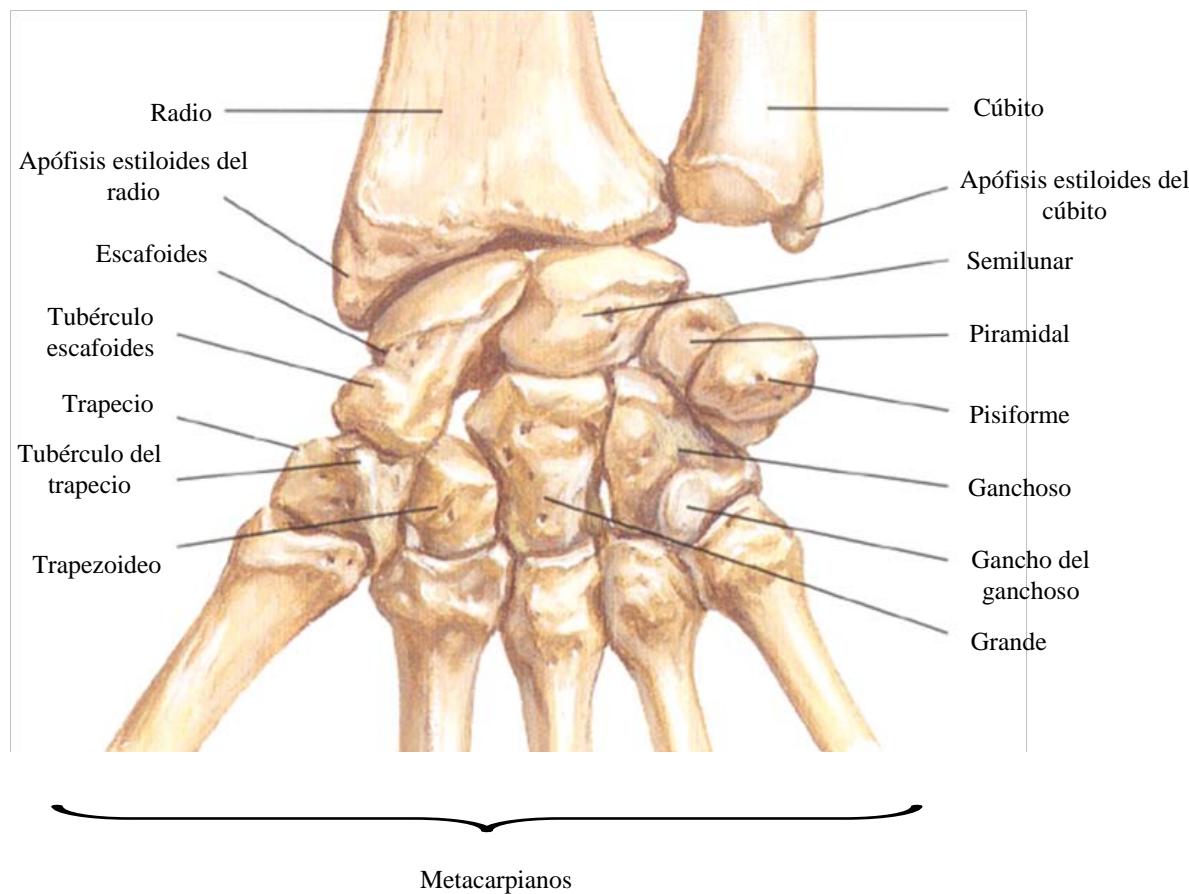


**Figura II.2.-** Vista palmar de la mano [II.3]

### II.1.2.- Estructura ósea

Una mano se forma por un total de 27 huesos, 8 en el carpo, 5 metacarpianos y 14 falanges [II.4]. Estos huesos constituyen en conjunto a las 4 principales articulaciones de la mano conocidas como: Articulación Interfalángica Distal (IFD), Articulación Interfalángica Proximal (IFP), Articulación Metacarpofalángica (MCF) y Articulación Carpometacarpiana (CMC).

La muñeca o carpo, es el conjunto de huesos y estructuras de tejido blando que conectan la mano con el antebrazo [II.5]. Los 8 huesos del carpo están divididos en dos filas: proximal y distal. Los huesos de la fila distal son el trapecio, trapezoide, grande y ganchoso (Figura II.3), que juntos forman una unidad sin movimiento que se articula con los metacarpianos para formar las articulaciones CMC.

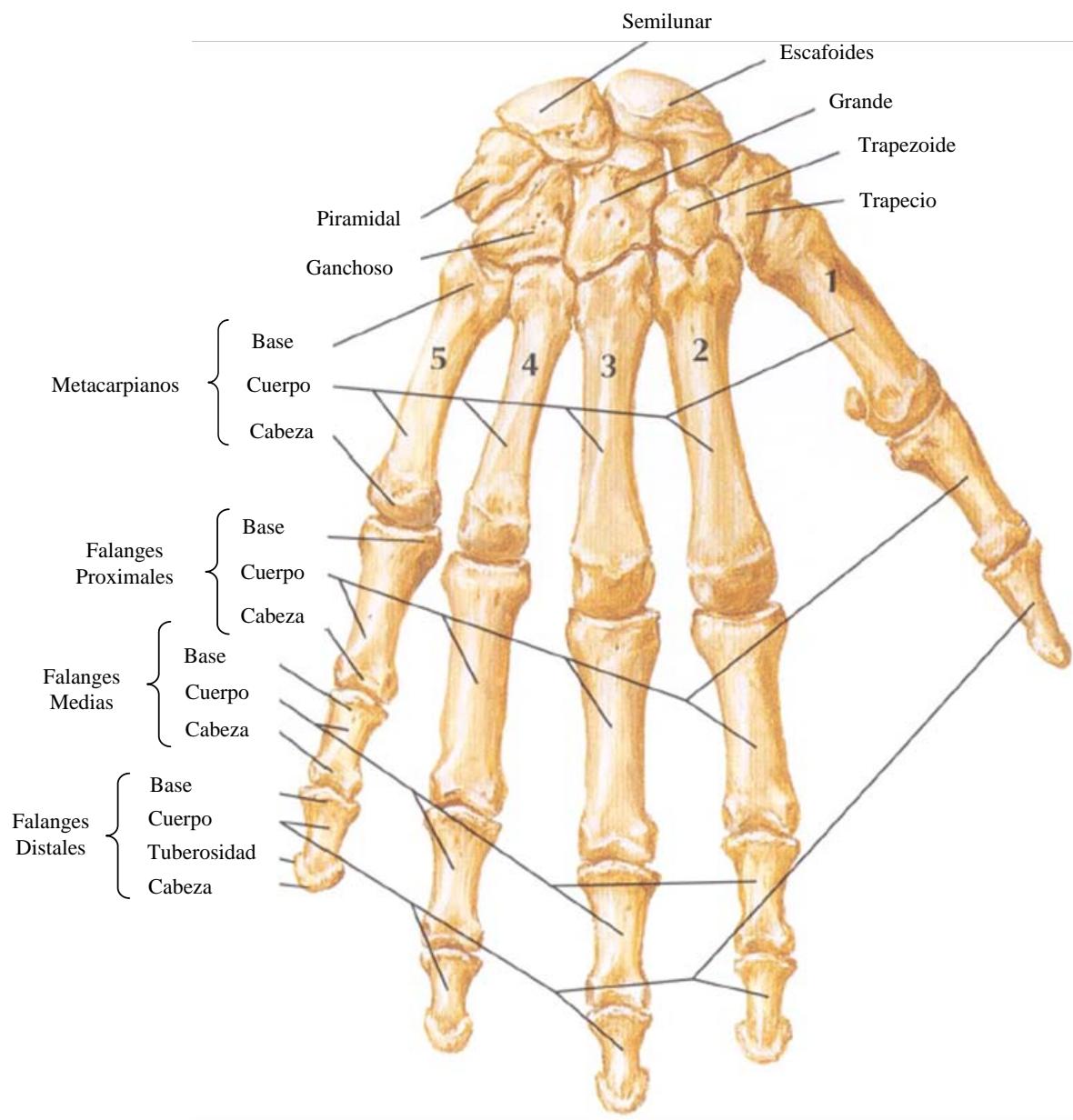


**Figura II.3.** Huesos del carpo (vista palmar) [II.2]

Los huesos de la fila proximal son el escafoides, semilunar y piramidal (Figura II.3), que forman una fila de huesos móvil y articulada con la parte distal del radio formando la articulación Radiocarpiana (RC). El pisiforme es un hueso sesamoideo que forma su pequeña articulación con el hueso piramidal.

El metacarpo es formado por 5 huesos largos también conocidos como metacarpianos, los cuales en conjunto con los huesos del carpo forman el esqueleto de la palma de la mano y se articulan en su parte superior con la segunda hilera de huesos del carpo y en la parte inferior con las primeras falanges de los dedos [II.5].

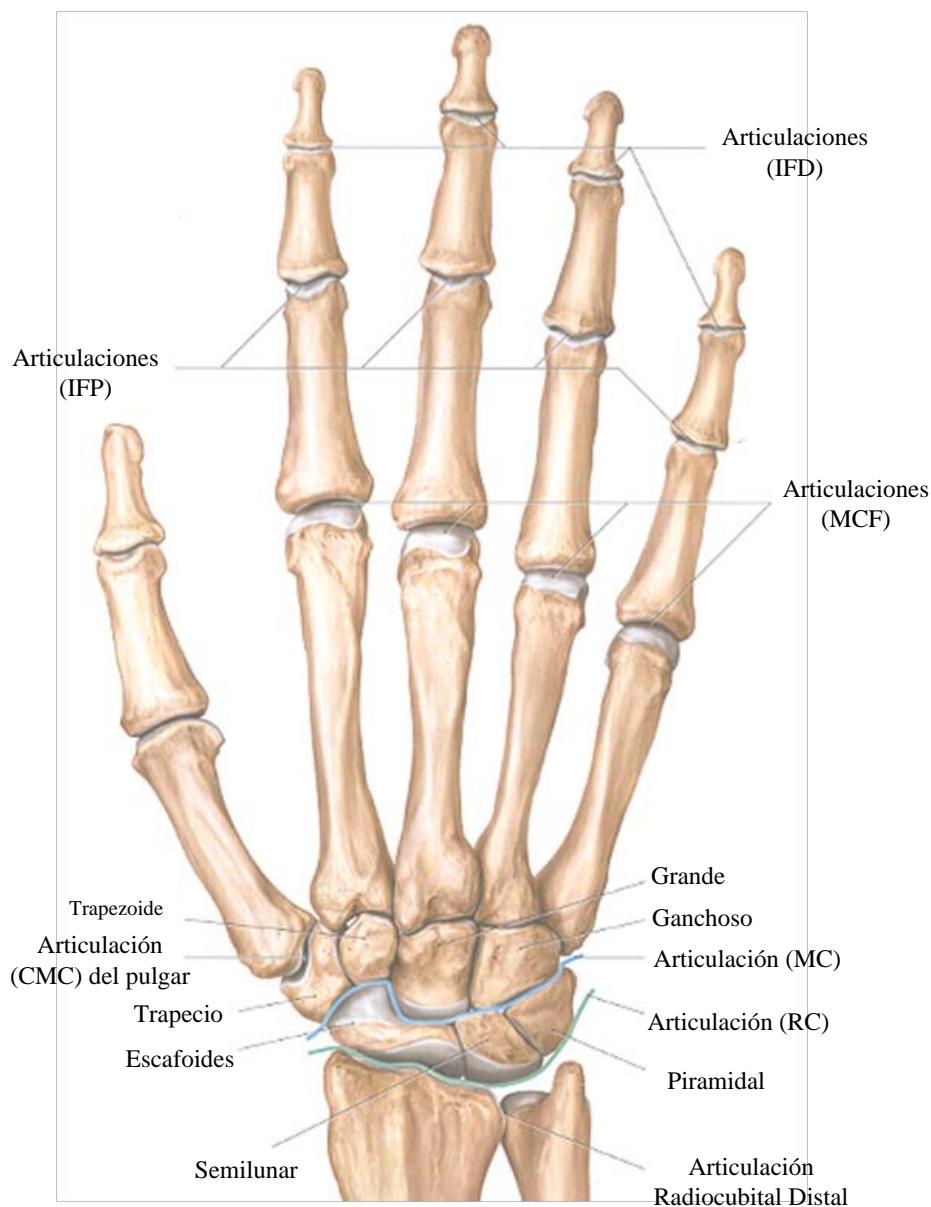
Las falanges forman el esqueleto de los dedos (Figura II.4), conocidas como falange proximal, media y distal. El pulgar y los dedos son los componentes básicos de la mano y se enumeran del hueso radial al cubital de la forma siguiente [II.6]: I (pulgar), II (índice), III (medio), IV (anular) y V (meñique), tomando en cuenta que esta numeración consta de un metacarpiano y 3 falanges en cada uno de los dedos exceptuando al pulgar que tiene dos falanges



**Figura II.4.-Huesos de mano (mano derecha vista dorsal) [II.2]**

### II.1.3.- Sistema Articular

Las uniones de los diversos huesos que componen la mano y producen algún movimiento se conocen como articulaciones [II.7]. Como se mencionó anteriormente, las articulaciones Interfalángicas (IF) se integran por la unión de las falanges proximal, media y distal, constituyendo las articulaciones IFP y IFD (Figura II.5).

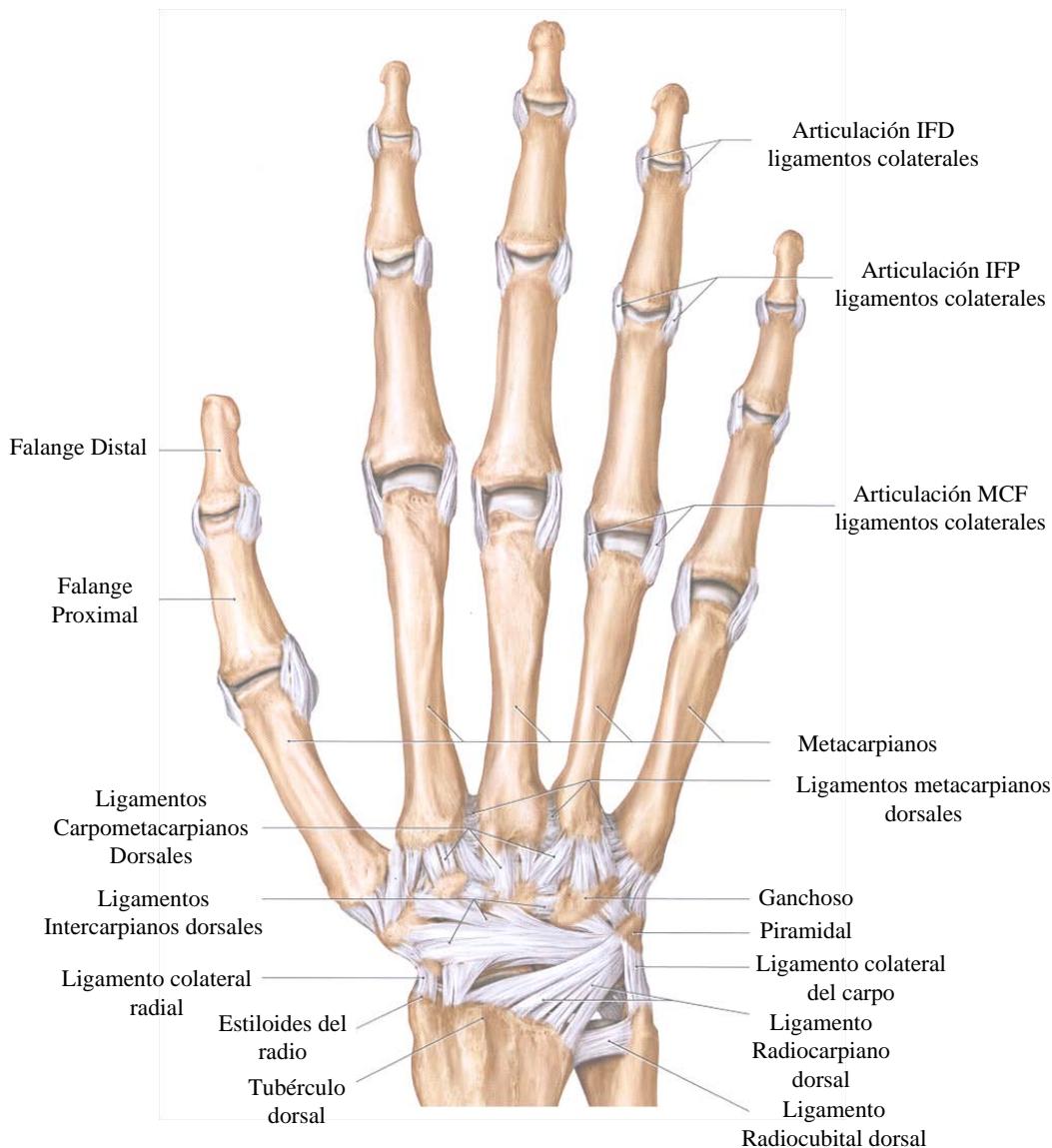


**Figura II.5.-** Articulaciones de la mano (vista dorsal) [II.3]

De forma similar, la articulación MCF está formada por la unión de la falange proximal y el metacarpiano correspondiente a cada uno de los dedos [II.6]. La articulación Radiocarpiana (RC) está ubicada entre la extremidad distal del radio y el carpo, y la articulación Mediocarpiana (MC) se encuentra entre las filas proximal y distal.

### II.1.4.- Ligamentos y tendones

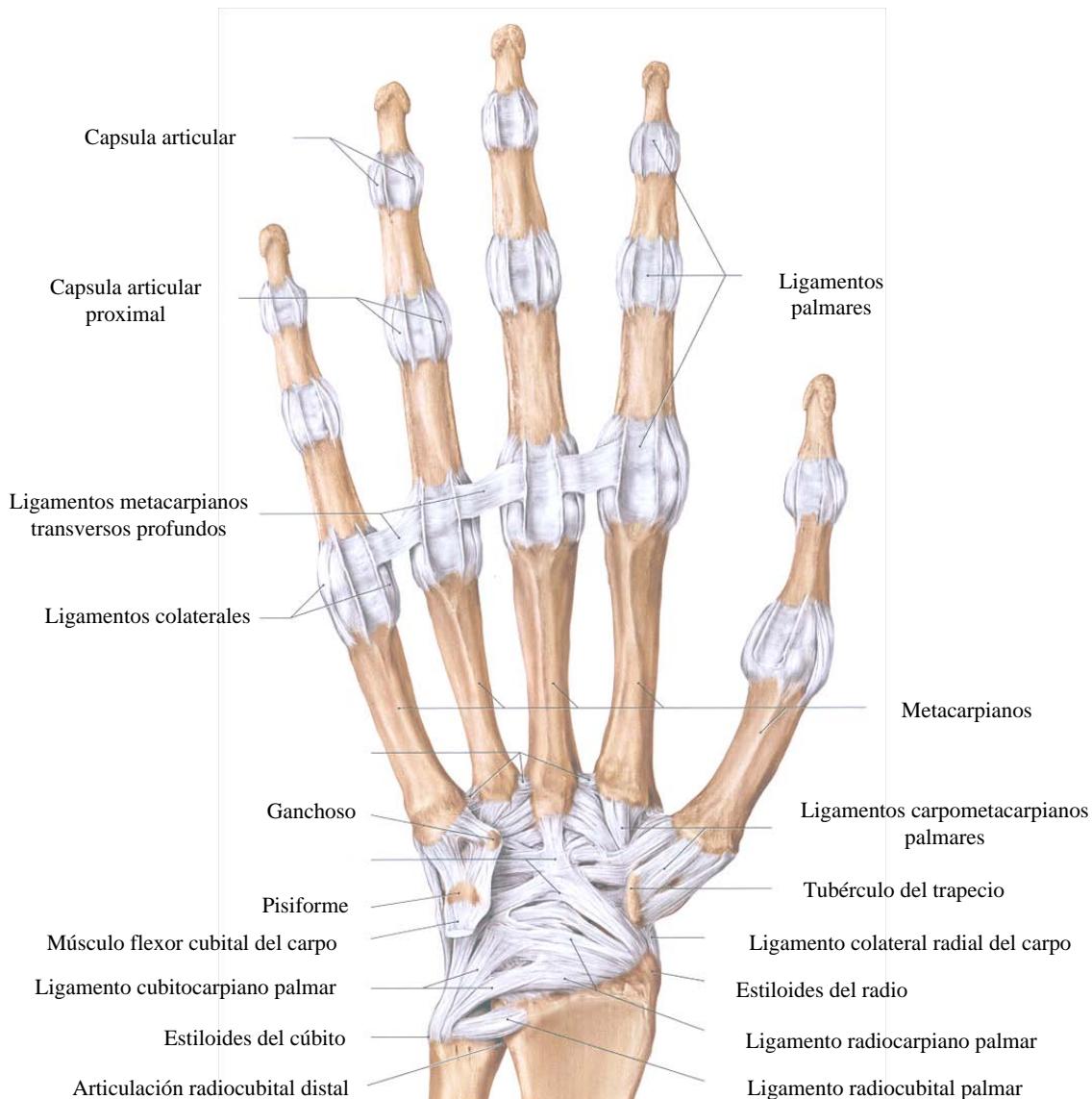
Los ligamentos constan principalmente de tejido fibroso que une a los huesos entre sí, con la función de mantener estables las estructuras óseas, mientras que los tendones unen los músculos con los diferentes huesos y sirven para mover el sistema óseo [II.4]. Se pueden identificar ligamentos radiocarpianos, cúbitocarpianos, colaterales, intercarpianos, carpometacarpianos y metacarpianos (Figura II.6).



**Figura II.6.-** Ligamentos de la mano (vista dorsal) [II.3]

La función de los ligamentos del carpo es limitar el movimiento articular, tomando en cuenta que estos ligamentos pueden inducir desplazamientos óseos y transmitir fuerza [II.5]. Los ligamentos ubicados en la palma, son más gruesos y fuertes que los del carpo.

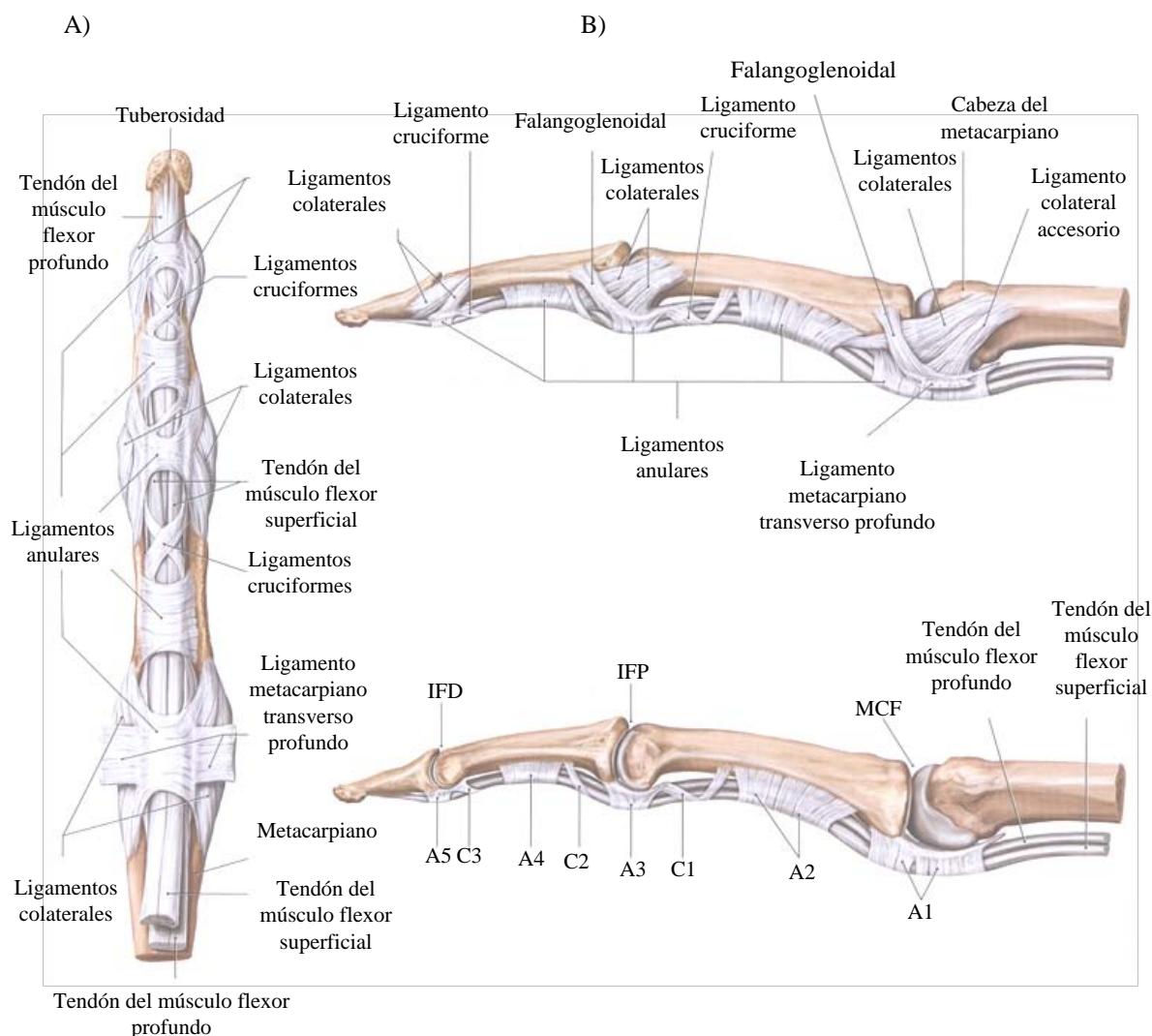
Los ligamentos dorsales son más delgados y los hay en menor cantidad (Figura II.7). Los ligamentos del carpo se pueden dividir en extrínsecos e intrínsecos. Los ligamentos extrínsecos palmares incluyen el ligamento lateral radial y radiocarpianos mientras que los intrínsecos se originan e insertan en el carpo. Los ligamentos extrínsecos dorsales se constituyen de 3 bandas del ligamento mediocarpiano dorsal mientras que los ligamentos intrínsecos se conocen como corto, largo e intermedio de acuerdo a su longitud.



**Figura II.7.- Ligamentos de la mano (vista palmar) [II.3]**

En la sección palmar de los dedos se encuentran los tendones flexores largos, ubicados dentro de una vaina tendinosa que funciona como guía además de permitir que los tendones se deslicen con el mínimo rozamiento [II.3], evitándose con ello la desviación de las vainas tendinosas al momento de efectuar el movimiento de flexión. La mayoría de los

tendones de la mano están fijos en vainas, las cuales los mantienen próximos al plano esquelético, manteniendo así un movimiento constante [II.5]. El sistema del tendón flexor en los dedos es el más desarrollado de todos. En la figura mostrada a continuación (Figura II.8), se puede observar el sistema ligamentario de los dedos, donde A1, A2, A3, A4 y A5 es un ligamento anular y C1, C2 y C3 es un ligamento cruciforme o también llamado oblicuo.

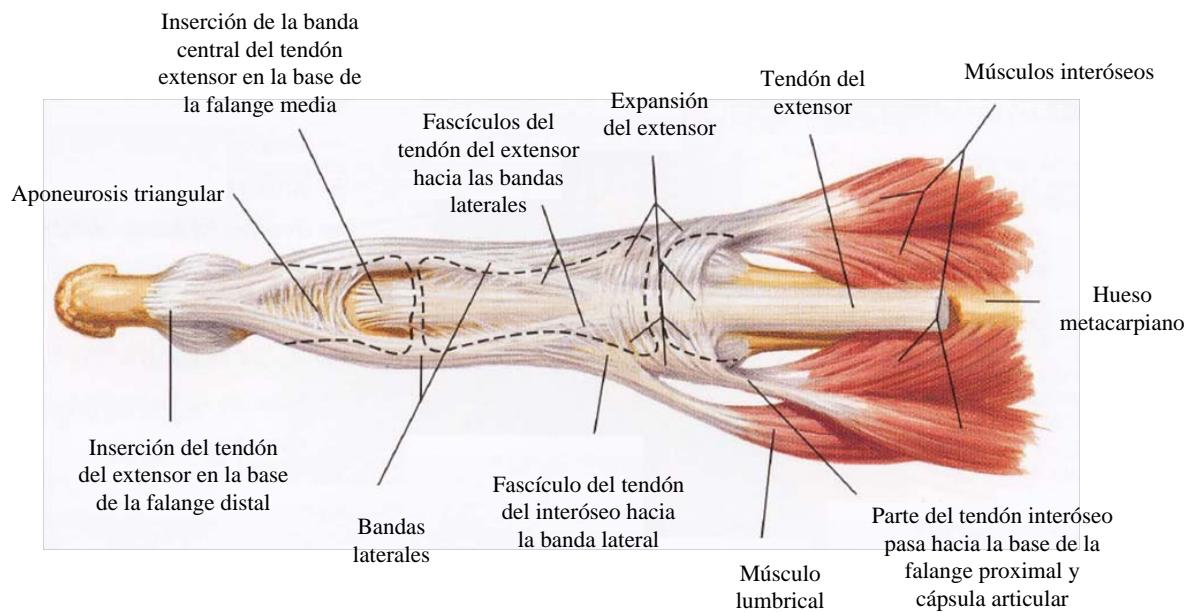


**Figura II.8.-** Sistema ligamentario de los dedos: A) Vista palmar y B) Vista lateral [II.3].

#### **II.1.5.- Sistema extensor de los dedos**

El sistema extensor de los dedos también conocido como *Mecanismo extensor de Hood* está compuesto principalmente por tendones intrínsecos y extrínsecos, a través de los cuales se controla el movimiento de las articulaciones IFP y MCF, además de

proporcionar un movimiento fino en cada uno de los dedos [II.8]. La estructura tendinosa del tendón extensor largo extrínseco está formada por bandas sagitales que circunscriben la cabeza de los metacarpianos, bandas proximales que se insertan en la base de la falange proximal, bandas centrales que se insertan en la base de la falange intermedia, bandas laterales que se insertan en la base de la falange distal, músculos interóseos y lumbricales (Figura II.9).

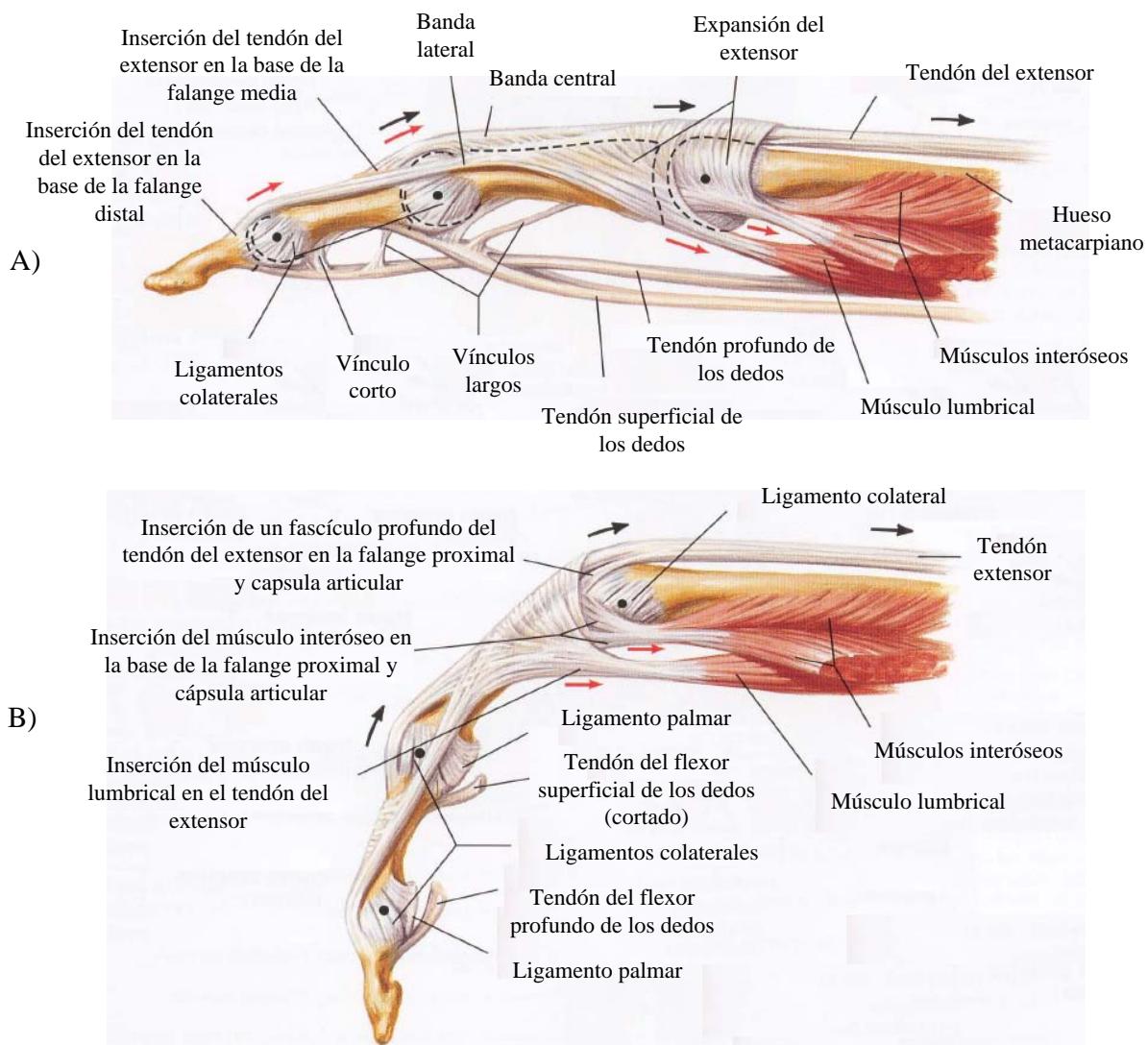


**Figura II.9.-** Tendones flexores y extensores de los dedos (Vista palmar) [II.2]

Al flexionar la articulación MCF, las bandas sagitales se deslizan hacia adelante para aplicar fuerza a lo largo de la banda central, extendiéndose con ello la falange intermedia (Figura II.10). Al flexionar la articulación IFP, las bandas laterales se deslizan perpendicularmente al eje de rotación y de este modo permite la flexión de la articulación IFD.

De la misma forma, el mecanismo extensor de la articulación IFD está formado por fibras arqueadas oblicuas que atraviesan transversalmente la banda central y las bandas laterales, el ligamento triangular que se extiende entre las inserciones de las bandas laterales (aponeurosis triangular) y la falange distal, el ligamento retinacular oblicuo de *Landsmeer*, que se extiende desde la inserción de los extensores en la falange distal sobre el eje de la articulación IFP (Figura II.10). Asimismo, las flechas negras indican la dirección que tiene la tracción del tendón extensor mientras que las flechas rojas indican

la dirección de la tracción de los músculos interóseos y lumbricales [II.2]. Además, los puntos negros indican el eje de rotación de las articulaciones.

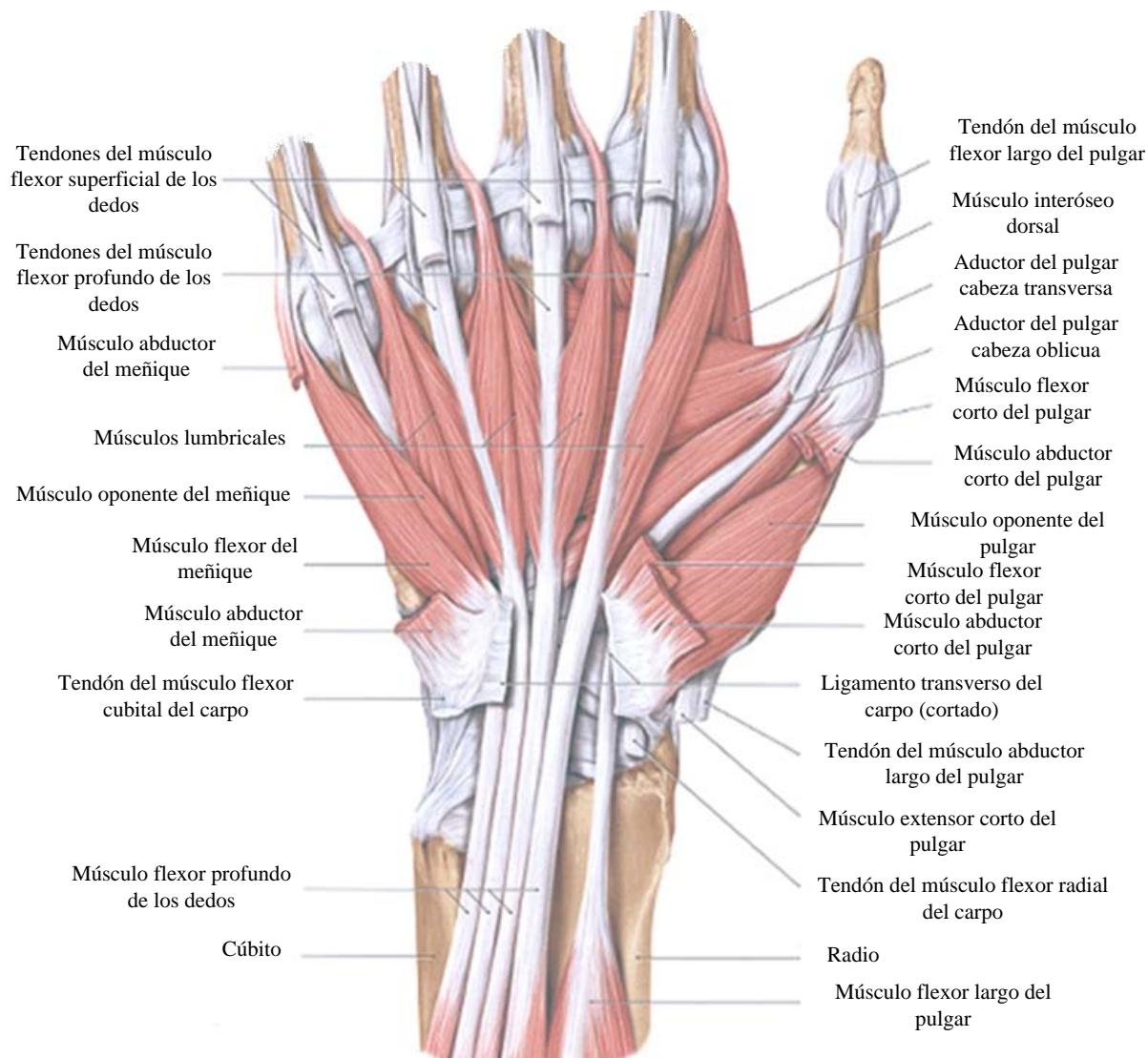


**Figura II.10.- A) Dedo en extensión y B) Dedo en flexión (Vista lateral) [II.2]**

El mecanismo extensor del pulgar tiene ligeras modificaciones en el mecanismo de la articulación IFD en comparación con los demás dedos, ya que no posee falange media [II.4]. La porción extrínseca está integrada por el extensor corto del pulgar que corre paralelo al centro de la articulación MCF para insertarse sobre la falange proximal y al extensor largo del pulgar que corre sobre la cara cubital de la articulación MCF para insertarse en la base de la falange distal.

### II.1.6.- Sistema muscular

Los músculos que tienen origen en algún sector de la mano se conocen como músculos intrínsecos mientras que los que surgen del brazo y antebrazo se llaman músculos extrínsecos; siendo estos últimos músculos de mayor tamaño, relacionados con la fuerza que desarrolla la mano, por otra parte, los músculos intrínsecos son pequeños y se asocian a desenvolver pequeños movimientos de los dedos [II.9]. Los músculos extrínsecos se clasifican de acuerdo a su función y estructura, teniendo músculos anteriores (flexores de los dedos) y posteriores (extensores) (Figura II.11). Los principales flexores de los dedos son el Flexor Digital Profundo que es utilizado para flexionar los dedos utilizando poca fuerza y el Flexor Digital Superficial que es utilizado cuando se requiere mayor fuerza.



**Figura II.11.-** Músculos cortos de la mano (vista palmar) [II.3]

En la sección del carpo se encuentran 3 músculos extensores llamados Primer radial externo, Segundo radial externo y Cubital posterior [II.7]. El segundo radial externo es el extensor primario de la muñeca y está situado en el centro de la palma permitiendo que los flexores actúen a través de sus arcos de movilidad. La porción intrínseca está integrada por el aductor y el abductor corto del pulgar, el cual posee fibras que se insertan sobre la cara radial de la falange proximal.

En la Tabla II.1 se establece de forma general un listado de los músculos intrínsecos y extrínsecos de la mano así como una breve descripción de la actividad que desempeñan.

**Tabla II.1.-** Músculos de la mano [II.10 y II.11]

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

Asimismo, En la tabla II.2 se visualiza una lista de los músculos ubicados en el carpo así como una breve descripción de la acción que realizan.

**Tabla II.2.-** Músculos de la muñeca [II.10 y II.11]

Músculo	Actividad
Flexor cubital anterior	Flexión del carpo (desviación cubital de la mano)
Flexor palmar mayor	Flexión del carpo (desviación radial de la mano)
Flexor palmar menor	Tensión de la fascia palmar
Extensor del primer radial	Extensión del carpo (desviación radial de la mano)
Extensor del segundo radial	Extensión del carpo (desviación radial de la mano)
Extensor cubital posterior	Extensión del carpo (desviación cubital de la mano)
Pronador redondo	Pronación del antebrazo
Pronador Cuadrado	Pronación del antebrazo
Supinador corto	Supinación del antebrazo
Supinador largo	Pronación o Supinación (dependiendo la posición)

## II.2.- Rangos de movimiento de la mano

Las manos son un órgano con movimiento de elevada complejidad y son valoradas de acuerdo al grado de intervención para realizar tareas prensiles. Además, posee la capacidad de adaptabilidad a un sin número de geometrías. Cuando se separan los dedos a voluntad, el eje de cada uno cruza en un mismo punto de la base de la eminencia tenar, esta ubicación corresponde aproximadamente al escafoideas. Sin embargo, cuando los dedos adoptan la posición natural, sus ejes no convergen en ningún punto, por otra parte los ejes del dedo medio, anular y meñique son paralelos, no así con el pulgar y el índice. Al desarrollar un movimiento de cierre palmar los ejes de cada dedo se encuentran en un punto céntrico cercano al Radio (Figura II.12), obteniéndose simetría en la vista palmar.

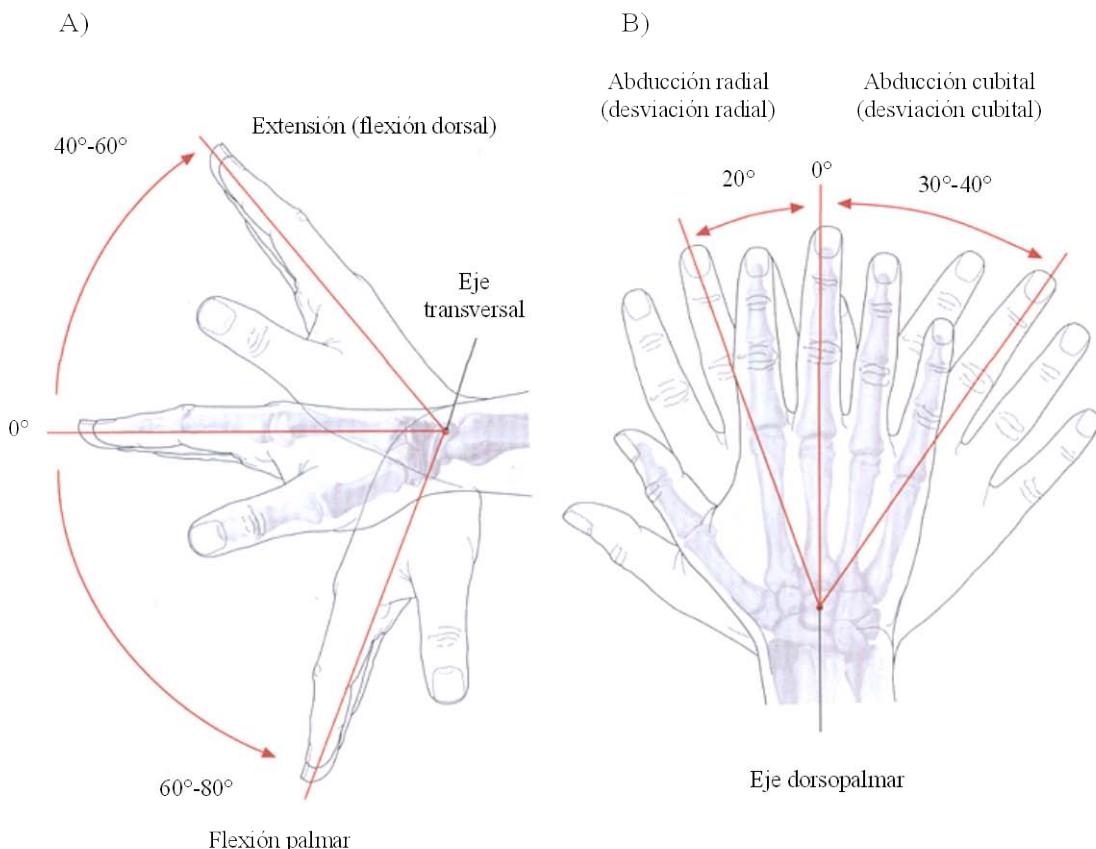


**Figura II.12.-** Cierre palmar [II.12]

El movimiento de las articulaciones de la mano esta dado en ángulos de flexión y extensión los cuales ayudan a la descripción de la trayectoria ejercida a través de los movimientos normales de la extremidad [II.4]. El movimiento del antebrazo es medido como grado de pronación y supinación desde su posición neutral al igual que el movimiento del carpo donde se tienen movimientos de flexión, extensión, desviación Radial y cubital.

### II.2.1.- Movimientos de las articulaciones en la muñeca

El movimiento de extensión (flexión dorsal)en condiciones normales del carpo presenta un ángulo de entre  $40^{\circ}$  y  $60^{\circ}$  aproximadamente con respecto a un eje neutro de  $0^{\circ}$  (Figura II.13), mientras que el ángulo del arco de flexión palmar se encuentra aproximadamente entre  $60^{\circ}$  y  $80^{\circ}$ . La flexión y la extensión de la muñeca son movimientos que pueden efectuarse en la articulación proximal y distal, sin embargo, los movimientos de abducción radial y cubital solo se llevan a cabo en la articulación proximal [II.13], donde la desviación cubital tiene un arco aproximado de  $30^{\circ}$  a  $40^{\circ}$  y la desviación radial es de  $20^{\circ}$ .

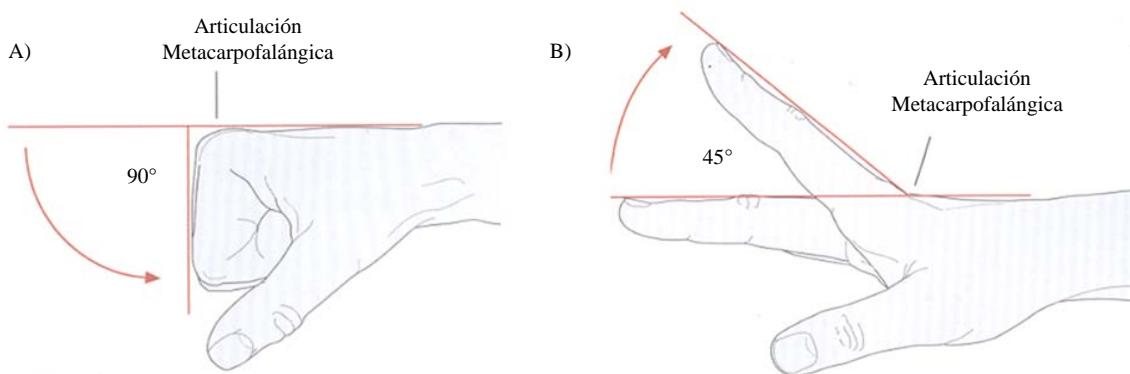


**Figura II.13.-** Movimientos de la muñeca: a) flexión y extensión, b) Cubital y radial [II.3]

### II.2.2.- Movimientos de los dedos

El movimiento desarrollado por los dedos se mide en el grado máximo de flexión hasta el grado máximo de extensión [II.13]. La Hiperextensión está dada con un ángulo negativo, por lo tanto el rango total del movimiento de cada uno de los dedos se determina restando el ángulo de extensión del ángulo de flexión. La abducción y aducción de los dedos son identificadas para determinar la función de los músculos interóseos de la mano. El movimiento de las articulaciones IFP, IFD y MCF del pulgar se visualizan igual que los demás dedos, empleando el criterio anterior para cada una de las articulaciones.

La flexión de los dedos a la altura de las articulaciones MCF puede formar un ángulo aproximado de  $90^\circ$  desde el origen (Figura II.14). Por otra parte, la extensión de los dedos es hasta  $45^\circ$  aproximadamente en dirección opuesta.



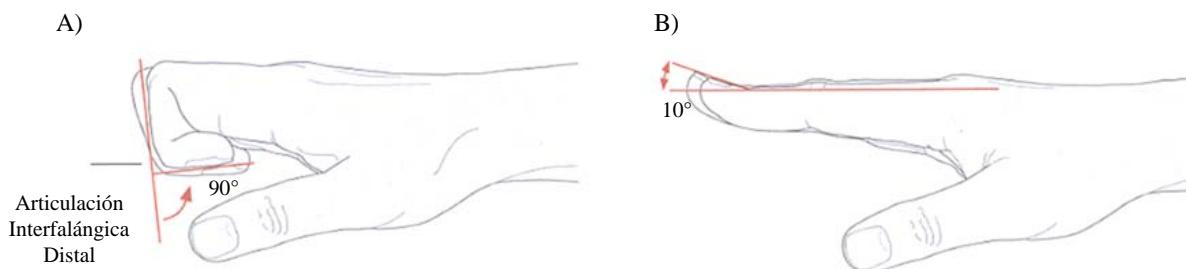
**Figura II.14.-** Movimientos de la articulación MCF [II.3]

Las articulaciones IFP no pueden desarrollar movimientos de extensión. Sin embargo, La flexión de los dedos se puede dar hasta por  $100^\circ$  aproximadamente (Figura II.15).



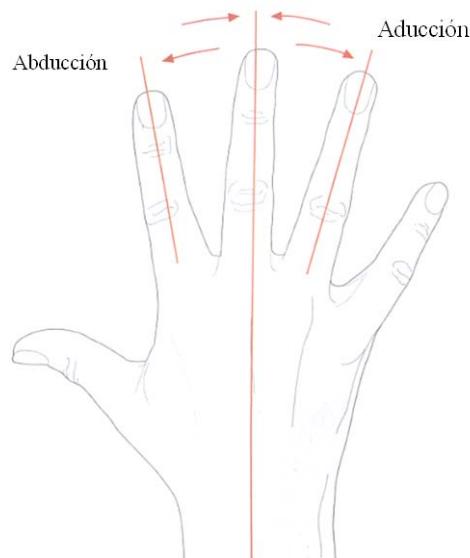
**Figura II.15.-** Flexión de las articulaciones IFP [II.3]

La flexión de los dedos en las articulaciones IFD puede formar un ángulo aproximado de 90° (Figura II.16) y la extensión de los dedos es de máximo 10° aproximadamente en dirección opuesta.



**Figura II.16.- A) Flexión y B) Extensión de las articulaciones IFP [II.3]**

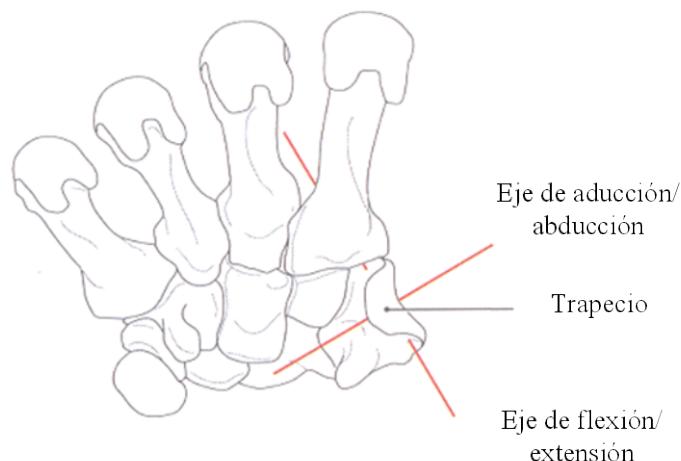
La abducción y aducción de las articulaciones MCF son movimientos que separan o juntan respectivamente a los dedos con respecto a un eje dorso-palmar [II.3], donde la denominación de dichas trayectorias se hace a partir del dedo medio y es de aproximadamente 20° (Figura II.17).



**Figura II.17.- Aducción y Abducción de las articulaciones MCF [II.3]**

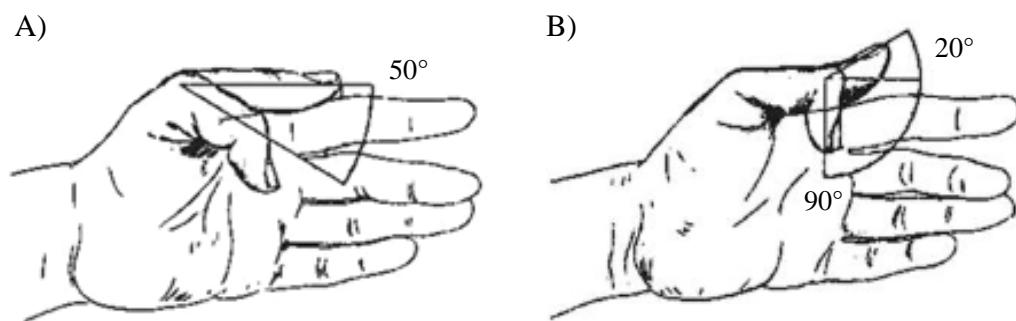
### II.2.3.- Movimientos del pulgar

La superficie articular del Trapecio con forma de silla de montar [II.3], permite la ejecución de movimientos en 2 ejes principales: un eje de abducción-aducción y un eje de flexión-torsión (Figura II.18).



**Figura II.18.-** Ejes de movimiento (mano derecha, vista palmar) [II.3]

La flexión y extensión de la articulación MCF transcurren de forma transversal y desarrolla un ángulo de movimiento aproximado de  $50^\circ$  con respecto al dedo Índice (Figura II.19 A). Sin embargo, cuando el pulgar se encuentra en máxima abducción [II.14], forma con el dedo Índice un ángulo aproximado de  $70^\circ$  y el regreso del pulgar hasta la palma representa una aducción máxima, con lo que el pulgar es capaz de realizar un movimiento de oposición al tocar la punta del dedo meñique. El rango de movilidad de flexión en la articulación IF es aproximadamente de  $90^\circ$  mientras que la extensión del dedo es de  $20^\circ$  (Figura II.19 B).



**Figura II.19.-** Flexión y extensión del pulgar en A) MCF y B) IF [II.14]

El rango de movimiento de las distintas articulaciones de la mano desarrolla valores aproximados en flexión y extensión; de ésta forma se pueden resumir dichos movimientos en la Tabla II.3.

**Tabla II.3.- Rango de movimiento en articulaciones [II.15]**

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

**II.2.4.- Dimensiones antropométricas**

Sin duda los rangos de movimiento y las dimensiones antropométricas son necesarios para el desarrollo del análisis estático y dinámico de la mano.

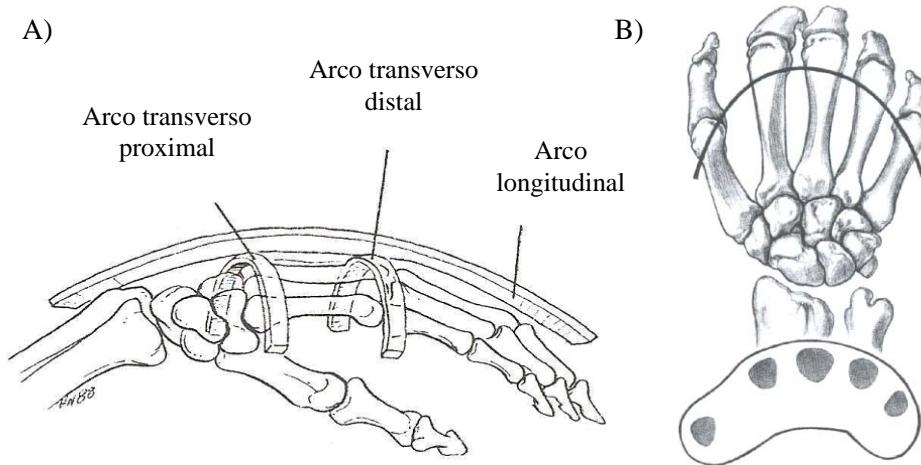
En la actualidad no se tienen estudios antropométricos referentes al genotipo mexicano de la extremidad superior, sin embargo, se pueden utilizar dimensiones aproximadas de las falanges las cuales intervienen directamente en el análisis estático de la estructura de los dedos. La Tabla II.4 presenta un estudio antropométrico donde se muestra la dimensión que ocupa cada falange con respecto al porcentaje total de la longitud de la mano [II.16], siendo estos valores aproximados a los reales.

**Tabla II.4.- Relación porcentual de las falanges con respecto a la mano [II.16]**

Dedo	Falange Proximal	Falange Media	Falange Distal
Pulgar	17.1	-	12.1
Índice	21.8	14.1	8.6
Medio	24.5	15.8	9.8
Anular	22.2	15.3	9.7
Meñique	17.2	10.8	8.6

### II.2.5.- Arcos de la mano

Los huesos y articulaciones ubicados en la mano, forman entre sí 3 arcos conocidos como el arco transverso proximal, el arco transverso distal y el arco longitudinal [II.17]. Estos arcos le dan forma cóncava a la palma de la mano (Figura II.20 A). La estructura arqueada es sostenida por los músculos intrínsecos de la mano y la ubicación de estos arcos hace posible la proyección palmar obteniendo un modelo eficiente de agarre entre el pulgar y el resto de los dedos [II.14]. El arco transverso proximal está ubicado a nivel carpiano mientras que el arco distal se ubica a nivel del cuello de los metacarpianos (Figura II.20 B) y el tercero se ubica a lo largo del sentido longitudinal desde el centro de la palma.



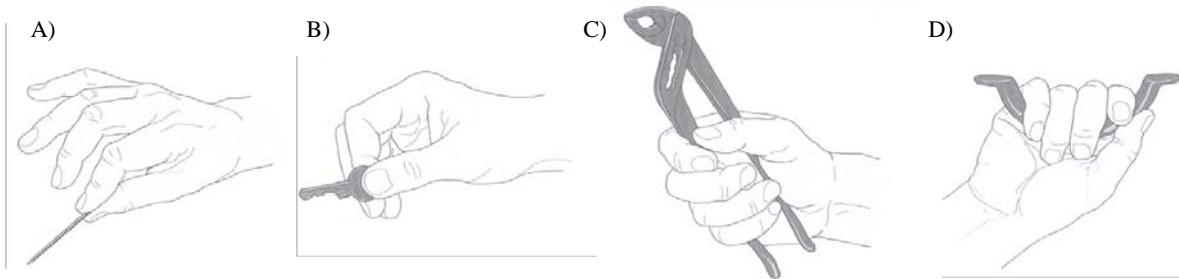
**Figura II.20.-** A) Arcos de la mano [II.5] y B) Arco distal proximal [II.8]

### II.3.- Sujeción de objetos

La mano como dispositivo terminal es un elemento increíblemente funcional que permite realizar actividades en extremo delicadas y con alta precisión [II.1]. Sin mencionar que tiene la capacidad para adaptarse a un sin número de diversas geometrías. Existe una amplia variedad de formas para realizar la sujeción de un objeto, la cual está en función directa de la geometría que dicho objeto posea [II.4]. Estas formas son obtenidas mediante el cambio de la cinemática de la mano. Para ello es necesario considerar componentes de fuerza y momento para así sostener un objeto de forma estable.

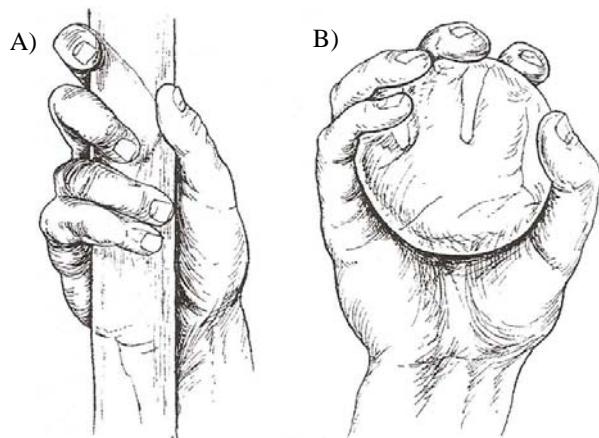
Los movimientos de sujeción que posee la mano son aquellos en los que se agarra un objeto el cual puede mantenerse entero o de forma parcial dentro del contorno de la mano [II.5]. También son utilizados en una variedad de actividades involucrando geometrías de múltiples tamaños y formas donde la función prensil depende en su gran mayoría de la

movilidad de las articulaciones CMC y MCF. Asimismo, de la estabilidad de los arcos longitudinales y la relación precisa existente entre la longitud, movilidad y posición de los componentes de cada dedo. Una clasificación general de movimientos para sujeción de objetos establece 6 tipos principales [II.18]: Puntual, Lateral, Palmar, Gancho, Cilíndrico y Esférico. El agarre Puntual es cuando se sujetan objetos de geometrías pequeñas y finas utilizando las puntas del pulgar y el índice regularmente (Figura II.21).



**Figura II.21.-Sujeción:** A) Puntual, B) Lateral, C) Palmar y D) Gancho [II.3]

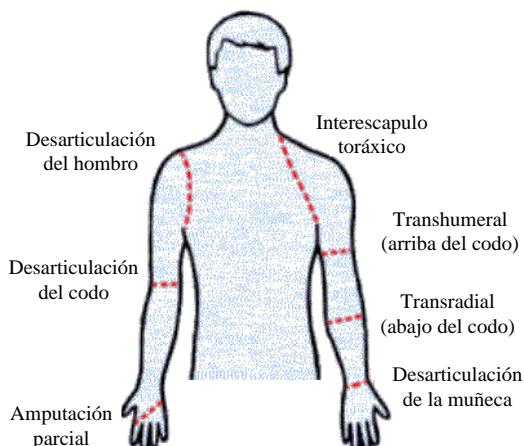
La sujeción Palmar se usa para sostener objetos con geometrías variables de mayor longitud [II.4]. El agarre lateral es utilizado para objetos delgados y planos donde la sujeción del objeto se lleva a cabo regularmente con la parte palmar del pulgar y la parte lateral exterior del Índice. La sujeción de Gancho se aplica regularmente para levantar, jalar o sujetar objetos donde se ven involucrados los 5 dedos de la extremidad. La sujeción Cilíndrica se emplea para hacer un agarre prensil de objetos con geometrías continuas como barras (Figura II.22), mientras que el Esférico se emplea para sujetar objetos con una circunferencia definida.



**Figura II.22.- Sujeción:** A) Cilíndrica y B) Esférica [II.5]

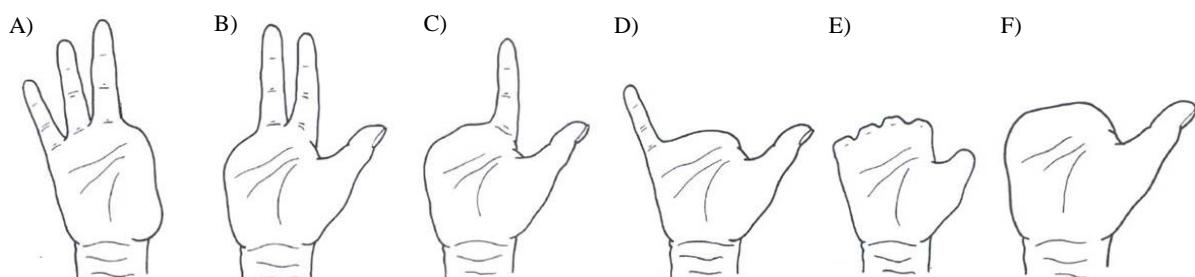
## II.4.- Lesiones y niveles de amputación

Una mano mutilada es el resultado de una lesión compleja con pérdida de tejido, músculo y hueso, sin mencionar la pérdida funcional en diferentes niveles [II.13]. Una amputación es conocida como un procedimiento quirúrgico el cual consiste en la separación parcial o total de una extremidad en forma perpendicular al eje longitudinal que posee el miembro afectado [II.19]. En general, las amputaciones de la extremidad superior se pueden clasificar en desarticulaciones (hombro, codo y muñeca) y amputaciones parciales (transhumeral, transradial y parcial de mano) (Figura II.23).



**Figura II.23.- Desarticulaciones y amputaciones de la extremidad superior**

Asimismo, una clasificación de las amputaciones parciales en los dedos según *Pulvertaft* [II.20] engloba las mutilaciones en 4 partes que son Radial, Cubital, Central y Distal (Figura II.24).



**Figura II.24.- Amputación parcial: A) Radial, B) Cubital C) Cubital de 3 dedos, D) Central, E) Distal y F) Pulgar con amputación de los dedos [II.20]**

Además de las amputaciones antes mencionadas, también es común encontrar amputación de 4 dedos quedando únicamente el pulgar. Por otra parte, cuando esta separación es realizada directamente en una sección articular es conocida entonces como procedimiento de desarticulación.

Las amputaciones y desarticulaciones son ocasionadas por lesiones traumáticas y no traumáticas [II.19]. Las lesiones traumáticas por lo general son accidentes de múltiples géneros, los cuales llegan a deformar parcial o por completo la extremidad afectada. Las lesiones no traumáticas son generalmente enfermedades disvasculares como *diabetes mellitus* o enfermedad *vascular periférica*, enfermedades infecciosas como *gangrena gaseosa* y *osteomielitis crónica*, enfermedades neoplásicas como tumores óseos y malformaciones congénitas entre otras [II.19]. Por lo tanto, el segmento amputado en la mano tiene dos niveles, amputación parcial y desarticulación de la muñeca. La amputación parcial puede dividirse en secciones de acuerdo al tipo de lesión.

Como una mano mutilada pudo haber sufrido distintos tipos de lesiones, una clasificación amplia que muestra el grado y la localización precisa de la lesión de tejido o hueso es el sistema *tres en raya* [II.13] que presenta VII niveles de lesión (Figura II.25).

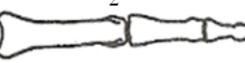
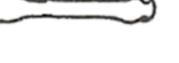
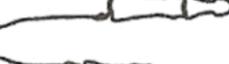
Proximal	Central	Distal	
7 	4 	1 	Radial
8 	5  	2  	Central
9 	6  	3  	Cubital

Figura II.25.- Sistema *tres en raya* [II.13]

En el sistema *tres en raya* la mano se subdivide en 9 zonas con columnas denominadas radial, central y cubital e hileras proximal, central y distal, mostrados en la Tabla II.5. Sistema que permite una evaluación precisa y exacta de la lesión en la extremidad y asimismo se puede determinar la clasificación adecuada de lesión, estado y zona afectada. Las amputaciones de la extremidad superior tienen mayor frecuencia en hombres [II.21], el miembro dominante es el más afectado con 74% de los casos aproximadamente y las causas que ocasionan una amputación son lesiones traumáticas y tumorales.

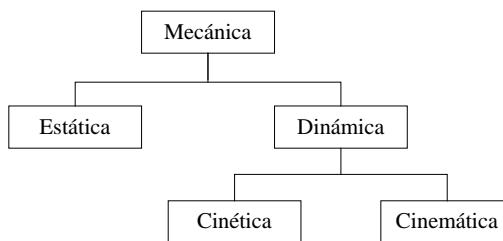
**Tabla II.5.-** Sistema de clasificación *tres en raya* [II.13]

Tipo de lesión	Descripción de la lesión
I Mutilación dorsal	Afectan la piel dorsal, tendones extensores y huesos. Se preserva la superficie táctil y la vascularización está intacta.
II Mutilación palmar	Afectan la piel palmar, tendones flexores y huesos. Con frecuencia dañan las arterias cubital y radial, los arcos palmares y las arterias digitales comunes.
III Mutilación cubital	Pérdida de falanges, metacarpianos y carpianos, además de interferencia con los mecanismos de prensión y fuerza.
IV Mutilación radial	Pérdida del pulgar y de los mecanismos de oposición o pellizco, así como destrucción de la columna radial.
V Amputación transversa	Pérdida de la mano o bien de los dedos a distintos niveles con la pérdida funcional correspondiente.
VI Lesión por denudación de la mano	Pérdida circunferencial de piel inervada y superficie táctil de la mano.
VII Lesión combinada	Es una combinación de los tipos I a VI así como otros daños que no se ajustan a definiciones en los tipos de lesión.

En vista de lo antes mencionado, es importante resaltar la enorme complejidad que posee la estructura músculo-esquelética de la mano, destacando así, la configuración de cada uno de los dedos lo que proporciona la habilidad para sujetar objetos diversos. Considerando lo anterior y tomando en cuenta la descripción física de la extremidad, es posible determinar una relación entre las posiciones, velocidades y fuerzas aplicando el conocimiento cinematográfico para así implementar un mecanismo que manipule diversos objetos de forma estable.

### II.5.- Herramientas matemáticas para manipuladores robóticos

Es importante realizar un análisis mecánico de la mano, considerando estudios dinámicos y cinematográficos del mecanismo tomando en cuenta que la mano es capaz de sujetar y manipular objetos a placer, lo cual es funcionalmente muy difícil de imitar, ya que la mano contiene más de 20 grados de libertad, además de que la arquitectura y los movimientos de ésta son muy complejos [II.22]. La mecánica es la rama ocupada del estudio de los movimientos [II.23], tiempo y fuerzas, dividida en estática y dinámica (Figura II.31), esta última referida al comportamiento de los sistemas con respecto al tiempo.

**Figura II.26.-** Diagrama de estudio [II.24]

El problema inicial para el desarrollo de un sistema mecánico (prótesis o actuador final) es la comprensión de su cinemática, la cual se conoce como el estudio del movimiento independientemente de las fuerzas que lo producen [II.25]. Es decir, es el estudio de la posición, desplazamiento, rotación, velocidad y aceleración del sistema.

De esta forma, la cinemática de un mecanismo puede describir la relación existente entre el movimiento de sus articulaciones y el movimiento resultante de los cuerpos rígidos que integran a un manipulador [II.26]. Sin embargo, el estudio de la cinemática plantea dos problemas a resolver: Cinemática Directa y Cinemática Inversa [II.27].

La Cinemática Directa consiste en determinar la posición y orientación del efecto final del manipulador, derivada de un cambio en la configuración del sistema de eslabones que conforman la cadena cinemática del manipulador, mientras que la Cinemática Inversa se ocupa de definir los valores de las posiciones articulares, para que la configuración del manipulador robótico resulte en una orientación y posición deseadas del efecto final, dentro de su espacio de trabajo.

Por otra parte, la dinámica del sistema trata con la formulación de las ecuaciones de movimiento de la mano [II.29]. Las ecuaciones dinámicas de movimiento de un manipulador son un conjunto de expresiones matemáticas que describen la conducta del manipulador, tales ecuaciones son útiles para la simulación del sistema.

### II.5.1.- Cinemática

Para resolver el problema cinemático directo se utiliza álgebra lineal y vectorial para desarrollar un método que describa la localización de un sistema referente a un punto fijo [II.28]. Lo anterior se reduce a encontrar una matriz de transformación la cual puede relacionar un sistema de coordenadas con otro que fungirá como sistema de referencia. Este sistema puede ser representado por una matriz de rotación que opera sobre un vector de posición en un espacio tridimensional y transforme sus coordenadas móviles  $Ouvw$  a un sistema de coordenadas de referencia  $OXYZ$ .

Dado lo anterior, un punto  $P$  en el espacio puede ser representado suponiendo que está en reposo con respecto a ambos sistemas de coordenadas, esto es:

$$P_{uvw} = (P_u, P_v, P_w)^T \quad y \quad P_{xyz} = (P_x, P_y, P_z)^T \quad (\text{II.1})$$

Donde  $P_{uvw}$  y  $P_{xyz}$  representan el mismo punto en el espacio pero con respecto a diferentes sistemas de coordenadas. Para encontrar la matriz de transformación  $R$  con respecto al sistema de coordenadas  $OXYZ$  después de que el sistema  $OUVW$  ha sido girado se emplea la ecuación II.2.

$$P_{xyz} = RP_{uvw} \quad (\text{II.2})$$

Debido a que ambos sistemas son *ortonormales* y coinciden en su orientación, los vectores unitarios  $i_x$  e  $i_u$  son vectores paralelos donde por definición, el producto punto entre ellos es 1 mientras que  $i_u$  es *normal* a  $j_y$  y  $k_z$ , cuyo producto punto es cero que en su forma matricial se expresa como se muestra en la ecuación II.3.

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_x \cdot i_u & i_x \cdot j_v & i_x \cdot k_w \\ j_y \cdot i_u & j_y \cdot j_v & j_y \cdot k_w \\ k_z \cdot i_u & k_z \cdot j_v & k_z \cdot k_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_u \\ P_v \\ P_w \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

Por lo tanto, la matriz  $R$  esta da por:

$$R = \begin{bmatrix} i_x \cdot i_u & i_x \cdot j_v & i_x \cdot k_w \\ j_y \cdot i_u & j_y \cdot j_v & j_y \cdot k_w \\ k_z \cdot i_u & k_z \cdot j_v & k_z \cdot k_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = I^3 \quad (\text{II.4})$$

Donde  $I^3$  es la matriz Identidad  $3 \times 3$ . Por otra parte, cuando uno de los sistemas de coordenadas, en este caso el sistema móvil  $OUVW$ , es rotado en cualquiera de los ejes del sistema de coordenadas fijo  $OXYZ$ , la matriz de rotación que represente la orientación está definida por los vectores  $i_u$  que es paralelo a  $i_x$  y tienen el mismo sentido, por lo que siendo sistemas *ortonormales*,  $i_u$  no tiene proyección en los vectores unitarios  $j_y$  y  $k_z$ ; en tanto que  $j_v$  y  $k_w$  siguen siendo *normales* a  $i_x$ , pero ambos tienen proyección en  $j_y$  y  $k_z$ .

Por lo tanto, para determinar la matriz de rotación  $R$  de cada eje se establece como se muestra en la ecuación II.5.

$$R_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} i_x \cdot i_u & i_x \cdot j_v & i_x \cdot k_w \\ j_y \cdot i_u & j_y \cdot j_v & j_y \cdot k_w \\ k_z \cdot i_u & k_z \cdot j_v & k_z \cdot k_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

De igual forma, las matrices de rotación para el eje  $OY$  con ángulo  $\varphi$  y respecto al eje  $OZ$  con el ángulo  $\theta$ , se obtiene respectivamente las ecuaciones II.6 y II.7.

$$R_{y,\varphi} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & \operatorname{sen}\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\operatorname{sen}\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

$$R_{z,\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\operatorname{sen}\theta & 0 \\ \operatorname{sen}\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

Siendo  $R_{x,\alpha}$ ,  $R_{y,\varphi}$  y  $R_{z,\theta}$  matrices de rotación básicas y que se pueden multiplicar entre sí para representar una secuencia de rotación finita respecto al eje principal de coordenadas. Con una matriz de rotación no es posible realizar la traslación y el escalado del sistema, por lo que se introduce un cuarto componente al vector de posición  $P=(P_x, P_y, P_z)^T$  en un espacio tridimensional que lo transforma en  $P=(wP_x, wP_y, wP_z, w)^T$ .

La componente de las coordenadas homogéneas  $w$  se puede ver como un factor de escala de unidad, es decir  $w=1$ . En aplicaciones de robótica este factor siempre tendrá valor de 1 [II.29]. La matriz de transformación homogénea es una matriz de  $4 \times 4$  y se puede considerar que se integra por 4 submatrices tal y como se visualiza en la ecuación II.8.

$$T = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & P_{3 \times 3} \\ f_{1 \times 3} & 1 \times 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Matriz de rotación} & \text{Vector de posición} \\ \text{Transformación de perspectiva} & \text{Escalado} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Puesto que si un vector de posición  $P$  en un espacio tridimensional se expresa en coordenadas homogéneas  $P=(P_x, P_y, P_z, 1)^T$ , por lo tanto una matriz de rotación  $3 \times 3$  se puede ampliar a una matriz de rotación homogénea  $4 \times 4$  para operaciones de rotación pura, conocidas como matrices de *rotación homogéneas básicas*, entonces de las ecuaciones II.5, II.6 y II.7 se obtienen las ecuaciones II.9, II.10 y II.11 respectivamente.

$$T_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\operatorname{sen}\alpha & 0 \\ 0 & \operatorname{sen}\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

$$T_{y,\varphi} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & \operatorname{sen}\varphi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\operatorname{sen}\varphi & 0 & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

$$T_{z,\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\operatorname{sen}\theta & 0 & 0 \\ \operatorname{sen}\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

La submatriz del vector de posición tiene el efecto de trasladar el sistema de coordenadas  $OUVW$  con ejes paralelos al sistema  $OXYZ$  el cual tiene origen en  $(dx, dy, dz)$  del sistema de coordenadas de referencia:

$$T_{trans} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & dx \\ 0 & 1 & 0 & dy \\ 0 & 0 & 1 & dz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Una matriz de transformación homogénea se transforma en un vector expresado en coordenadas homogéneas con respecto al sistema de coordenadas  $OUVW$  en el sistema de coordenadas de referencia  $OXYZ$  con  $w=1$ , donde se tiene  $P_{xyz}=TP_{uvw}$ .

Para describir la relación de translación y rotación entre los elementos de una cadena cinemática, *Denavit y Hartenberg (D-H)* propusieron un método matricial para establecer de forma sistemática un sistema de coordenadas ligado al cuerpo para cada elemento de una cadena articulada [II.28], la cual resulta en una matriz de transformación homogénea que representa cada uno de los sistemas que integran al elemento.

La representación *D-H* de un cuerpo rígido está en función de cuatro parámetros geométricos asociados a cada elemento, los cuales describen la relación espacial entre sistemas de coordenadas. Estos parámetros son:

$a_i$ : Distancia más corta entre los ejes  $z_{i-1}$  y  $z_i$ .

$\alpha_i$ : Es el ángulo formado entre el eje  $z_{i-1}$  y el eje  $z_i$  alrededor del eje  $x_i$ .

$d_i$ : Distancia desde el origen del sistema de coordenadas  $i-1$  hasta la intersección de los ejes  $x_i$  y  $z_{i-1}$ , a lo largo del eje  $z_{i-1}$ .

$\theta_i$ : Ángulo de la articulación del eje  $x_{i-1}$  al eje  $x_i$  respecto al eje  $z_{i-1}$ .

La representación de  $D-H$  resulta en una matriz de transformación homogénea  $4 \times 4$  conocida como  ${}^{i-1}A_i$ , que describe la relación entre el sistema de coordenadas de cada eslabón con respecto al sistema de coordenadas previo, como lo indica la ecuación II.13.

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

Al obtener la matriz de transformación homogénea se expresa la orientación y posición del extremo del manipulador en función de sus coordenadas articulares, con lo que se resuelve el problema cinemática directo. El problema cinemática inverso se resuelve para obtener los valores que deberán adoptar las coordenadas articulares del manipulador para que su extremo se oriente y posicione de acuerdo a una localización determinada.

La cinemática inversa puede ser resuelta por diversos métodos como el álgebra de tornillo, matrices duales, métodos geométricos y a partir de la matriz de transformación homogénea, siendo este último un método ideal ya que se puede resolver el sistema a partir del conocimiento de la cinemática directa [II.24].

### II.5.2.- Grados de libertad

Otro aspecto que se debe tener en consideración, es el número de grados de libertad, el cual puede definirse como cada una de las coordenadas independientes necesarias para describir el estado de un sistema móvil [II.23]. Normalmente, en cadenas cinemáticas abiertas, cada par eslabón-articulación tiene un sólo grado de libertad, ya sea en rotación o traslación, pero no necesariamente ambas.

Por otra parte, un mecanismo plano de  $n$  eslabones posee  $3(n-1)$  grados de libertad antes de conectar cualquiera de las articulaciones y sin contar el eslabón fijo [II.4]. Al conectar una articulación con un grado de libertad, por ejemplo, un par de revolución, se tiene el efecto de proveer dos restricciones entre los eslabones conectados.

De igual forma, el criterio de *Kutzbach* establece que para un mecanismo plano la movilidad está dada por la ecuación II.14 donde se tiene que:

$$m = 3(n - 1) - 2j_1 - j_2 \quad (\text{II.14})$$

Donde  $n$  es el número de eslabones,  $j_1$  es el número de pares cinemáticos que poseen un grado de libertad y  $j_2$  es el número de pares cinemáticos con dos grados de libertad [II.23]. Este criterio menciona que cuando  $m > 0$ , el mecanismo posee  $m$  grados de libertad. Si  $m = 1$ , el mecanismo se puede impulsar con un solo movimiento de entrada, si  $m = 2$ , se requieren dos movimientos separados al inicio del sistema para producir el movimiento restringido del mecanismo.

### II.5.3.- Síntesis de mecanismos

Un mecanismo se puede definir como un dispositivo capaz de transformar un movimiento en otro pero con una trayectoria planeada y está constituido por un determinado número de elementos acoplados de tal forma que cumplen una función determinada [II.4]. Por otra parte, diseñar un mecanismo es un problema muy complejo cuya solución puede descomponerse en varias etapas independientes [II.23]. Asimismo, la metodología para obtener la síntesis de un mecanismo comprende 3 fases de diseño que son: síntesis de tipo, síntesis de número y síntesis dimensional.

La síntesis del tipo se refiere a la clase del mecanismo seleccionado (eslabonamiento, sistema de engranes, bandas, poleas o levas). La síntesis de número se ocupa de la cantidad de eslabones o articulaciones que se requieren para obtener un movimiento deseado. La síntesis dimensional se ocupa de la longitud de cada uno de los elementos del mecanismo (puede darse por cadena abierta o cerrada).

### II.6.- Sumario

En el desarrollo de este capítulo se abordó la estructura ósea, articulaciones, ligamentos, tendones, músculos y arterias, como partes fundamentales de la anatomía de la mano. Asimismo, se estudiaron rangos de movimiento, formas de sujeción, lesiones y niveles de amputación.

Es importante resaltar la enorme complejidad que posee la estructura músculo-esquelética de la mano, destacando así, la configuración de cada uno de los dedos para sujetar objetos con formas de diversas geometrías y tamaños.

Otros aspectos abordados en esta sección, fueron los rangos de movimiento de cada uno de los dedos y el mecanismo flexor y extensor, al igual que la clasificación de los tipos de agarre empleados por el ser humano, destacando la sujeción Cilíndrica, Puntual y Palmar, que son de vital importancia para el desarrollo de actividades diarias.

Considerando lo anterior y tomando en cuenta la descripción física de los dedos, es posible determinar una relación entre las posiciones, velocidades y fuerzas aplicando el conocimiento cinemático para determinar un mecanismo que manipule diversos objetos de forma estable.

En el siguiente capítulo se presenta la metodología de diseño empleada para la implementación de una mano robótica servo-articulada. Sección en la que se considera un proceso de diseño creativo así como la clarificación de objetivos y el establecimiento de funciones, sin mencionar la especificación de requerimientos y determinación de características que conlleva un sistema óptimo.

### II.7.- Referencias

- 1.- Douglas, G. S., Aprehendiendo la importancia de las manos, *In Motion*, Vol.16, No.6, pp 1-6, 2006.
- 2.- Netter, F. H., *Atlas de Anatomía Humana*, Elsevier Masson, pp 213-233, 2007.
- 3.- Schunkë, M., Schulte, E., Schumacher, U., Voll, M. y Wesker, K., *Prometheus: Texto y Atlas de Anatomía Tomo 1*, Médica Panamericana, pp 222-330, 2007.
- 4.- Velázquez-Sánchez, A. T., *Caracterización cinemática e implementación de una mano robótica multiarticulada*, Tesis de Doctorado, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación ESIME Zácatenco, Instituto Politécnico Nacional, México, pp 33-67, 2008.
- 5.- Nordin, M. y Frankel, V. H., *Biomecánica básica del sistema musculoesquelético*, McGraw Hill, pp 370-399, 2004.
- 6.- Moore, K. L., *Anatomía con orientación clínica*, Médica Panamericana, pp 584-655, 1993.
- 7.- Ariyan, S., *Cirugía de la mano*, El Manual Moderno, pp 1-40, 1984.
- 8.- Trumble, T. E., *Principles of hand surgery and therapy*, W. B. Saunders Company, pp 1-56, 2000.
- 9.- Freivalds, A., *Biomechanics of the upper limbs: mechanics, modeling, and musculoskeletal injuries*, CRC Press, pp 1-56, 2004.

- 10.- Strickland, J. W., Anatomy and kinesiology of the hand, *Hand function in the child*, C. V. Mosby Company, pp 16-39, 1995.
- 11.- Fess, E. E. y Philips, C. A., *Hand Splinting: Principles and methods*, C. V. Mosby Company, pp 3-41, 1987.
- 12.- Nicholas, J. A. y Herschmann, E. B., *Medicina deportiva. Patología de las extremidades superiores*, C. V. Mosby Company, pp 373-397, 1993.
- 13.- Weinzweig, J., *Secretos de la cirugía de mano y muñeca*, McGraw-Hill Interamericana, pp 1-18, 119-125.
- 14.- Hoppenfeld, S., *Exploración física de la columna vertebral y las extremidades*, El Manual Moderno, pp 102-162, 1979.
- 15.- Lauren-Banks, J., Design and Control of an Anthropomorphic Robotic Finger with Multi-point Tactile Sensation, *Artificial Intelligence Laboratory*, Cambridge, MA, Massachusetts Institute of Technology, pp 9-37, 2001.
- 16.- Davidoff, N. A. y Freivalds A., A graphic model of the human hand using CATIA, *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 12, No. 4, pp 255-264, 1993.
- 17.- Flatt, A. E., *The care of the rheumatoid hand*, Saint Louis Mosby, pp 12-32, 1974.
- 18.- Skinner, F., Designing a Multiple Prehension Manipulator. *Mechanical Engineering Society*, pp 30-37, 1975.
- 19.- Recuperado de: [www.arcesw.com/niveles.htm](http://www.arcesw.com/niveles.htm), Octubre 2010.
- 20.- Dunitz, M., Tubiana R. y Gilbert, A., *Bone and skin disorders*, Imago, pp 516-540, 2002.
- 21.- Barouti, H., Agnello, M. y Volckmann, P., Amputaciones del miembro superior, *Enciclopedia Médico-Quirúrgica*, pp 1-11, 1998.
- 22.- Velázquez-Sánchez, A. T., Merchán-Cruz, E. A. y Flores L. A., Caracterización de los parámetros cinemáticos del dedo Índice de la mano, *3er Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica*, pp 1-9, 2007.
- 23.- Shigley, J. E. y Uicker Jr., J. J., *Teoría de Máquinas y Mecanismos*, McGraw-Hill, pp 1-28, 1988.
- 24.- Barrientos, A., Peñín, L. F., Balaguer, C. y Aracil, R., *Fundamentos de Robótica*, McGraw Hill, pp 49-121, 1997.
- 25.- Velázquez-Sánchez, A. T. y Merchán-Cruz, E. A., Cinemática de un dedo robótico multiarticulado, *2do Congreso Científico Tecnológico de la Carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica*, pp 1-7, 2007.
- 26.- Murray, R. M., Li, Z. y Sastry, S., *A mathematical introduction to robotic manipulation*, CRC Press Inc., pp 1-45, 1994.

- 27.- Merchán, E. A., Velázquez, A. T. y Flores, L. A., Metodología para la generación de trayectorias de manipuladores robóticos, su cinemática y dinámica, *2do Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas*, pp 1-7,2000.
- 28.- Fu, K. S., González, R. C. y Lee, K. S. G., *Robótica: Control, Detección, Visión e Inteligencia*, McGraw Hill, pp 1-79, 1990.

# III

## Metodología de diseño

En esta sección se plantea una metodología para el desarrollo de la mano robótica, considerando un proceso creativo con diversas herramientas que culminan con un diseño conceptual compacto y con funciones claramente definidas para cubrir los requerimientos aquí planteados.

### **III.- Metodología de diseño**

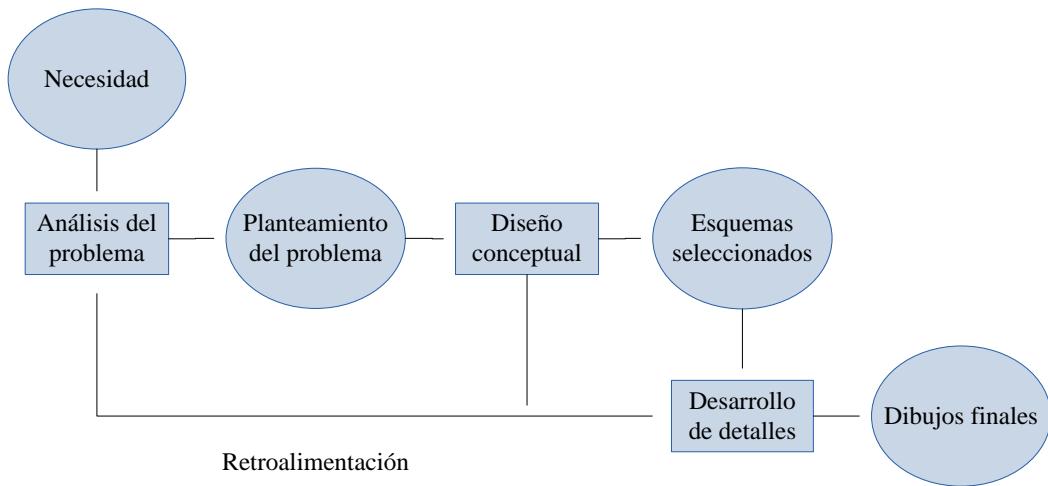
La ciencia como actividad pertenece a la vida social cuando es aplicada para mejorar el medio natural y artificial en el que se desenvuelve el hombre, dando origen a la invención y manufactura de bienes materiales y culturales donde por lo general, la ciencia se transforma en tecnología. Lo anterior se simplifica en un sistema de ideas establecidas provisionalmente como conocimiento científico, y como actividad productora de nuevas ideas llamado investigación científica, dando origen a la metodología de diseño. La palabra método se entiende como el camino que se sigue para alcanzar un objetivo en forma literal y etimológica. La metodología de diseño es el camino por el cual se llega a un cierto resultado en la actividad científica, inclusive cuando dicho camino no ha sido fijado por anticipado de manera deliberada y reflexiva, siendo un instrumento de la actividad científica que se basa directamente en el estudio del método. Un método riguroso conduce a resultados precisos, mientras que un método vago sólo lleva a resultados confusos.

Para el desarrollo de una metodología idónea para la implementación de una mano robótica servo-articulada es necesario considerar un proceso de diseño creativo así como la clarificación de objetivos y el establecimiento de funciones, sin mencionar la especificación de requerimientos y determinación de características que conlleva un sistema óptimo.

#### **III.1.- Procesos de diseño**

En los últimos años se han dado a conocer un gran número de intentos por establecer modelos referentes al proceso del diseño, los cuales se pueden englobar en 2 categorías: prescriptivos y descriptivos [III.1]. Los modelos prescriptivos motivan al diseñador para que adopte una forma de trabajar que generalmente termina en una metodología de diseño particular, enfatizando en las especificaciones de rendimiento derivadas del problema de diseño, lo cual puede generar múltiples diseños alternativos desarrollando soluciones secundarias y seleccionando racionalmente el mejor diseño. Por otra parte, los modelos descriptivos son un proceso convencional y heurístico, que hace énfasis en la relevancia que adquiere el desarrollar un concepto de solución en las primeras etapas del proceso, ubicando así, el pensamiento del diseño enfocado hacia una solución. Un modelo descriptivo es elaborado bajo un diagrama de flujo que representa una serie de etapas con ciclos de retroalimentación donde muestran iteraciones.

La solución inicial propuesta en el método descriptivo es sometida posteriormente a un análisis, evaluación, rediseño (si se requiere) y desarrollo. La metodología utilizada en esta tesis es la propuesta por *French* (Figura III.1), quien desarrolló un proceso más detallado y concreto basado en el análisis del problema, diseño conceptual, planteamiento de esquemas y desarrollo de detalles.



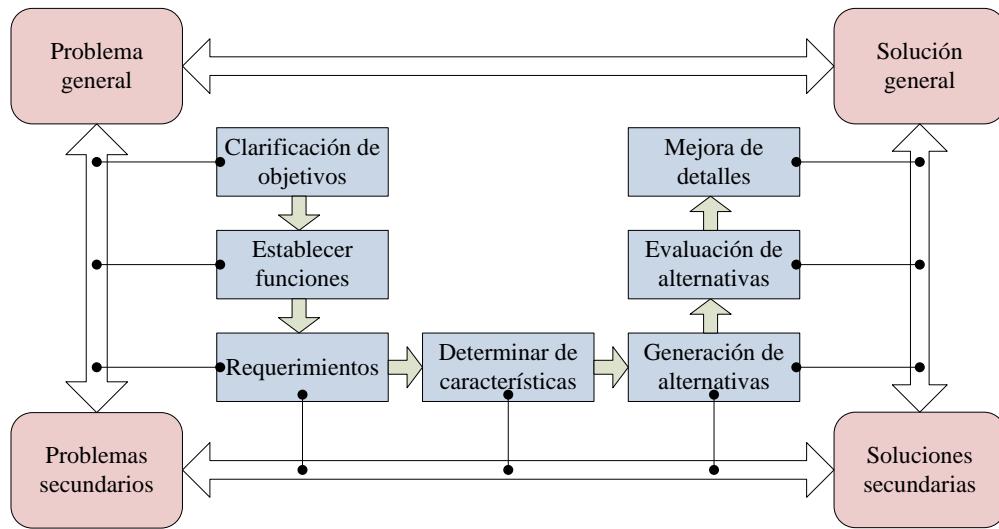
**Figura III.1.-** Modelo de *French* [III.1]

En el modelo presentado en la Figura III.1, los círculos representan las etapas u objetivos alcanzados, mientras que los rectángulos representan actividades realizadas o por realizar. El proceso de diseño da inicio con el planteamiento de una necesidad a partir de la cual se desarrolla el análisis y da como resultado al planteamiento del problema. En esta actividad se deben conocer las limitaciones que se imponen a la solución, estableciendo los elementos adecuados a los objetivos, restricciones y planteamientos de diseño. El siguiente punto en el proceso es establecer el diseño conceptual, fase en la cual se toma el planteamiento del problema para generar soluciones en forma esquemática, para posteriormente trabajarla con mayor detalle.

### III.2.- Método de diseño

En los últimos años se han desarrollado diversos métodos para ayudar a superar las dificultades encontradas en los actuales problemas de diseño [III.1], tales como métodos para explorar situaciones, búsqueda de ideas, exploración de la estructura del problema, evaluación y marco de referencia lógico. Los métodos con marco de referencia lógico motivan a obtener un enfoque sistemático con objetivos similares a los métodos creativos, utilizando una lista de verificación, la cual estipula lo que se tiene que hacer para formalizar el proceso.

Existe una amplia gama de estos métodos, sin embargo, la mayoría recaen en 7 pasos fundamentales que cumplen perfectamente con el proceso de diseño seleccionado [III.1]. Estas etapas se correlacionan una con otra además de estar directamente en armonía con el modelo del problema y solución (Figura III.2).



**Figura III.2.-** Método de diseño [III.1]

Este modelo integra los aspectos más relevantes del procedimiento de diseño con los aspectos estructurales del problema. El primer paso es desarrollar la clarificación de objetivos, sección en la cual se establecen de forma simple y compacta los objetivos principales y secundarios del diseño así como la relación existente entre ellos. Posteriormente, se plantea un análisis en el cual se plasman las funciones y límites que conlleva el nuevo sistema para después fijar los requerimientos físicos, así como el rendimiento en cada elemento.

A la postre, se determinan las características de ingeniería que satisfagan los objetivos previamente establecidos. Luego, se generan alternativas en forma de diagramas morfológicos con el fin de ampliar las soluciones potenciales y así elegir la opción adecuada. Asimismo, se evalúan las alternativas comparando las propuestas con base en su rendimiento. Terminando con una mejora de detalles para aumentar el valor del modelo final [III.1].

A continuación se describe cada una de las etapas mencionadas anteriormente, enfocadas al diseño del prototipo en cuestión.

### III.2.1.- Clarificación de objetivos

Un paso importante en el diseño de un sistema es tener claros los objetivos que debe cumplir el modelo, aunque es relevante mencionar que en todas las etapas del proceso se busca cumplir algún fin para satisfacer una necesidad. Sin embargo, es conveniente mencionar que estos objetivos pueden cambiar a medida que avanza el proceso de diseño.

En este caso, para clarificar los lineamientos a cumplir, se utilizará un *árbol de objetivos* el cual ofrece una estructura clara, útil y confiable para desarrollar el planteamiento, además de ayudar en la mejora de la percepción del problema [III.1]. Este esquema muestra los objetivos principales así como los secundarios que se desprenden, siendo un arreglo temporal que cambiará a medida que avance el proceso.

El procedimiento para realizar el *árbol de objetivos* es simple, y consiste en preparar y ordenar una lista de objetivos de mayor a menor nivel de importancia, donde los objetivos principales y secundarios se agrupan en niveles jerárquicos, trazando un diagrama que muestre las conexiones entre ellos (Figura III.3).

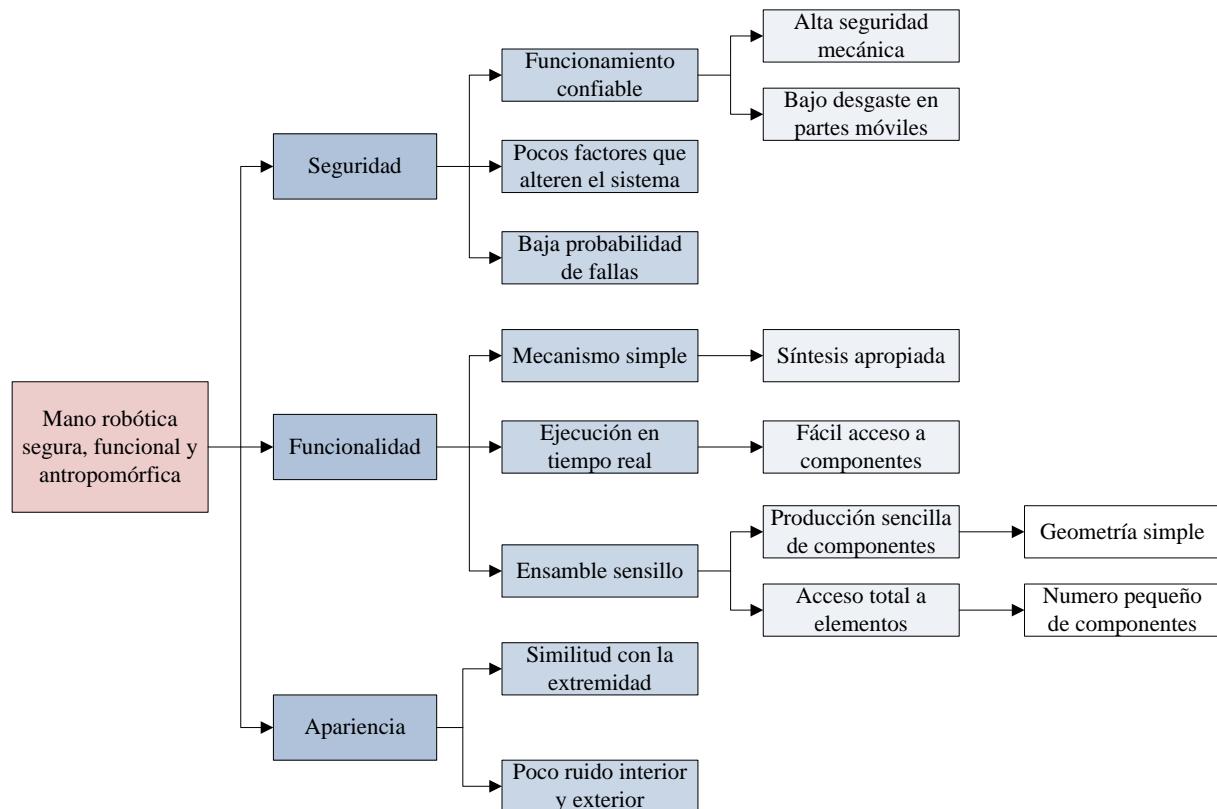


Figura III.3.- *Árbol de objetivos* de la mano robótica

El diagrama anterior (Figura III.3), es el preámbulo para tener una idea mas clara al momento de establecer las funciones que debe desempeñar el prototipo. En el *árbol de objetivos*, se evidencia el hecho de tener diversos niveles en cuanto a la jerarquía de metas, sin embargo, las que se encuentran en niveles mas bajos no dejan de ser importantes, al contrario, ayudan al entendimiento del objetivo siguiente en el árbol.

Por otra parte, es indispensable contar con un medio para implantar los objetivos especificados con anterioridad, y esto puede hacerse mediante el establecimiento de funciones. El análisis de este método propone un medio para identificar las actividades esenciales que el sistema a diseñar debe desempeñar para satisfacer los objetivos planteados en el diagrama del árbol, independientemente de los dispositivos que se vayan a utilizar.

### III.2.2.- Establecimiento de funciones

Esta etapa da inicio con el planteamiento de un enfoque dirigido hacia los objetivos que se deben lograr y no en cómo se harán, visualizando el prototipo a diseñar como si fuera una *caja negra* (Figura III.4). Esta analogía plantea que la *caja negra* contiene la función requerida para transformar entradas en la salida deseada.

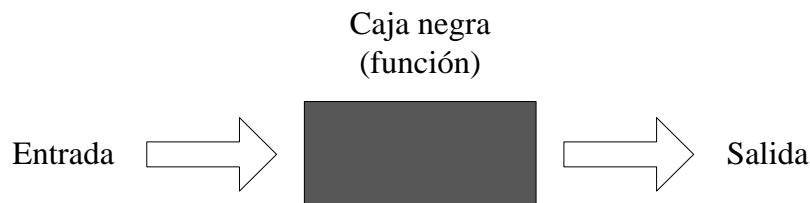
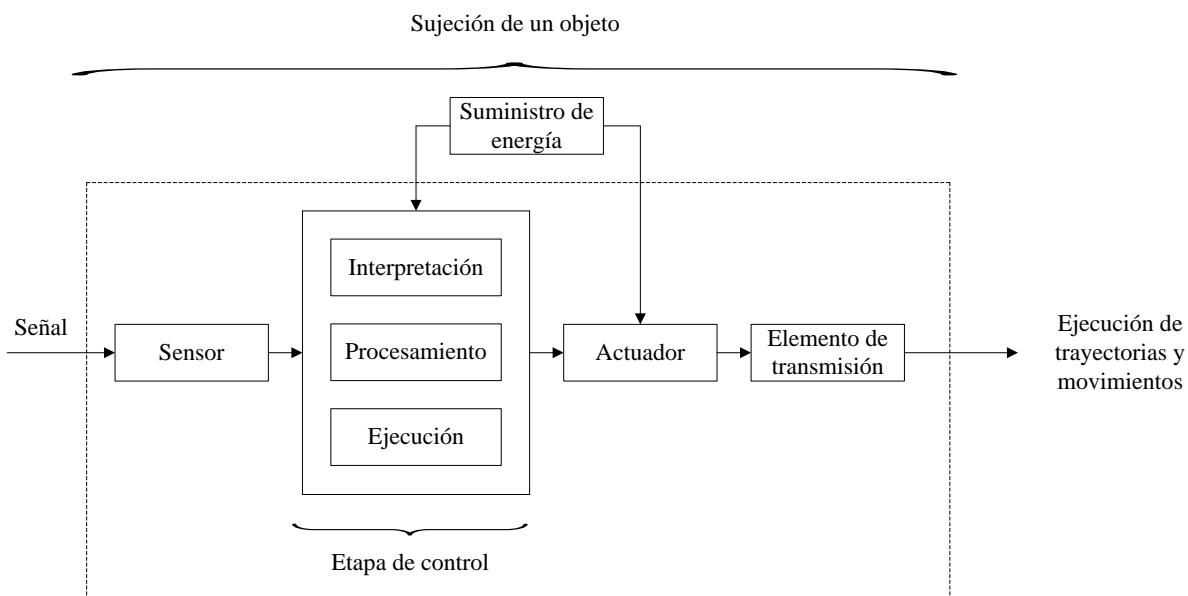


Figura III.4.- *Caja negra* para establecer funciones

Para el diseño de la mano robótica, la función general del sistema es la *sujeción de objetos*. Posteriormente se debe descomponer en múltiples funciones secundarias, que son indispensables para cumplir el objetivo. Estas funciones secundarias deben abarcar todas las actividades a realizarse en la *caja negra*.

Lo anterior se puede representar en un diagrama a bloques mostrando las interacciones entre las funciones secundarias (Figura III.5). Además, el diagrama de bloques también debe contener los límites funcionales que definen al diseño.



**Figura III.5.-** Diagrama de función principal

La primera función secundaria es la recepción de la señal para después llegar a la etapa de control del sistema, la cual se encarga de interpretar y procesar la señal para inmediatamente ejecutar el código adecuado para que el actuador desarrolle su función de forma adecuada, utilizando un acoplamiento para adaptarse al sistema y así ejecutar la trayectoria apropiada.

Al fijarse los límites en la función principal, se clarifica la especificación de los componentes principales así como la variedad de soluciones para la propuesta de diseño. En consecuencia, se reducen las variantes para definir de forma estrecha los requerimientos con que deben contar los componentes del sistema y así, identificar la dirección e ideas que se deben seguir para evitar soluciones inapropiadas, que deberán modificarse cuando se encuentren fuera de los límites.

### III.2.3.- Requerimientos

La finalidad de especificar los requisitos es conseguir un parámetro claro para obtener las especificaciones y componentes principales de la propuesta de diseño. En este punto, se toman en cuenta las alternativas, tipos y características de los elementos a considerar. Asimismo, se plantean los atributos de rendimiento que se requieren de modo independiente para así obtener soluciones particulares. Esto colleva una elección entre alternativas, tipos o características de un dispositivo.

El estudio de este diseño incluye análisis de las características de múltiples ejemplos de diseños anteriores de manos robóticas. Donde como resultado se elaboró una tabla con las especificaciones y características adecuadas para el funcionamiento óptimo de la mano robótica (Tabla III.1). Por otra parte, se clasificaron como *requeridas* o *deseadas*.

**Tabla III.1.- Especificaciones del equipo**

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

Determinar los requisitos del sistema es el preámbulo para especificar las características de cada componente. Un método compacto para lograr la correspondencia entre los requisitos solicitados con las características ingenieriles del sistema es el método *Blitz QFD (QFD Relampago)*, forma simplificada de la metodología *QFD (Quality Function Deployment)*.

La metodología *QFD* es un sistema que se ocupa esencialmente de traducir los requerimientos en características de ingeniería, apoyándose en etapas anteriores de la metodología de diseño [III.5]. El objetivo primordial es la mejora continua de la calidad, su planificación en el proceso de diseño y el eslabonamiento en la etapa siguiente; partiendo de los requerimientos y expectativas [III.6]. Esto permite llegar con facilidad al diseño conceptual con un planteamiento idóneo donde los errores son perceptibles y se corrigen inmediatamente para transformar el modelo en un sistema concreto plasmado en planos de diseño, cálculos y especificaciones [III.7]. Por otra parte, la metodología simplificada Blitz QFD es una herramienta práctica y sintetizada que no requiere de software ni herramientas específicas (como la casa de la calidad) para ofrecer resultados favorables [III.8]. Consta de 7 breves pasos que se adaptan a la metodología aplicada para este prototipo (Figura III.6).

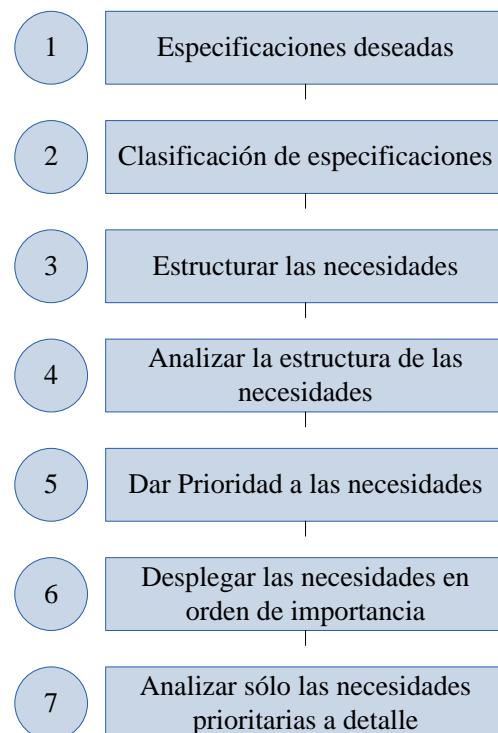


Figura III.6.- Metodología *Blitz QFD* [III.8]

Es importante resaltar que los primeros 3 pasos de la metodología mostrada en la Figura III.6 ya han sido desarrollados en etapas anteriores de este capítulo, sin embargo, falta desarrollar el análisis de la estructura de las necesidades así como asignar prioridades y estudiarlas a detalle. Estos pasos se desarrollan en la sección detallada a continuación.

### **III.2.4.- Características de los componentes**

La finalidad de establecer las características de los componentes es constituir las metas que se deben alcanzar con las características ingenieriles del sistema, con el objetivo de satisfacer los requerimientos mencionados en la Tabla III.1. Los requerimientos obligatorios se consideran de vital importancia, así que cada uno de ellos debe ser cumplido al finalizar la metodología, mientras que los deseables brindan cierta flexibilidad en cuanto a su total cumplimiento, por lo que se procede a ponderar por importancia cada uno de ellos.

Después de tener las especificaciones del equipo, es conveniente determinar la importancia relativa entre las especificaciones deseadas con base en su naturaleza, tomando mayor importancia aquellos requerimientos que sean indispensables para la operación del dispositivo.

Esta ponderación, se efectúa para ordenar los requerimientos deseables por orden de importancia. Dentro de esta ponderación se hace una comparación para establecer una relación significativa que arroja como resultado el orden de importancia que tiene cada requerimiento deseable (Tabla III.2).

**Tabla III.2.- Ponderación de requerimientos deseables**

Requerimientos deseados		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	$\Sigma$	%
D1	Dimensiones del diseño	----	-	-	-	-	-	-	+	1	3.5
D2	Capacidad de carga	+	----	-	-	+	+	-	+	4	14.3
D3	Disponibilidad dispositivos	+	+	----	+	+	+	-	+	6	21.4
D4	Mantenimiento Mínimo y sencillo	+	+	-	----	-	+	+	+	5	17.8
D5	Acceso total a elementos	+	-	-	+	----	-	-	+	3	10.7
D6	Bajo desgaste en partes móviles	+	-	-	-	+	----	-	+	3	10.7
D7	Similitud con la extremidad	+	+	+	-	+	+	----	+	6	21.4
D8	Poco ruido interior	-	-	-	-	-	-	-	----	0	0
Total										28	100

Esta evaluación se realizó a través de signos positivos (+) o negativos (-) de forma que si un requerimiento tiene mayor relevancia que otro se anota un signo positivo, de lo contrario se asigna un signo negativo.

Una vez que se obtuvo la ponderación de los requerimientos, se acomodan de forma decremental con los porcentajes adquiridos y la sumatoria que dio lugar dichos porcentajes (Tabla III.3).

**Tabla III.3.- Despliegue de requerimientos deseables**

Importancia	Requerimientos		$\Sigma$	%
1	D3	Disponibilidad dispositivos	6	21.4
2	D7	Similitud con la extremidad	6	21.4
3	D4	Mantenimiento Mínimo y sencillo	5	17.8
4	D2	Capacidad de carga	4	14.3
5	D5	Acceso total a elementos	3	10.7
6	D7	Bajo desgaste en partes móviles	3	10.7
7	D1	Dimensiones del diseño	1	3.5
8	D8	Poco ruido interior	0	0

Ya definidos los requerimientos deseables por su orden de importancia, se traducen a términos mensurables de ingeniería, para llevarlos a un nivel cuantificable relacionado directamente con una unidad de medición referida a la actividad que ésta implícita. Aquellos que no pueden ser asociados a una unidad de medición, se expresan con un significado explícito.

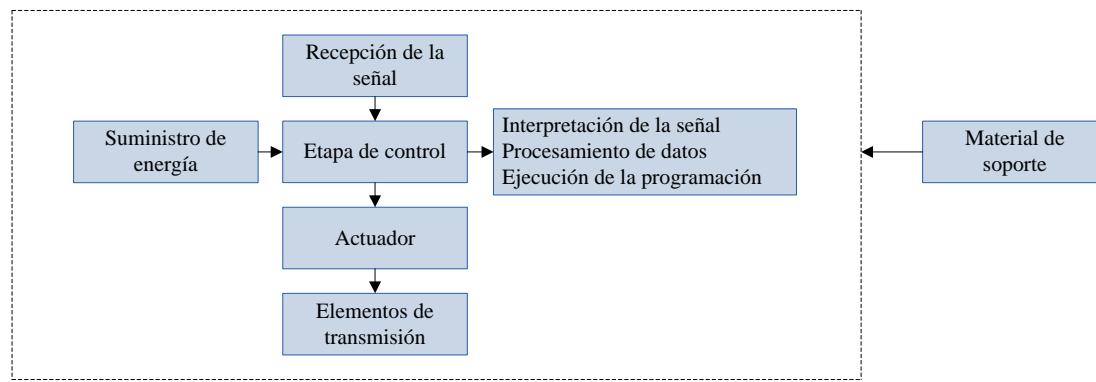
Posteriormente los términos mensurables se llevan a metas de diseño. Ahora se evaluarán medidas reales o físicas para establecer cuáles son los criterios más adecuados con base al proyecto para saber que tanto afecta un concepto con respecto a otro y así determinar cuáles son los que se deben cumplir. Es decir, el diseño del prototipo sobre la base de las necesidades y requerimientos antes mostrados.

Después de haber aplicado el método *Blitz QFD*, es conveniente generar las alternativas que satisfagan las características antes propuestas, marcándose este aspecto como esencial para el desarrollo del diseño.

### III.2.5.- Generación de alternativas

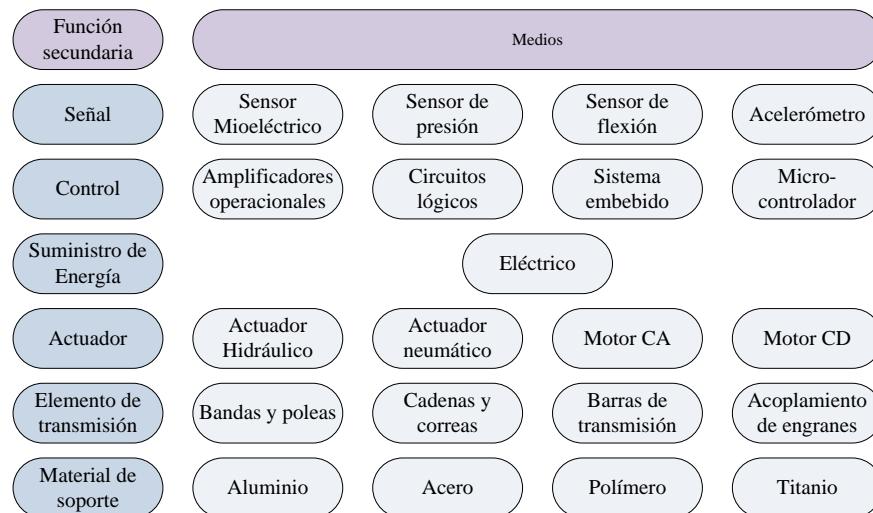
La generación de alternativas tiene como finalidad obtener una gama de múltiples soluciones de diseño, así como ampliar la búsqueda de nuevas soluciones potenciales. Para esto, se hará uso de un *diagrama morfológico* el cual presenta todas las variantes de los elementos, componentes y soluciones secundarias que se pueden combinar para obtener resultados positivos.

El procedimiento para obtener el *diagrama morfológico* da inicio con la elaboración de una lista con las características o funciones secundarias indispensables para cumplir completamente con los requisitos para el diseño (Figura III.7).



**Figura III.7.-** Funciones secundarias

Posteriormente se elabora un diagrama que contiene las soluciones secundarias más importantes posibles (Figura III.8). Este diagrama representa el espacio total conformado por las combinaciones posibles por las soluciones secundarias del sistema.



**Figura III.8.-** Diagrama morfológico de posibles soluciones

El diagrama anterior arroja un total de 1024 combinaciones que pueden resultar del uso de los conceptos mencionados en la figura anterior. Sin embargo, el número de combinaciones es demasiado elevado, por ello es recomendable usar filtros que ayuden a descartar opciones que no van de acuerdo al proyecto. Estos filtros son utilizados en la evaluación de alternativas.

### III.2.6.- Evaluación de alternativas

La evaluación de alternativas tiene como finalidad, simplificar el número de soluciones para cumplir satisfactoriamente con las funciones secundarias del diseño. La elección del medio que resolverá la función puede presentarse en diferentes contextos. Consiste básicamente, en elegir una solución entre las disponibles, a los efectos de resolver un problema actual.

#### III.2.6.1.- Recepción de la señal

Existe gran diversidad de dispositivos para interpretar diferentes señales del cuerpo humano, tales como sensores mioeléctricos, de presión, de flexión, acelerómetros, etc. (Figura III.9). Estos componentes son elementos esenciales para cumplir con la función principal del sistema.

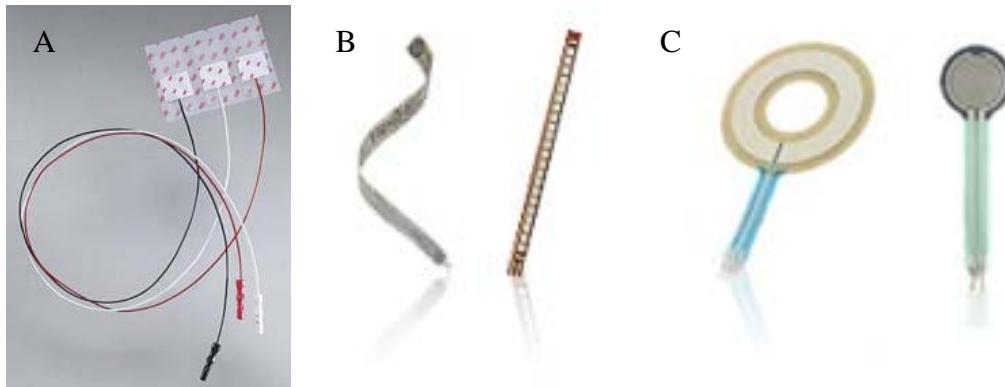


Figura III.9.- Sensores adaptables al sistema: A) Mioeléctrico, B) Flexión y C) Presión

Debido a que la amputación de la extremidad superior es el resultado de una malformación y/o lesión compleja con pérdida de tejido, músculo y hueso, es importante resaltar la enorme complejidad que posee la estructura músculo-esquelética de la mano, destacando algunas características ausentes en la persona afectada, tales como actividad mioeléctrica o pérdida total o parcial de movimientos. Considerando lo anterior, es indispensable contemplar la posibilidad de integrar diversos sensores de forma individual o simultanea. Lo anterior con la finalidad de que el diseño pueda adaptarse a las

diferentes características encontradas como resultado de los accidentes, malformaciones y procedimientos quirúrgicos que dan origen a una amputación. Lo anterior se puede lograr adaptando un dispositivo de control que pueda interactuar sin complicaciones con los dispositivos antes mencionados, es decir, la etapa de control debe tener la capacidad de percibir señales encontradas por sensores mioeléctricos, de presión, de flexión, acelerómetros, etc.

### III.2.6.2.- Dispositivo de control

Hoy día, se cuenta con gran diversidad de dispositivos de control, sin embargo, no todos cumplen con las características esenciales para el diseño de la mano robótica. Principalmente debe tener la capacidad de interpretar una o varias señales diferentes, además de almacenar y procesar datos y ofrecer una plataforma de programación. De igual forma, es indispensable que el componente de control permita manipular y sincronizar múltiples actuadores de forma simultánea. Dada la descripción anterior, se deben evaluar los principales medios para cumplir con los requisitos del sistema. Entre los actuales dispositivos de control, se encuentran los amplificadores operacionales, circuitos lógicos, micro-controladores y sistemas embebidos, los cuales pueden dar una solución parcial a las necesidades del sistema a diseñar. Por otra parte existen criterios de diseño que debe cumplir el dispositivo de control, tales como dimensiones, capacidad de almacenaje de información, autonomía, etc.

Un amplificador operacional es un dispositivo electrónico empleado para desarrollar operaciones matemáticas (suma, resta, multiplicación, división, integración, derivación, etc.) [III.9]. Sin embargo, sería extremadamente complejo desarrollar un código lógico para poder controlar y ejecutar las trayectorias adecuadas al sistema, sin mencionar que el arreglo electrónico de estos elementos sobrepondría las dimensiones del modelo a diseñar.

Un circuito integrado también conocido como chip o microchip, es un pequeño dispositivo de material semiconductor fabricado generalmente mediante fotolitografía y que está protegido dentro de un encapsulado de plástico o cerámica [III.10]. El encapsulado posee conductores metálicos apropiados para hacer conexión entre la pastilla y un circuito impreso. Estos dispositivos poseen una pequeña partición para uso de memoria sin embargo se saturan rápidamente y es difícil desarrollar una programación lógica más extensa. Por otra parte, se requerirían 5 circuitos integrados para poder desarrollar las trayectorias independientes de cada dedo ocasionando complicaciones para establecer las

secuencias adecuadas. Por lo anterior los circuitos integrados quedan descartados para ser utilizados en la implementación de la mano robótica.

Un microcontrolador es un circuito que consta de una unidad central de procesamiento, memoria y puertos de entrada y salida. Existen gran variedad de microcontroladores con dimensiones y características versátiles [III.11]. Si bien es cierto que es una opción aceptable para desarrollar programaciones secuenciales lógicas, este dispositivo tiene ciertas limitantes en cuanto a número de elementos a controlar, es decir, para establecer una sincronía entre 10 actuadores y otro tanto de sensores se necesitaría un microcontrolador con dimensiones superiores a las requeridas, lo que deja fuera a este elemento de control para ser incorporado al prototipo. No obstante, si se requieren hacer pruebas para seguimientos de trayectoria o manipulación de objetos, este dispositivo es una opción que se puede considerar.

Un sistema embebido es un dispositivo de control que posee entre sus componentes a un microprocesador, un microcontrolador y una unidad de memoria que en sincronía ofrecen una ejecución de comandos prácticamente en tiempo real [III.12]. Por lo general los sistemas embebidos se pueden programar directamente en el lenguaje ensamblador o bien, utilizando algún compilador específico como *C*, *C++* y *BASIC*. Estos dispositivos electrónicos se encuentran en diferentes dimensiones y capacidades, estableciéndose como una opción ideal para fungir como etapa de control en la mano robótica.

El dispositivo seleccionado es un servocontrolador de 18 canales (12 analógicos y 6 digitales), que permite la conexión y sincronía de 18 elementos (actuadores o sensores), además de una programación simple y rápida (Figura III.10), asegurando la ejecución de trayectorias en tiempo real (especificaciones técnicas Anexo 1).

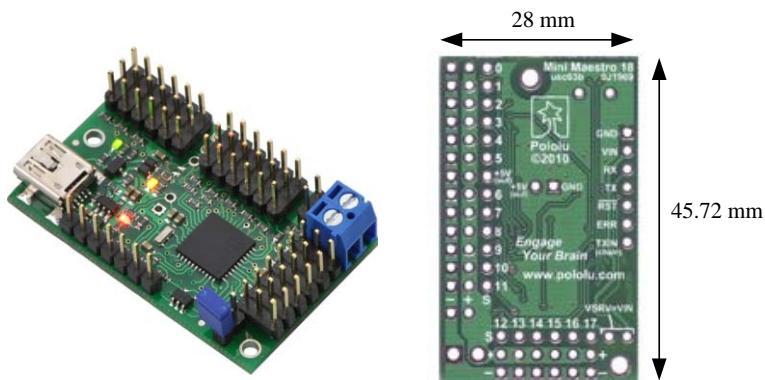


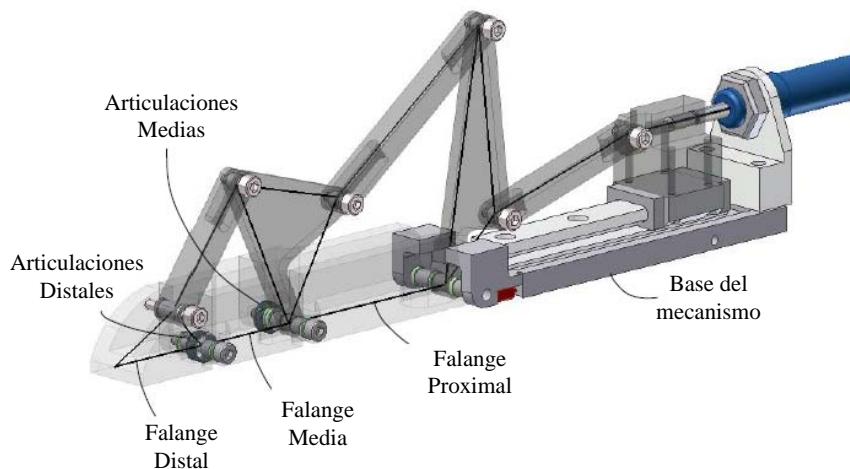
Figura III.10.- Sistema embebido

### III.2.6.3.- Elementos de transmisión

Los elementos de transmisión son parte fundamental para transmitir potencia entre dos o más elementos [III.13]. De igual forma, puede transformar un movimiento en otro con diferentes características y sin duda, la transmisión de movimientos que es realizada por elementos giratorios (engranes y poleas) ocupa menos espacio que un elemento de transmisión lineal y ya que como se ha estado mencionando con anterioridad en esta sección, las dimensiones del dispositivo a diseñar, son hasta cierto punto una limitante para establecer un sistema adecuado.

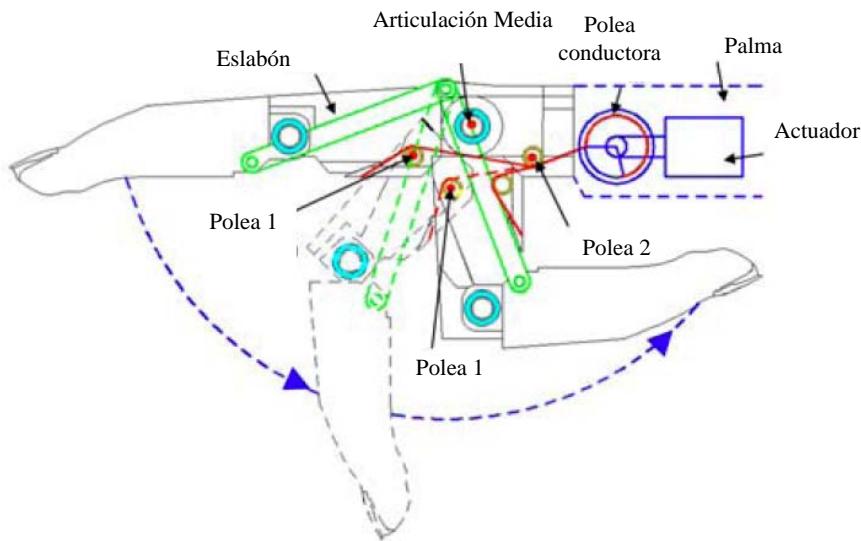
Entre las formas más comunes de elementos de transmisión se encuentran las cadenas, correas de distribución, engranes y barras de mecanismos, siendo estos últimos la opción ideal para introducir en un modelo tridimensional, esto debido a que ocupan muy poco espacio y son extremadamente ligeros [III.14].

En definitiva, un mecanismo es la opción adecuada para generar la trayectoria deseada. Por otra parte, existe gran variedad de mecanismos aplicados a las manos robóticas, tal es el caso de *Fligiolini y Rea*, quienes proponen un mecanismo de 5 eslabones sub-articulados por un actuador lineal (Figura III.11). Este mecanismo cumple con la trayectoria descrita por los dedos de la mano [III.15], sin embargo, las dimensiones de los eslabones superan en gran medida las dimensiones deseadas desde un punto de vista lateral.



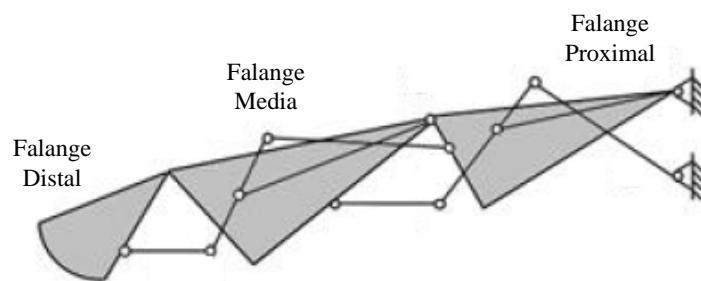
**Figura III.11.-** Mecanismo propuesto por *Fligiolini y Rea* [III.15]

No obstante, *Jung* y colaboradores proponen un mecanismo articulado con un eslabón y 3 poleas, accionado por un actuador convencional (Figura III.12). La flexión de los dedos es un movimiento que resulta de ejercer una fuerza contraria al tirar de un cable que funge como tendón, pero la extensión de los dedos se realiza por un mecanismo elástico compuesto por un resorte de restauración [I.39]. Aún con lo anterior, este dispositivo no realiza la flexión y extensión de la articulación distal, lo que dificulta en ciertos puntos el seguimiento de la trayectoria y posteriormente la sujeción de objetos.



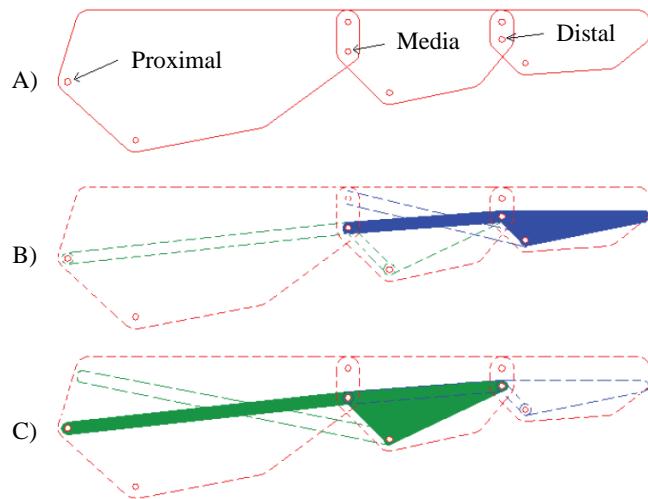
**Figura III.12.-** Mecanismo propuesto por *Jung* [I.39]

Otro mecanismo que cumple con la trayectoria, es el propuesto por *Portilla* y colaboradores (Figura III.13), dispositivo diseñado para el seguimiento de trayectorias de un dedo índice con propiedades antropomórficas, el cual utiliza 4 eslabones y un actuador para generar la trayectoria [III.16]. Sin embargo, aunque se utiliza un número mayor de eslabones que los trabajos antes mencionados, no es posible separar el movimiento de flexión de las falanges, con la flexión de la articulación MCF, lo que propicia una dependencia total de la ejecución de un solo movimiento.



**Figura III.13.-** Mecanismo propuesto por *Portilla* y colaboradores [III.16]

Por el contrario, *Velázquez* desarrolló como trabajo doctoral, la síntesis de un mecanismo que originalmente utiliza 3 eslabones sub-actuados (Figura III.14). Sin embargo, es posible reemplazar el eslabón proximal por un actuador lineal, obteniéndose así una configuración idónea para desarrollar la trayectoria adecuada con dos movimientos independientes. Por lo anterior, el mecanismo a utilizar es el descrito por



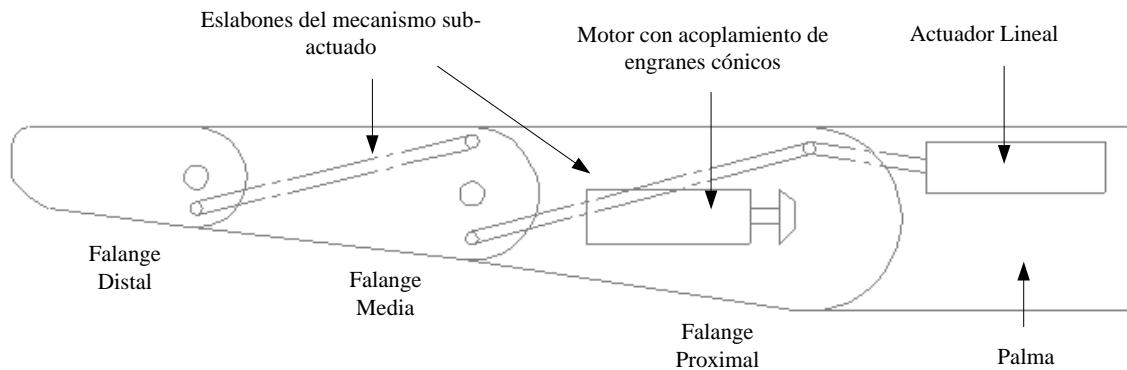
**Figura III.14.-** Mecanismo propuesto por *Velázquez*: A) Falanges, B) Eslabón distal y C) Eslabón proximal [II.4]

#### III.2.6.4.- Actuadores

La aplicación de actuadores hidráulicos en manos robóticas en combinación con barras de transmisión ha sido nula, esto debido a que se requiere una fuente mayor que alimente a estos actuadores y en vista del espacio tan delimitado que se tiene no es conveniente hacer uso de estos. Por otro lado, no hay motores de C. A. que puedan ser instalados dentro de la falange proximal, idea principal que se tiene para el sistema robótico. Por tal motivo, se ha decidido por criterio de diseño, que los actuadores a utilizar serán motores de C. D. Estos motores se caracterizan por su capacidad para posicionarse de forma sencilla en cualquier posición dentro de su intervalo de operación [II.4]. Un actuador de C. D. es un dispositivo con un eje de rendimiento controlado ya que puede ser llevado a posiciones angulares específicas al enviar una señal codificada.

Para hacer la selección del primer actuador, es necesario identificar la forma en la que este se va a desempeñar. La idea principal que se tiene para el sistema robótico, es que el motor se introduzca en la falange proximal del modelo tridimensional, y mediante el acoplamiento de engranes cónicos, transmita el par correspondiente para ejecutar la

trayectoria con las barras de transmisión en las falanges proximal, media y distal (Figura III.15). Asimismo, el actuador lineal deberá proporcionar el par necesario para ejecutar la trayectoria de la articulación MCF, sistema que funciona como un mecanismo biela-manivela.



**Figura III.15.-** Posición inicial de actuadores y barras de transmisión

Para el motor con acoplamiento de engranes cónicos, se propone buscar un moto-reductor existente de dimensiones mínimas y el mayor par posible, además de un sistema de engranes cónicos con relación 1:1. Lo anterior permitirá tener continuidad entre el número de vueltas a controlar, en función del desplazamiento requerido por las barras de transmisión. Los motores que cumplen con las características mencionadas se muestran en la tabla III.4.

**Tabla III.4.-** Comparación de motores

Características	Motores				
Modelo					
Alimentación	12 V	12 V	3-9 V	4.8-6 V	3-5 V
Velocidad	170 RPM	200 RPM	120 RPM	--	--
Peso	--	50 g	10 g	8 g	5.4 g
T máximo	1.5 Kg·cm	4.6 Kg·cm	5.4 Kg·cm	1.1 Kg·cm	0.53 Kg·cm
I máxima	2.5 A	1.5 A	1.6 A	5.4-5.5 mA	3-5 mA
I sin carga	150 mA	90 mA	70 mA	150-180 mA	120-145 mA
Dimensiones	--	37 mm trans.	24x10x12 mm	23x12x24 mm	23x10x16 mm

Está claro que existe gran diversidad de motores, motoreductores y servomotores, sin embargo estos últimos tienen ventajas y desventajas muy marcadas, en concreto, un servomotor tiene mejor control de posición que un motor, pero el par ejercido por un servo de dimensiones pequeñas es mucho menor que el que ejercen los motoreductores. Por lo anterior es conveniente utilizar un motoreductor que puede presentar el par más alto en comparación con los demás dispositivos, sin mencionar que tiene la capacidad de adaptarse a un rango más amplio de Voltaje. Derivado de esto, el motor seleccionado para este trabajo es el modelo *MM-R 995* (especificaciones técnicas Anexo 1), dispositivo que será adaptado en la parte interna de la falange proximal.

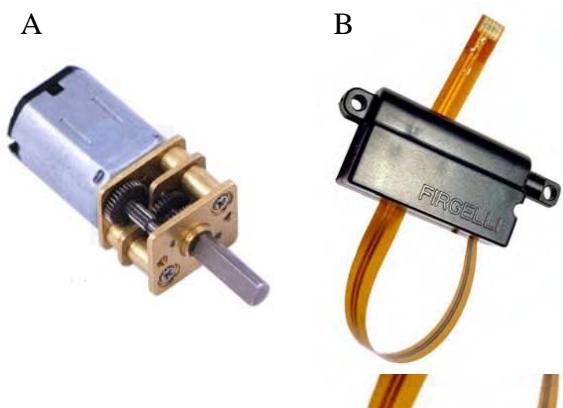
De igual forma, se requiere un actuador que desarrolle un movimiento similar al par cinemático de biela-manivela. Por ende, es conveniente utilizar un actuador lineal, para ello debe seleccionarse de acuerdo a capacidad de torque, rango de alimentación, y dimensiones del vástago principalmente. Los actuadores que podrían cumplir con las características mencionadas anteriormente, se comparan directamente en la Tabla III.5, con lo que se espera identificar la mejor opción para la mano robótica.

**Tabla III.5.- Comparación de actuadores lineales**

Características	Actuadores lineales	
Modelo	 PQ12	 SQ100
Alimentación	6-12 V	5-12 V
Velocidad	25 mm/s	0-2 mm/s
Peso	15 g	--
Fuerza máxima	9 N	5 N
Longitud vástago	20 mm	50 mm
Dimensiones	22x42x15 mm	12.5x77x10 mm

El actuador a seleccionar, será ubicado en la parte interior de la palma (Figura III.16), y debe utilizarse el dispositivo que tenga un equilibrio entre fuerza, velocidad y peso. El dispositivo seleccionado es el PQ12 (especificaciones técnicas Anexo 1), debido a que posee mayor fuerza aunque tiene menor longitud del vástago. Por otra parte, este actuador lineal se puede configurar directamente con el sistema embebido seleccionado, lo que facilita el ensamble y control del dispositivo, además de que puede cumplir sin

problemas el requisito dimensional. Los actuadores seleccionados se pueden observar en la Figura III.16.



**Figura III.16.-** Actuadores seleccionados: A) Motoreductor y B) Actuador lineal

### III.2.6.5.- Suministro de energía

Habiendo seleccionado los sensores, dispositivo de control, actuadores y elementos de transmisión, ahora corresponde la selección del suministro de energía. Las características que debe cumplir este elemento están en función directa del sistema embebido. No obstante se busca integrar una fuente de alimentación portátil, esto pudiera ser una batería recargable (Figura III.17), siempre y cuando cumpla con lo requerido por la etapa de control. Por otra parte, es conveniente también, permitir que la mano robótica pueda conectarse directamente a una fuente de alimentación externa, es decir, que pueda conectarse a un transformador u otro elemento que igual sea capaz de alimentar al sistema, lo anterior con la finalidad de permitir realizar pruebas sin estar delimitando la vida útil de la batería portable.



**Figura III.17.-** Baterías recargables (portátiles)

### III.2.6.6.- Material de soporte

Está claro que desde hace años, se incorporan a la industria de los materiales la aplicación de plásticos, que tienen como principales cualidades ser muy ligeros (en comparación con un metal) y resistentes a la oxidación [III.16]. Sin embargo, esto no es suficiente, ya que la industria constantemente demanda materiales que satisfagan necesidades aun más complicadas. Por otra parte, existen múltiples alternativas de solución a estos requerimientos, tal es el caso del *Nylamid* ®, termoplástico que ha sustituido diseños y componentes fabricados con otros materiales como acero, bronce, aluminio, madera y cerámica, en un sinnúmero de sectores industriales, proporcionando beneficios reflejados en disminución de costos, facilidad de maquinado, menor consumo de lubricantes, reducción de ruido, etc. Específicamente, los compuestos de Nylon o poliamidas se clasifican de acuerdo al número de moléculas de Carbono que integran al material, estas pueden ser 6, 6/6, 6/12, 10, 11, 12, etc. Cada tipo tiene características diferentes y son utilizados para diferentes aplicaciones, tal y como se muestra en la Tabla III.6.

**Tabla III.6.- Comparación de actuadores lineales**

Característica	Material			
Nombre comercial	<i>Nylamid-M</i>	<i>Nylamid-SL</i>	<i>Nylamid-XL</i>	<i>Nylamid-TS</i>
Clasificación	Mecánico	Super Lubricado	Extra Lubricado	Tabla de suaje
Color	Hueso	Negro	Verde	Ámbar

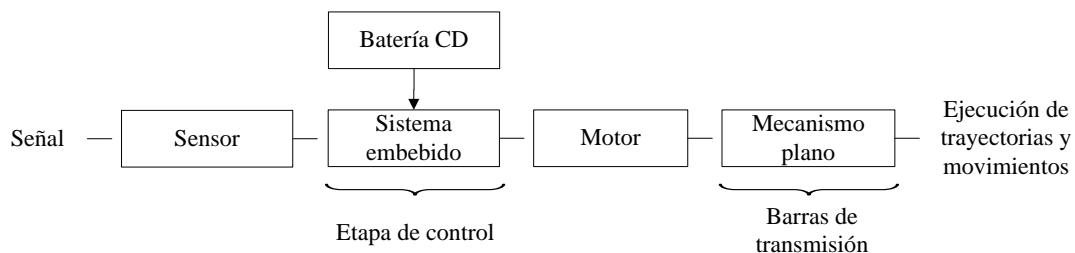
El material que se propone para soporte del diseño robótico, es el *Nylamid-XL* (Características técnicas Anexo 1), conocido como extra lubricado al que se añade un aceite especial en el momento de mezclar las materias primas. Este compuesto tiene partículas lubricantes integradas molecularmente que lo hace ser un material ideal para el contacto con metales, permitiendo el libre movimiento sin la necesidad de proporcionar otro lubricante entre las partes que estén en contacto.



**Figura III.19.- Tipos de Nylamid ®**

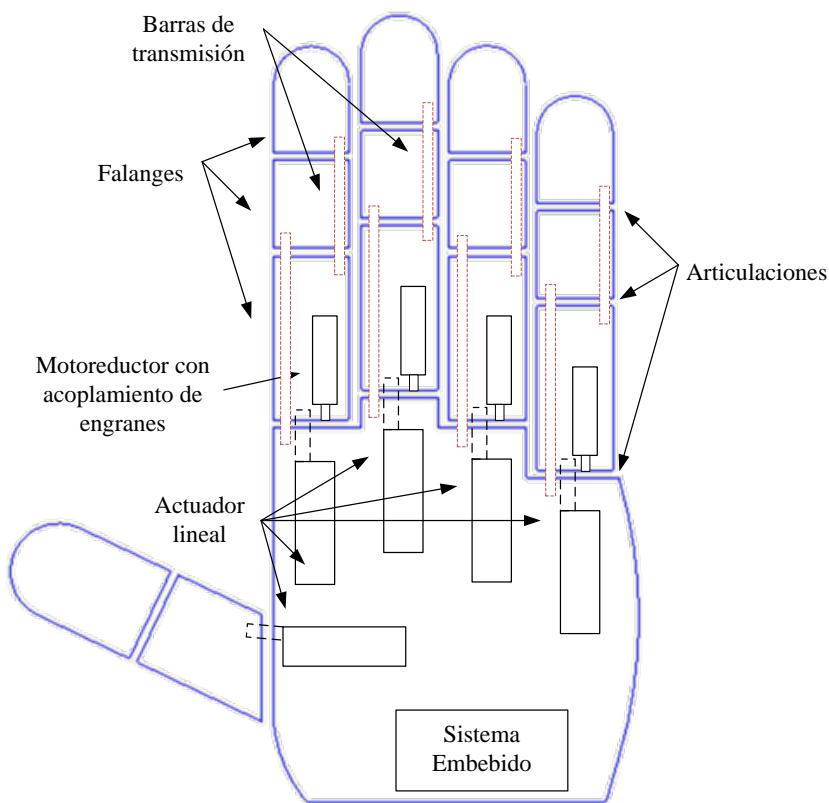
### III.3.- Diseño conceptual

Una vez que se ha seleccionado cada componente que brinde la solución adecuada a cada una de las funciones secundarias, se procede a puntualizar lo que sería una opción general que brinde un diseño primario. Lo anterior se puede representar con un diagrama general del sistema (Figura III.19). De esta forma, ya se tiene definido cada uno de los parámetros y por consiguiente, el prototipo toma cierta forma.



**Figura III.19.-** Esquema general de la mano robótica

Por otra parte, es importante representar de forma ambigua y simple, un esquema general que muestre los componentes principales que integren el sistema (Figura III.20), siendo este el primer paso para obtener un diseño conceptual.



**Figura III.20.-** Diseño conceptual de la mano robótica

Asimismo, se debe mencionar que es posible retroalimentar al diseño conceptual, esto al comenzar a evaluar la síntesis de las barras de transmisión por lo que cabe la posibilidad de que el diseño final tenga ciertas diferencias con el conceptual.

Ahora, se debe proceder a encontrar una metodología que permita obtener dimensiones reales de una mano natural, tanto de los dedos como de los arcos que se forman en su interior, esto con la finalidad de calcular la síntesis del mecanismo y posteriormente adaptar las barras de transmisión a las falanges de un modelo tridimensional.

#### III.4.- Sumario

En esta sección, se ha planteado una metodología para la implementación de una mano robótica servo-articulada, donde fue indispensable considerar un proceso de diseño creativo, introduciendo diversas herramientas para obtener la clarificación de objetivos, el establecimiento de funciones, la especificación de requerimientos, determinación de características, generación de alternativas y selección del esquema general, con lo que se obtuvo un diseño conceptual que se piensa, sea idóneo para obtener un sistema óptimo.

En el siguiente capítulo, se desarrolla un análisis para determinar las dimensiones exactas de la mano robótica, posteriormente se desarrolla la síntesis de las barras de transmisión, engranes y ejes; dispositivos que proporcionarán el movimiento al mecanismo para obtener las trayectorias deseadas. Además, se desarrolla el modelo tridimensional y la implementación de la mano robótica.

#### III.5.- Referencias

- 1.- Cross, N., *Métodos de diseño: Estrategias para el diseño de productos*, Limusa Wiley, pp 29-174, 2008.
- 2.- Bürdek, B. E., *Diseño. Historia, teoría y práctica del diseño industrial*, Gustavo Gili, pp 155-167, 2002.
- 3.- Iváñez-Gimeno, J. M., *La gestión del diseño en la empresa*, McGraw-Hill, pp 1-16, 81-197, 2000.
- 4.- Capuz-Rizo, S., *Introducción al proyecto de producción. Ingeniería concurrente para el diseño de producto*, Alfaomega, pp 67-186, 1999.
- 5.- Akao, Y. y Mazur, G. H., The leading edge in QFD: past, present and future, *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 20, No. 1, pp 20 – 35, 2003.

- 6.- Herzwurm, G. y Schöckert, S., The leading edge in QFD for software and electronic business, *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 20, No. 1, pp 36-55, 2003.
- 7.- Hunt, R. A. y Xavier, F. B., The leading edge in strategic QFD, *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 20, No. 1, pp 56-73, 2003.
- 8.- González-Bosch, V. y Tamayo-Enríquez, F., Blitz QFD, *Asociación latinoamericana de QFD*, pp 1-3.
- 9.- Coughlin, R. F. y Driscoll, F. F., *Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales*, Prentice Hall, pp 1-45, 1999.
- 10.- Fitchen, F. C., *Circuitos integrados y sistemas*, Reverté, pp 1-35, 1975.
- 11.- Valdez-Pérez, F. E. y Pallàs-Areny, R., *Microcontroladores: Fundamentos y aplicaciones con PIC*, Carles Parcerisas Civit, pp 11-75, 2007.
- 12.- Robotics & electronics®, recuperado de: <http://www.pololu.com/>, Marzo, 2011.
- 13.- Mott, R. L., *Diseño de elementos de máquinas*, Pearson Educación, pp 1-56, 2006.
- 14.- Cortizo-Rodríguez, J. L., et al., *Elementos de máquinas. Teoría y problemas*, Universidad de Oviedo, pp 1-75, 2004.
- 15.- Figliolini, G. y Rea, P., Ca.U.M.Ha. Robotic Hand (Cassino-Underactuated-Multifinger-Hand), *Advanced intelligent mechatronics, IEEE/ASME 2007*, pp 1-6, 2007.
- 16.- Recuperado de: [www.tecniaceros.com](http://www.tecniaceros.com), Mayo, 2011.

# IV

## Modelado tridimensional

En esta sección se establece la metodología para obtener el modelo de la mano robótica, partiendo del procesamiento de imágenes para obtener la síntesis del mecanismo. De igual forma, se describe la obtención de la impresión tridimensional de cada parte que compone al sistema y el ensamble de los mismos.

#### IV.- Modelado tridimensional

Muchas técnicas se han utilizado para obtener dimensiones externas e internas de partes del cuerpo, incluyendo la obtención de valores cinemáticos del carpo, metacarpianos y falanges. Tal es el caso del análisis de radiografías, análisis de movimiento por video, aplicación de dispositivos magnéticos para seguimiento de trayectorias, dispositivos sónicos y reconstrucciones tridimensionales a partir de tomografías [IV.1]. Actualmente el modelado en 3 dimensiones se torna como un estudio indispensable en diversas etapas de investigación y diseño [IV.2]. Además, es una técnica que consiste en regenerar y posteriormente caracterizar el modelo de un sistema real para estudiar su comportamiento sin necesidad de perturbar el sistema original.

En particular, los desarrollos en biomecánica han aportado estudios experimentales realizados para análisis de la fisiología humana y restauración de funciones en traumatología y ortopedia [IV.3]. Es importante hacer mención que el estudio de la biomecánica puede abarcar diversas etapas como la observación y el entendimiento del sistema músculo-esquelético, teoría, modelado, experimentación y validación de resultados [IV.4]. Por su parte, la simulación computacional permite utilizar medios virtuales para el diseño, implementación y evaluación de dispositivos como prótesis y materiales de osteosíntesis (clavos, tornillos y placas), sin la necesidad de intervenir directamente en el cuerpo humano [IV.5].

##### IV.1.- Obtención de dimensiones

La metodología para poder elaborar el modelado de la mano robótica da comienzo con la generación de un conjunto de imágenes a partir de una tomografía, para posteriormente por medio del programa *ScanIP®*, generar un primer modelo en 3 dimensiones (Figura IV.1). Esta imagen tridimensional proveerá una visión más clara de múltiples dimensiones que se requieren para implementar el prototipo.

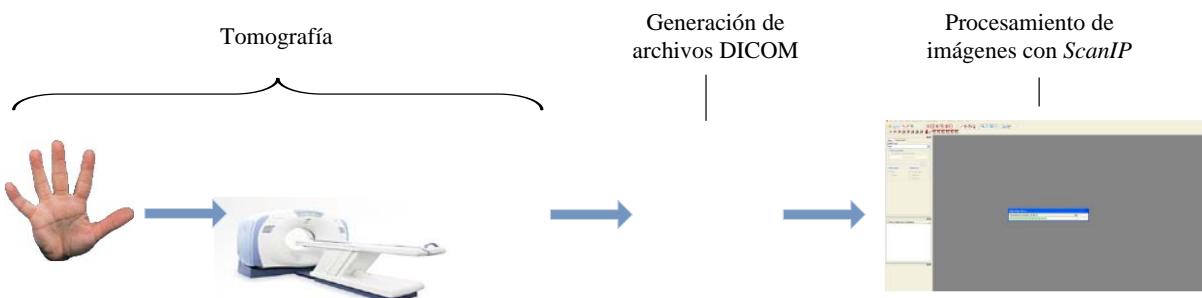


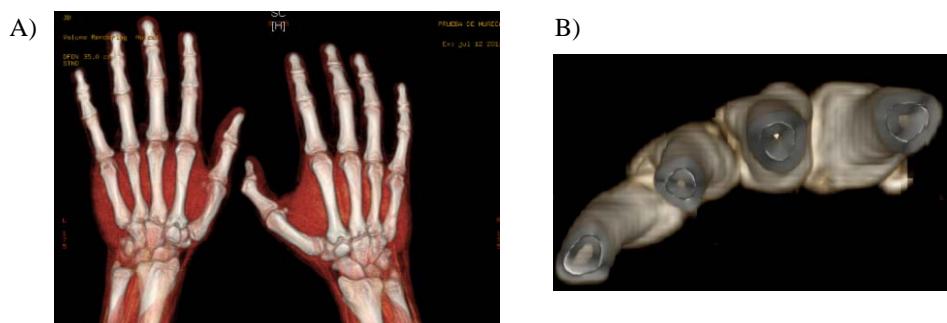
Figura IV.1.- Procesamiento de imágenes en *ScanIP®*

En primera instancia se obtuvo la tomografía de la mano derecha (dominante) de un varón de 25 años de edad, 1.73 m de altura y 81 Kg de peso, estudio realizado en un Tomógrafo *General Electric BrightSpeed Elite* con 16 detectores que entregó como resultado 295 cortes de 1 mm de espesor cada uno (Figura IV.2), lo anterior con apoyo del departamento de Radiología del Hospital “Magdalena de las Salinas” del IMSS.



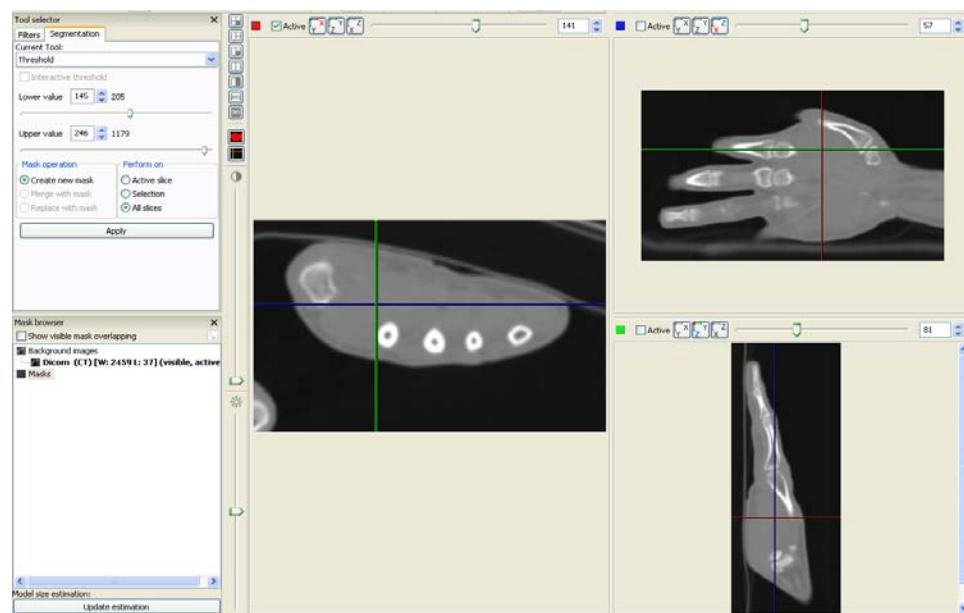
**Figura IV.2.-** Tomografía parcial de miembro superior

Una vez generada la tomografía en archivos DICOM, se pueden identificar algunas dimensiones en primera instancia (Figura IV.3), tal es el caso de las longitudes de metacarplos y falanges, además del arco metacarpiano principalmente.



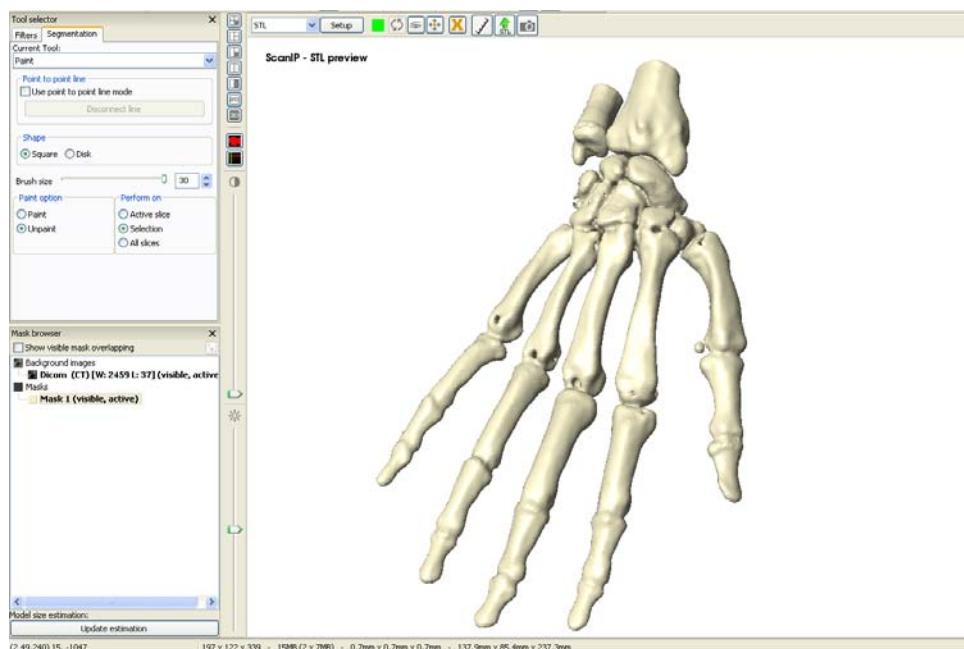
**Figura IV.3.-** A) Acercamiento dorsal y B) Corte transversal del arco metacarpiano

Después procesar las imágenes obtenidas de la tomografía, se importaron los archivos DICOM al programa *ScanIP®*, que generó los planos sagital, coronal y axial (Figura IV.4), donde posteriormente se eligió uno para trabajar.



**Figura IV.4.- Importación de archivos DICOM al programa *ScanIP®***

Posteriormente, se delimitó la parte ósea en primera instancia, esto realizando la incorporación de imágenes procesadas corte por corte (Figura IV.5), hasta formar el cuerpo completo.



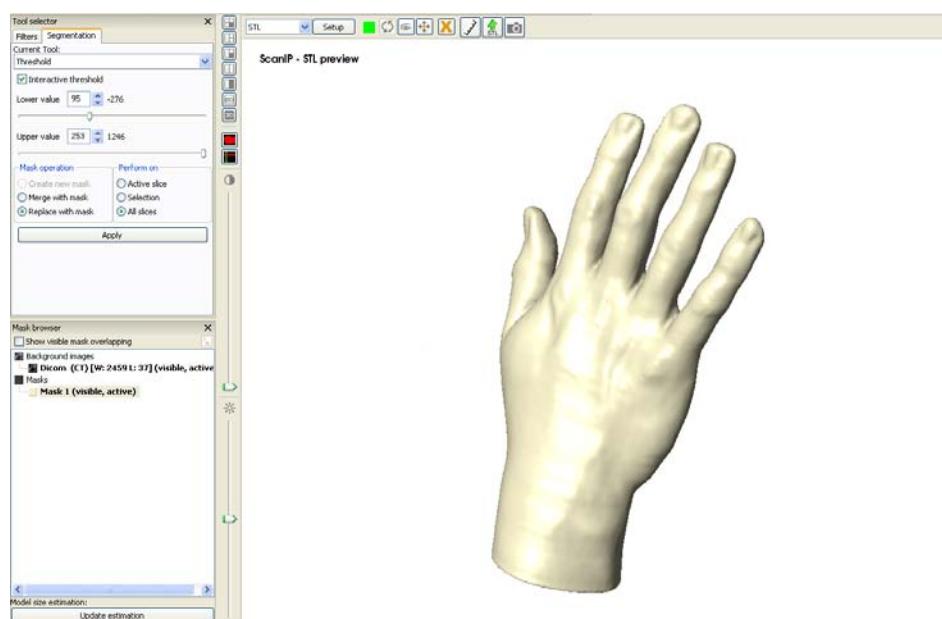
**Figura IV.5.- Imagen tridimensional de parte ósea**

Ya generado el modelo ahora es conveniente realizar un “rectificado” de la imagen tridimensional, con la finalidad de homogeneizar la superficie. Posteriormente, se exporta a *SolidWorks* ® para obtener las dimensiones faltantes que se requieren de arcos y distancia entre articulaciones (Figura IV.6).



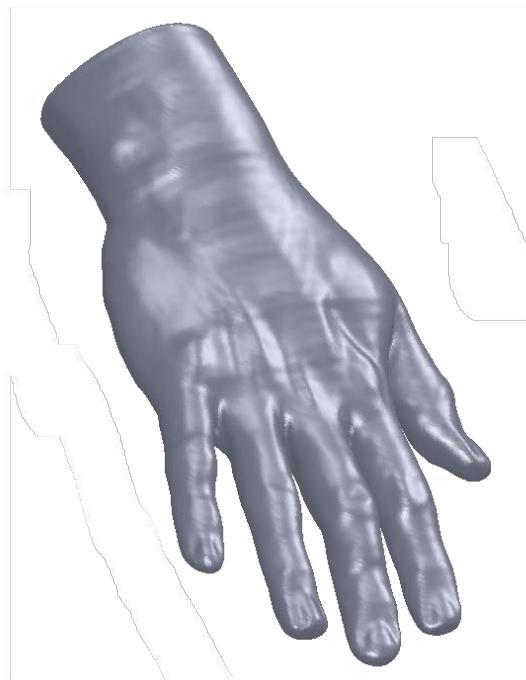
**Figura IV.6.- A)** Imagen del sistema óseo exportada a *SolidWorks* ®

Por otra parte, es conveniente generar otra imagen en 3 dimensiones pero ahora para el exterior de la extremidad, lo que permite obtener dimensiones de la palma, eminencias y dedos de la mano (Figura IV.7).



**Figura IV.7.-** Imagen tridimensional de la mano

Ya generado el modelo, nuevamente se realizó el rectificado de la imagen tridimensional para homogeneizar la superficie. Posteriormente, se exportó a *SolidWorks®* para obtener las dimensiones faltantes (Figura IV.8).



**Figura IV.8.-** Imagen tridimensional de la mano Imagen exportada a *SolidWorks®*

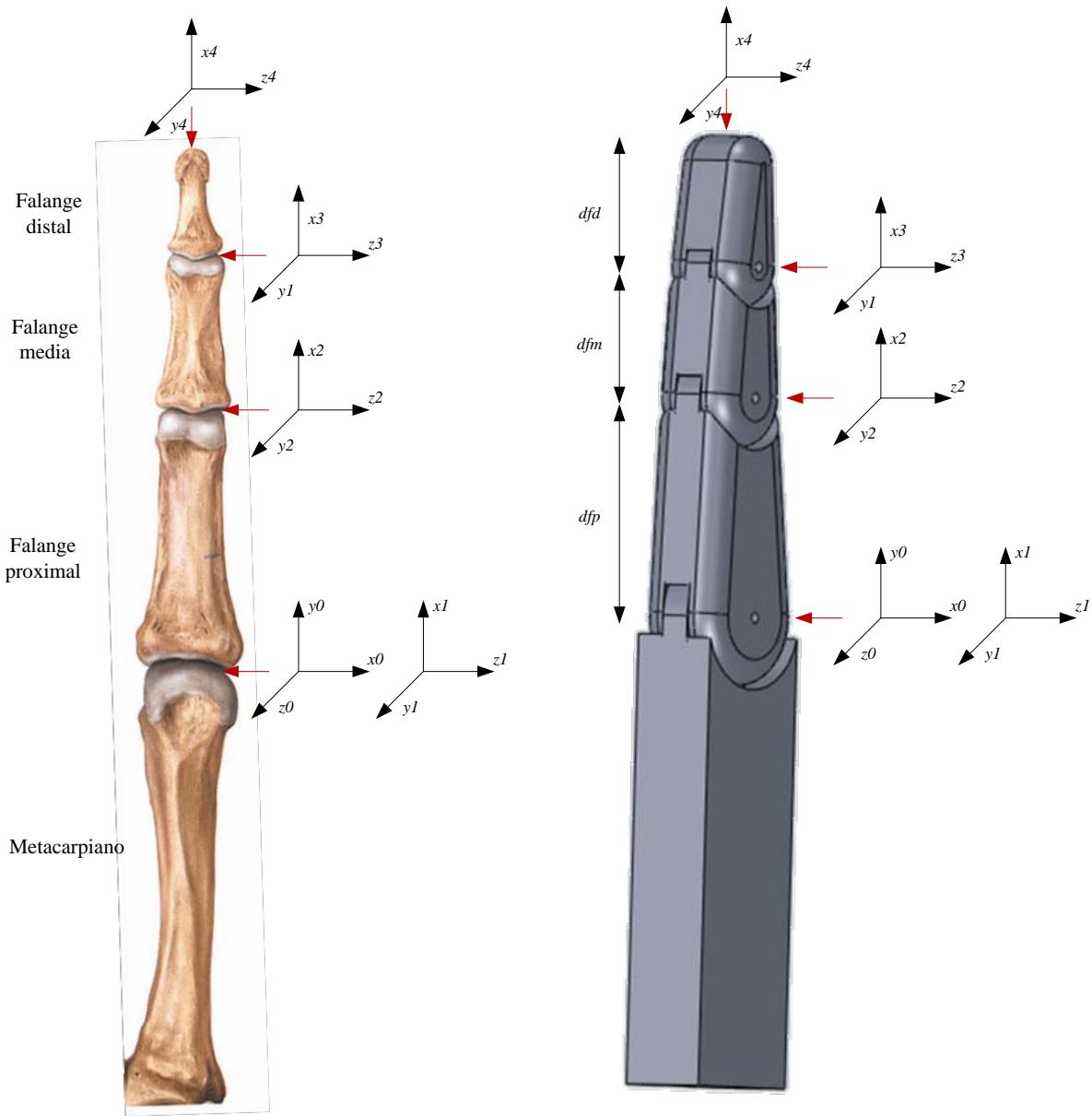
Por consiguiente las dimensiones propuestas para las falanges y palma se visualizan en el Anexo 2. Es importante mencionar que las dimensiones correspondientes para los dedos índice, medio y anular, son propuestas como iguales, lo anterior se debe a que en los datos obtenidos en el procesamiento de imágenes y estudios realizados anteriormente [II.16], existe poca diferencia entre estas, por lo cual se propone que estos dedos sean iguales para facilitar el modelado, sin embargo serán posicionados a diferentes distancias con respecto a un punto de referencia, dato obtenido en el procesamiento de imágenes.

Con los datos obtenidos a raíz del procesamiento de imágenes, fue posible desarrollar un modelo primario con lo que el paso a seguir corresponde a realizar el análisis para adaptar las barras de transmisión, para esto, se realizó la síntesis del mecanismo como se describe a continuación.

#### **IV.2.- Síntesis del mecanismo**

Considerando lo anterior y tomando en cuenta la descripción física de los dedos, y dimensiones entre articulaciones, es posible determinar una relación entre las posiciones, velocidades y fuerzas de contacto que actúan en los dedos, estudiando las condiciones bajo

las cuales es posible manipular un objeto de forma estable [II.4]. El primer paso para realizar la síntesis, corresponde a la asignación de coordenadas en cada una de las articulaciones (Figura IV.9).



**Figura IV.9.-** Asignación del sistema de coordenadas al dedo robótico

Para describir la relación de traslación y rotación entre los elementos de una cadena cinemática, se obtuvo la representación *D-H* de un cuerpo rígido en función de cuatro parámetros geométricos asociados a cada elemento, los cuales describen la relación espacial entre sistemas de coordenadas y concuerdan con los obtenidos por *Velázquez* [II.4]. Se muestran en la Tabla IV1.

Tabla IV.1.- Parámetros D-H

Articulación	$\theta_i$	$\alpha_i$	$a_i$	$d_i$
Proximal IF flexión	0	0	$dfm$	0
Distal IF flexión	0	0	$dfd$	0
MCF abducción	$\pi/2$	$\pi/2$	0	0
MCF flexión	0	0	$dfp$	0

Conforme a los parámetros anteriores, se prosiguió a obtener la matriz de transformación homogénea partiendo de las matrices de rotación obtenidas de dichos parámetros. Sustituyendo valores acordes a la asignación del sistema de coordenadas, las matrices de transformación quedan como se muestra en la ecuación IV.1

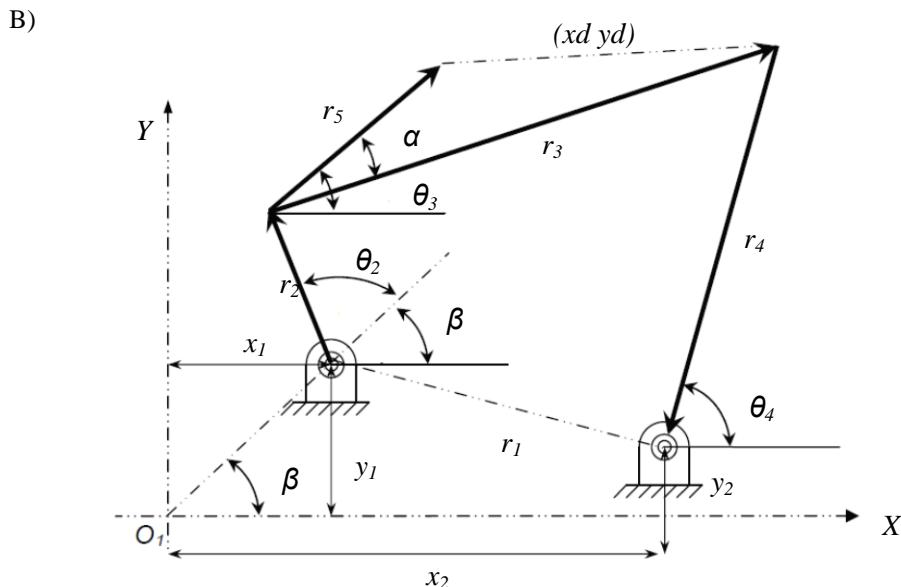
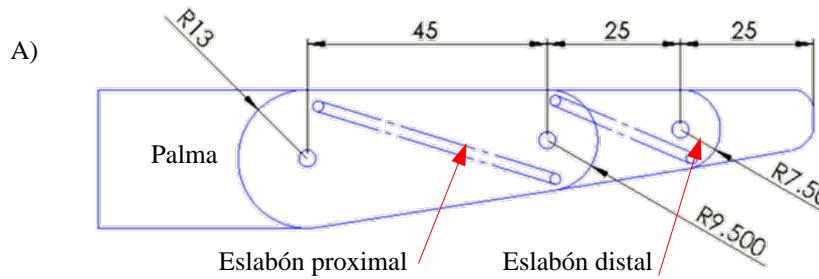
$$\begin{aligned}
 {}^0A_1 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & \operatorname{sen}\theta_1 & 0 \\ \operatorname{sen}\theta_1 & 0 & -\cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^1A_2 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\operatorname{sen}\theta_2 & 0 & dfp \cos\theta_2 \\ \operatorname{sen}\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & dfp \operatorname{sen}\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^2A_3 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\operatorname{sen}\theta_3 & 0 & dfm \cos\theta_3 \\ \operatorname{sen}\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & dfm \operatorname{sen}\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^3A_4 &= \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & -\operatorname{sen}\theta_4 & 0 & dfd \cos\theta_4 \\ \operatorname{sen}\theta_4 & \cos\theta_4 & 0 & dfd \operatorname{sen}\theta_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{IV.1}$$

Después de resolver las matrices independientes, se obtuvo la matriz de transformación homogénea  $4 \times 4$ , que describe la relación entre el sistema de coordenadas de cada eslabón con respecto al sistema de coordenadas previo, como lo indica la ecuación IV.2.

$${}^0A_4 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 \cos\theta_{234} & -\cos\theta_1 \operatorname{sen}\theta_{234} & \operatorname{sen}\theta_1 & dfd \cos\theta_1 \cos\theta_{234} + dfm \cos\theta_1 \cos\theta_{23} + dfp \cos\theta_1 \cos\theta_2 \\ \operatorname{sen}\theta_1 \cos\theta_{234} & -\operatorname{sen}\theta_1 \operatorname{sen}\theta_{234} & -\cos\theta_1 & dfd \operatorname{sen}\theta_1 \cos\theta_{234} + dfm \operatorname{sen}\theta_1 \cos\theta_{23} + dfp \operatorname{sen}\theta_1 \cos\theta_2 \\ \operatorname{sen}\theta_{234} & s \cos\theta_{234} & 0 & dfd \operatorname{sen}\theta_{234} + dfm \operatorname{sen}\theta_{23} + dfp \operatorname{sen}\theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{IV.2}$$

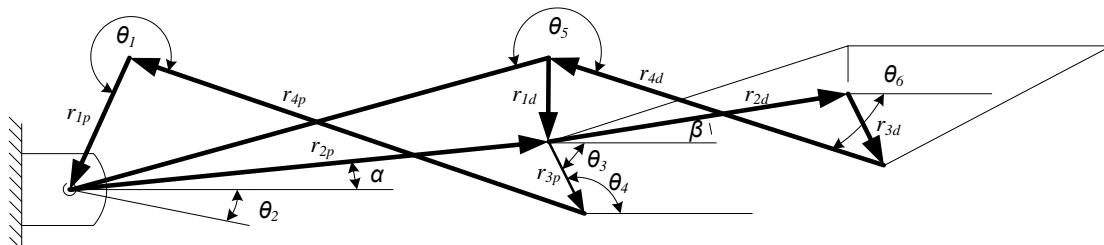
Al obtener la matriz de transformación homogénea se expresa la orientación y posición del extremo del manipulador en función de sus coordenadas articulares, con lo que se resuelve el problema cinemática directo. El problema cinemático inverso se resuelve para obtener los valores que deberán adoptar las coordenadas articulares del manipulador para que su extremo se oriente y posicione de acuerdo a una localización determinada.

Ya habiendo determinado la cinemática del cuerpo, es necesario simplificar el problema estimado el mecanismo propuesto (Figura IV.10 A). Se entiende que son 2 eslabones con diferentes puntos fijos, por lo cual se pueden analizar de forma individual como un mecanismo de 4 barras (Figura IV.10 B).



**Figura IV.10.- A) Eslabones propuestos y B) representación de un mecanismo de 4 barras [II.4]**

Para poder analizar los eslabones propuestos es necesario realizar un diagrama correspondiente que muestre de forma vectorial el comportamiento de los elementos y distancias requeridas (Figura IV.11).



**Figura IV.11.- Diagrama vectorial del dedo índice [II.4]**

Asimismo, el diagrama vectorial debe descomponerse en dos mecanismos independientes, es decir, debe analizarse de forma independiente cada uno de los eslabones internos del dedo realizando un estudio basado en un mecanismo de cuatro barras que conforman el dedo (Figura IV.12).

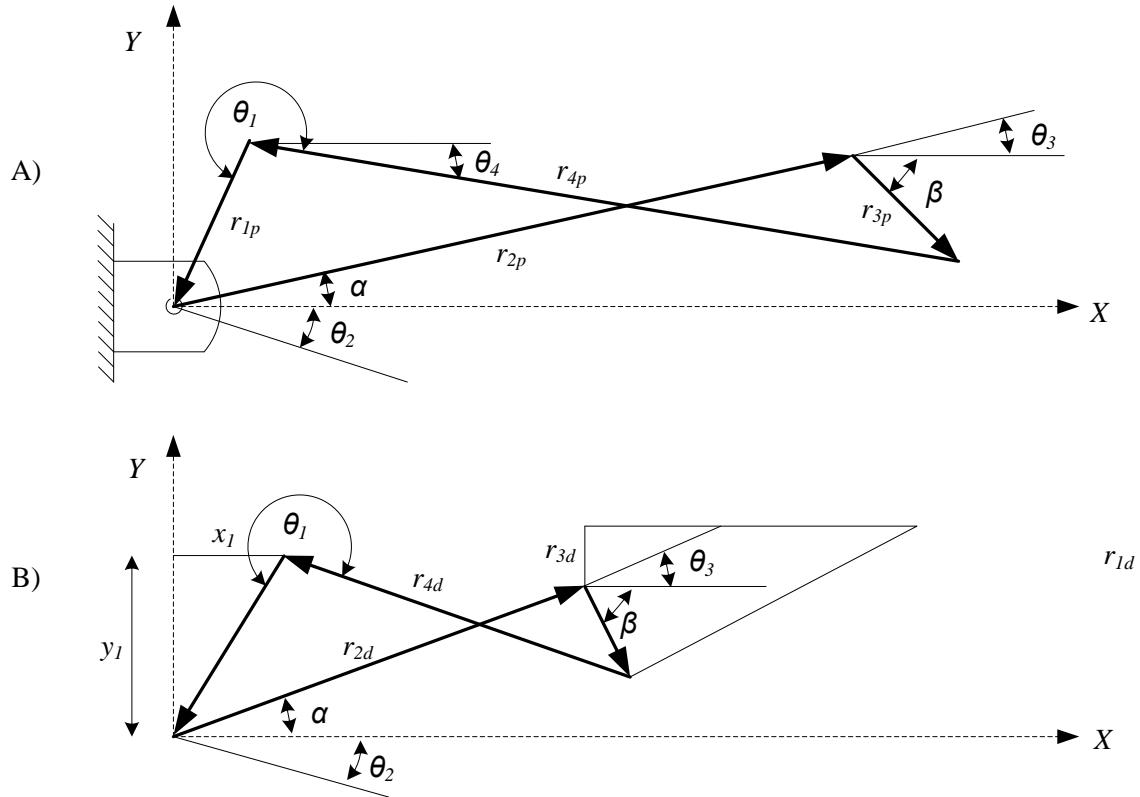


Figura IV.12.- Diagrama vectorial: A) Eslabón proximal y B) eslabón distal [II.4]

Es preciso encontrar las dimensiones de un elemento que gire y tenga un movimiento alternativo, según la función del tiempo, o bien, una función del movimiento de entrada específica; esto se conoce como generación de función. Para ello, se sintetizó el eslabonamiento de cuatro barras (Figura IV.12 A) para generar la función  $y = f(x)$ , en este caso,  $x$  representa el movimiento de la manivela de entrada y el eslabonamiento se diseñó de tal modo que el movimiento del oscilador de salida sea una aproximación de  $y$ .

Lo anterior se resolvió utilizando el espaciamiento de *Chebychev*, que consiste en seleccionar un conjunto de puntos de precisión para utilizarlos en la síntesis cinemática, de tal modo que se minimice el error estructural. Considerando que  $\theta_2$  y  $\theta_4$  son las posiciones angulares de los eslabones 2 y 4 respectivamente en el mecanismo de cuatro barras; hay que especificar 10 puntos de  $x$  que se encuentren en el intervalo  $0 \leq x \leq 1$ , con el

fin de encontrar un mecanismo que pueda satisfacer la relación deseada para la función. La ecuación de *Chebychev* es:

$$x_j = \frac{1}{2}(x_0 + x_{n+1}) - \frac{1}{2}(x_{n+1} - x_0) \cos\left(\frac{\pi(2_j - 1)}{2N}\right) \quad (\text{IV.3})$$

Donde  $N=21$  puntos de precisión y es  $j=1, 2, 3, \dots, n$ . Si  $\theta_2$  es la posición angular del eslabón  $r_2$  en un eslabonamiento de cuatro barras, y  $\theta_4$  es la posición angular del eslabón  $r_4$ , de tal forma que:

$$\theta_4 = f(\theta_2) \quad (\text{IV.4})$$

En donde  $f$  es cualquier relación funcional deseada, para este caso es  $y = e^x$ . Con este espaciamiento propuesto, es posible identificar los 21 puntos de precisión para  $\theta_2$  y así encontrar un eslabonamiento que satisfaga la relación deseada para la síntesis; aunque es posible que existan desviaciones en otros puntos, conocidas con el nombre de errores estructurales.

Por tal motivo, conviene destacar que el espaciamiento de *Chebychev* es solo una primera aproximación y ya que se requiere una exactitud adicional, entonces se define una curva del error estructural contra  $x$ , por lo común se pueden determinar visualmente los ajustes que se deben hacer en los puntos de precisión para la aproximación siguiente [II.4], tal es el caso del método descrito por *Freudenstein*.

Para formular la ecuación de diseño de *Freudenstein* para la condición de cadena cinemática abierta se expresa como:

$$x_d = x_1 + r_2 \cos(\theta_2 + \beta) + r_5 \cos \theta_3 \quad (\text{IV.5})$$

$$y_d = y_1 + r_2 \sin(\theta_2 + \beta) + r_5 \sin \theta_3 \quad (\text{IV.6})$$

Despejando  $r_5$  y elevando al cuadrado las expresiones IV.5 y IV.6 se tiene:

$$(r_5 \cos \theta_3)^2 = (x_d - x_1 - r_2 \cos(\theta_2 + \beta))^2 \quad (\text{IV.7})$$

$$(r_5 \sin \theta_3)^2 = (y_d - y_1 - r_2 \sin(\theta_2 + \beta))^2 \quad (\text{IV.8})$$

Sumando las expresiones IV.7 y IV.8 además de aplicar la identidad ( $\cos^2\theta + \sin^2\theta = 1$ ) se tiene que:

$$r_5^2 = (x_d - x_1 - r_2 \cos(\theta_2 + \beta))^2 + (y_d - y_1 - r_2 \sin(\theta_2 + \beta))^2 \quad (\text{IV.9})$$

De la ecuación IV.9 se puede establecer la función que resuelve la ecuación cinemática de la cadena abierta que se establece como sigue:

$$F = (x_d - x_1 - r_2 \cos(\theta_2 + \beta))^2 + (y_d - y_1 - r_2 \sin(\theta_2 + \beta))^2 - r_5^2 \quad (\text{IV.10})$$

De forma similar, se realizó la deducción para obtener las ecuaciones para la cadena cerrada. De acuerdo a la Figura IV.7 se tiene que:

$$r_2 \cos(\theta_2 + \beta) + r_3 \cos(\theta_3 - \alpha) = (x_2 - x_1) + r_4 \cos \theta_4 \quad (\text{IV.11})$$

$$r_2 \sin(\theta_2 + \beta) + r_3 \sin(\theta_3 - \alpha) = (y_2 - y_1) + r_4 \sin \theta_4 \quad (\text{IV.12})$$

Despejando  $r_4$  y elevando al cuadrado las ecuaciones IV.11 y IV.12 se tiene que:

$$(r_4 \cos \theta_4)^2 = (r_2 \cos(\theta_2 + \beta) + r_3 \cos(\theta_3 - \alpha) - (x_2 - x_1))^2 \quad (\text{IV.13})$$

$$(r_4 \sin \theta_4)^2 = (r_2 \sin(\theta_2 + \beta) + r_3 \sin(\theta_3 - \alpha) - (y_2 - y_1))^2 \quad (\text{IV.14})$$

Posteriormente, se suman las ecuaciones IV.13 y IV.14 para obtener la ecuación cinemática de cadena cerrada como sigue:

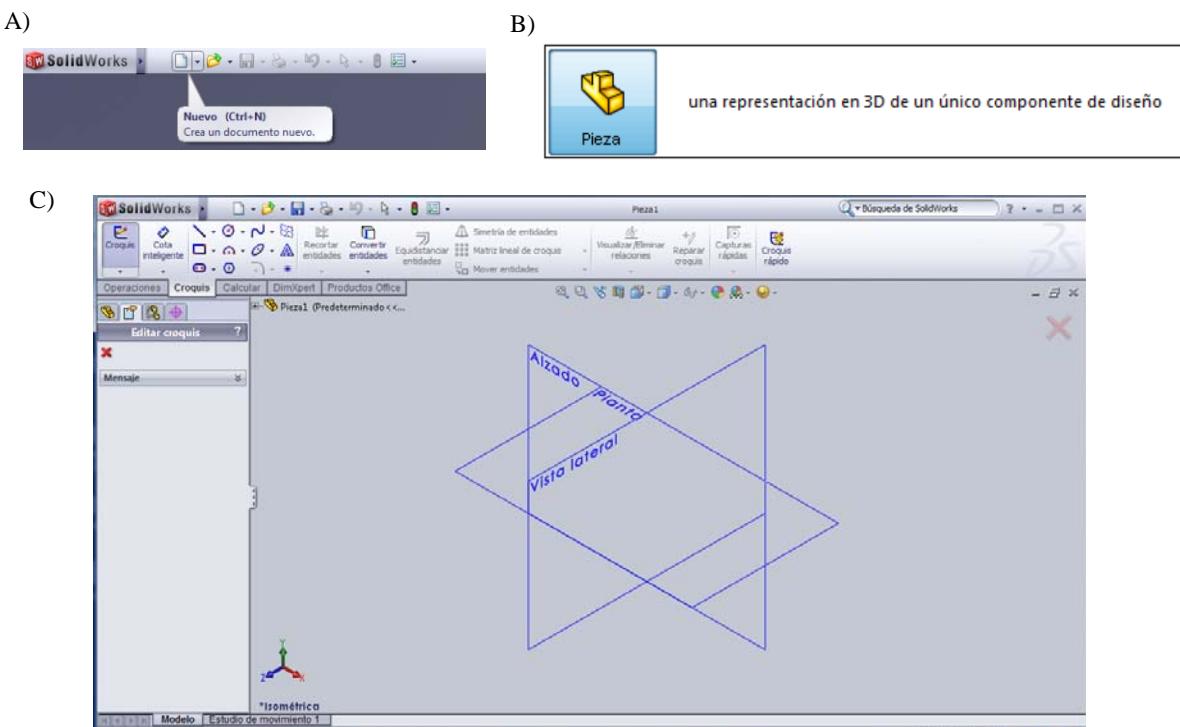
$$r_4^2 = (r_2 \cos(\theta_2 + \beta) + r_3 \cos(\theta_3 - \alpha) - (x_2 - x_1))^2 + (r_2 \sin(\theta_2 + \beta) + r_3 \sin(\theta_3 - \alpha) - (y_2 - y_1))^2 \quad (\text{IV.15})$$

Una vez obtenidas las funciones de cadena abierta y cerrada respectivamente, se deben obtener los valores correspondientes para formar un sistema de 22 ecuaciones con 5 incógnitas en cada caso, esto es, un conjunto de ecuaciones simultaneas no lineales que contienen la información que se desea que el mecanismo satisfaga. Para resolver el conjunto de ecuaciones se usa el Método Numérico *de Newton – Raphson*.

En el Anexo 2, se presenta el programa desarrollado en *Matlab®* para la solución del espaciamiento de *Chebychev* y las ecuaciones de *Freudenstein* de la cadena cinemática abierta y cerrada respectivamente, correspondiente al eslabón de la Figura IV.10 B.

#### IV.3.- Metodología del modelado

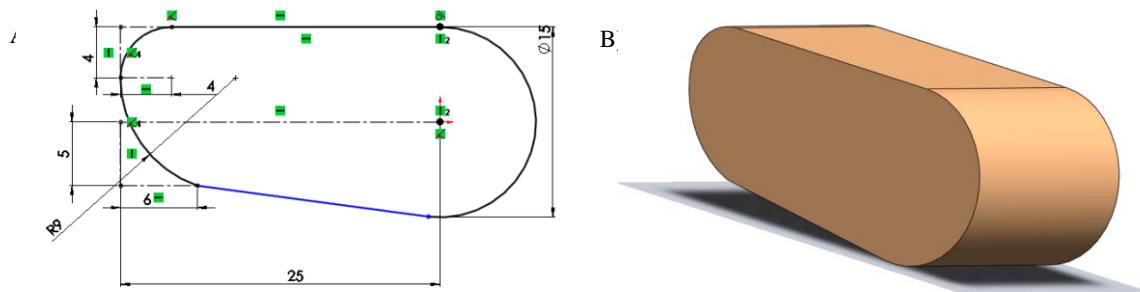
El programa utilizado para generar un modelo tridimensional fue *Solidworks® 2010*, plataforma que integra un gran número de funciones avanzadas para facilitar el modelado de piezas, ensambles, planos y otras funcionalidades que le permiten validar, gestionar y comunicar proyectos de forma rápida, precisa y fiable [IV.6]. Asimismo, este programa permite la exportación e importación de modelos con extensión *IGES (Initial Graphics Exchange Specification)* y *STL (estereolitografía)*, extensiones que definen un formato neutral de datos para el intercambio digital de información entre sistemas de diseño asistido por computadora CAD. Descrito lo anterior, se procedió a realizar el modelo de los componentes, dando inicio con abrir un documento nuevo en el programa (Figura IV.13 A), posteriormente, se debe seleccionar la representación gráfica que desea elaborarse, para este caso se selecciona la opción de *pieza* (Figura IV .13 B). A continuación, se elige el plano de trabajo, con el propósito de tener comodidad visual al momento de modelar la pieza.



**Figura IV.11.-** A) Creación de un documento, B) Representación y C) Plano de trabajo

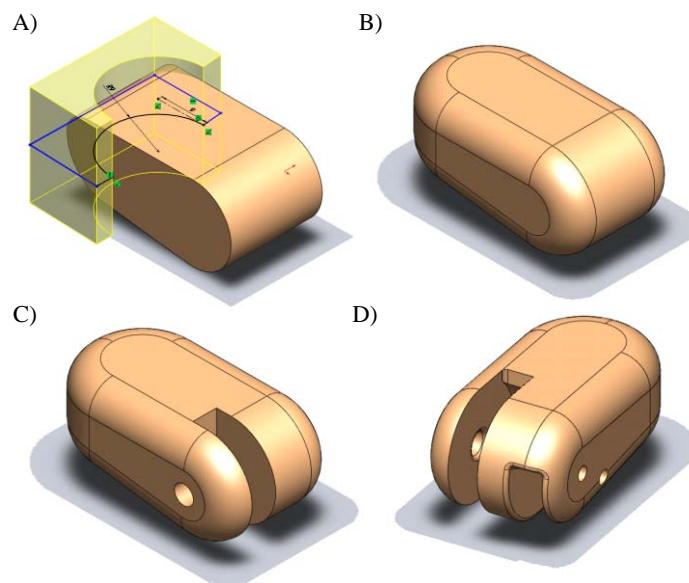
#### IV.3.1.- Falange Distal

Dadas las dimensiones de la pieza a modelar, se procedió a desarrollar un croquis primario desde una vista lateral de la falange (Figura IV.14 A), que posteriormente se extruiría para formar un contorno tridimensional en base a las especificaciones propuestas (Figura IV.14 B).



**Figura IV.14.- Trazado de falange distal**

Una vez obtenido el sólido primario, se continuó dando forma en la parte superior de la falange mediante una serie de cortes y redondeos. El primero de ellos, da forma a la parte superior del dedo (Figura IV.15 A), posteriormente se realizó un redondeo en las esquinas con radio de 4 mm (Figura IV.15 B). Asimismo, se hizo el barrenado y seccionados correspondientes que servirán para adaptar una flecha que tiene como objetivo funcionar como articulación (Figura IV.15 C). De igual forma, se continuó con el seccionado del lugar donde será adaptada la barra de transmisión, además de un orificio para guiar su trayectoria (Figura IV.15 D).

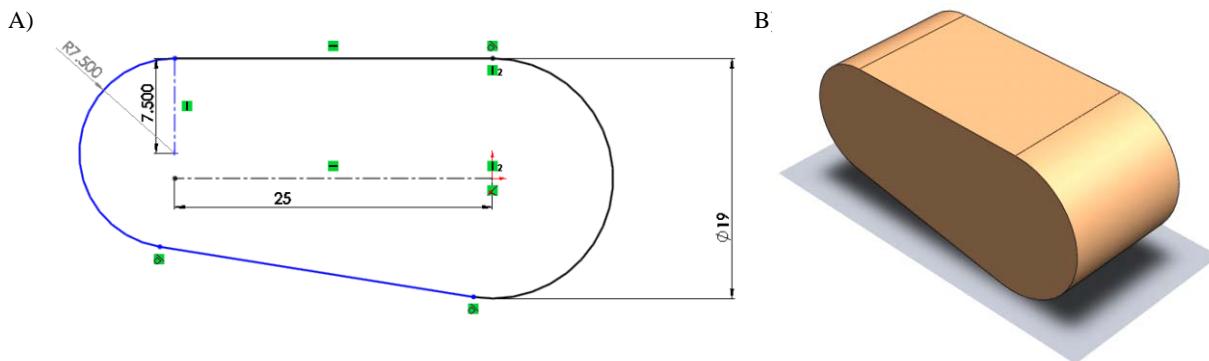


**Figura IV.15.- A) Extruido, B) Redondeo, C) Corte para articulación y D) Pieza final**

Es relevante mencionar que todos los cortes y extruidos fueron obtenidos mediante geometría básica, además de utilizar técnicas de redondeo para eliminar ejes rectos entre los cortes del modelo. La representación de la falange distal se puede ver a detalle en el Anexo 3.

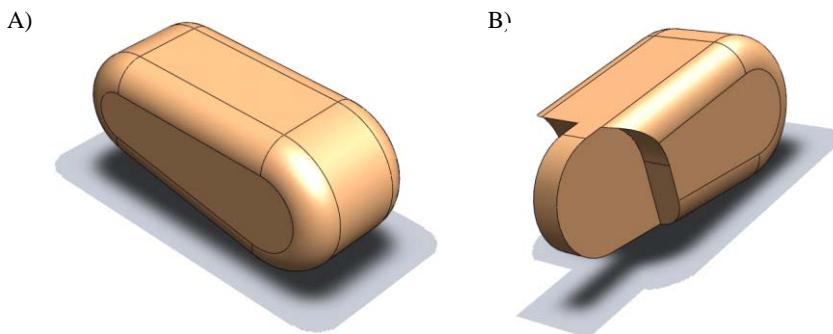
#### IV.3.2.- Falange Media

Para el modelado de la falange media, se repite la forma en que se genera el documento nuevo y dadas las dimensiones de la pieza a modelar, se procedió a desarrollar un croquis primario desde una vista lateral de la falange media (Figura IV.16 A), que posteriormente se extruiría para formar un contorno tridimensional en base a las especificaciones propuestas (Figura IV.16 B).



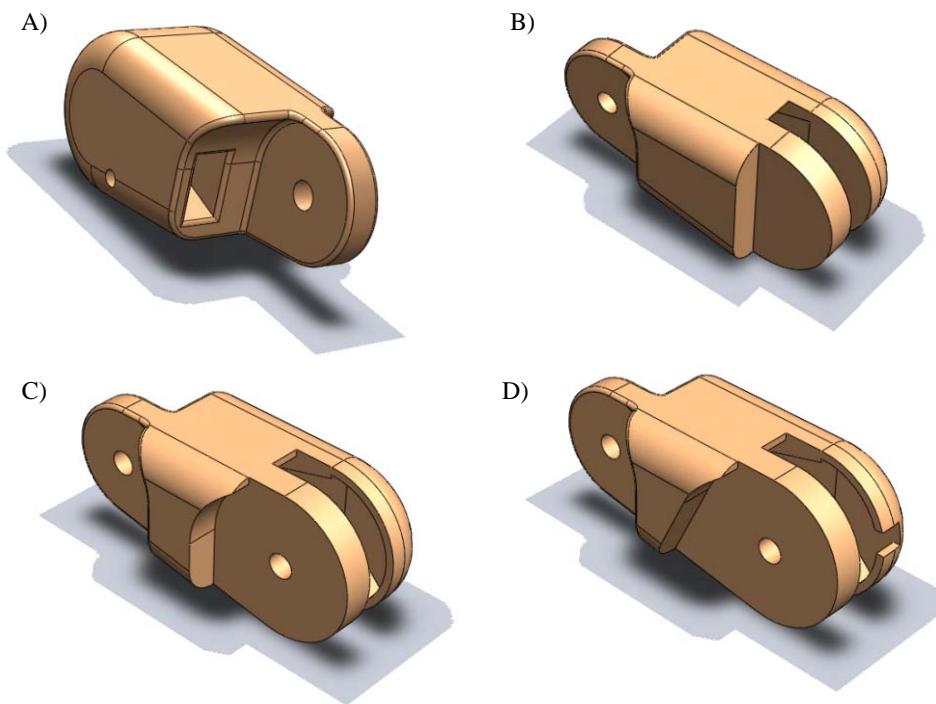
**Figura IV.16.- Trazado de la falange media**

Una vez obtenido el sólido primario, se dio forma a la falange media realizando una serie de cortes, extruidos y redondeos. El primer redondeo se aplicó a los contornos laterales de la falange (Figura IV.17 A), posteriormente se realizó una serie de cortes para adaptar la falange distal (Figura IV.17 B). Asimismo, se desarrolló el barrenó y seccionados correspondientes que servirán para adaptar una flecha que tiene como objetivo funcionar como articulación.



**Figura IV.17.- Estructura primaria de la falange media**

De igual forma, se continuó con el seccionado del lugar donde será adaptada la barra de transmisión, además de un orificio para guiar su trayectoria (Figura IV.18 A). Posteriormente, se desarrollaron los cortes requeridos para adaptar este modelo con el siguiente, el cual sería la falange proximal. Se comenzó con seccionar 2 espacios para adaptarse al siguiente modelo (Figura IV.18 B). Se prosiguió con el corte para introducir la flecha correspondiente (Figura IV.18 C) y finalmente una serie de cortes y extruidos para dar forma al espacio requerido por la barra de trasmisión (Figura IV.18 D).

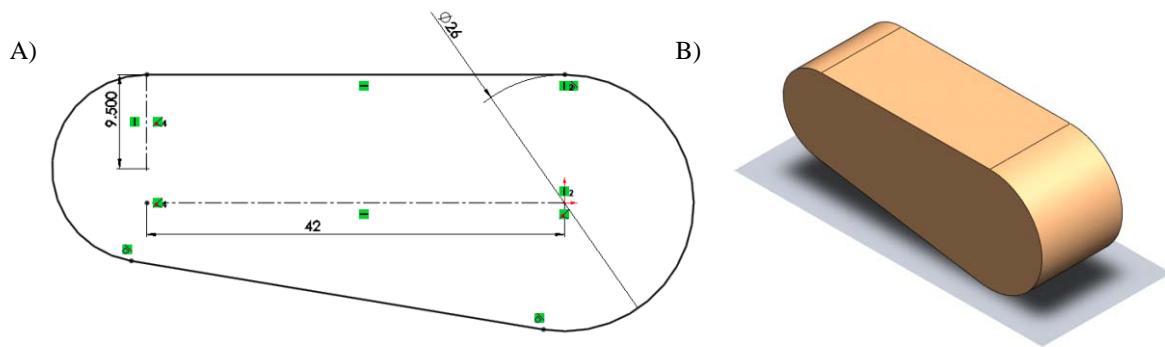


**Figura IV.18.**- Modelado de la falange media

La representación de la Ingeniería de detalle de la falange media se puede ver en un desglose más amplio en el Anexo 3.

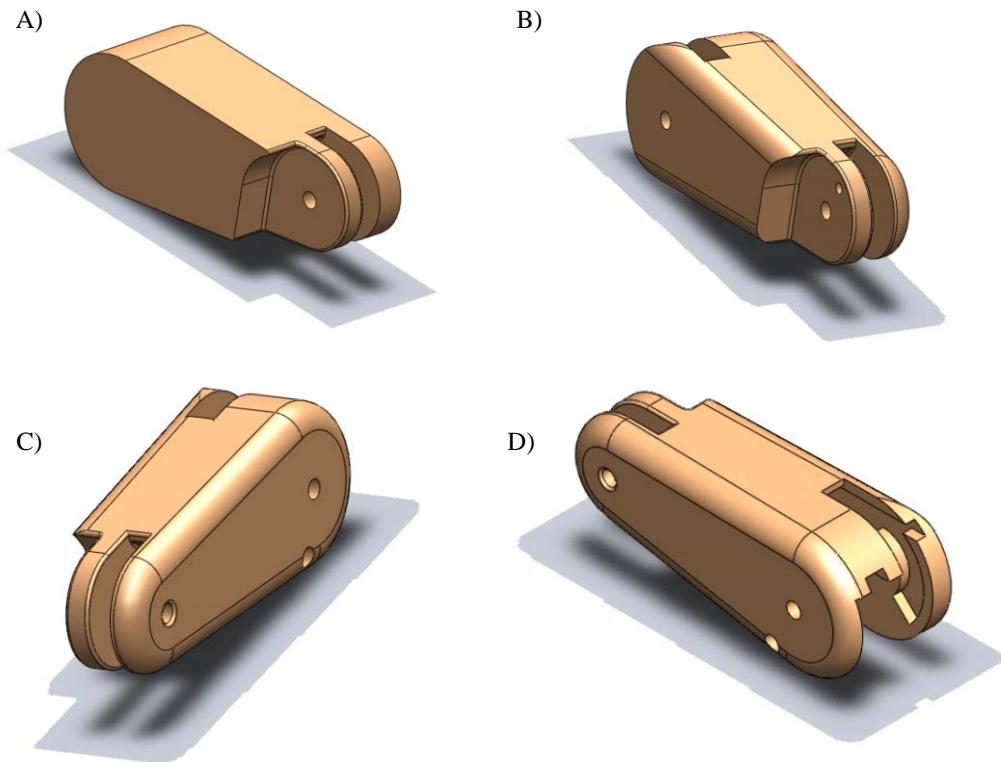
#### IV.3.3.- Falange Proximal

Dadas las dimensiones de la pieza a modelar, se procedió a desarrollar un croquis primario desde una vista lateral de la falange media (Figura IV.19 A), que posteriormente se extruiría para formar un contorno tridimensional en base a las especificaciones propuestas (Figura IV.19 B).



**Figura IV.19.-** Trazado de la falange proximal

Una vez obtenido el sólido primario, se procedió a dar forma como en las falanges anteriores, esto mediante una serie de cortes, extruidos y redondeos. La primer sección de cortes y barrenos se enfoca a las dimensiones de la articulación IF (Figura IV.20 A). Posteriormente se aplica a los contornos laterales de la falange y seccionar la parte adaptable a la articulación MCF (Figura IV.20 B). Prosigue con realizar una serie de cortes para adaptar la barra de transmisión (Figura IV.20 C) y por último, se realizó el barreno y seccionados correspondientes que servirán para adaptar un disco dentado en su sección lateral (Figura IV.20 D), además de la flecha que tiene como objetivo funcionar como articulación.

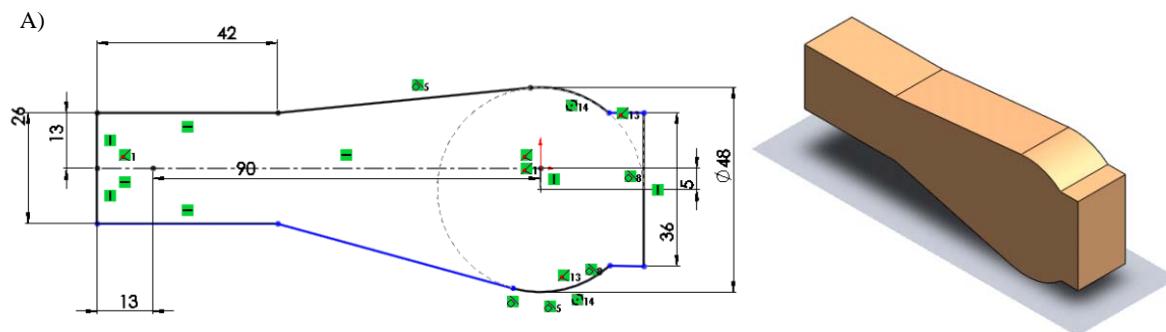


**Figura IV.20.-** Cortes y seccionado de la falange proximal

La representación de la Ingeniería de detalle de la falange proximal se puede ver en un desglose más amplio en el Anexo 3. Asimismo, es importante resaltar, que el modelado tridimensional de cada dedo se realizó siguiendo los pasos aquí mostrados, evidentemente con dimensiones, seccionados y extruidos de diferente magnitud.

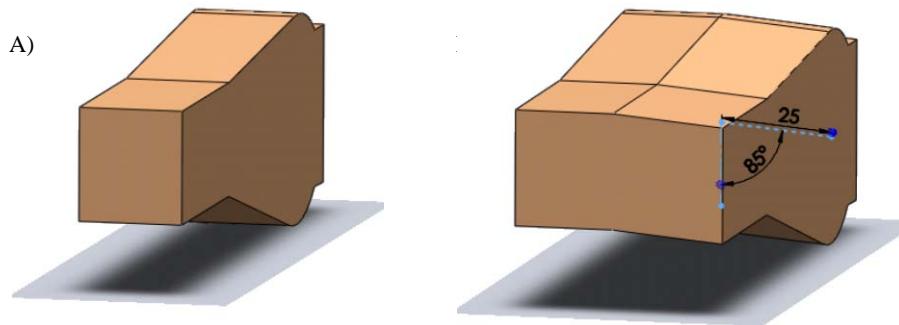
#### IV.3.4.- Palma

Para el modelado de la palma, se repitió el paso uno del inciso IV.3.1, y dadas las dimensiones de la pieza a modelar, se procedió a desarrollar un croquis primario desde una vista lateral a partir de la articulación MCF del dedo medio (Figura IV.21 A), que posteriormente se extruiría para formar un contorno tridimensional en base a las especificaciones propuestas (Figura IV.21 B).



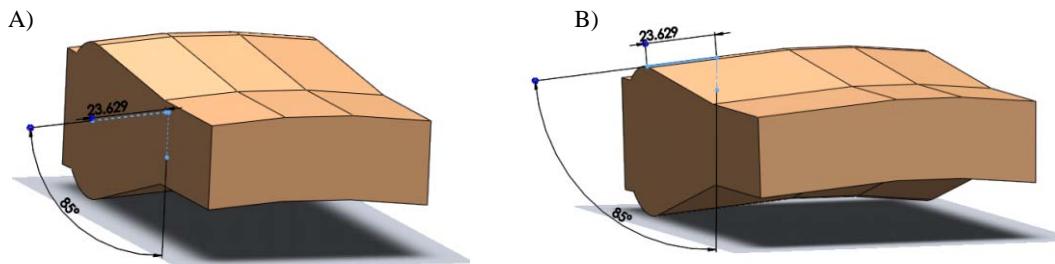
**Figura IV.21.- Trazado de la palma**

Una vez obtenido el sólido primario (Figura IV.22 A), este sirve como punto de referencia para obtener los demás extruidos, por consiguiente se procedió a dar forma al contorno de la palma mediante una serie de extruidos sólidos para formar completamente el modelo. En primera instancia se obtuvo el extruido que funge como articulación del dedo índice (Figura IV.22 B), lo anterior apegado al arco de los metacarpianos.



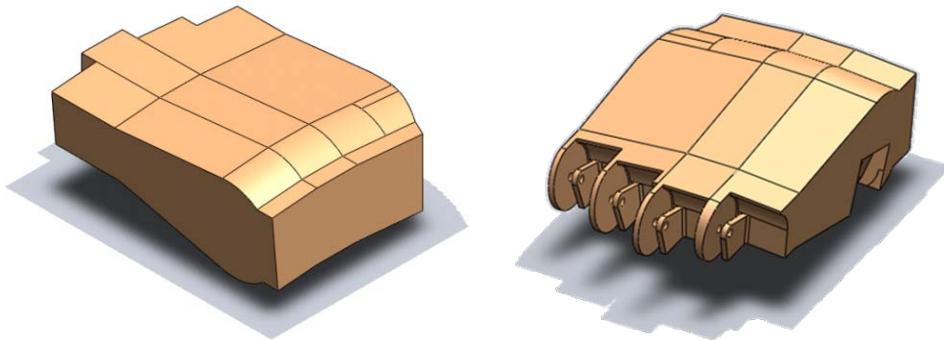
**Figura IV.22.- Construcción de la palma: A) Dedo medio y B) Dedo índice**

Posteriormente se realizaron los extruidos para obtener las articulaciones MCF de los dedos anular (Figura IV.23 A) y meñique respectivamente (Figura IV.23 B), esto mediante una serie de cortes y extruidos.



**Figura IV.23.-** Construcción de la palma: A) Dedo anular y B) Dedo meñique

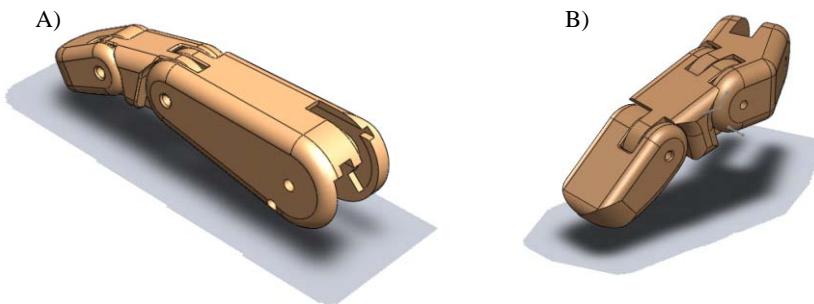
Después de generar el sólido de la palma, la primera sección de cortes y barrenos se enfoca a obtener los espacios correspondientes para adaptar cada uno de los dedos, acorde al arco palmar formado por las articulaciones MCF (Figura IV.24).



**Figura IV.24.-** Cortes y seccionado de la palma

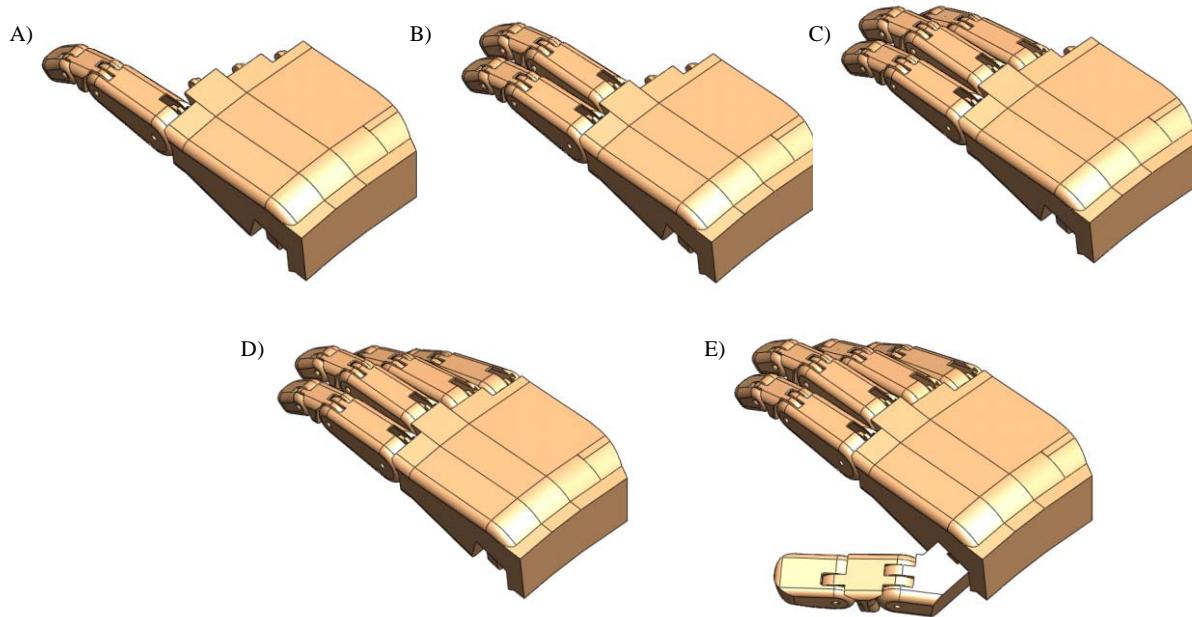
#### IV.3.5.- Ensamble completo

Habiendo realizado el modelado de todas las partes, se procedió a unir cada modelo independiente que se tiene del diseño, dando inicio con los dedos índice y pulgar respectivamente (Figura IV.25).



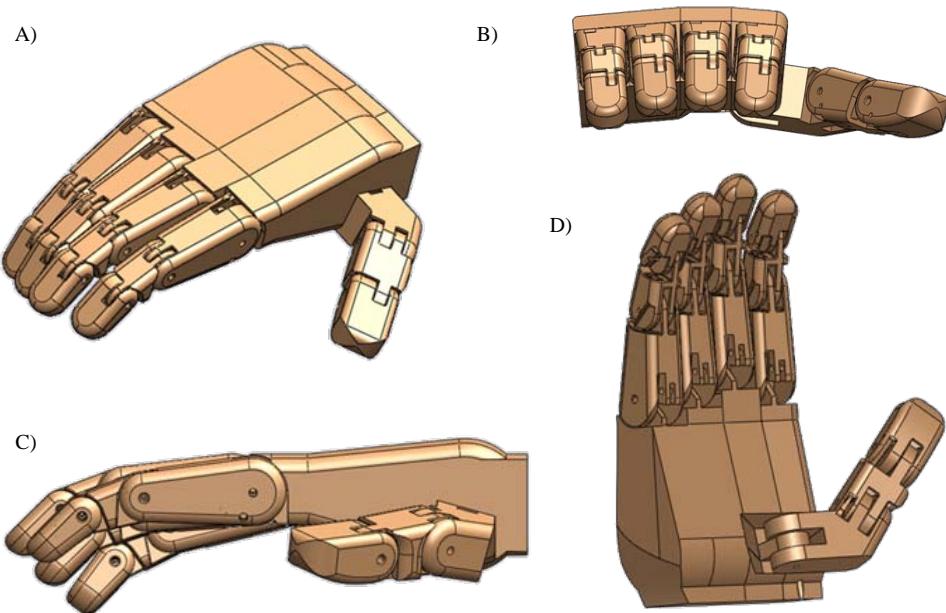
**Figura IV.25.-** Ensamble de los dedos A) Índice y B) Pulgar

De igual forma, se insertaron los dedos en la palma uno a uno, comenzando con el dedo índice (Figura IV.26 A), medio (Figura IV.26 B), anular (Figura IV.26 C), meñique (Figura IV.26 D) y por último el dedo pulgar (Figura IV.26 E).



**Figura IV.26.-** Ensamble de los dedos en la palma

Así da por finalizado el proceso de modelado del prototipo (Figura IV.27), donde hasta este punto se conservan dimensiones y simetría adecuada de acuerdo a lo establecido en la metodología de diseño.



**Figura IV.27.-** Vistas del prototipo: A) Dorsal, B) Transversal, C) Lateral y D) Palmar

#### IV.4.- Implementación del prototipo

Para el desarrollo del prototipo se optó por utilizar una impresión tridimensional a partir de un código numérico. Esta es una herramienta muy útil ya que esta técnica proporciona modelos a tamaño real y escala que dan una mejor idea de las características y visión a cerca de los dispositivos diseñados en un modelo CAD [IV.7].

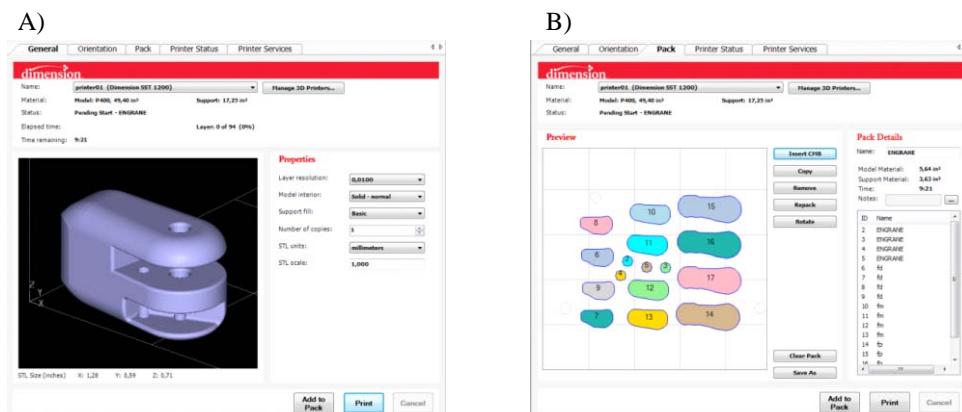
##### IV.4.1.- Impresión tridimensional

Para la impresión tridimensional, el procedimiento consistió en realizar una copia del despiece completo de los componentes y guardarla en formato *STL* que es usado por el programa *Catalyst ex* ® versión 3.0, como interfaz para comunicarse con la impresora tridimensional *Dimension sst1200* ® (Figura IV.28).



**Figura IV.28.-** Proceso para obtener impresiones tridimensionales

Después de generar los archivos en formato *STL*, estos fueron enviados uno a uno al programa de impresión (Figura IV.29 A). Posteriormente se acomodaron en el espacio delimitado por el programa que ofrece una vista lateral del espacio entre piezas así como información de la cantidad de material a utilizar y tiempo de impresión (Figura IV.29 B).



**Figura IV.29.-** A) Incorporación de piezas y B) Acomodo de piezas

Ya generado el archivo adecuado, y posteriormente el envío al programa de impresión, se ejecutó la orden para comenzar la construcción de los modelos. Después de transcurrir un tiempo total de 18 horas en 3 sesiones de impresión (Figura IV.30), las piezas fueron retiradas de la impresora y puestas en una solución para retirar el material de soporte.

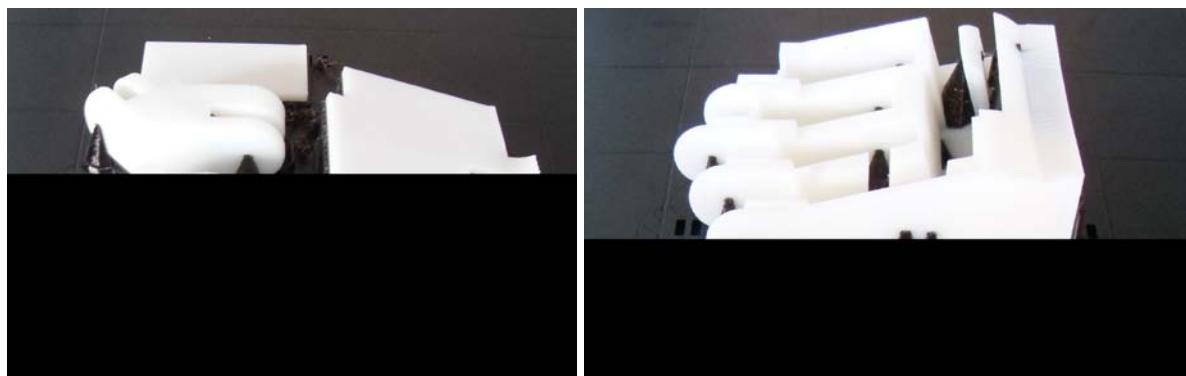
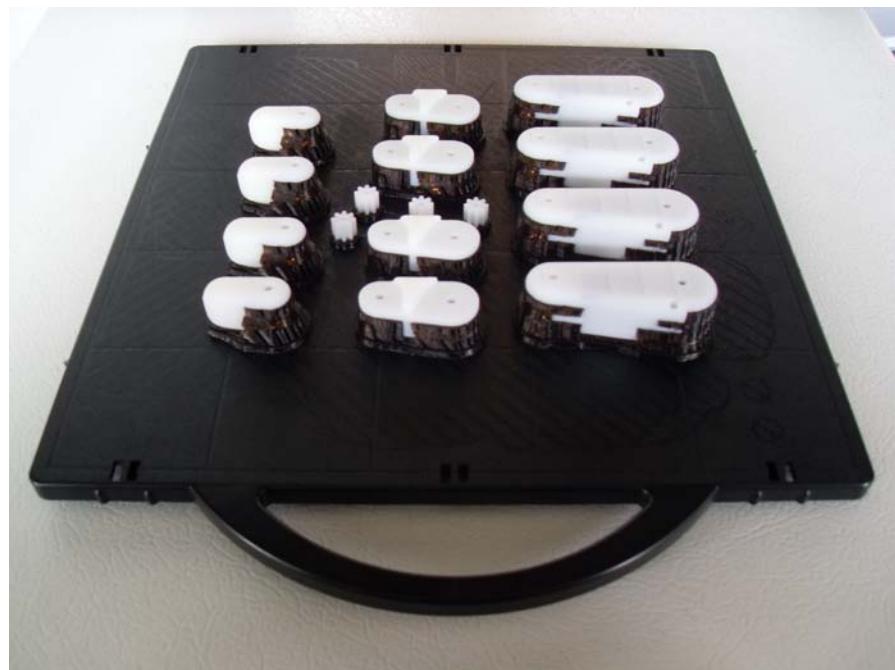
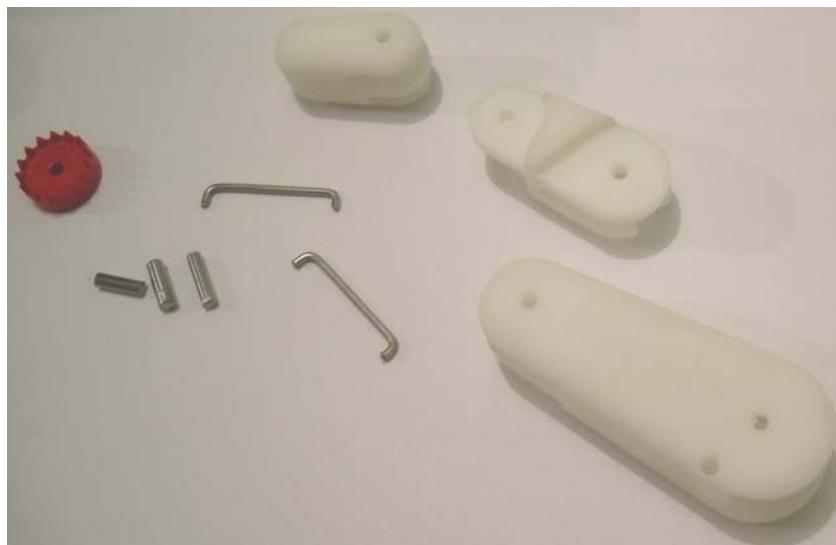


Figura IV.30.- Piezas construidas

La tecnología de diseño tridimensional es una herramienta que se vuelve relevante ya que permite construir piezas a detalle de forma eficaz y rápida. Hasta este momento, se ha generado el modelo completo del prototipo diseñado, ahora se debe continuar con el ensamblaje del dispositivo incorporando los motores seleccionados y el sistema embebido, así como las conexiones requeridas por cada uno de los elementos a utilizar.

#### IV.4.2.- Ensamble de los componentes

Ya con la impresión tridimensional de todas las piezas, se procedió a realizar el ensamblaje de todos los componentes. Donde la función esencial del proceso de ensamblaje es unir todas las partes entre sí con un orden específico para formar un conjunto o subconjunto completo; en este caso, el prototipo de mano robótica. Para el ensamblaje de un dedo sin tomar en cuenta los actuadores, incluye 2 barras de transmisión, 3 ejes, 3 falanges, y un engrane (Figura IV.31).



**Figura IV.31.-** Piezas para ensamblaje de los dedos

La unión de las partes se realizó en primera instancia uniendo las falanges para dar forma a los dedos uno a uno, insertando los ejes que fungirán como articulación, y posteriormente las barras de transmisión (eslabones del mecanismo) previamente calculados (Figura IV.32).



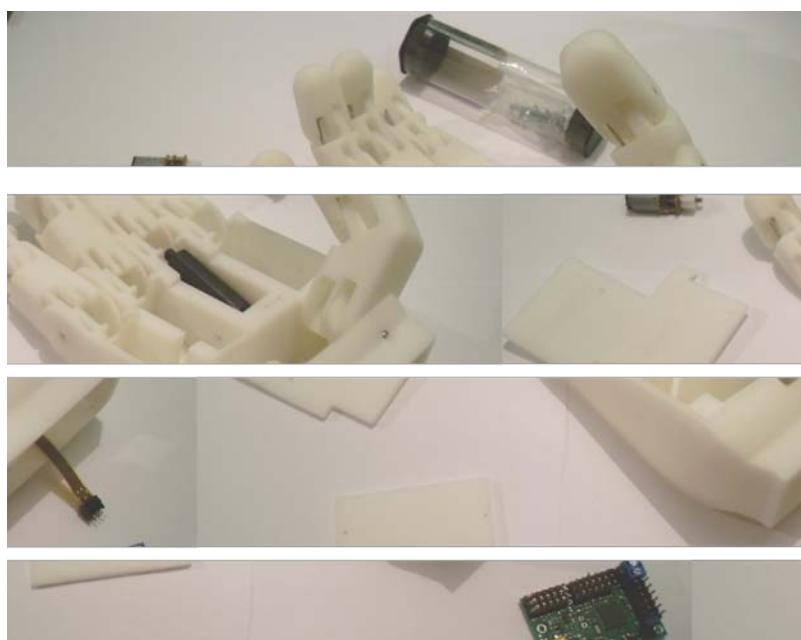
**Figura IV.32.-** Ensamble de un dedo

Después de introducir las barras de transmisión en la sección correspondiente para la generación de la trayectoria se procedió a insertar los motorreductores con el engrane conductor (Figura IV.33).



**Figura IV.33.**- Ensamble completo de los dedos

Previo a la instalación de los motorreductores, se realizó la conexión de los cables de alimentación, y después se insertaron en la falange proximal. Posteriormente se instaló el actuador correspondiente a cada falange y a su vez fue posicionado en la palma (Figura IV.34).



**Figura IV.34.**- Instalación de los actuadores lineales en la palma

Después, se instalaron todas las conexiones de alimentación correspondientes al sistema embebido que posteriormente se fijó en la parte inferior de la palma. Para finalizar el ensamblaje, se colocaron las tapas transversal y palmar en la sección correspondiente a cada una de ellas (Figura IV.35), con lo que se dio por terminado el acoplamiento de los componentes.



**Figura IV.35.-** Ensamble completo del prototipo

#### IV.5.- Sumario

El presente capítulo menciona la importancia sobre la generación de modelos tridimensionales a través de imágenes, las cuales se tornan importantes en aplicaciones de la Ingeniería o medicina y deben ser capaces de imitar exactamente las partes sólidas del cuerpo humano, y en este caso, con la principal función de generar trayectorias óptimas. Así también, se hace una descripción detallada de la generación del modelo de la mano robótica y su impresión tridimensional a tamaño real, siendo lo anterior un preámbulo para desarrollar pruebas correspondientes a cantidad de movimientos y sujeción de objetos.

En el siguiente capítulo se describe el análisis de resultados obtenidos del seguimiento de trayectorias en los dedos de la mano robótica, esto es la diversidad de movimientos que este puede ejecutar. Además, se desarrollan una serie de pruebas básicas para determinar parámetros en las principales formas de sujeción que puede desempeñar el dispositivo móvil.

**IV.6.- Referencias**

- 1.- Pfaeffle, J., Blankenhorn, B., Stabile, K., Imbriglia, J., Goitz, R. y Robertson, D., Development and validation of a computed tomography-based methodology to measure carpal kinematics, *Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 127, pp 541-548, 2005.
- 2.- Ruíz-Muñoz, E. R., Beltrán-Fernández, J. A., Rodríguez-Cañizo, R. G., Hernández-Gómez, L. H., Urriolagoitia-Sosa, G. y Urriolagoitia-Calderón, G., Técnicas de modelado en 3D aplicado a casos de vértebras porcinas por medio de un escáner 3D y tomografías, *XXV Congreso Nacional de Investigación Biomédica*, pp 1-10, 2009.
- 3.- Müller-Karger, C. M. y Cerrolaza, M., Un nuevo método para la simulación de la estructura ósea mediante la versión P de elementos finitos, *IMME*, Vol. 39, No.3, pp 23-54, 2001.
- 4.- Buroni, F. C., Commissio, P. E. y Cisilino, A. P., Determinación de las constantes elásticas anisótropas del tejido óseo utilizando tomografías computadas. Aplicación a la construcción de modelos de elementos finitos, *Mecánica Computacional* Vol. XXIII, pp 1-34, 2004.
- 5.- Ruíz-Muñoz, E .R., *Análisis de la estabilización segmentaria en especímenes de columna lumbar porcina (L1-L5) con cerclaje interespinoso empleando un cinturón de poliamida 6/6*, Tesis de Maestría. ESIME IPN, México, pp 160-175. 2010.
- 6.- Torres-San Miguel, C. R., *Análisis de esfuerzos de una válvula introbronquial*, Tesis de Maestría, ESIME IPN, México, pp 51-60, 2006.
- 7.- Isaza, J. y Naranjo, M., Prototipaje rápido de estructuras craneofaciales, *Ingeniería y Ciencia*, Vol. 4, No 8, pp 27-43, 2008.

# V

## Análisis de resultados

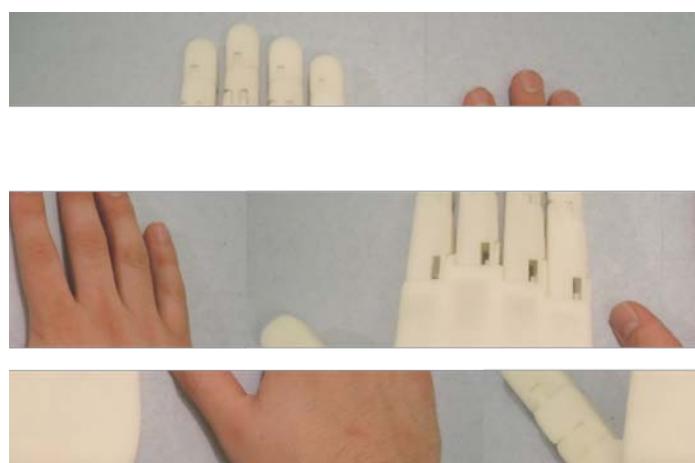
En esta sección se presentan los resultados correspondientes a la síntesis del mecanismo para verificar la trayectoria así como la simulación del modelo y prototipo descritos en el capítulo anterior. Además, se determina si el dispositivo emula satisfactoriamente ciertos movimientos de la mano.

## V.- Análisis de Resultados

En este trabajo se presentó la evolución y estado actual de prótesis y dispositivos robóticos de mano, así como una recopilación de los trabajos más destacados en las últimas décadas, además de la descripción anatómica, biomecánica y patológica de la mano; elementos relevantes para la comprensión de las funciones prensiles; empleadas en múltiples actividades donde se resalta la enorme complejidad que posee la estructura músculo-esquelética de la extremidad superior.

De igual forma, se estableció un método para implementar el prototipo a partir del acoplamiento de diversas herramientas y así obtener la clarificación de objetivos, establecer funciones, especificar requerimientos, determinar características, generar alternativas y seleccionar un esquema general con lo que se obtuvo el diseño conceptual de un sistema óptimo. El procesamiento de imágenes generadas a partir de una tomografía dio como resultado la obtención de dimensiones necesarias para plantear los parámetros iniciales del análisis cinemático.

Después, de obtener las dimensiones del prototipo, se obtuvo la cinemática directa e inversa utilizando los parámetros de *Denavit-Hartenberg*, los cuales resultaron en la representación de una matriz de transformación homogénea, expresándose así la orientación y posición del extremo de los eslabones en función de sus coordenadas articulares. Por otro lado, se obtuvieron los valores angulares que pueden adoptar las coordenadas articulares para que su extremo se posicione de acuerdo a un punto deseado. Lo descrito anteriormente, fue empleado para obtener un modelo tridimensional en CAD, para posteriormente implementarlo mediante estereolitografía, planteamiento base con lo que se obtuvo un prototipo con proporciones antropométricas (Figura V.1).

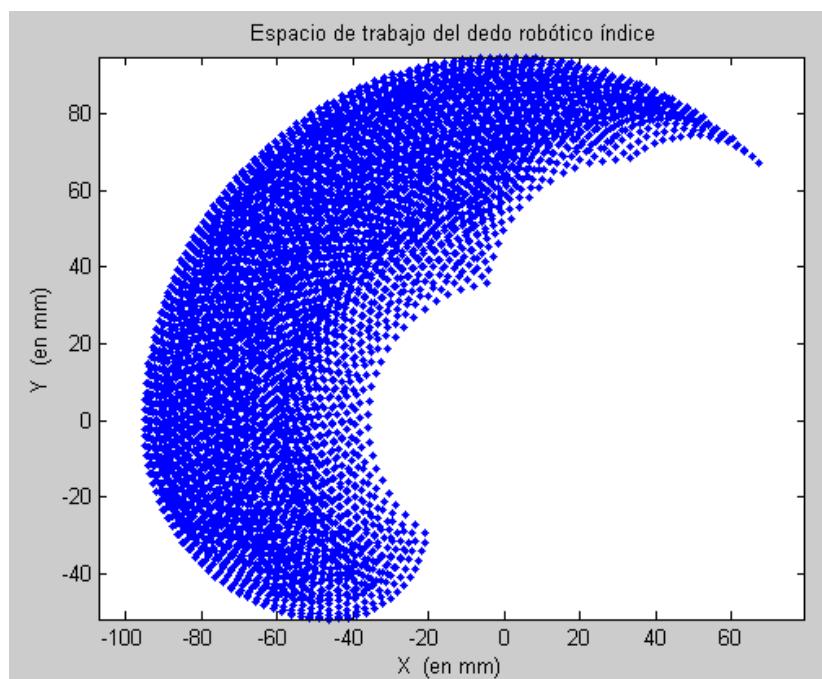


**Figura V.1.-** Prototipo de mano robótica

### V.1.- Estudio cinemático

Los dedos robóticos obtenidos conservan tres eslabones que se desempeñan como falanges: proximal, media y distal, respectivamente. Poseen 3 articulaciones e igual número de grados de libertad, a diferencia del pulgar que posee 2. El análisis cinemático, permitió obtener los parámetros representativos para sintetizar las barras de transmisión, donde uno de los puntos de mayor interés fue determinar el espacio de trabajo del modelo resultante, por lo que es necesario tener puntos de comparación con otros estudios referentes al movimiento de los mismos. Lo anterior permite validar la metodología utilizada para obtener la síntesis de mecanismos.

Con los datos obtenidos a partir de la cinemática, es posible determinar el espacio de trabajo descrito por el dispositivo en el desarrollo de este trabajo, con lo que se obtuvo en primera instancia, el espacio de trabajo del prototipo aquí propuesto (Figura V.2).



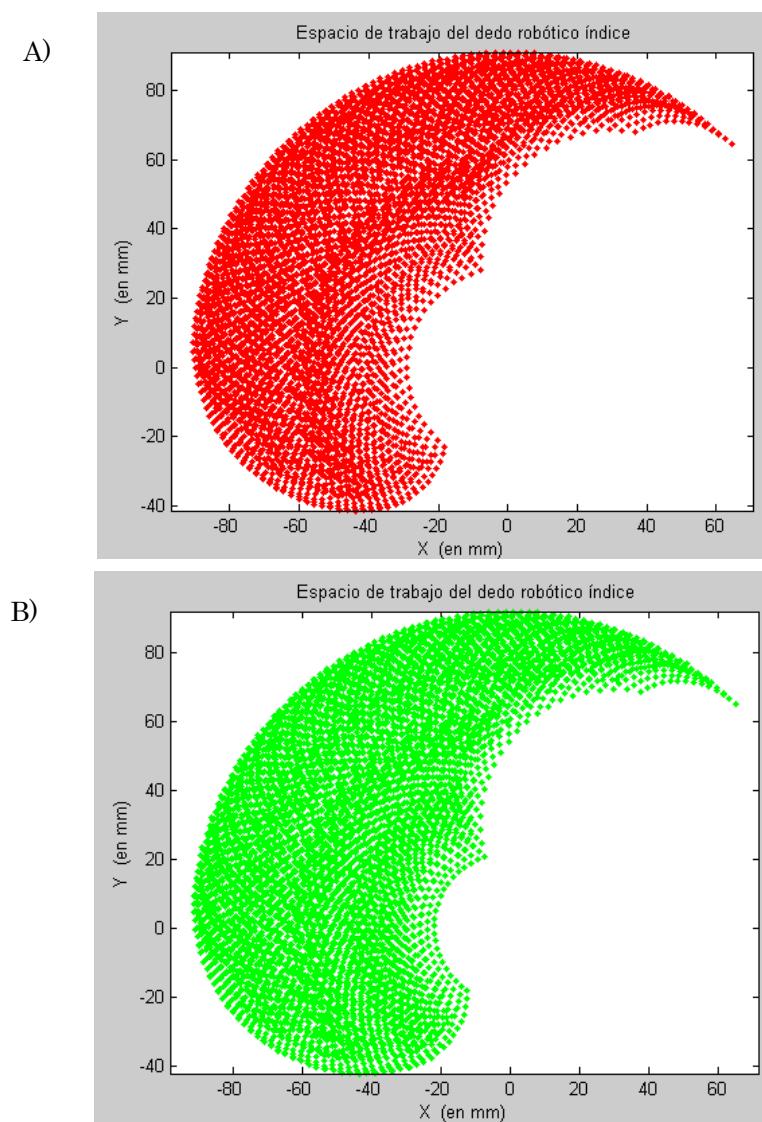
**Figura V.2.-** Espacio de trabajo del diseño obtenido

Como ya se mencionó, para validar la metodología utilizada en la síntesis del mecanismo, es indispensable tener puntos de comparación con otros estudios referentes al movimiento de los mismos. En la tabla V.1 se muestran los datos obtenidos de los trabajos desarrollados por *Figliolini, Lotti y Velázquez*, estudios con mayor relevancia, referente a la dimensión de mecanismos y dedos antropomorfos. Estos parámetros representan las dimensiones y rangos de movimiento del dedo índice.

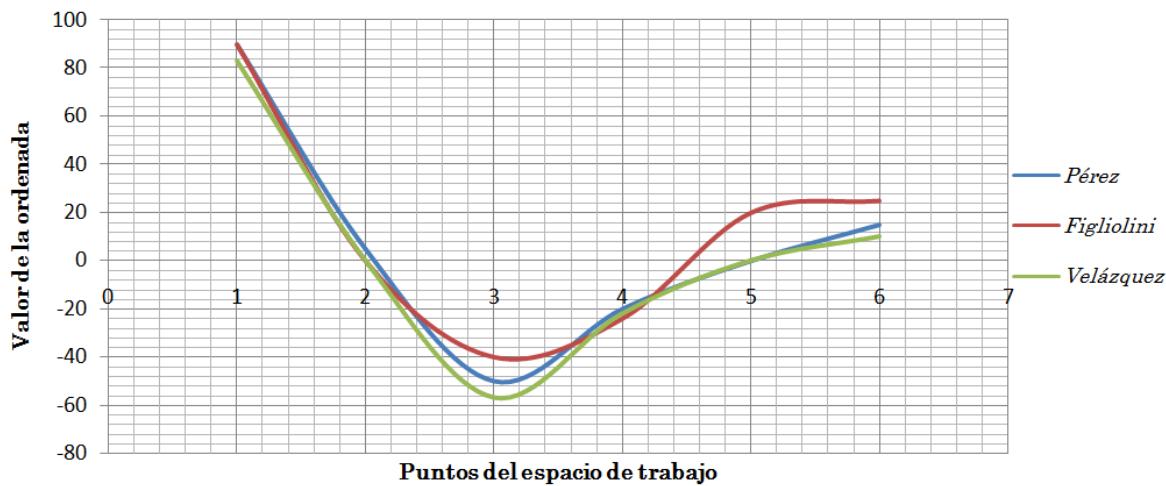
**Tabla V.1.- Comparación de rangos de movimiento en articulaciones [V.1, V.2 y II.4]**

<b>Parámetro</b>		<b>Proximal</b>	<b>Media</b>	<b>Distal</b>
<i>Figliolini</i>	Longitud	43 mm	25 mm	23 mm
	Ángulo	83°	105°	78°
<i>Lotti</i>	Longitud	43 mm	25 mm	23 mm
	Ángulo	83°	105°	78°
<i>Velázquez</i>	Longitud	43 mm	26 mm	23 mm
	Ángulo	98°	115°	78°
<i>Pérez</i>	Longitud	46 mm	25 mm	25 mm
	Ángulo	97°	100°	90°

Los espacios de trabajo obtenidos por la representación de *Figliolini* y *Lotti* se pueden observar a detalle en la Figura V.3 A, mientras que los resultados obtenidos por *Velázquez* pueden analizarse en la Figura V.3 B.

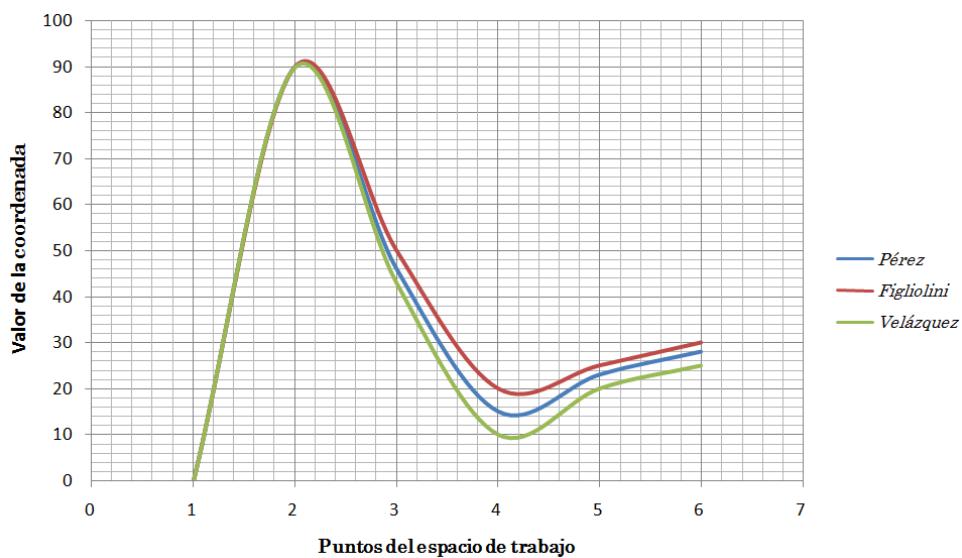
**Figura V.3.- Espacios de trabajo: A) *Figliolini* [V.1] y B) *Velázquez* [II.4]**

Es evidente que el espacio de trabajo presentado por estos científicos es muy similar al que se obtuvo en esta investigación. Por otra parte, de acuerdo a la gráfica que se presenta en la Figura V.4, existen pequeñas desviaciones entre los diferentes espacios de trabajo, esto se debe a la variación de la longitud de cada falange, sin dejar de considerar la destreza en el manejo del equipo y programas de cómputo para la obtención de estos datos.



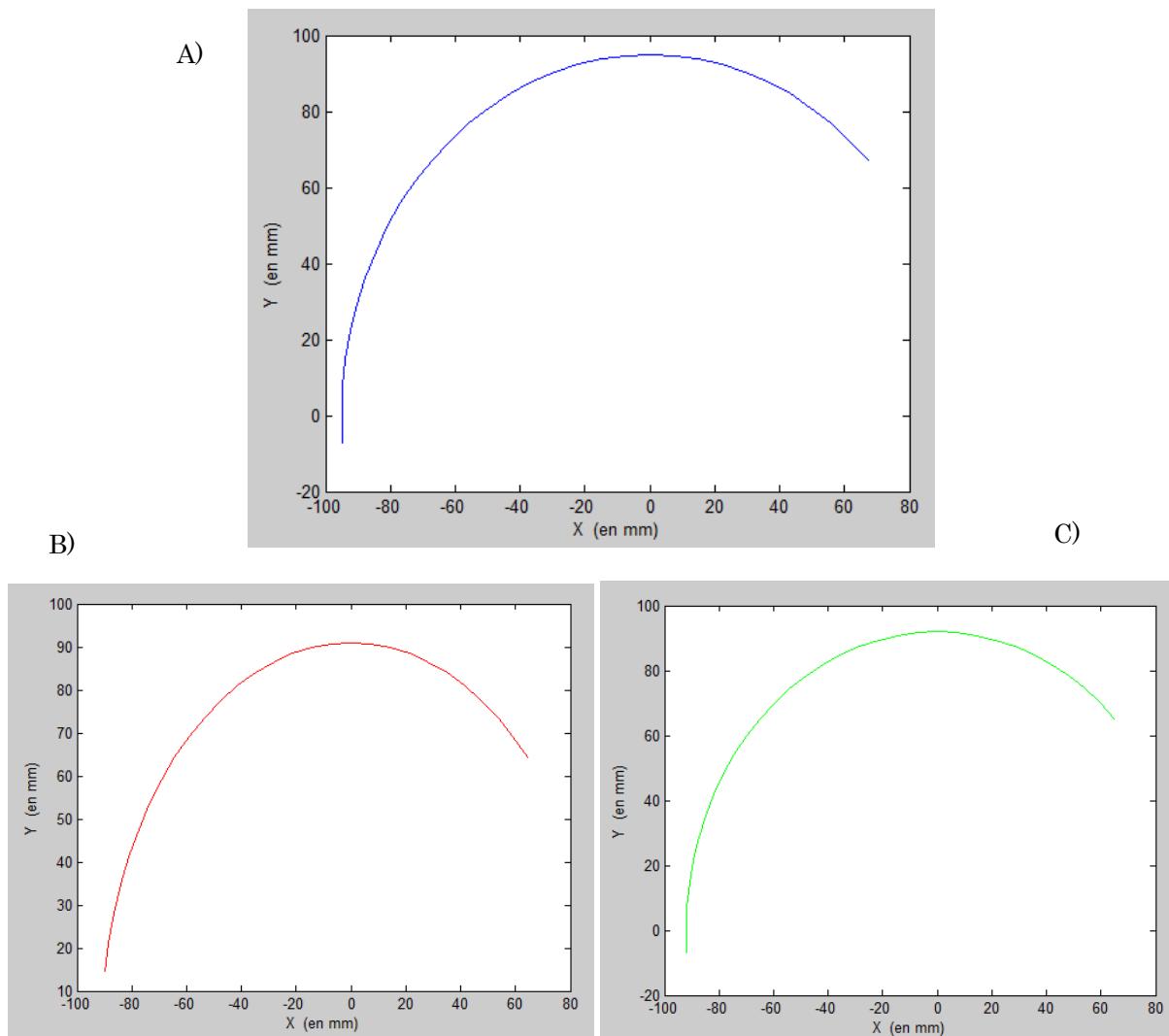
**Figura V.4.-** Desviación de valores de  $X$  en el espacio de trabajo

Además de la variación de los espacios de trabajo en  $X$ , también se obtuvieron las desviaciones en  $Y$ , lo que permite identificar el porcentaje de error entre los diferentes espacios de trabajo (Figura V.5), provocado por la variación de longitudes y rangos de movimiento en cada articulación.



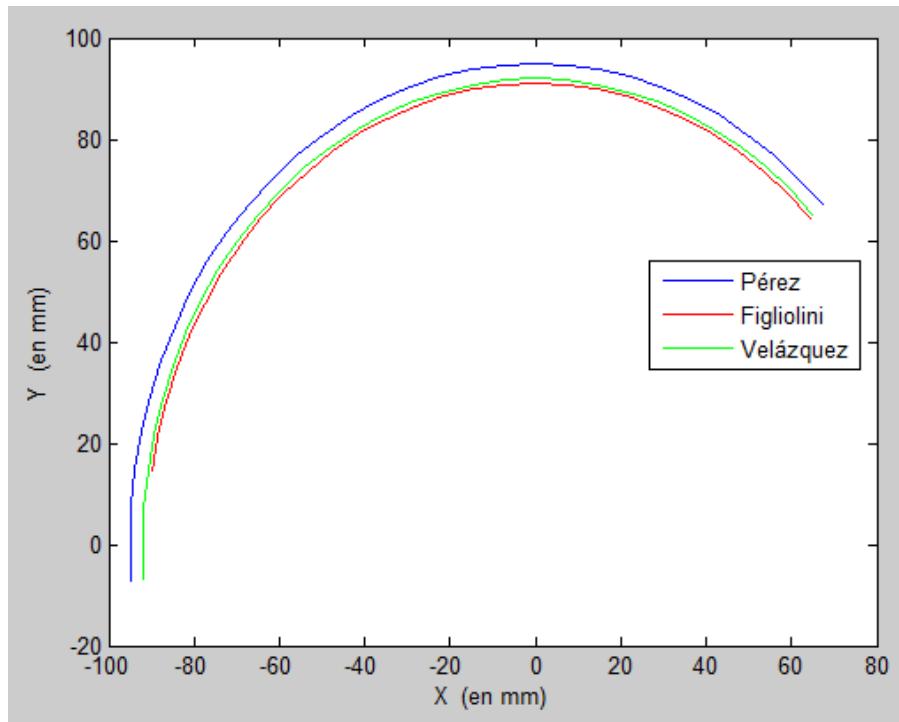
**Figura V.5.-** Desviación de valores de  $Y$  en el espacio de trabajo

Además de analizar el área de trabajo del prototipo, deben considerarse los resultados de la trayectoria obtenida por los eslabones. Estos datos también deben validarse de forma comparativa con respecto a otros estudios referentes al movimiento de los dedos. En la Figura V.6 se observa la trayectoria producida por la flexión de la articulación MCF, la trayectoria obtenida en [V.1] se visualiza en la Figura V.6 B y la trayectoria obtenida en [II.4] se muestra en la Figura V.6 C. A simple vista parecen ser trayectorias similares, sin embargo existen pequeñas diferencias entre estas, debidas también a la variación de la longitud de cada falange y manejo de programas computacionales para la obtención de estos datos.



**Figura V.6.-** Trayectorias en articulación Metacarpofalángica: A) Obtenida, B) *Figliolini* [V.1] y C) *Velázquez* [II.4]

La pequeña desviación entre las trayectorias, puede observarse de forma más clara en la Figura V.7, sin embargo, las variaciones identificadas en la secuencia del movimiento son realmente diminutas, con lo que el resultado es favorable para el estudio cinemático.



**Figura V.7.-** Trayectorias en articulación Metacarpofalángica

Se debe resaltar, que las trayectorias generadas en [II.4] fueron obtenidas en base a una caracterización de movimientos en diferentes circunstancias, por lo que ésta similitud en las trayectorias se toma como un resultado positivo en la síntesis de este mecanismo. De igual forma las trayectorias individuales de los eslabones, no representan un resultado relevante ya que existe diferencia dimensional en cada una de ellas, sin embargo, la trayectoria resultante es un valor que se debe considerar.

Por otra parte, para calcular el error estructural o error entre la función deseada y la función real que genera el mecanismo sintetizado ( $E_e$ ), es necesario comparar los ángulos o posiciones deseadas  $\phi_d$  de la barra conducida del mecanismo con las posiciones  $\phi_g$  que la misma barra conducida al analizar las posiciones con los valores obtenidos de la síntesis de mecanismos. En este caso el error se calculó como:

$$E_e = \phi_d - \phi_g \quad (\text{V.1})$$

Dados los ángulos obtenidos en la síntesis, se generó la gráfica del  $E_e$  (Figura V.8), que muestra la desviación que tiene el ángulo deseado del eslabón proximal. El error estructural esta dado en grados, y la diferencia oscila entre  $-0,01 < E_e < 0,01$ , lo que se considera como un valor mínimo.

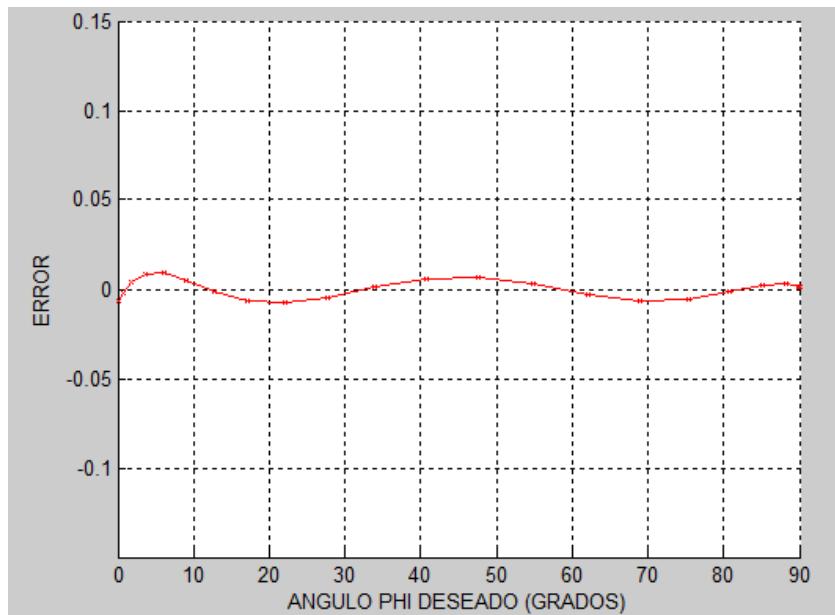


Figura V.8.- Error estructural

Está claro que los resultados obtenidos en el estudio cinemático tienen una elevada coincidencia con los estudios comparativos, específicamente con la investigación realizada por *Velázquez* en su trabajo doctoral [II.4], por lo que se debe resaltar que las trayectorias generadas por la caracterización de movimientos en diferentes circunstancias son un parámetro claro y fiable para comparar los resultados aquí mostrados. En este caso se entiende a la síntesis del mecanismo desarrollada en esta Tesis como un resultado favorable. Por consiguiente se debe analizar el rango de movimientos que puede realizar el prototipo, en comparación con los datos presentados en la Tabla II.3 del Capítulo II, que plantean en resumen el movimiento descrito por las articulaciones de cada uno de los dedos.

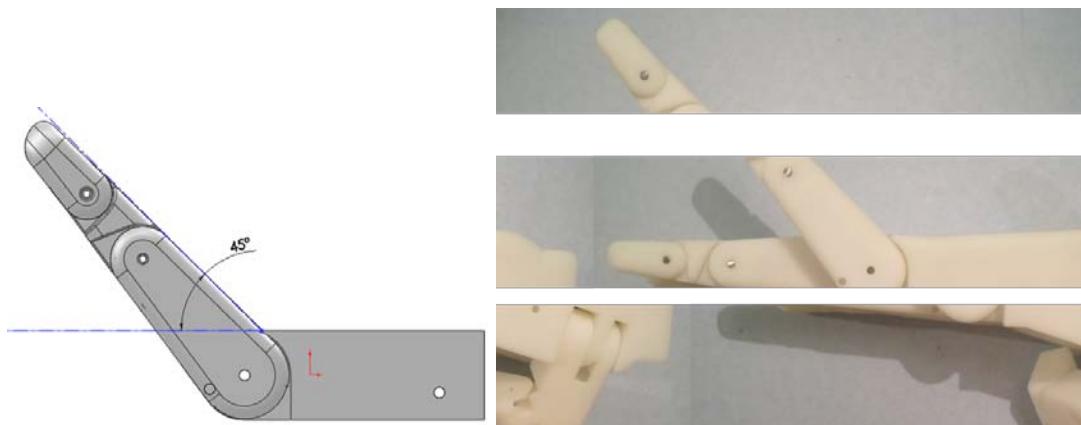
## V.2.- Rangos de movimiento obtenidos en las articulaciones del prototipo

El movimiento desarrollado por los dedos se midió desde el grado máximo de flexión hasta el grado máximo de extensión. La flexión de los dedos obtenida en las articulaciones MCF forma un ángulo aproximado de hasta  $97^\circ$  desde el punto de referencia en la palma (Figura V.9).



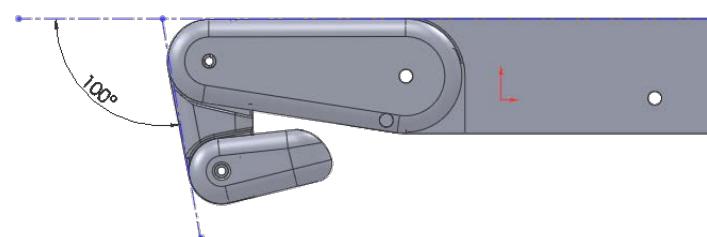
**Figura V.9.-** Movimientos de la articulación MCF

Por otra parte, la extensión de los dedos es hasta  $45^{\circ}$  en dirección opuesta (Figura V.10), es importante mencionar que está limitada por el actuador lineal y no por el modelo tridimensional.



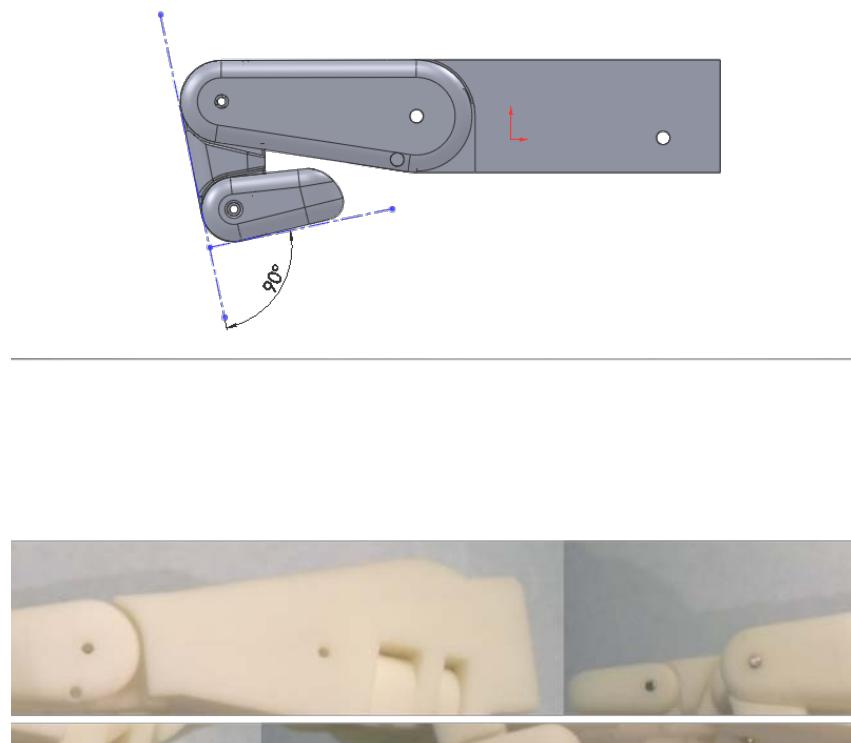
**Figura V.10.-** Movimientos de la articulación MCF

Las articulaciones IFP no pueden desarrollar movimientos de extensión. Sin embargo, la flexión de los dedos se puede dar hasta por  $100^{\circ}$  aproximadamente (Figura V.11).



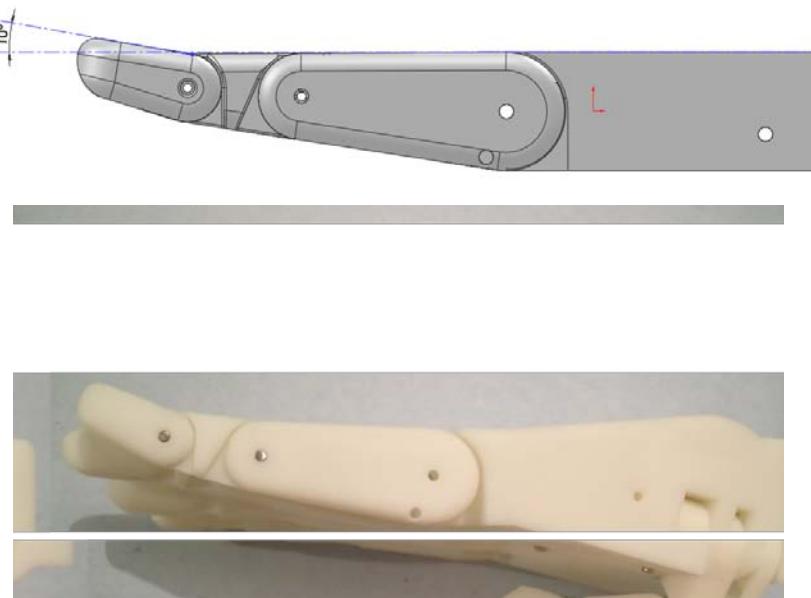
**Figura V.11.-** Flexión de las articulaciones IFP

La flexión de los dedos en las articulaciones IFD puede formar un ángulo aproximado de  $90^\circ$  (Figura V.12).



**Figura V.12.-** Flexión de las articulaciones IFD

Por otra parte, la extensión de los dedos es de máximo  $10^\circ$  aproximadamente en dirección opuesta (Figura V.13).



**Figura V.13.-** Extensión de las articulaciones IFP

Por otro lado, en este modelo no pueden desarrollarse la abducción y aducción de las articulaciones, además de que los movimientos del pulgar están restringidos por solo tener 2 grados de libertad. El movimiento de oposición del pulgar puede desarrollarse sin ningún problema (Figura V.14), cumpliendo con los ángulos descritos en la Tabla II.3.



**Figura V.14.-** Oposición del pulgar

La flexión y extensión de la articulación MCF en el pulgar, transcurre de forma transversal, y desarrolla un ángulo de movimiento aproximado de 50° con respecto al dedo Índice. El rango de movilidad de la flexión en la articulación IF es aproximadamente de 90°, mientras que la extensión del dedo es de 20°.

El rango de movimiento de las distintas articulaciones de la mano desarrolla valores aproximados en flexión y extensión, de ésta forma pueden resumirse los movimientos desarrollados por el modelo, en la Tabla V.2.

**Tabla V.2.-** Rango de movimiento en articulaciones [II.15]

Articulaciones	Rango de movimiento
Articulación MCF de los dedos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hiperextensión 0° - 45°</li> <li>• Flexión 0° - 90°</li> </ul>
Articulación IFP de los dedos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Extensión 0°</li> <li>• Flexión 0° - 100°</li> </ul>
Articulación IFD de los dedos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Extensión 0° - 10°</li> <li>• Flexión 0° - 90°</li> </ul>
Pulgar	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hiperextensión 0° - 10°</li> <li>• Flexión 0° - 90°</li> </ul>

El movimiento de las articulaciones IFP, IFD y MCF de los dedos, cumple con los movimientos primarios en un plano bidimensional, sin embargo no desarrollan la aducción y abducción en ningún punto del sistema.

### V.3.- Sujeción de objetos

Los movimientos de sujeción que posee la mano, son aquellos en los que se agarra un objeto que puede mantenerse (entero o de forma parcial) dentro del contorno de la mano [II.5]. Este tipo de agarres son utilizados en una gran variedad de actividades, involucrando geometrías de múltiples tamaños y formas donde la función prensil depende en su mayoría de la movilidad de las articulaciones CMC y MCF.

Dada la clasificación de movimientos para sujeción de objetos presentada con anterioridad, se entiende que los principales tipos de agarre son: Puntual, Palmar, Lateral, Gancho, Cilíndrico y Esférico.

Como se mencionó en el Capítulo II, el agarre Puntual es cuando se sujetan objetos de geometrías pequeñas y finas utilizando las puntas del pulgar y el índice, regularmente (Figura V.15 A). El agarre lateral es utilizado para sostener objetos delgados y planos (como una llave), donde la sujeción del objeto se lleva a cabo generalmente con la parte palmar del pulgar y la parte lateral exterior del Índice (Figura V.15 B).

A)

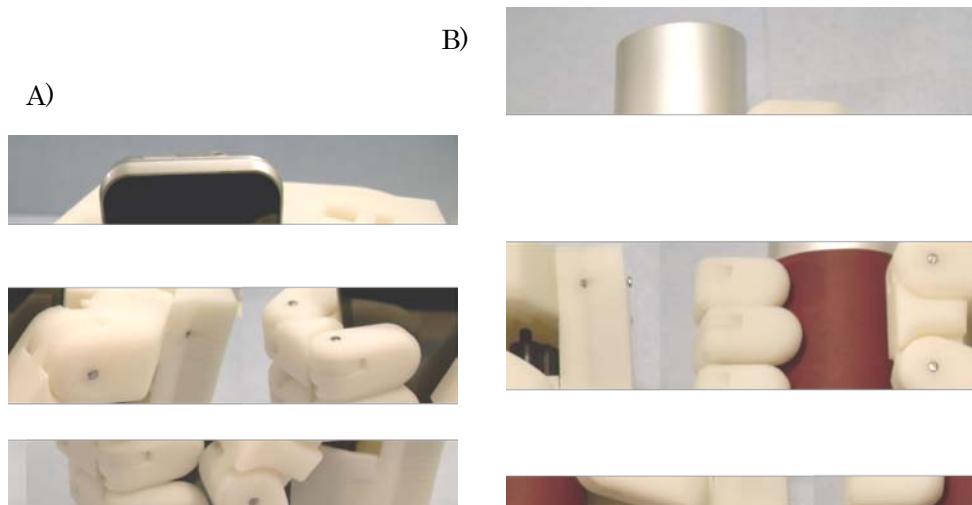


B)



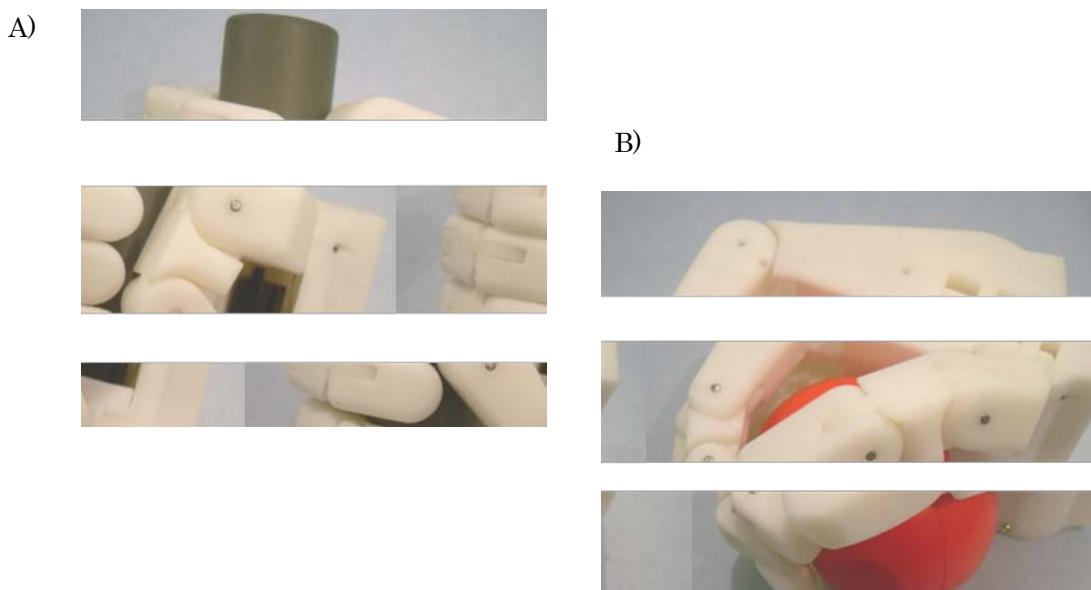
**Figura V.15.-Sujeción: A) Puntual y B) Lateral**

La sujeción Palmar se utiliza para sostener objetos con geometrías de mayor longitud además de involucrar todos los dedos, también influye el contorno interno de la palma lo que provee de estabilidad y firmeza al sujetar un objeto (Figura V.16 A). La sujeción de Gancho se aplica para levantar, jalar o sujetar objetos donde se ven involucrados los 5 dedos de la extremidad (Figura V.16B).



**Figura V.16.-Sujeción: A) Palmar y B) Gancho**

La sujeción Cilíndrica se emplea para hacer un agarre prensil de objetos con geometrías continuas como barras (Figura V.17 A), mientras que el Esférico se emplea para sujetar objetos con una circunferencia definida (Figura V.17 B).

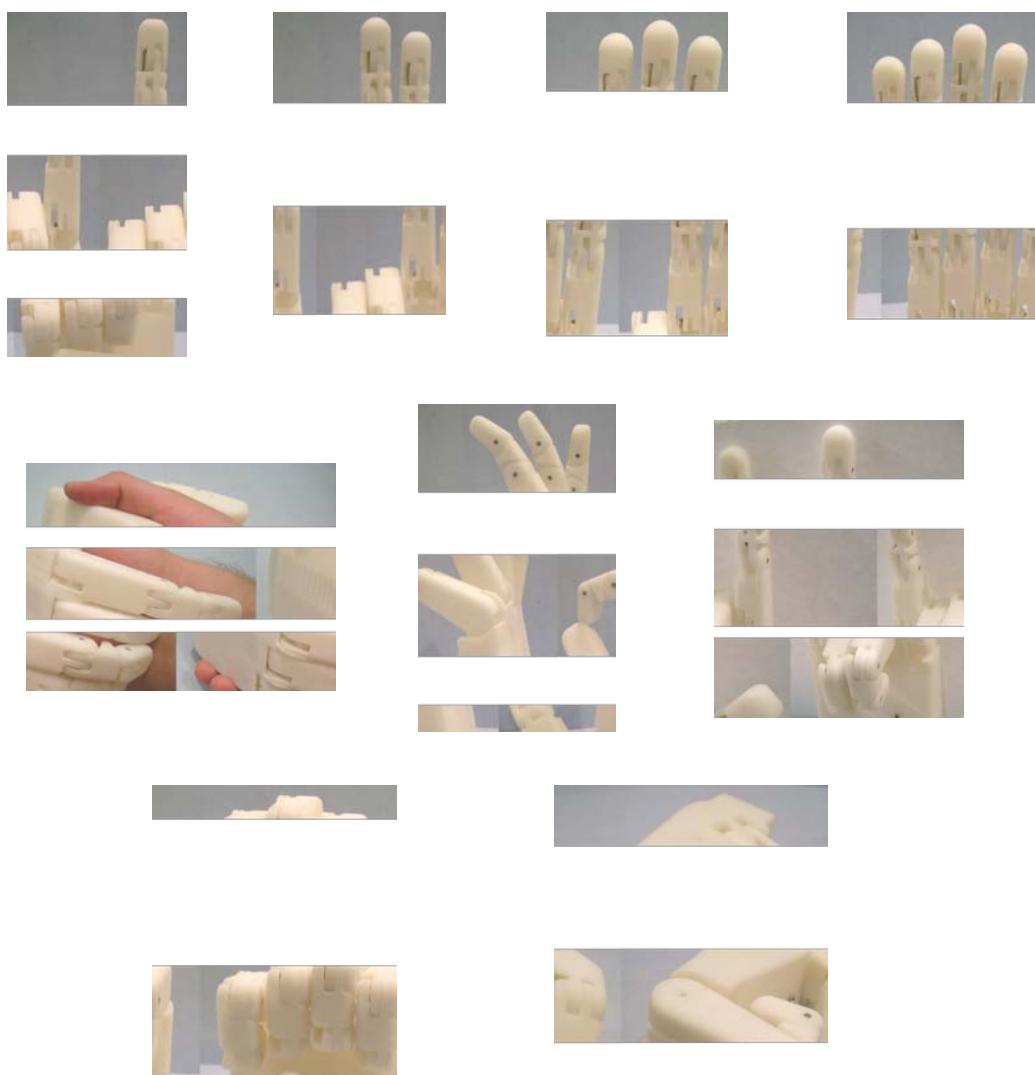


**Figura V.17.- Sujeción: A) Cilíndrica y B) Esférica**

El prototipo diseñado, puede desempeñar sin problemas la sujeción de estos objetos, sin embargo, no fue posible identificar la Fuerza con la que se sujetaron dichos objetos, debido a las propiedades mecánicas del material utilizado en la impresión tridimensional.

#### V.4.- Otros movimientos

Las manos dotadas con características cinemáticas de elevada complejidad, pueden realizar infinidad de movimientos y trayectorias además de poseer la capacidad de adaptabilidad a un sin número de geometrías. En este caso, el dispositivo diseñado puede realizar diferentes movimientos además de los antes mencionados, tal es el caso de saludar de mano, contar, flexión de las articulaciones distales, así como otro tipo de señales utilizadas en la vida cotidiana, como hacer una señal de *todo está bien* o mantener el puño cerrado.



**Figura V.18.-** Diversos movimientos

Para finalizar, en esta sección de análisis se corroboró que los datos obtenidos de forma analítica a partir de la cinemática directa e inversa, fueron patrones determinantes en la síntesis del mecanismo, con lo que se obtuvieron parámetros adecuados para desarrollar un prototipo que ejecuta trayectorias de forma óptima. Lo anterior fue corroborado por estudios previos que definitivamente son un parámetro importante para determinar que el trabajo aquí descrito es fiable y que satisface las necesidades del diseño.

Por otra parte, un prototipo robótico es aplicable como prótesis siempre y cuando sea biocompatible con la parte del cuerpo al que desea adaptarse. Sin embargo, existen dispositivos auxiliares como encajes protésicos que realizan la función de unión entre el componente robótico y el muñón o remanente, por lo que es posible que el dispositivo robótico propuesto sea aplicable como prótesis.

#### IV.5.- Sumario

En este capítulo se presentaron los resultados obtenidos a lo largo del desarrollo de este trabajo, partiendo de la recopilación de las investigaciones más representativas en las últimas décadas, hasta llegar a la obtención de las dimensiones del prototipo mediante la cinemática directa e inversa, partiendo del procesamiento de imágenes que dieron las dimensiones iniciales. También se analizaron los datos obtenidos en la síntesis del mecanismo, así como los rangos de movimiento que posee el prototipo y haciendo énfasis en los principales tipos de agarre para sujetar objetos.

En la siguiente sección se presentan las conclusiones obtenidas de este trabajo, así como una propuesta de trabajos futuros y los anexos correspondientes a los diversos métodos aplicados en la investigación.

#### IV.6.- Referencias

- 1.- Fligliolini, G., Fixed and moving polodes for a new articulated finger mechanism, *6º International Workshop on Robotics in Alpe-Adria Danube Region RAAD'97*, pp 1-10, 1997.
- 2.- Lotti, F., Tiezzi, P., Vassura, G. y Zucchelli, A., Müller-Karger, C. M. y Cerrolaza, M., Mechanical Structures for Robotic Hands based on the “Compliant Mechanism” Concept, *7º ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation ASTRA'02*, pp 1-8, 2002.

# Conclusiones

## Conclusiones

Al término del desarrollo de este trabajo, pueden exponerse las conclusiones derivadas del mismo, considerando su objetivo principal: desarrollar el análisis cinemático, definir trayectorias e implementar un dispositivo robótico para efectuar diferentes tipos de sujeción con adecuada sincronía de sus componentes.

La revisión literaria del estado del arte correspondiente a las investigaciones y desarrollos relacionados con el diseño de manos robóticas, efectores finales y prótesis de mano mostró un panorama amplio enfocándose a las carencias de los diseños actualmente utilizados. Fue posible identificar la necesidad de realizar un estudio más a fondo sobre los parámetros cinemáticos involucrados directamente con la trayectoria de los dedos considerando el movimiento independiente de cada una de las falanges.

Por otra parte, la metodología de diseño utilizada en este trabajo, buscó resaltar la creatividad para mostrar indicaciones y requisitos necesarios para dar solución a los problemas derivados del diseño. Sin embargo, los métodos utilizados en esta investigación no son universales y son referidos a situaciones en particular. Además, las soluciones parciales obtenidas en cada sección son parciales.

Obtener dimensiones para los eslabones de un mecanismo no es un proceso arbitrario, ya que en esencia, un mecanismo debe satisfacer un gran número de características para que sea óptimo. De esta sección se puede concluir que el problema planteado de la síntesis permitió identificar las funciones matemáticas idóneas para derivar en 2 mecanismos subactuados que con utilizar un menor número de actuadores son capaces de ejecutar los principales tipos de sujeción de objetos.

Está claro que, el mecanismo propuesto por *Velázquez* presenta un mejor desempeño, además de considerar que la síntesis del mecanismo se resume en 2 barras de transmisión (proximal y distal), sin demeritar el hecho de que su estudio está basado en un mecanismo plano de cuatro barras utilizando funciones descriptivas.

Al obtener los parámetros cinemáticos, los alcances de este trabajo permiten incorporar un modelo tridimensional con apoyo de equipo de cómputo basado en el procesamiento de imágenes. Es importante resaltar que la aplicación de técnicas para obtener dimensiones externas e internas cuerpo humano son de gran utilidad, tal es el caso del

análisis de radiografías, análisis de movimiento por vídeo, dispositivos sónicos y reconstrucciones tridimensionales a partir de tomografías. Estas últimas se tornan como un estudio indispensable en diversas etapas de investigación y diseño de dispositivos antropomorfos. En este sentido, un estudio tridimensional complementa y facilita una metodología que tiene como objetivo particular obtener el ensamblaje de un diseño adecuado a la selección de componentes que integran este sistema, sin olvidar la aplicación de impresiones tridimensionales.

Asimismo, el procesamiento de imágenes y la síntesis del mecanismo fueron pilares fundamentales para la generación detallada de un modelo tridimensional en CAD, que posteriormente fue la interface para obtener una impresión tridimensional del prototipo. Así también, es relevante mencionar que dichos análisis terminan por influir significativamente en la generación del modelo de la mano robótica, sección del estudio que se propone como preámbulo para plantear pruebas correspondientes a cantidad de movimientos y sujeción de objetos.

Para finalizar y tomando en consideración la forma y métodos en cómo se obtuvieron las soluciones parciales a los problemas planteados, derivados de los objetivos particulares y las funciones secundarias deseadas, se entiende que en el transcurso del capitulado que los capítulos que integra este escrito, puede concluirse que el objetivo general así como los particulares fueron alcanzados de forma aceptable.

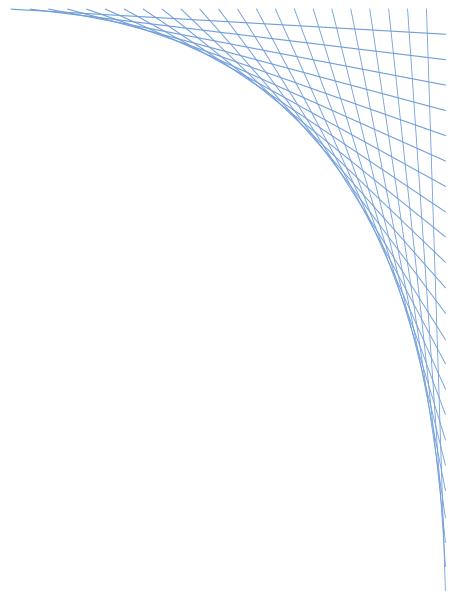
# Recomendaciones a trabajo futuro

## Trabajo futuro

La información obtenida de este estudio proporciona un mejor panorama sobre el comportamiento de la mano en situaciones de agarre específicos, determinando las características esenciales de este sistema. En base a esto, los alcances de este trabajo comienzan por entender la síntesis de un mecanismo mediante funciones analíticas para obtener la implementación de una mano robótica. Sin embargo, es indispensable plantear nuevos estudios para complementar a este dispositivo, tomando en cuenta esto se propone como trabajo futuro lo siguiente:

- Realizar caracterizaciones respecto a los movimientos realizados por el dedo pulgar en diversos tipos de movimiento, lo que permitirá ofrecer parámetros ideales para realizar una nueva síntesis de mecanismos en ese dedo.
- Realizar análisis numéricos en forma estática y dinámica de los elementos que componen la mano robótica, con la finalidad de determinar los puntos críticos que posee el prototipo para posteriormente realizar las adecuaciones necesarias que aseguren el óptimo funcionamiento mecánico del sistema.
- Implementar el prototipo con los materiales y dispositivos aquí planteados, con el objetivo de realizar pruebas experimentales para caracterizar Fuerza, Velocidad, Aceleración y posteriormente sujeción y manipulación de objetos.
- Es indispensable realizar la sincronía de los actuadores del prototipo, esto directamente enfocado a la sujeción de objetos sincronizando de forma adecuada los actuadores para generar las trayectorias requeridas.
- Es relevante implementar una técnica de control avanzado, tomando en cuenta que existen diversos avances en el área de control que se basan principalmente en algoritmos derivados de la implementación de técnicas como el control difuso, redes neuronales o combinación de ambas.

# Anexos



# A1

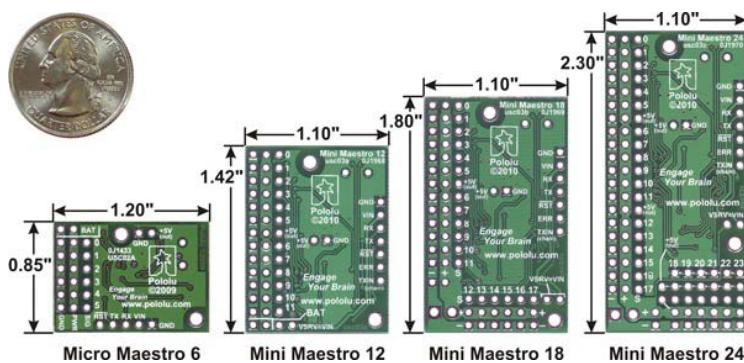
## Especificaciones técnicas

## Mini Maestro 18-Channel USB Servo Controller



The Mini Maestros are highly versatile (and compact) servo controllers and general-purpose I/O boards. They support three control methods: USB for direct connection to a computer, TTL serial for use with embedded systems, and internal scripting for self-contained, host controller-free applications. The channels can be configured as servo outputs for use with radio control (RC) servos or electronic speed controls (ESCs), as digital outputs, or as analog/digital inputs. The extremely precise, high-resolution servo pulses have a jitter of less than 200 ns, making these servo controllers well suited for high-performance applications such as robotics and animatronics, and built-in speed and acceleration control for each channel make it easy to achieve smooth, seamless movements without requiring the control source to constantly compute and stream intermediate position updates to the Mini Maestros. The Mini Maestros also feature configurable pulse rates from 1 to 333 Hz and can generate a wide range of pulses, allowing maximum responsiveness and range from modern servos. Units can be daisy-chained with additional Pololu servo and motor controllers on a single serial line.

Dimensions:



## Main Features

- Three control methods: USB, TTL (5V) serial, and internal scripting
- 0.25 $\mu$ s output pulse width resolution (corresponds to approximately 0.025° for a typical servo, which is beyond what the servo could resolve)
- Pulse rate configurable from 1 to 333 Hz

- Wide pulse range of 64 to 4080  $\mu$ s
- Individual speed and acceleration control for each channel
- Channels can be optionally configured to go to a specified position or turn off on startup or error

Alternate channel functions allow the channels to be used as:

- General-purpose digital outputs (0 or 5 V)
- Analog or digital inputs (channels 0 – 11 can be analog inputs; channels 12+ can be digital inputs)
- One channel can be a PWM output with frequency from 2.93 kHz to 12 MHz and up to 10 bits of resolution
- A simple scripting language lets you program the controller to perform complex actions even after its USB and serial connections are removed

Free configuration and control application for Windows and Linux makes it easy to:

- Configure and test your controller
- Create, run, and save sequences of servo movements for animatronics and walking robots
- Write, step through, and run scripts stored in the servo controller

Two ways to write software to control the Maestro from a PC:

- Virtual COM port makes it easy to send serial commands from any development environment that supports serial communication
- Pololu USB Software Development Kit allows use of more advanced native USB commands and includes example code in C, Visual Basic .NET, and Visual C++
- TTL serial features:
- Supports 300 – 200,000 bps in fixed-baud mode, 300 – 115,200 bps in autodetect-baud mode
- Simultaneously supports the Pololu protocol, which gives access to advanced functionality, and the simpler Scott Edwards MiniSSC II protocol (there is no need to configure the device for a particular protocol mode)
- Can be daisy-chained with other Pololu servo and motor controllers using a single serial transmit line
- Chain input allows reception of data from multiple Mini Maestros using a single serial receive line without extra components (does not apply to Micro Maestros)
- Can function as a general-purpose USB-to-TTL serial adapter for projects controlled from a PC
- Board can be powered off of USB or a 5 – 16 V battery, and it makes the regulated 5V available to the user
- Upgradable firmware

Maestro Comparison Table

	<u>Micro Maestro</u>	<u>Mini Maestro 12</u>	<u>Mini Maestro 18</u>	<u>Mini Maestro 24</u>
<b>Channels:</b>	6	12	18	24
<b>Analog input channels:</b>	6	12	12	12
<b>Digital input channels:</b>	0	0	6	12
<b>Width:</b>	0.85" (2.16 cm)	1.10" (2.79 cm)	1.10" (2.79 cm)	1.10" (2.79 cm)
<b>Length:</b>	1.20" (3.05 cm)	1.42" (3.61 cm)	1.80" (4.57 cm)	2.30" (5.84 cm)
<b>Weight<sup>(1)</sup>:</b>	3.0 g	4.2 g	4.9 g	6.0 g
<b>Configurable pulse rate:</b>	33–100 Hz	1–333 Hz	1–333 Hz	1–333 Hz
<b>Pulse range:</b>	64–3280 µs	64–4080 µs	64–4080 µs	64–4080 µs
<b>Script size:</b>	1 KB	8 KB	8 KB	8 KB

## 298:1 Micro Metal Gearmotor HP



These tiny, high-quality motors are intended for use at 6 V, though in general, these kinds of motors can run at voltages above and below this nominal voltage, so they should comfortably operate in the 3 – 9 V range (rotation can start at voltages as low as 0.5 V). Lower voltages might not be practical, and higher voltages could start negatively affecting the life of the motor. The micro metal gearmotors are available in a wide range of gear ratios—from 5:1 up to 1000:1—and offer a choice between two different motors: high-power (HP) and standard. With the exception of the 1000:1 gear ratio versions, all of the micro metal gearmotors have the same physical dimensions, so one version can be easily swapped for another if your design requirements change. Please see the [micro metal gearmotor comparison table](#) for detailed specifications of all our micro metal gearmotors. This dynamically-sortable table can help you find the gearmotor that offers the best blend of speed, torque, and current-draw for your particular application.

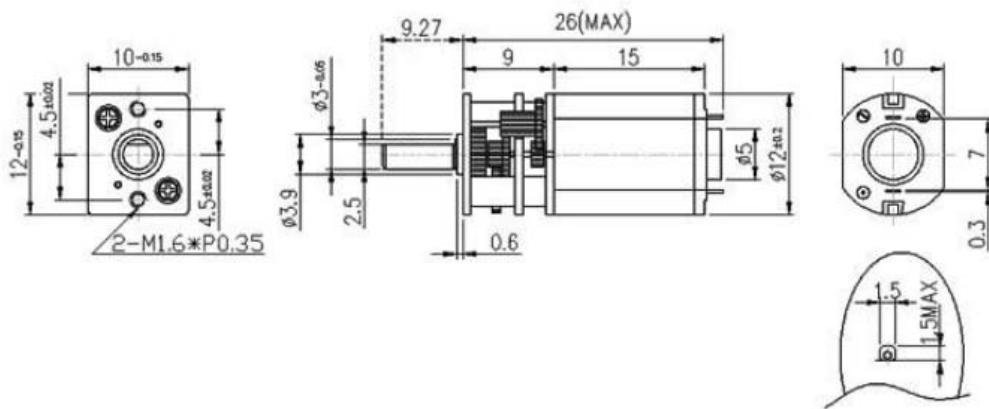
Some versions of the gearmotors are sold with an additional 1mm-diameter output shaft that protrudes from the rear of the motor. This 4.5mm-long rear shaft rotates at the same speed as the input to the gearbox and offers a way to add a custom-built encoder to provide motor speed or position feedback.

Dimensions:

**Size:** 24 x 10 x 12 mm

**Weight:** 0.34 oz

**Shaft diameter:** 3 mm



Micro metal gearmotor dimensions (units in mm).

## General specifications

Gear ratio:	298:1
Free-run speed @ 6V:	100 rpm
Free-run current @ 6V:	70 mA
Stall current @ 6V:	1600 mA
Stall torque @ 6V:	70 oz in
Extended motor shaft?:	N



PQ12 Actual Size

**Benefits**

- Compact miniature size
- Precise position feedback
- Limit switches
- Simple control
- Low voltage
- Equal push/pull force
- Easy mounting

**Applications**

- Robotics
- Consumer appliances
- Toys
- RC vehicles
- Automotive
- Industrial Automation



# Miniature Linear Motion Series · PQ12

Firgelli Technologies' unique line of Miniature Linear Actuators enables a new generation of motion-enabled product designs, with capabilities that have never before been combined in a device of this size. These tiny linear actuators are a superior alternative to designing your own push/pull mechanisms.

The PQ12 actuators are complete, self contained linear motion devices with position feedback for sophisticated position control capabilities, or end of stroke limit switches for simple two position automation. Driving them couldn't be easier, simply apply a DC voltage to extend the actuator, and reverse the polarity to retract it. Several gear ratio's and voltage options are available to give you varied speed/force configurations.

## PQ12 Specifications

<u>Gearing Option</u>	<u>30:1</u>	<u>63:1</u>	<u>100:1</u>
Peak Power Point	7N @ 12mm/s	20N @ 7mm/s	27N @ 4mm/s
Peak Efficiency Point	4N @ 18mm/s	10N @ 9mm/s	14N @ 7mm/s
Max Speed (no load)	25mm/s	12mm/s	9mm/s
Max Force (lifted)	9N	24N	35N
Max Side Load	5N	10N	15N
Back Drive Force	15N	35N	60N
Stroke	20 mm		
Input Voltage	6 or 12 VDC		
Stall Current	550mA @ 6V, 220mA @ 12V		
Mass	15g		
Operating Temperature	-10°C to +50°C		
Positional Accuracy	±0.1mm		
Lifetime	20,000 strokes, 20% Duty Cycle		
Audible Noise	55dB @ 45cm		
Ingress Protection	IP-54		
Feedback Potentiometer	1/8W Non-Buffered 10kΩ Potentiometer		
Limit Switches	Max. Current Leakage: 8uA		

## Basis of Operation

The PQ12 is designed to push or pull a load along its full stroke length. The speed of travel is determined by the load applied. (See the Load Curves). When power is removed the actuator will hold its position, unless the applied load exceeds the backdrive force. Stalling the actuator for short periods will not cause damage, however repeated stalling will shorten the life of the actuator.

## Ordering

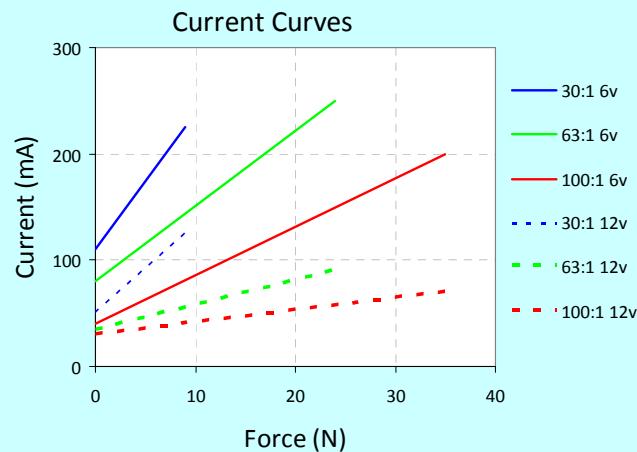
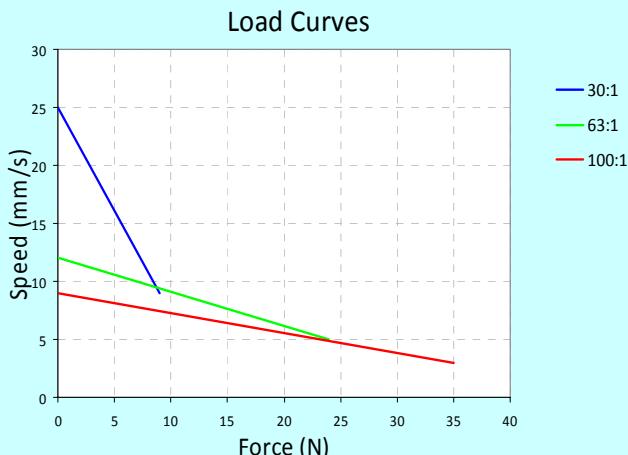
Small quantity orders can be placed directly online at [www.firgelli.com](http://www.firgelli.com). Each actuator ships with two mounting brackets, M3 mounting hardware, and one FPC ribbon cable connector. To extend the length of the ribbon cable, solder holes are provided to attach a section of wire cable of your choice.



Firgelli Technologies Inc.

1550 Mileva Lane Victoria, BC V8N 2V5 Canada	1 (206) 347-9684 phone 1 (888) 225-9198 toll-free 1 (206) 347-9684 fax	sales@firgelli.com www.firgelli.com
--	--	--

## PQ12 Specifications



## Model Selection

The PQ12 has 3 configuration choices: Gear Ratio, Voltage and Controller. PQ12 options are identified according to the following scheme:

### PQ12-GG-VV-C

feature	options
<b>GG:</b> Gear reduction ratio (refer to load curves above)	<b>30, 63, 100</b> (lower ratios are faster but push less force, and vice versa)
<b>VV:</b> Voltage	<b>6, 12</b> (DC volts)
<b>C:</b> Controller	<b>P</b> Potentiometer Feedback <b>S</b> Limit Switches

## PQ12 Controller Options

### Option S – End of Stroke Limit Switches

WIRING: (see next page for pin numbering)

- 1- Limit Switch Detection (Optional)
- 2- Actuator Motor Power
- 3- Actuator Motor Power
- 4- Not Connected
- 5- Not Connected

The –S actuators have limit switches that will turn off power to the motor when the actuator reaches within 1mm of the end of stroke. Internal diodes allow the actuator to reverse away from the limit switch. The limit switches cannot be moved. While voltage is applied to the motor power pins (2 & 3) the actuator extends. Reverse the polarity and the actuator retracts. This can be accomplished manually with a DPDT switch or relay, or using an H-Bridge circuit. The –S model cannot be used with the CIB control board. Pin #1 can be used to sense when the actuator has reached the end limits. See our FAQ page for a simple schematic to light an LED when the limits are reached.

### Option P – Potentiometer Position Feedback

WIRING: (see next page for pin numbering)

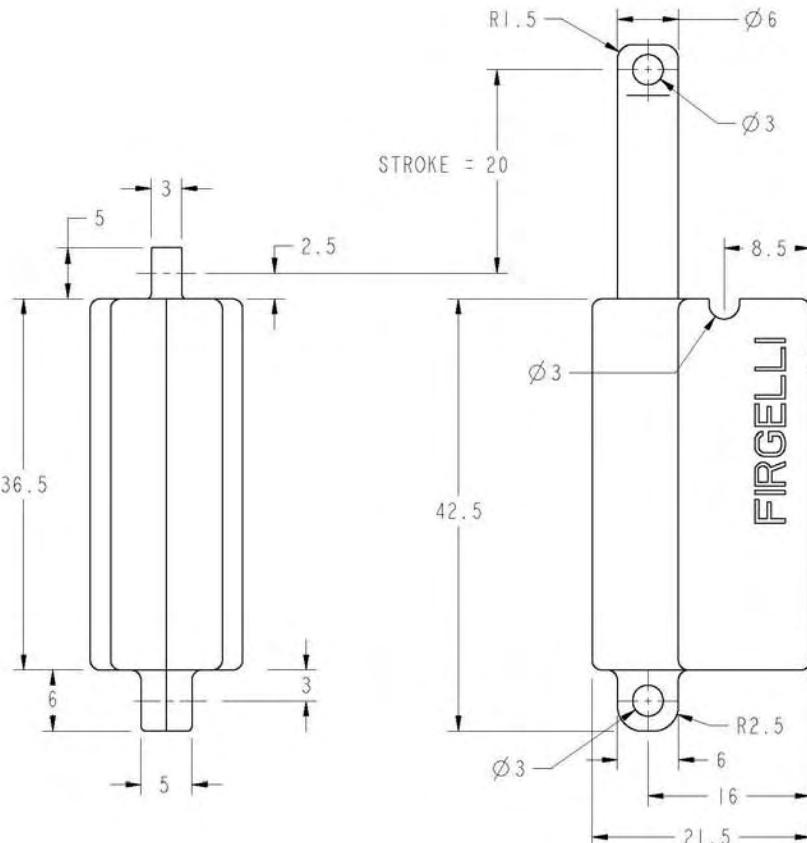
- 1 – Feedback Potentiometer negative reference rail
- 2 – Actuator Motor Power
- 3 – Actuator Motor Power
- 4 – Feedback Potentiometer positive reference rail
- 5 – Feedback Potentiometer wiper

The –P actuators have no built in controller, but do provide an analog position feedback signal that can be input to an external controller. While voltage is applied to the motor power pins (2 & 3) the actuator extends. Reverse the polarity and the actuator retracts. This can be accomplished manually with a DPDT switch or relay, or using an H-Bridge circuit. Position of the actuator stroke can be monitored by providing any stable low and high reference voltage on pins 1 & 4, then reading the position signal on pin 5. The voltage on pin 5 will vary linearly between the two reference voltages in proportion to the position of the actuator stroke.

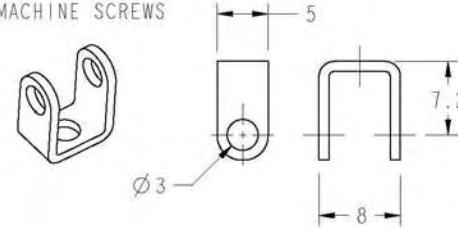
The PQ12 –P actuators can be used as a linear servo by connecting the actuator to a microcontroller such as the CIB control board offered by Firgelli. This control board reads the position signal from the PQ12, compares it with your input control signal then commands the actuator to move via an on-board H-bridge circuit. The CIB allows any one of the following control inputs: Analog 0-5V or 4-20mA, or Digital 0-5V PWM or 1-2ms Standard RC. The RC input effectively transforms your PQ12 into a linear servo which is a direct replacement for any common hobby servo used in RC toys and robotics. Refer to the CIB datasheet for more details.

### Special Notes:

The PQ12 model numbering scheme has changed as of 1<sup>st</sup> Jan 2010. The old model numbers PQ-12s and PQ-12f have been replaced by PQ12-30-6-P and PQ12-63-6-P respectively.



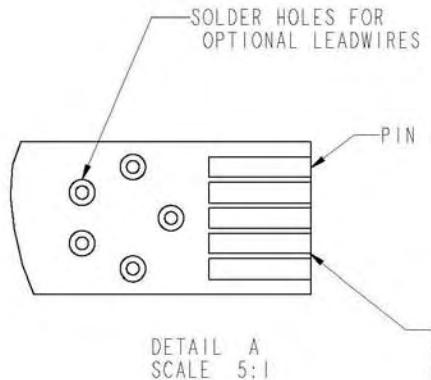
MOUNTING BRACKET  
HOLES FOR M3 MACHINE SCREWS



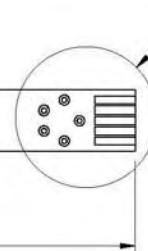
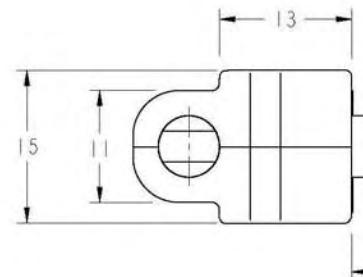
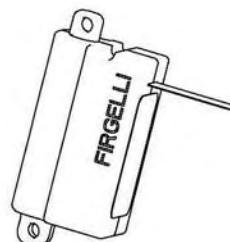
WIRING (PIN CONNECTIONS):

PQ12 - P OPTION  
PIN 1 - POTENTIOMETER REFERENCE  
PIN 2 - ACTUATOR POWER  
PIN 3 - ACTUATOR POWER  
PIN 4 - POTENTIOMETER REFERENCE  
PIN 5 - POTENTIOMETER WIPER

PQ12 - S OPTION  
PIN 1 - LIMIT DETECTION (OPTIONAL)  
PIN 2 - ACTUATOR POWER  
PIN 3 - ACTUATOR POWER  
PIN 4 - NOT CONNECTED  
PIN 5 - NOT CONNECTED



1 MM PITCH 5 POS FPC/FFC TERMINALS  
MATING CONNECTOR:  
FCI #HLW5S-2C7LF



SEE DETAIL A

ALL DIMENSIONS IN MILLIMETERS

PQ12 ACTUATOR  
DIMENSIONS



Copyright 2010 © Firgelli Technologies Inc.



Firgelli Technologies Inc.

1550 Mileva Lane  
Victoria, BC V8N 2V5  
Canada

1 (206) 347-9684 phone  
1 (888) 225-9198 toll-free  
1 (206) 347-9684 fax

[sales@firgelli.com](mailto:sales@firgelli.com)  
[www.firgelli.com](http://www.firgelli.com)



El Nylamid® XL (XL = eXtra Lubricado) es de color verde y tiene una carga de aceite para reducir aún más su coeficiente de fricción y además es de baja absorción de humedad.

Este Nylamid® es producido por la polimerización directa de monómeros para formar polímeros de nylon 6/12, al ser vaciados a presión atmosférica. Este proceso ofrece la ventaja de poder fabricar piezas de mucho mayor volumen que con la inyección y extrusión.

#### Aplicaciones Típicas:

- Cojinetes
- Aislantes eléctricos
- Moldes
- Poleas
- Catarinas
- Guías de desgaste
- Piezas de impacto
- Prototipos
- Engranes
- Ruedas
- Rodillos
- Sellos para válvulas
- Raspadores
- Tolvas
- Aislantes térmicos

Medidas Disponibles													
Barras		Placas		Placas Especiales		Barras cuadradas		Bujes			Discos ciegos		
Ø	Long.	Esp.	Med.	Esp.	Med.	Lado	Long.	Ø Ext.	Ø Int.	Long.	Esp.	Ø	
Plg.	Plg.	Plg.	Plg.	Plg.	Plg.	Plg.	Plg.	Plg.	Plg.	Plg.	Plg.	Plg.	
2	24	1/4	24x24	1/4	39x39	1	24	2	1	24	3/4	26	
2 1/4	y	3/8	24x48	3/8	y	1 1/4		2 1/2	1		1	28	
2 1/2	48	1/2	24x72	1/2	60x60	1 1/2		3	3/8		1 1/4	30	
2 3/4		5/8	24x96	5/8		2		3 1/4	1 1/2		1 1/2	32	
3		3/4	24x120	3/4		2 1/2		3 1/2	1 3/4			34	
3 1/4		1	48x48	1		3		4	2			36	
3 1/2		1 1/4	48x72			3 1/2		4 1/2	2 1/2			38	
3 3/4		1 1/2	48x96			4		5	2 3/4			40	
4		1 3/4	48x120			5		5 1/2	3			42	
4 1/2		2				6		6	3 1/2			44	
5						6 1/2		6 1/2	4			46	
5 1/2						7		7	4				
6						7 1/2		8	3/8				
6 1/2						8		9	4 1/2				
7						9		10	5				
7 1/2						10		11	5 1/2				
8						11		12	6				
9	24	2 1/4	24x24	1 1/4	60x60			13	6 1/2				
10			24x48	1 1/2				14	7				
11		2 1/2	24x24	1 3/4				15	8				
12		3	24x48					16	9				
13			48x48					17	10				
14		3 1/4	24x24						11				
15		3 1/2	24x48						12				
16		4							13				
17		5							14				
		6							15				

Para mayor información llame sin costo al 01-800-216-8711 o consulte a su distribuidor autorizado más cercano.

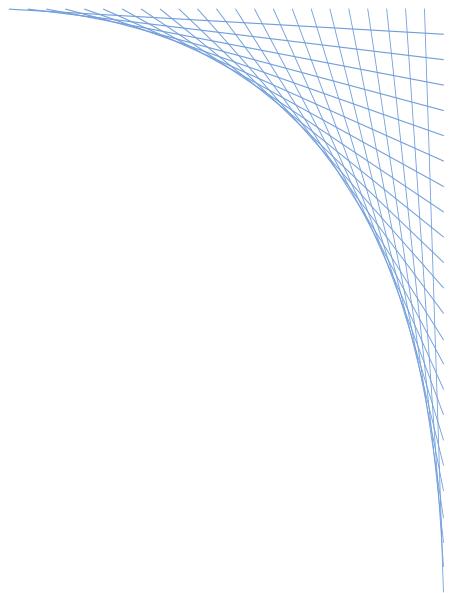
**Principales propiedades Nylamid® XL**

Propiedades	Norma ASTM	Unidades	Valores	Unidades	Valores
<b>I- Mecánicas</b>					
Gravedad específica 23 °C	D 792	-	1.03	-	-
Resistencia a la tensión 23 °C	D 638	psi	12,000	Kg/cm <sup>2</sup>	844
Módulo de elasticidad a la tensión 23 °C	D 638	psi	400,000	Kg/cm <sup>2</sup>	28,124
Elongación a la ruptura 23°C	D 638	%	20	-	-
Resistencia a la flexión 23 °C	D 790	psi	16,000	Kg/cm <sup>2</sup>	1,125
Módulo de elasticidad a la flexión 23 °C	D 790	psi	500,000	Kg/cm <sup>2</sup>	35,155
Resistencia a la compresión, 10% de deformación 23°C	D 695	psi	15,000	Kg/cm <sup>2</sup>	1,055
Módulo de elasticidad a la compresión 23 °C	D 695	psi	400,000	Kg/cm <sup>2</sup>	28,124
Dureza escala Shore D, 23 °C	D 2240	-	D 85	-	-
Impacto Izod (con muesca) 23 °C	D 256	ft.lb/in	0.4	cm.kg/cm	2.18
Coeficiente de fricción dinámico (en seco vs. Acero)	PTM 55007	-	0.2	-	-
<b>II- Térmicas</b>					
Coeficiente de expansión térmica lineal (de -40 a 149 °C)	E 831 (TMA)	In./in./°F	3.5x10 <sup>-5</sup>	m/(m.K)	90x10 <sup>-6</sup>
Temperatura de deflexión al calor (264 psi)	D 648	°F	200	°C	93.3
Punto de fusión	D 3418	°F	420	°C	215.5
Temperatura de servicio continuo en Aire (Máx)	-	°F	200	°C	93.3
Conductividad térmica	F 433	BTU in/hr.ft <sup>2</sup> .°F	1.7	W/(K.m)	0.28

## Continuación de propiedades Nylamid® XL

Propiedades	Norma ASTM	Unidades	Valores
<b>III- Eléctricas</b>			
Resistencia dieléctrica, corto tiempo	D 149	Volts/mil	500
Resistividad volumétrica	D 257	Ohm-cm	> 10 <sup>13</sup>
Constante dieléctrica 10 <sup>6</sup> Hz	D 150	-	3.7
<b>IV- Químicas</b>			
Absorción de agua en 24 horas	D 570 (3)	% por peso	0.3
Absorción de agua hasta saturación	D 570 (3)	% por peso	7.0
Ácidos suaves 23 °C	-	-	S. Limitado
Ácidos fuertes 23 °C	-	-	S. Inaceptable
Alcalinos suaves 23 °C	-	-	S. Limitado
Alcalinos fuertes 23 °C	-	-	S. Inaceptable
Hidrocarburos aromáticos 23 °C	-	-	S. Aceptable
Hidrocarburos Alifáticos 23 °C	-	-	S. Aceptable
Cetonas, Esteres 23 °C	-	-	S. Aceptable
Éteres 23 °C	-	-	S. Aceptable
Solventes clorados 23 °C	-	-	S. Limitado
Alcoholes 23 °C	-	-	S. Limitado
Soluciones salinas inorgánicas 23 °C	-	-	S. Aceptable
Rayos de sol en continuo 23 °C	-	-	S. Limitado

- Los datos de las propiedades mostradas son un promedio típico de sus valores y varían en función al lote de producción, tamaño y configuración del producto.
- Todas las declaraciones, información técnica y recomendaciones contenidas en ésta publicación, son presentadas en buena fe, basadas para ser confiables, en pruebas reales y experiencias en el campo de la práctica. El lector queda advertido, de cualquier forma, que Plásticos de Mantenimiento, S.A. de C.V. No garantiza la precisión de ésta información y que es responsabilidad de los usuarios, determinar la factibilidad de uso de los productos Nylamid® en cualquier aplicación dada.



# A2

# Códigos de programación

## Cinemática del mecanismo

```
clc;
clear all;
t=input(' Tolerancia deseada: '); %tolerancia
n=13; %puntos de precision
sg=[0 30 60 90 120 150 180 210 240 270 300 330 360]; %angulos de entrada
xd=[273.267353 275.204465 322.391041 286.202767 224.730517 162.397768 109.807621 -42.232424
85.874935 220.985798 345.658967 429.855237 273.267353]; %x deseados
yd=[273.505319 -187.464702 -39.794960 60.066825 117.190931 142.526198 150.000000 -361.903691 -
383.121613 -352.892280 -259.301352 -69.601707 273.505319]; %y deseados
s=deg2rad(sg);
fprintf('\nPOSICION ÁNGULO DE ENTRADA X DESEADA YDESEADA\n');
for i=1:n
    fprintf('\n %d %2d %2f,i,sg(i),xd(i),yd(i));
end
h=input('\n presione enter para continuar ');
fprintf('\nVALORES INICIALES PARA LAS VARIABLES DE LA ECUACION DE CADENA ABIERTA\n');
fprintf('\nx1=%f x2=%f x5=%f x6=%f x9(grados)=%f\n',x1,x2,x5,x6,x9);
fprintf('\nITERACIONES PARA DETERMINAR VALORES DE LA ECUACION DE CADENA ABIERTA');
x9=deg2rad(x9);
for j=1:100
    for i=1:n
        pj=s(i)+x9;
        J(i,1)=2*(x1-yd(i))+2*x2*sin(pj); %matriz jacobiana
        J(i,2)=2*x2+2*(x6-xd(i))*cos(pj)+2*(x1-yd(i))*sin(pj);
        J(i,3)=-2*x5;
        J(i,4)=2*(x6-xd(i))+2*x2*cos(pj);
        J(i,5)=2*x2*((xd(i)-x6)*sin(pj)+(x1-yd(i))*cos(pj));
        F1(i)=x1^2+x2^2-x5^2+x6^2+xd(i)^2+yd(i)^2+2*x2*cos(pj)*(x6-xd(i))+2*x2*sin(pj)*(x1-yd(i))-
        2*x6*xd(i)-2*x1*yd(i);
    end
    v=-(J\F1');
    x1=x1+v(1); %método de Newton-Raphson
    x2=x2+v(2);
    x5=x5+v(3);
    x6=x6+v(4);
    x9=x9+v(5);
    fprintf('\nI=%d x1=%f x2=%f x5=%f x6=%f x9=%f',j,x1,x2,x5,x6,rad2deg(x9));
    if abs(v)<t
        break
    end
end
fprintf('\n\nLOS VALORES DE LOS ESLABONES EN CADENA ABIERTA\n');
fprintf('\nx1=%f x2=%f x5=%f x6=%f x9(grados)=%f\n',x1,x2,x5,x6,rad2deg(x9));
h=input('\n presione enter para continuar');
pk=atan((x1+x2*sin(s+x9)-yd)./(x6+x2*cos(s+x9)-xd)); %angulos datos para entrada de cadena cerrada.
xg=xd+0.5;%x6+x2*cos(s+x9)+x5*cos(pk)-.5;
yg=yd+0.5;%x1+x2*sin(s+x9)+x5*sin(pk)-0.5;
for j=1:200
    for i=1:n
```

```

pj=s(i)+x9;
JJ(i,1)=2*(xg(i)-x6)-2*x2*cos(pj);
JJ(i,2)=2*(yg(i)-x1)-2*x2*sin(pj);
FJ(i)=x1^2+x2^2-x5^2+x6^2+xg(i)^2+yg(i)^2+2*x2*cos(pj)*(x6-xg(i))+2*x2*sin(pj)*(x1-yg(i))-2*x6*xg(i)-2*x1*yg(i);
%JJ(i,1)=tan(pk(i));
%JJ(i,2)=-1;
%FJ(i)=tan(pk(i))*(xg(i)-x6-x2*cos(pj))+x1+x2*sin(pj)-yg(i);
end
uu=-(JJ\FJ);
for i=1:n
    xg(i)=xg(i)+uu(1);
    yg(i)=yg(i)+uu(2);
end
if abs(uu)<t
    break
end
fprintf('\n\nVALORES INICIALES PARA LAS VARIABLES DE LA ECUACION DE CADENA CERRADA\n');
x3=100.000000; %VALORES INICIALES
x4=200.000000;
x7=x6+90.000000;
x8=10.000000;
x10g=-30.000000;
fprintf('\n x3=%f x4=%f x7=%f x8=%f x10(grados)=%f\n',x3,x4,x7,x8,x10g);
fprintf('\nITERACIONES PARA DETERMINAR VALORES DE LA ECUACION DE CADENA CERRADA');
x10=deg2rad(x10g);
for j=1:100
    for i=1:n %matriz jacobiana
        J2(i,1)=2*x3+2*(x6-x7)*cos(pk(i)-x10)+2*(x1-x8)*sin(pk(i)-x10)+2*x2*(cos(s(i)+x9)*cos(pk(i)-x10)+sin(s(i)+x9)*sin(pk(i)-x10));
        J2(i,2)=-2*x4;
        J2(i,3)=2*(x8-x1)-2*(x2*sin(s(i)+x9)+x3*sin(pk(i)-x10));
        J2(i,4)=2*x3*((x6-x7)*sin(pk(i)-x10)-(x1-x8)*cos(pk(i)-x10))+2*x2*x3*(cos(s(i)+x9)*sin(pk(i)-x10)-sin(s(i)+x9)*cos(pk(i)-x10));
        F2(i)=x1^2+x2^2+x3^2-x4^2+x6^2+x7^2+x8^2+2*(x6-x7)*(x2*cos(s(i)+x9)+x3*cos(pk(i)-x10))+2*(x1-x8)*(x2*sin(s(i)+x9)+x3*sin(pk(i)-x10))+2*x2*x3*(cos(s(i)+x9)*cos(pk(i)-x10)+sin(s(i)+x9)*sin(pk(i)-x10))-2*(x6*x7+x1*x8);
    end
    z=-(J2\F2);
    x3=x3+z(1); %método de Newton-Raphson
    x4=x4+z(2);
    x8=x8+z(3);
    x10=x10+z(4);
    fprintf('\nI=%d x3=%f x4=%f x7=%f x8=%f x10=%f',j,x3,x4,x7,x8,rad2deg(x10));
    if abs(z)<t
        break
    end
end
fprintf('\n\nLOS VALORES DE LOS ESLABONES EN CADENA CERRADA\n');
fprintf('\n x3=%f x4=%f x7=%f x8=%f x10(grados)=%f',x3,x4,x7,x8,rad2deg(x10));
h=input('\n presione enter para continuar');

```

```

e1=xd-xg;      %se obtienen los errores de cada posicion deseada.
e2=yd-yg;
fprintf('\n\nPOSICION ÁNGULO X DESEADA   XGENERADA   ERROR   YDESEADA
YGENERADA   ERROR\n');
for i=1:n
    fprintf('\n %d      %2d      %f      %f      %f      %f      %f,i,sg(i),xd(i),xg(i),e1(i),yd(i),yg(i),e2(i));
end
h=input('\n presione enter para continuar');

%_____FIGURA UNO
figure(1);
hold on
plot(xg,yg,'ob');
plot(xd,yd,'or');
grid on;
title('MECANISMO PARA OBTENER TRAYECTORIA DESEADA');
xx2=x6+x2*cos(s(i)+x9);
yx2=x1+x2*sin(s(i)+x9);
xx3=xx2+x3*cos(pk(i)-x10);
yx3=yx2+x3*sin(pk(i)-x10);
line([x6 xx2],[x1 yx2]);
line([xx2 xg(i)],[yx2 yg(i)]);
line([xx2 xx3],[yx2 yx3]);
line([xg(i) xx3],[yg(i) yx3]);
line([xx3 x7],[yx3 x8]);
line([x6 x7],[x1 x8]);
line([-1 5],[0 0]);
line([0 0],[-0.25 3.5]);
axis square
hold on
plot(3,0.25,'oR');
text(3.25,0.25,'(X,Y) Generado');
text(0.25,2.25,'x2');
text(0.7,2.6,'x3');
text(2.25,2.8,'x4');
text(0.1,0.1,'0');

```

## Espacio de trabajo

```
l1 = 45;
l2 = 25;
l3 = 25;

theta1 = 0.7854:0.1:3.2638;
theta2 = 0:0.1:1.5708;
theta3 = 0:0.1:1.5708;
[THETA1, THETA2, THETA3] = meshgrid(theta1, theta2, theta3);
X = l1 * cos(THETA1) + l2 * cos(THETA1 + THETA2) + l3 * cos(THETA1 + THETA2 + THETA3);
Y = l1 * sin(THETA1) + l2 * sin(THETA1 + THETA2) + l3 * sin(THETA1 + THETA2 + THETA3);

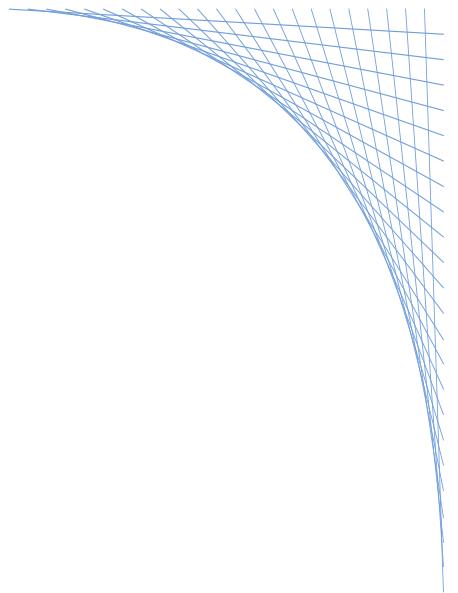
data1 = [X(:) Y(:) THETA1(:)];
data2 = [X(:) Y(:) THETA2(:)];
data3 = [X(:) Y(:) THETA3(:)];
plot(X(:, 1), Y(:, 1), 'b.');
axis equal;
xlabel('X (en mm)')
ylabel('Y (en mm)')
title(' Espacio de trabajo del dedo robótico índice')
```

## Trayectorias comparativas

```
L=95
th=pi/4:(pi/2)/20:3.2638
px=L*cos(th)
py=L*sin(th)
plot(px,py)
xlabel('X (en mm)')
ylabel('Y (en mm)')
```

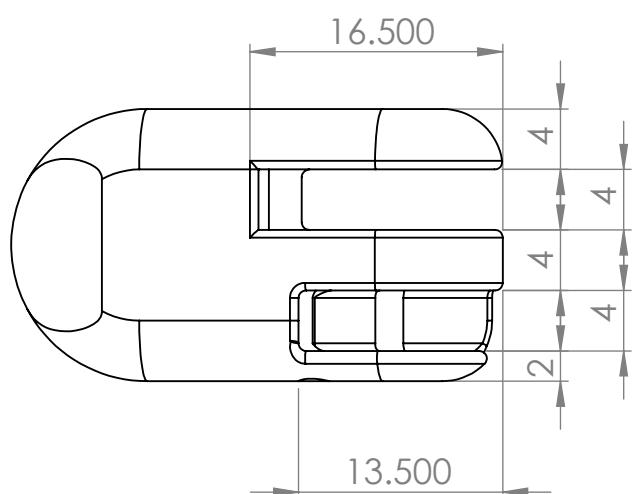
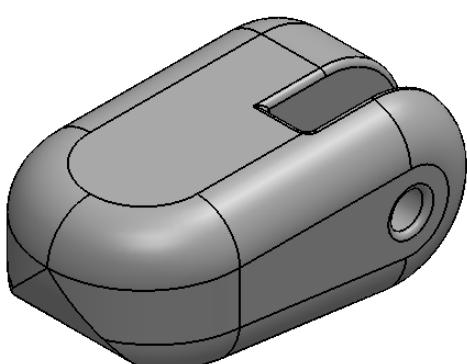
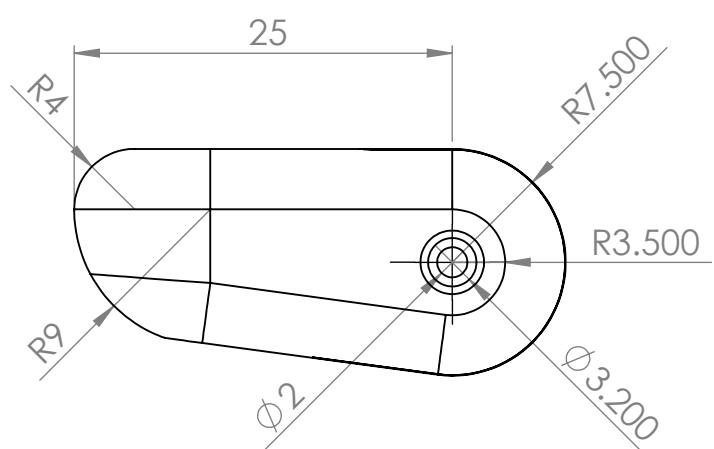
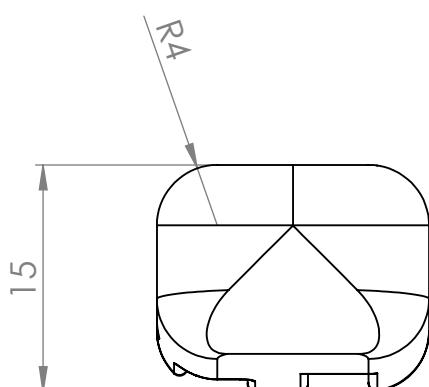
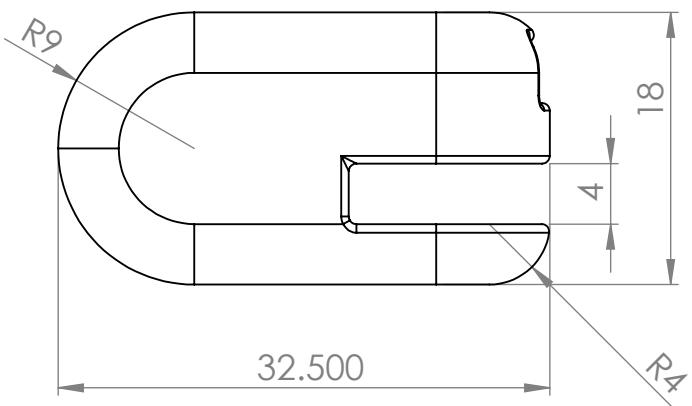
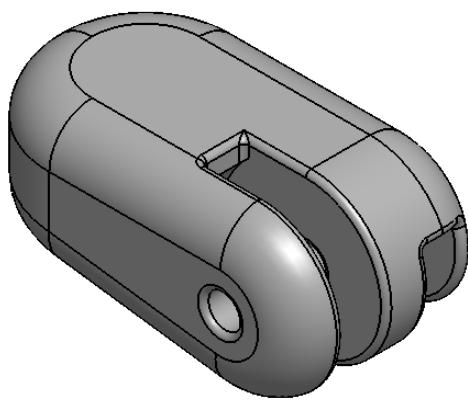
```
L1=91
th1=pi/4:(pi/2)/20:3.0194
px1=L1*cos(th1)
py1=L1*sin(th1)
L2=92
th2=pi/4:(pi/2)/20:3.2812
px2=L2*cos(th2)
py2=L2*sin(th2)
hold on
plot(px1,py1, 'r')
plot(px2,py2, 'g')
hold off
```

```
% Pérez L= 95, .....45°,0,3.2638
% Figliolini L=91 ..... 45°,0,3.0194
% Velázquez L=92 ..... 45°,0,3.2812
```



A3

Planos



ESCALA: 2:1 en mm	Tolerancia lineal: $\pm 0,01$ mm Tolerancia angular: $\pm 0,5^\circ$
Dibujo realizado por:	Ing. Mauricio Aarón Pérez Romero
Revisado por:	Dr. Alejandro T. Velázquez Sánchez
Aprobado por:	Dr. Guillermo Urriolagoitia Calderón
Material:	Nylamid XL

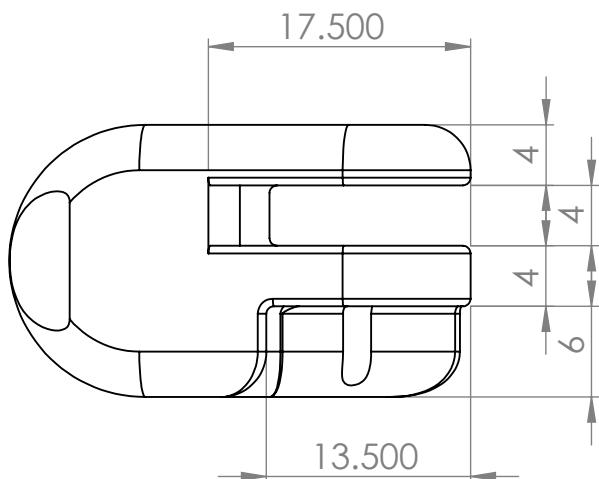
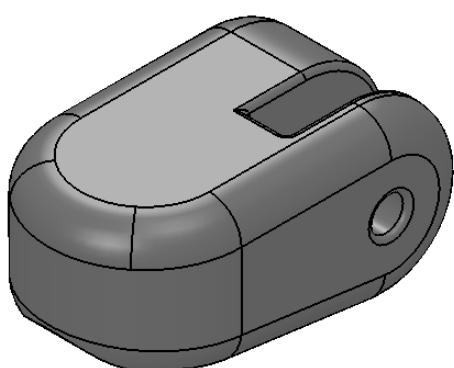
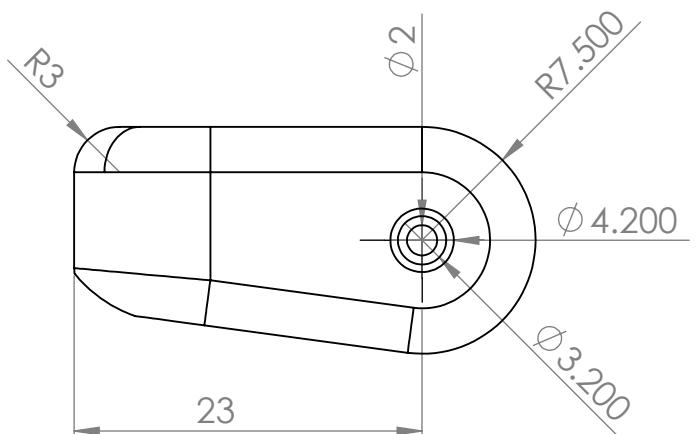
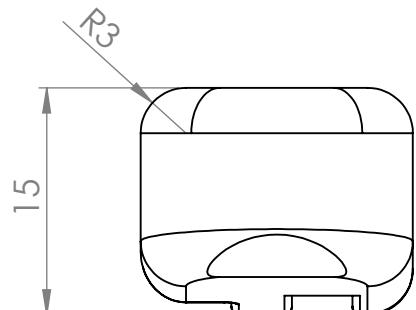
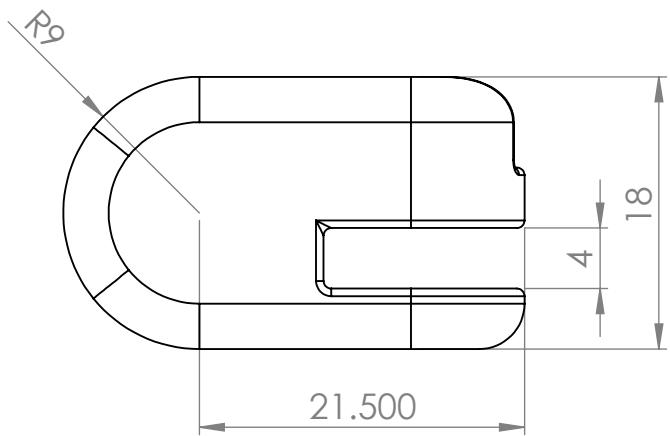
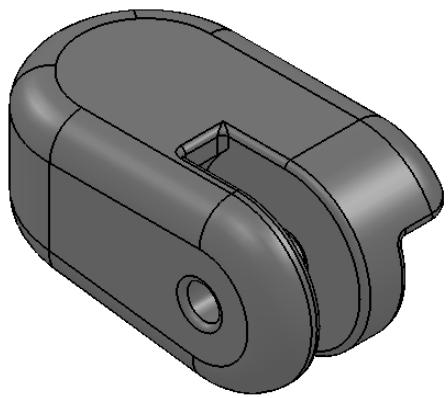


INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
ESIME ZACATENCO



Falange distal (i, m y a)

A3.1



ESCALA: 2:1 en mm	Tolerancia lineal: $\pm 0,01$ mm Tolerancia angular: $\pm 0,5^\circ$
Dibujo realizado por:	Ing. Mauricio Aarón Pérez Romero
Revisado por:	Dr. Alejandro T. Velázquez Sánchez
Aprobado por:	Dr. Guillermo Uriolagoitia Calderón
Material:	Nylamid XL

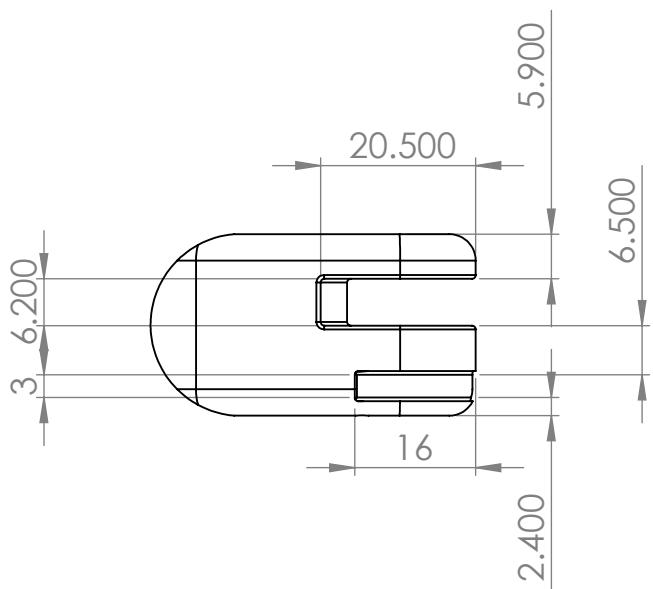
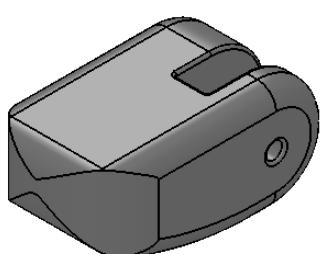
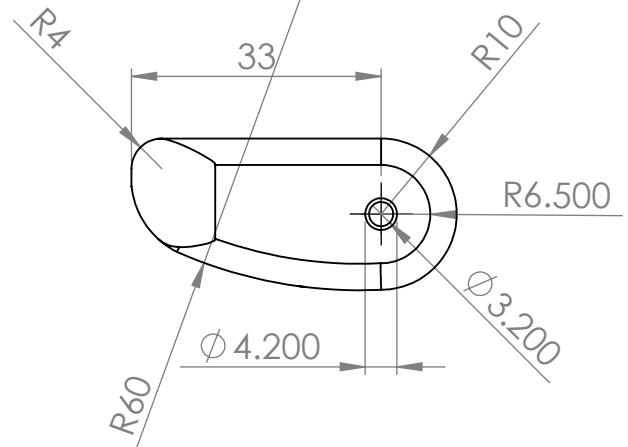
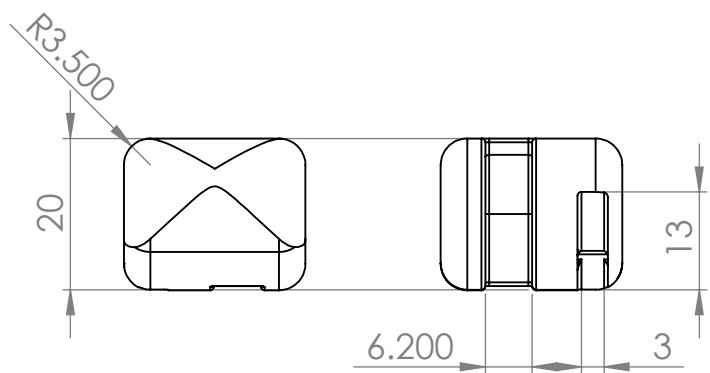
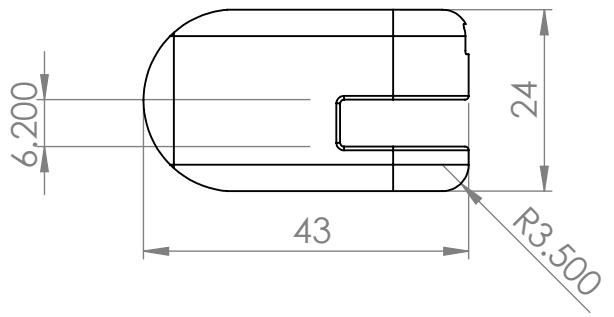
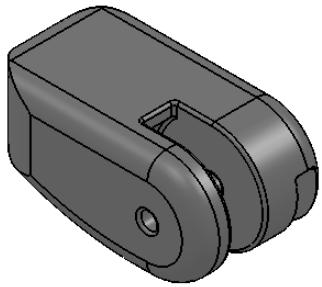


INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
ESIME ZACATENCO



Falange distal meñique

A3.2



ESCALA: 1:1 en mm	Tolerancia lineal: $\pm 0,01$ mm Tolerancia angular: $\pm 0,5^\circ$
Dibujo realizado por:	Ing. Mauricio Aarón Pérez Romero
Revisado por:	Dr. Alejandro T. Velázquez Sánchez
Aprobado por:	Dr. Guillermo Urriolagoitia Calderón
Material:	Nylamid XL

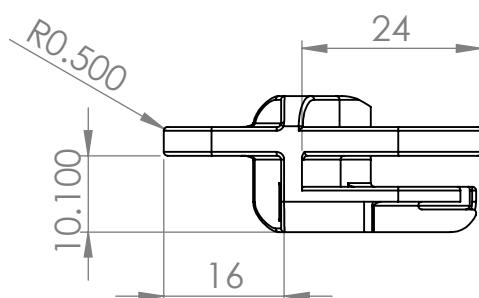
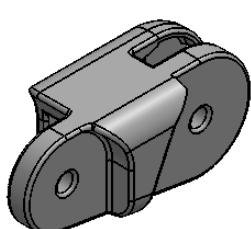
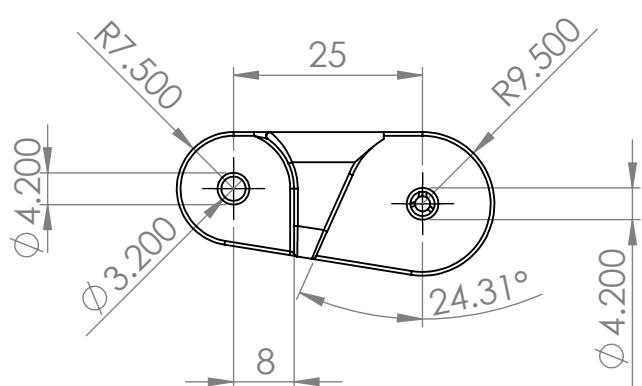
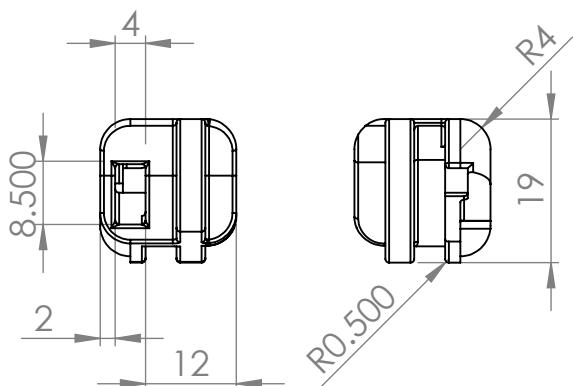
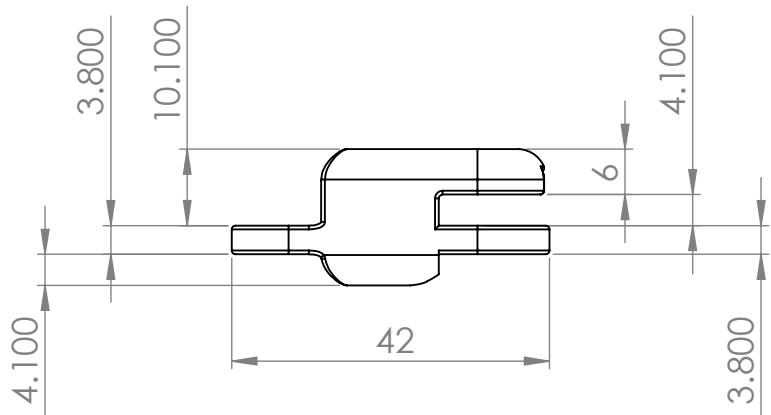
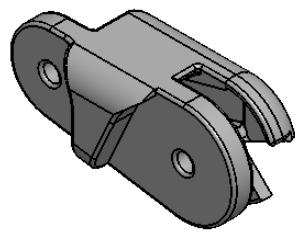


INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
ESIME ZACATENCO

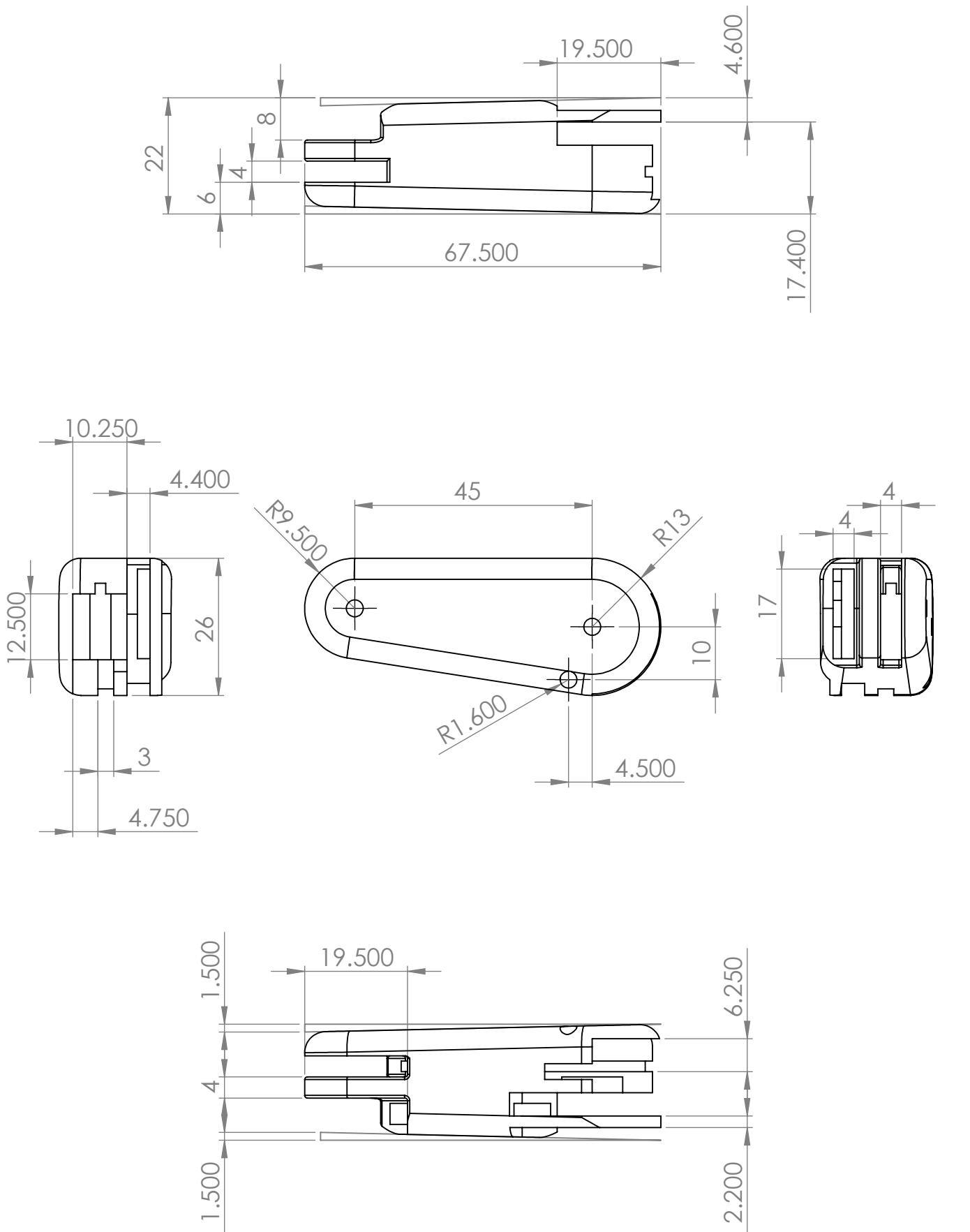


Falange distal pulgar

A3.3



ESCALA: 1:1 en mm	Tolerancia lineal: $\pm 0,01$ mm Tolerancia angular: $\pm 0,5^\circ$	<b>INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL</b> SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN <b>ESIME ZACATENCO</b>
Dibujo realizado por:	Ing. Mauricio Aarón Pérez Romero	
Revisado por:	Dr. Alejandro T. Velázquez Sánchez	
Aprobado por:	Dr. Guillermo Uriolagoitia Calderón	
Material:	Nylamid XL	Falange media (í, m, a, y me)      A3.4



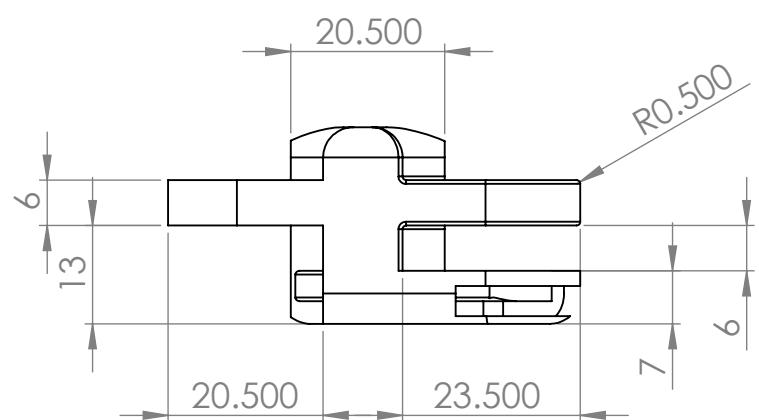
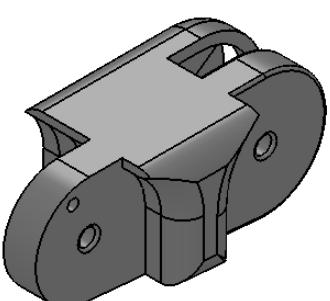
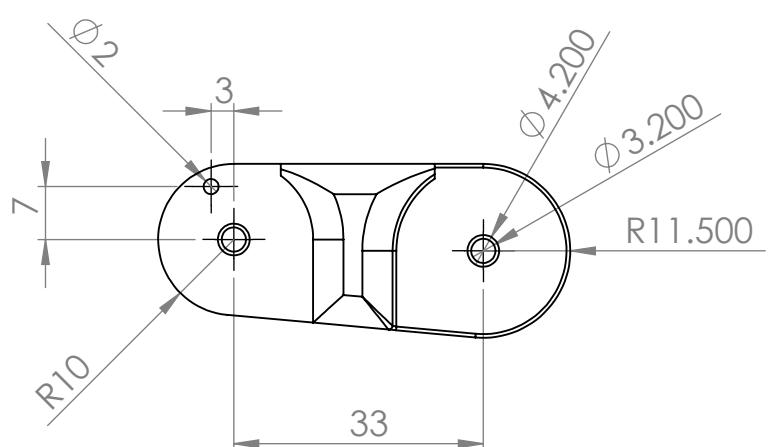
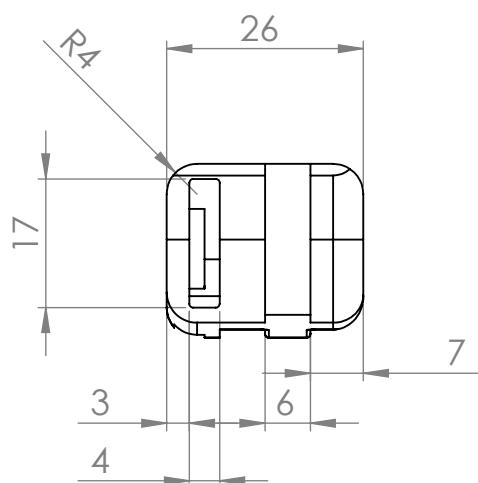
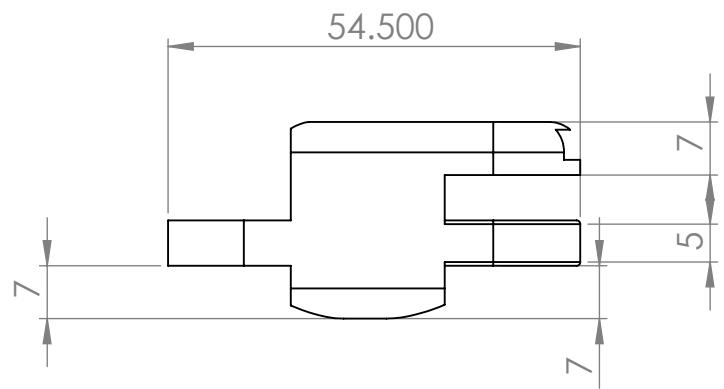
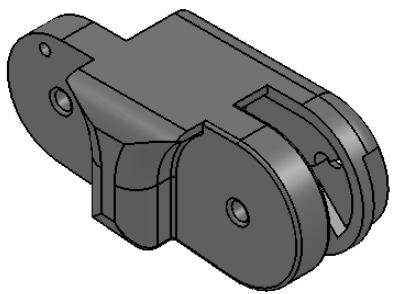
ESCALA: 1:1 en mm	Tolerancia lineal: $\pm 0,01$ mm Tolerancia angular: $\pm 0,5^\circ$
Dibujo realizado por:	Ing. Mauricio Aarón Pérez Romero
Revisado por:	Dr. Guillermo Urriolagoitia Calderón
Aprobado por:	Dr. Guillermo Urriolagoitia Calderón
Material:	Nylamid XL

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
ESIME ZACATENCO



Falange proximal (í, m, a y me)

A3.5



ESCALA: 1:1 en mm	Tolerancia lineal: $\pm 0,01$ mm Tolerancia angular: $\pm 0,5^\circ$
Dibujo realizado por:	Ing. Mauricio Aarón Pérez Romero
Revisado por:	Dr. Alejandro T. Velázquez Sánchez
Aprobado por:	Dr. Guillermo Urriolagoitia Calderón
Material:	Nylamid XL

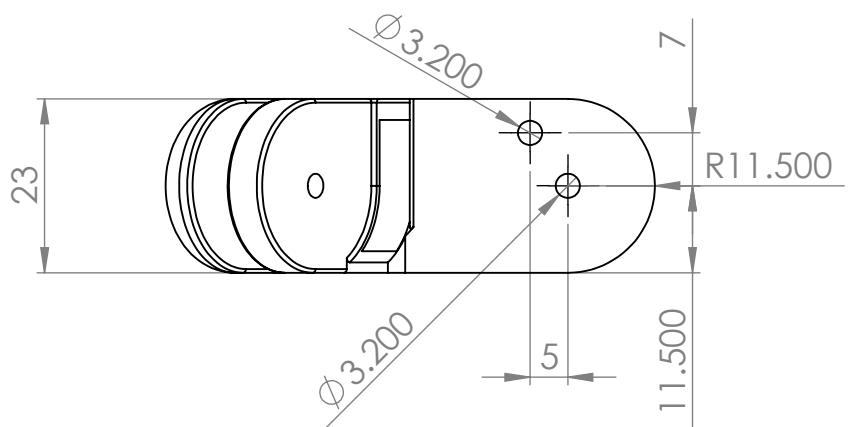
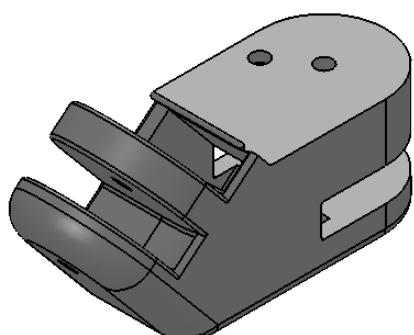
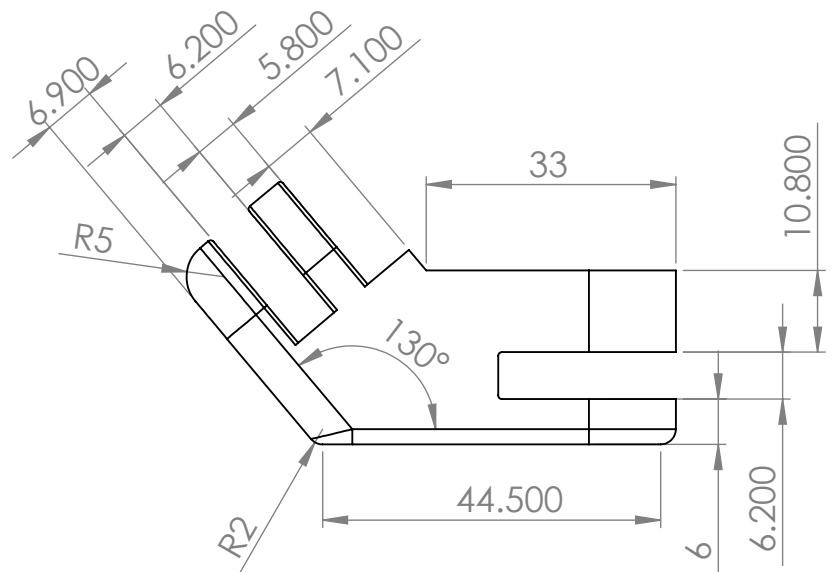
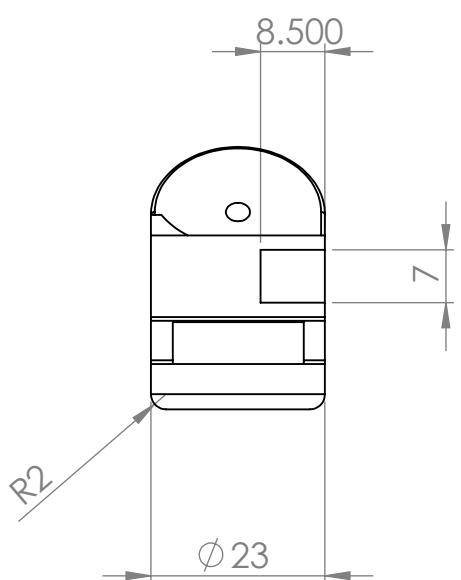
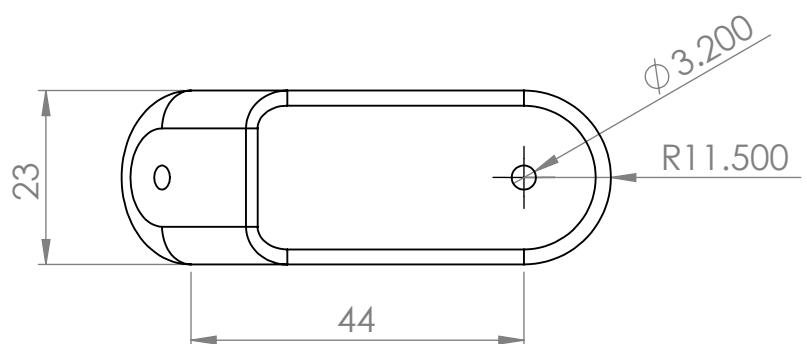
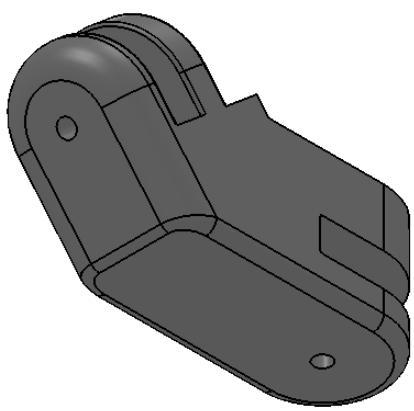


INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
ESIME ZACATENCO



Falange proximal pulgar

A3.6



ESCALA: 1:1 en mm	Tolerancia lineal: $\pm 0,01$ mm Tolerancia angular: $\pm 0,5^\circ$
Dibujo realizado por:	Ing. Mauricio Aarón Pérez Romero
Revisado por:	Dr. Alejandro T. Velázquez Sánchez
Aprobado por:	Dr. Guillermo Urriolagoitia Calderón
Material:	Nylamid XL

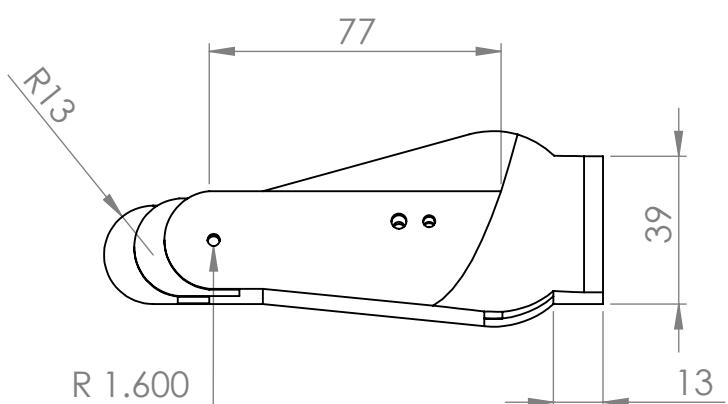
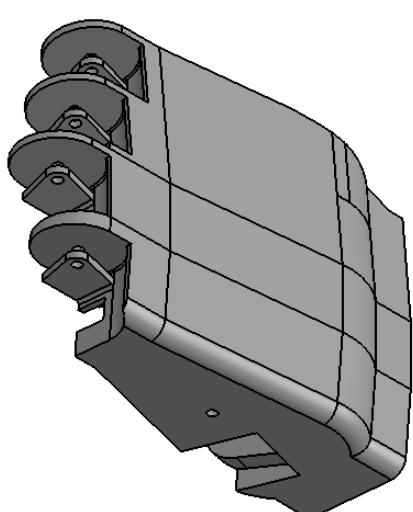
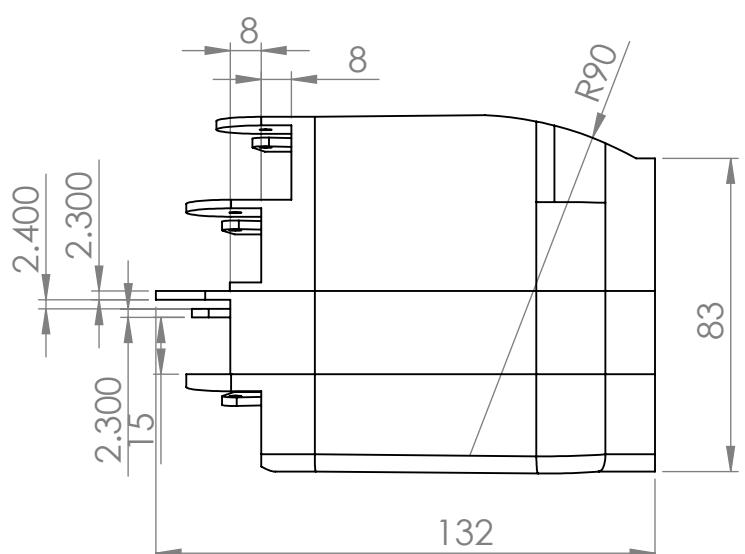
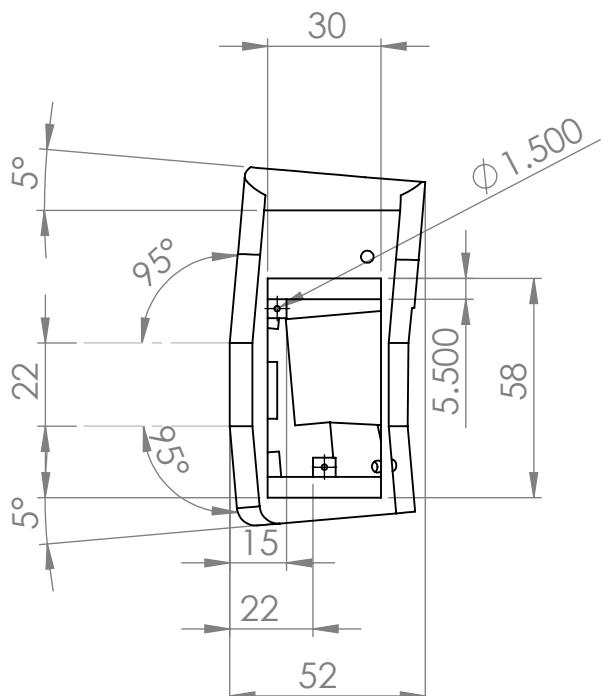
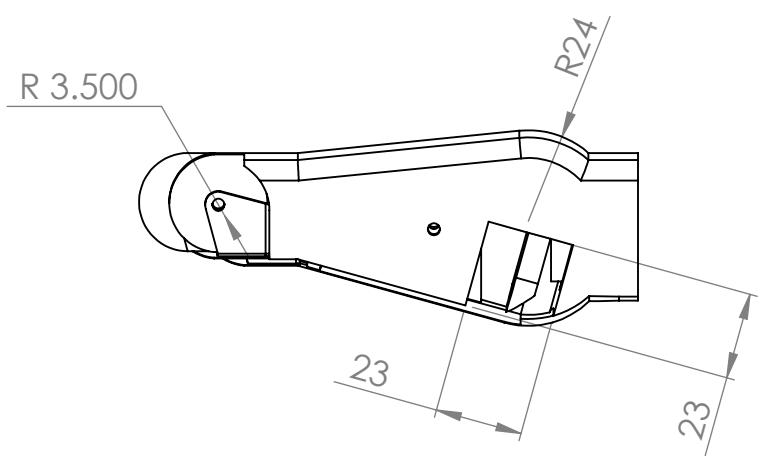
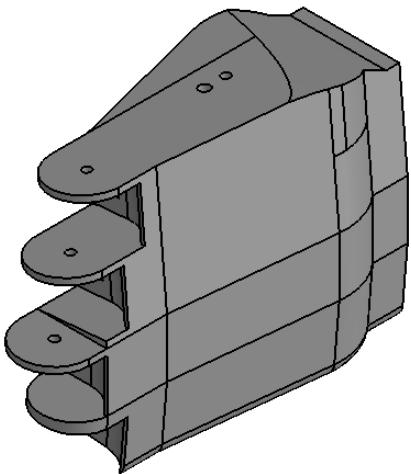


INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
ESIME ZACATENCO



Metacarpiano pulgar

A3.7



ESCALA: 1:2 en mm	Tolerancia lineal: $\pm 0,01$ mm Tolerancia angular: $\pm 0,5^\circ$
Dibujo realizado por:	Ing. Mauricio Aarón Pérez Romero
Revisado por:	Dr. Alejandro T. Velázquez Sánchez
Aprobado por:	Dr. Guillermo Urriolagoitia Calderón
Material:	Nylamid XL

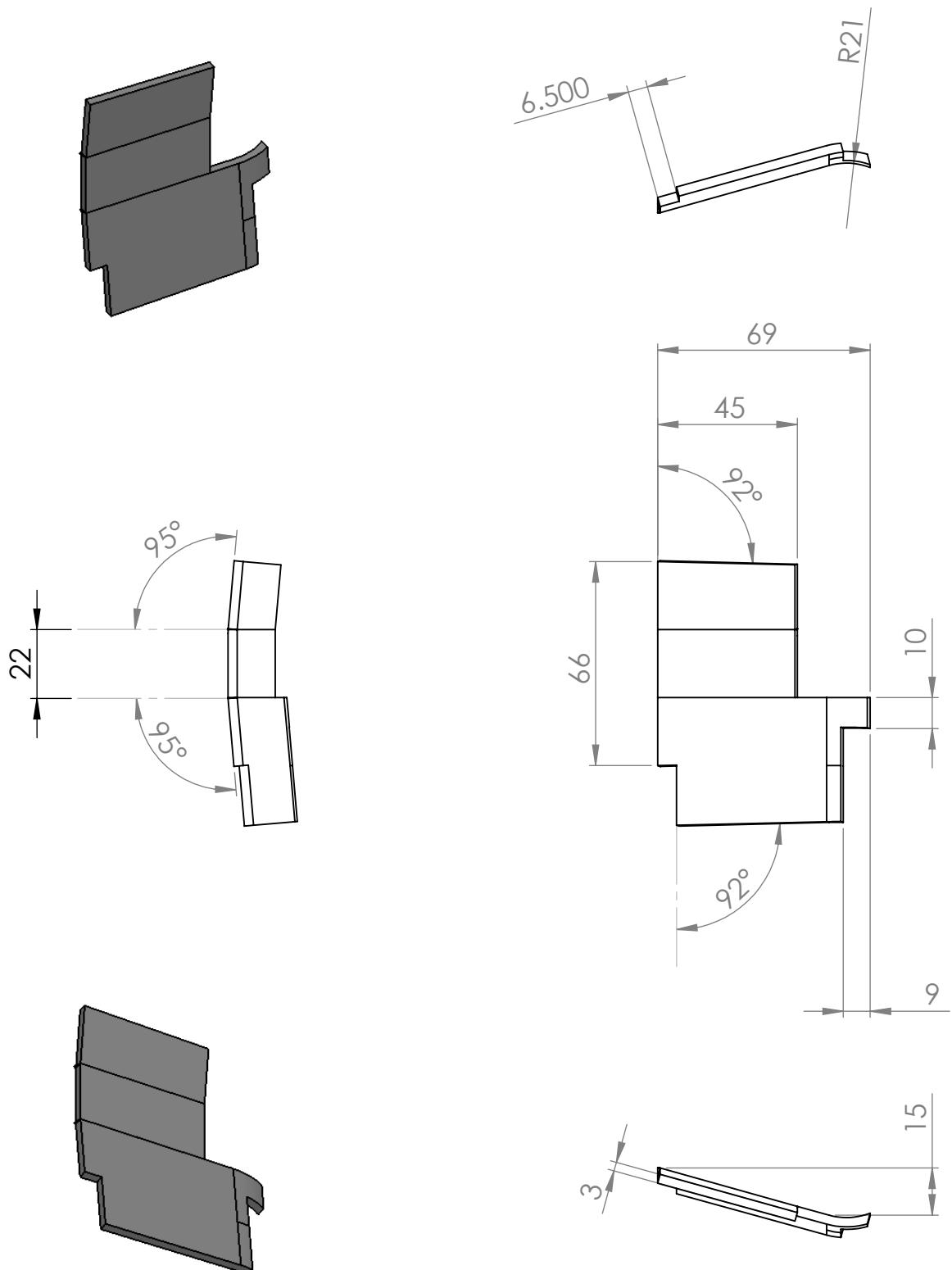


INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
ESIME ZACATENCO



Palma

A3.8



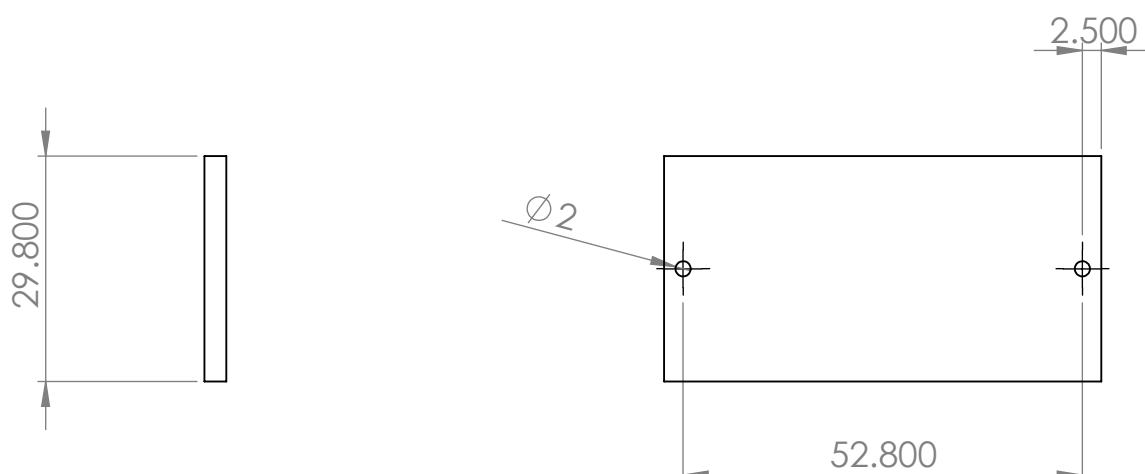
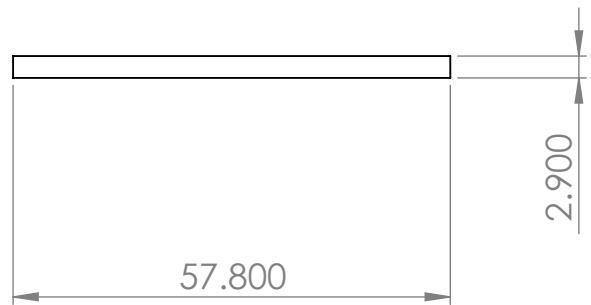
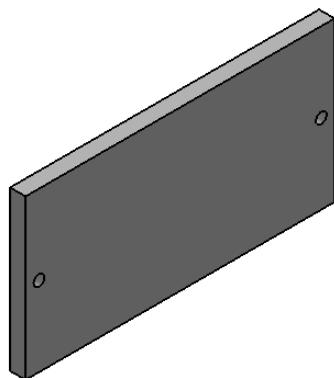
ESCALA: 1:2 en mm	Tolerancia lineal: $\pm 0,01$ mm Tolerancia angular: $\pm 0,5^\circ$
Dibujo realizado por:	Ing. Mauricio Aarón Pérez Romero
Revisado por:	Dr. Alejandro T. Velázquez Sánchez
Aprobado por:	Dr. Guillermo Urriolagoitia Calderón
Material:	Nylamid XL

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
ESIME ZACATENCO



Tapa palmar

A3.9



ESCALA: 1:1 en mm	Tolerancia lineal: $\pm 0,01$ mm Tolerancia angular: $\pm 0,5^\circ$
Dibujo realizado por:	Ing. Mauricio Aarón Pérez Romero
Revisado por:	Dr. Alejandro T. Velázquez Sánchez
Aprobado por:	Dr. Guillermo Urriolagoitia Calderón
Material:	Nylamid XL

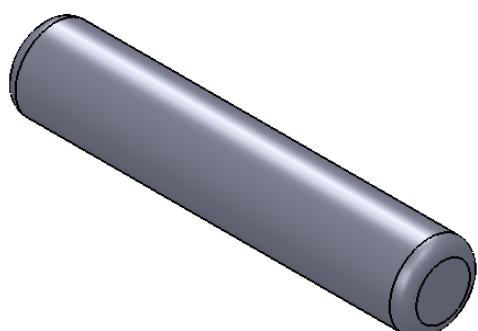
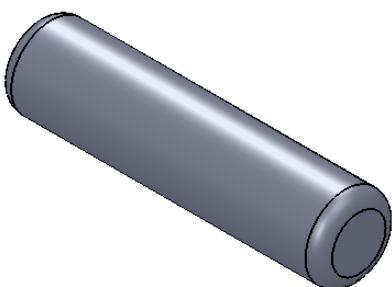
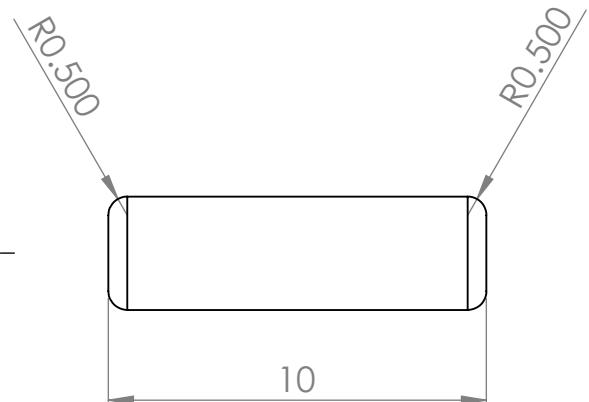
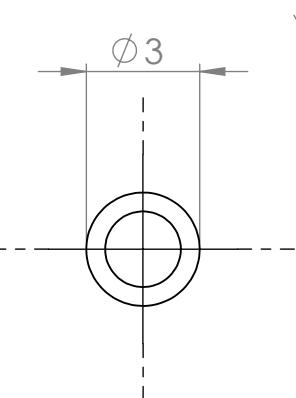
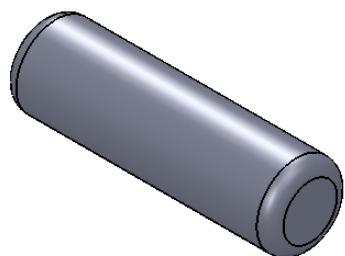


INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
ESIME ZACATENCO



Tapa transversal

A3.10



ESCALA: 5:1 en mm	Tolerancia lineal: $\pm 0,01$ mm Tolerancia angular: $\pm 0,5^\circ$	 <b>INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL</b> SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN <b>ESIME ZACATENCO</b>
Dibujo realizado por:	Ing. Mauricio Aarón Pérez Romero	
Revisado por:	Dr. Alejandro T. Velázquez Sánchez	
Aprobado por:	Dr. Guillermo Urriolagoitia Calderón	
Material:	Nylamid XL	Ejes (10, 12 y 15 mm)      A3.11