



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

**“DISEÑO DE PROTOTIPO DE ANTEBRAZO CON
EFECTOR FINAL PARA PACIENTES CON
MALFORMACIONES TRANSRADIAL BE”**

RESIDENCIA PROFESIONAL

**QUE PRESENTA:
MOISES BUENO LÓPEZ**

**ASESOR DEL PROYECTO:
DR. ROBERTO CARLOS GARCÍA GÓMEZ**

TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS, JUNIO DE 2017

INTRODUCCIÓN

Se presenta una recopilación de información de las primeras prótesis y dispositivos robóticos para la extremidad superior, en donde se describen las partes que lo constituyen como mecanismos, sensores, actuadores, fuentes de energía utilizadas, material de soporte, al analizar los dispositivos utilizados ayudará en la toma de decisiones y delimitación del proyecto al dar una propuesta de solución a la problemática. Se abordan temas de amputación, efectores finales, de anatomía y fisiología del miembro superior.

Se sigue una metodología implementada por Mauricio Aarón Pérez Romero para una mano robótica articulada, donde se utilizan 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.

Se plantean instrucciones para obtener las medidas de las falanges y partes de la mano, las cuales sirven como valores máximos para el diseño del efector final, al hacer el modelo tridimensional se utiliza el programa de cómputo SolidWorks, para el antebrazo se plantea una metodología de diseño tridimensional mediante fotografía utilizando el complemento Autotrace.

Se describe el análisis de resultados obtenidos a partir de las metodologías propuestas. Por último se presentan las conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros a esta investigación.

Índice general

INTRODUCCIÓN	2
Índice general	3
Índice de Figuras	6
Índice de Tablas	11
1 CARACTERIZACION DEL PROYECTO	12
1.1 Antecedentes del problema.....	13
1.2 Definición del problema.....	14
1.3 Objetivos Generales y Especificos.....	15
1.3.1 Objetivo General.....	15
1.3.1 Objetivos Específicos	15
1.4 Justificación.....	16
1.5 Delimitación.....	17
2 ESTADO DEL ARTE	18
2.1 Primeros hallazgos históricos.....	19
2.2 Manos robóticas.....	24
2.2.1 Manos robóticas no-antropomórficas.....	24
2.2.2 Manos robóticas semi-antropomórficas	31
2.2.3 Manos robóticas antropomórficas.....	40
3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	61
3.1 Lesiones y niveles de amputación	62
3.1.1 Niveles de amputación de la extremidad superior	62
3.2 Prótesis	64
3.2.2 Clasificación de los tipos de prótesis del miembro superior	65
3.2.2.1 Según nivel de amputación:	65

3.2.2.2	Según su función:	66
3.2.2.3	Según la fuente de energía impulsora:	67
3.2.3	Componentes de prótesis de miembro superior	69
3.3	Efectores finales.....	70
3.3.4	Efactor final de pinza o dedos mecánicos	71
3.3.5	Parámetros y limitaciones de las pinzas.....	71
3.3.6	Efactor final multiarticulado.....	72
3.3.7	Manos robóticas como efectores finales.....	72
3.4	Introducción a la anatomía del brazo humano	74
3.4.8	Anatomía de la superficie del miembro superior.....	74
3.4.8.1	Superficie de la mano	74
3.4.9	Sistema óseo.....	76
3.4.10	Sistema articular.....	82
3.4.11	Ligamentos y tendones.....	86
3.4.12	Musculatura del brazo	91
3.4.13	Movimientos del brazo.....	97
3.4.13.1	Movimientos de las articulaciones en la muñeca	98
3.4.13.2	Movimiento de los dedos.....	99
3.4.13.3	Movimiento del pulgar	100
3.4.13.4	Ejes de los dedos en cierre palmar	102
3.4.14	Arcos de la mano.....	103
3.4.15	Sujeción de objetos	104
4	METODOLOGÍA DE DISEÑO.....	106
4.1	Metodología de diseño.....	107
4.2	Método de diseño.....	107

4.2.1	Clarificación de objetivos	108
4.2.2	Establecimiento de funciones	110
4.2.3	Requerimientos.....	112
4.2.4	Características de los componentes.....	113
4.2.5	Generación de alternativas	115
4.2.6	Evaluación de alternativas	117
4.2.6.1	Recepción de la señal.....	118
4.2.6.2	Dispositivo de control	119
4.2.6.3	Elementos de transmisión.....	120
4.2.6.4	Actuadores	121
4.2.6.5	Suministro de energía	123
4.2.6.6	Material de soporte	123
4.3	Diseño conceptual.....	124
5	MODELADO TRIDIMENSIONAL	126
5.1	Modelado tridimensional	127
5.2	Obtención de las mediciones	127
5.3	Metodología del modelado	133
5.3.1	Falange Distal.....	134
5.3.2	Falange Media	136
5.3.3	Falange Proximal.....	137
5.3.4	Palma	138
5.3.5	Antebrazo	140
5.3.6	Ensamble.....	146
6	Resultados	147
7	Conclusiones.....	151

8	Recomendaciones	152
9	Fuentes de información.....	153

Índice de Figuras

Figura 2.1	Representación de la evolución de las prótesis (2)	19
Figura 2.2	Mano de Alt-Ruppin construida con hierro en el año 1400 (3).	20
Figura 2.3	Mano de Hierro de Berlichingen (4).....	20
Figura 2.4	Mano artificial Le Petit Lorraine (5).....	21
Figura 2.5	Prótesis de mano con pulgar móvil y gancho dividido sagitalmente (3).	22
Figura 2.6	Prótesis actual de gancho Hook.....	22
Figura 2.7	Prótesis: a) Europea 1850-1910 (6), b) De doble gancho (6) y c) Sauerbruch.....	23
Figura 2.8	Stanford/JPL Hand – Universidad de Stanford.....	25
Figura 2.9	Barret Hand - Barrett Technology Inc.....	25
Figura 2.10	MARS Hand - Universidad de Laval.....	27
Figura 2.11	a)SARAH M1 Hand b) SARAH P1 Hand c) SARAH CSA Hand. Universidad de Laval.....	28
Figura 2.12	a) SARAH UKAEA Hand b) SARAH Pneumatic Hand. Universidad de Laval.....	29
Figura 2.13	High-Speed Tokyo Hand - Universidad de Tokyo	29
Figura 2.14	La High-Speed Tokyo Hand realizando tareas de manipulación de objetos.....	30
Figura 2.15	Mano robótica UTAH-MIT	31
Figura 2.16	Robot Humanoide COG - Laboratorio de Inteligencia Artificial del MIT	32
Figura 2.17	Mano robótica del Robot Humanoide COG - Laboratorio de Inteligencia Artificial del MIT.....	33
Figura 2.18	DIST-Hand – Universidad de Génova	34
Figura 2.19	DLR Three finger robot hand - Centro de Investigación Aeroespacial Alemania	35
Figura 2.20	DLR-Hand Centro de Investigación Aeroespacial Alemania (DLR)	36

Figura 2.21 Mano robótica DLR Hand II.....	37
Figura 2.22 DLR Hand II sujetando un cautín y b) tocando el piano.	38
Figura 2.23 HIT/DLR hand- Harbin Institute of Technology y el Centro de Investigación Aeroespacial Alemán.....	39
Figura 2.24 La DLR/HIT hand - Centro de Investigación Aeroespacial Alemán y el Harbin Institute of Technology.....	39
Figura 2.25 Prótesis endoesquelética de mano	40
Figura 2.26 a) Mano robonaut sin guante b) NASA/DARPA Robonaut después de adquirir un taladro c) Robonaut 2.....	41
Figura 2.27 Ultralight Anthropomorphic Hand - Research Center of Karlsruhe	42
Figura 2.28 TUAT-Karlsruhe Humanoid Hand - Universidad de Tokyo y Karlsruhe	43
Figura 2.29 Manus – Hand.....	44
Figura 2.30 Mecanismos independientes de la Manus-Hand.....	45
Figura 2.31 Esquema del sistema de poleas y los tendones cruzados de la Manus-Hand.....	46
Figura 2.32 Esquema de la Rueda de Génova y esquema de funcionamiento del pulgar de la Manus-Hand.....	46
Figura 2.33 GIFU Hand II - Universidad de GIFU.....	48
Figura 2.34 a) Sensores táctiles distribuidos de FSR de la GIFU Hand II b) de la GIFU Hand III	49
Figura 2.35 GIFU Hand III - Universidad de GIFU.....	50
Figura 2.36 Ejemplos de agarre esférico, cilíndrico y prismático de la GIFU Hand III	50
Figura 2.37 KH Hand Type S - Universidad de GIFU	51
Figura 2.38 UB Hand II - Universidad de Bologna.....	52
Figura 2.39 Integración de la UB Hand II con un antebrazo.....	53
Figura 2.40 UB Hand III - Universidad de Bologna.....	53
Figura 2.41 a) Esquema de la estructura interna del dedo de la UB Hand III b) Dedo recubierto.....	54
Figura 2.42 La UB Hand III integrada a su antebrazo	55

Figura 2.43 Prototipos anteriores de la Shadow Hand - Shadow Robot Company	56
Figura 2.44 Shadow Hand C3 - Shadow Robot Company	57
Figura 2.45 Sensores de tacto desarrollados en cooperación con la Universidad de Bielefeld para la Shadow Hand	57
Figura 2.46 Prótesis Bebionic [REF]	58
Figura 2.47 Prótesis i-LIMB [REF].....	59
Figura 2.48 Prótesis: a) Michelangelo [REF] y b) Myo Hand [REF].....	59
Figura 2.49 Prótesis UTAH ARM [REF]	60
Figura 3.1 Desarticulaciones y amputaciones de la extremidad superior (8)	62
Figura 3.2 Niveles de amputación en miembro superior	66
Figura 3.3 Prótesis cosméticas	66
Figura 3.4 Prótesis mecánicas (8).....	67
Figura 3.5 Prótesis eléctricas	68
Figura 3.6 Prótesis mioeléctricas (8)	69
Figura 3.7 Prótesis híbridas.....	69
Figura 3.8 Componentes de prótesis de miembro superior.....	70
Figura 3.9 Efecto final con dedos mecánicos.....	71
Figura 3.10 Vista palmar de la mano [26].....	75
Figura 3.11 Vista dorsal de la mano (26)	76
Figura 3.12 Regiones del miembro superior (27)	76
Figura 3.13 Huesos del miembro superior (27)	77
Figura 3.14 Húmero derecho a) Visión ventral b) Visión dorsal (26)	78
Figura 3.15 Radio y cúbito de un antebrazo derecho a) Visión ventral b) Visión dorsal (26)	79
Figura 3.16 Huesos del carpo de la mano derecha en una visión proximal (26) ...	81
Figura 3.17 Huesos de la mano derecha en una visión palmar (26)	82
Figura 3.18 Elementos esqueléticos implicados en la articulación del codo derecho (26).....	83
Figura 3.19 Superficies articulares de la articulación mediocarpiana de la mano derecha (26)	83

Figura 3.20 Visión de las superficies articulares de un antebrazo derecho del radio y del cúbito a)Proximales b) Distales (26)	84
Figura 3.21 Superficies articulares de la articulación radiocarpiana de la mano derecha (26)	84
Figura 3.22 Articulaciones de la mano derecha (vista dorsal) (26).....	85
Figura 3.23 Complejo capsuloligamentario de la articulación del codo derecho en posición de 90° de flexión a) visión dorsal; b)Visión medial c) Visión lateral d) en posición de extensión, vista ventral (26)	86
Figura 3.24 Disposición del ligamento anular del radio en la articulación radiocubital proximal derecha, a) después de haber retirado el húmero b) después de retirar al radio (26).....	87
Figura 3.25 Ligamentos de la mano (vista dorsal) (26)	88
Figura 3.26 Ligamentos de la mano (vista palmar) (26)	89
Figura 3.27 Complejo capsuloligamentario y vaina tendinosa digital del dedo medio derecho a)Visión palmar; b) Visión lateral (26).....	90
Figura 3.28 Músculos bíceps braquial y braquial, brazo derecho, visión ventral (26)	91
Figura 3.29 Músculos tríceps braquial y ancóneo. Brazo derecho, visión dorsal (26)	91
Figura 3.30 Flexores superficiales (M.m. pronador redondo, flexor superficial de los dedos, flexor radial del carpo, flexor cubital del carpo y palmar largo) antebrazo derecho, visión ventral (26).	92
Figura 3.31 Flexores profundos (Mm. flexor profundo de los dedos, flexor largo del pulgar y pronador cuadrado) antebrazo derecho, visión ventral (26).	92
Figura 3.32 Musculatura radial (Mm. braquiorradial, extensor radial largo del carpo y extensor radial corto del carpo) antebrazo derecho, visión dorsal (26)	93
Figura 3.33 Extensores superficiales (Mm. extensor de los dedos, extensor del muñequé y extensor cubital del carpo) antebrazo derecho, visión dorsal (26).	93
Figura 3.34 Extensores profundos (Mm. supinador. abductor largo del pulgar, extensor corto del pulgar, extensor largo del pulgar y extensor del índice), antebrazo derecho, visión dorsal (26).	94

Figura 3.35 Musculatura de la eminencia tenar (Mm. abductor corto del pulgar, aductor del pulgar, flexor corto del pulgar y oponente del pulgar) y de la eminencia hipotenar (Mm. abductor del meñique, flexor del meñique y oponente del meñique) Mano derecha, palmar (26)	95
Figura 3.36 Musculatura del metacarpo, mano derecha, visión palmar. a)Mm. lubricales I-IV; b)Mm. interóseos palmares I-III; c) Mm. interóseos dorsales I-IV (26).....	96
Figura 3.37 Movimiento del codo flexo-extensión	97
Figura 3.38 Movimiento del codo prono-supinación	97
Figura 3.39 Movimientos de la muñeca: a) flexión y extensión, b) cubital y radial (26).....	98
Figura 3.40 Movimientos de la articulación MCF (26)	99
Figura 3.41 Flexión de las articulaciones IFP (26)	99
Figura 3.42 a) Flexión y b) Extensión de las articulaciones IFP (26).....	100
Figura 3.43 Aducción y Abducción de las articulaciones MCF (26).....	100
Figura 3.44 Ejes de movimiento (mano derecha, vista palmar) (26)	101
Figura 3.45 Flexión y extensión del pulgar en a) MCF y b)IF (32).....	101
Figura 3.46 Cierre palmar.....	103
Figura 3.47 a) Arcos de la mano (29) y b) Arco distal proximal (33)	104
Figura 3.48 Sujeción : A) Puntual, B)Lateral, C)Palmar y D) Gancho (26)	105
Figura 3.49 Sujeción: A) Cilíndrica y B) Esférica (29)	105
Figura 4.1 Método de diseño (35)	108
Figura 4.2 Árbol de objetivos del antebrazo robótico	109
Figura 4.3 Caja negra para establecer funciones.....	110
Figura 4.4 Diagrama de función principal.....	111
Figura 4.5 Funciones secundarias	116
Figura 4.6 Diagrama morfológico de posibles soluciones	117
Figura 4.7 Sensores adaptables al sistema: a) Mioeléctrico, b) Flexión y c) Presión	118
Figura 4.8 Componentes de un actuador	122

Figura 4.9 Clasificación de actuadores según la energía que utilizan sus transformadores de energía.	123
Figura 4.10 Tipos de Nylimid.....	124
Figura 4.11 Esquema general de la mano robótica.....	125
Figura 5.1 Posiciones de la mano para los pasos 1, 2 y 3	128
Figura 5.2 Posiciones de la mano para los pasos 4, 5, 6 y 7	128
Figura 5.3 Posiciones de la mano para las mediciones de las articulaciones interfalángicas del paso 8.....	129
Figura 5.4 Posiciones de la mano para la obtención de medidas del falange II ..	129
Figura 5.5 Posiciones de la mano los pasos 9 y 10	130
Figura 5.6 Posiciones de la mano para los pasos 11 y 12	130
Figura 5.7 Posiciones de la mano para los pasos 13 y 14	131
Figura 5.8 Imagen 1 a) Creación de un documento, b) Representación	¡Error! Marcador no definido.
Marcador no definido.	
Figura 5.10 Trazado de falange distal	¡Error! Marcador no definido.
Figura 5.9 Plano de trabajo	¡Error! Marcador no definido.
Figura 5.11 a)Cortes para dar forma b) cortes para la articulación c)Redondeo y pieza final	¡Error! Marcador no definido.
Figura 5.12 Trazado de la falange media.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 5.13 Operaciones sobre la falange media.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 5.14 Trazado de la falange proximal	¡Error! Marcador no definido.
Figura 5.15 Operaciones sobre la falange proximal .	¡Error! Marcador no definido.
Figura 5.16 Operaciones sobre la palma	139

Índice de Tablas

Tabla 3.1 Causas de amputación y porcentaje [1]	63
Tabla 3.2 Rango de movimiento en articulaciones.....	102
Tabla 4.1 Especificaciones del equipo	112
Tabla 4.2 Ponderación de requerimientos deseables	114
Tabla 4.3 Despliegue de los requerimientos	115
Tabla 4.4 Comparación de los termoplásticos Nylamid.....	124

Tabla 5.1 Medidas de la mano del paciente 131

1 CARACTERIZACION DEL PROYECTO

1.1 Antecedentes del problema

En las presentaciones del 4 de marzo del 2015 de la Academia Nacional de Medicina del tema: “Los amputados, un reto para el estado”, se dio una perspectiva de cuál es el impacto social de las amputaciones en México. Respecto a los datos de incidencia, se mencionó que el INEGI, reporta que el número de amputados es cerca de 780 mil. Por otra parte se comentó que la Academia Nacional de Cirugía reporta que se amputan en México 75 personas diarias. Los datos a 2014 muestran que hay cerca de 900 mil amputados en México, la mayor parte de ellos tienen alguna incapacidad e incluye personas de todas las edades. Esta es la población que se debe atender para lograr su rehabilitación (1).

En este contexto es necesario hacerse las siguientes preguntas con respecto al Sistema de Salud de México:

- ¿Quién atiende a los amputados?
- ¿Dónde se atienden?
- ¿Quién tiene la responsabilidad de rehabilitarlos?

Se comentó que el IMSS sólo atiende a los amputados por accidente de trabajo, y que son la minoría de los pacientes que sufren amputaciones. En cuanto al DIF Nacional mencionó que tiene un papel importante en la rehabilitación, pero cuenta con sólo 11 unidades en las delegaciones de algunos estados que fabrican prótesis, pero no tiene el presupuesto adecuado, por lo que sólo fabrican alrededor de 400 prótesis al año.

En lo que respecta al Instituto Nacional de Rehabilitación (INR) mencionó que da prótesis a 120 pacientes al año. El Hospital Militar también participa en la rehabilitación de amputados, pero no proporciona datos sobre el número de pacientes que atiende.

El CRIMAL IAP Querétaro es una institución privada que produce prótesis para 130 pacientes al año. Los CRIT no tienen fabricantes de prótesis, sino que las mandan a hacer a proveedores externos y llegan a producir prótesis para 775 pacientes al año.

Considerando los datos presentados es patente que en el país la producción de prótesis no llega a 1500 en un año. De modo que si cada año hay más de 27 mil amputados, es aparente que la mayor parte de los pacientes amputados no son atendidos. Esta situación representa un problema de salud y económico muy importante que no está siendo atendido de manera integral (1).

1.2 Definición del problema

Alto nivel de amputados y bajo mercado en la construcción de prótesis personalizadas y a precios no accesibles.

1.3 Objetivos Generales y Especificos

1.3.1 Objetivo General

Diseño de un prototipo de antebrazo y efector final, utilizando software Solidworks (CAD), para construcción en impresión 3D u otras afines.

1.3.1 Objetivos Específicos

- 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.
- Recopilación de información respecto a la anatomía, fisiología y mecánica del movimiento referente al miembro superior.
- Plantear (usar o elegir) una metodología de diseño, para determinar las características del prototipo y obtener un diseño conceptual.
- Crear un modelo tridimensional con apoyo de equipo de cómputo y crear una metodología de diseño mediante fotografía para obtener perfiles del antebrazo.
- Modificación de los modelos tridimensionales del prototipo para posibles impresiones tridimensionales o técnicas de moldeado.

1.4 Justificación

El antebrazo y la mano forman parte de la extremidad superior en donde se encuentra el órgano terminal del ser humano que es utilizada para diversas aplicaciones dentro de su desarrollo, tales actividades como explorar, comunicar o interactuar con el entorno y con otros seres humanos, contener y manipular objetos.

La carencia del miembro superior debido a una malformación o amputación provoca un cambio al estilo de vida del ser humano. La amputación conlleva a un cambio en la imagen corporal, que en muchos casos va acompañado por un rechazo social, también se presenta una dificultad al realizar actividades cotidianas del hombre provocando una incapacidad laboral. Los gastos catastróficos asociados incluyen no sólo la cirugía en sí, sino de manera importante la rehabilitación física y psicológica, así como gastos asociados como el transporte del paciente.

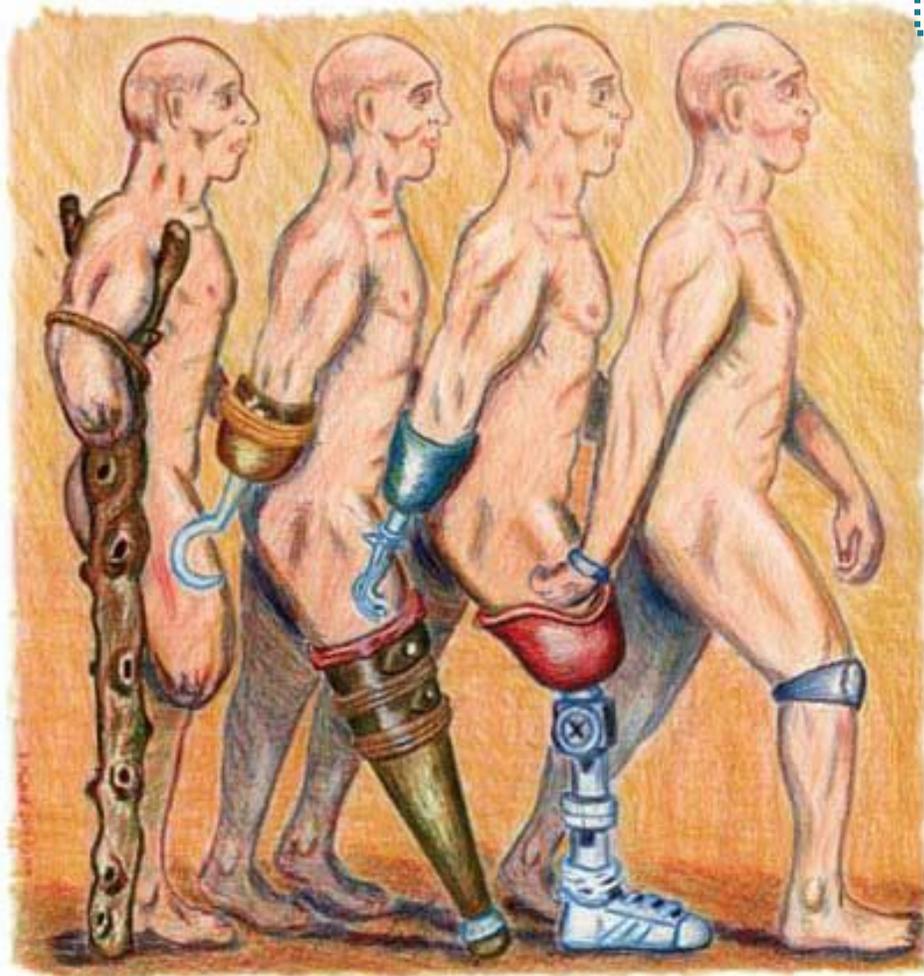
Una amputación es la pérdida o eliminación total o parcial de una extremidad, seccionada en forma perpendicular al eje longitudinal del miembro, ya sea por accidente, razones quirúrgicas o enfermedades congénitas.

Es necesario crear un diseño protésico de la extremidad superior que pueda ser adquirido económicamente relativo al precio de las prótesis comerciales, con el presente trabajo se pueden obtener prótesis personalizadas mediante la creación de una metodología de diseño guiada por fotografía y construcción de piezas con la ayuda de la impresión 3D.

El diseño de antebrazo y mano con similitud al del ser humano no solo podría ser utilizado en el ámbito protésico, sino también podría ser aplicado en otros campos de estudio, como en exploraciones espaciales, teleoperación y en la industria de manipuladores robóticos.

1.5 Delimitación

El diseño de prototipo de antebrazo con efector final para pacientes con malformaciones transradial BE se pretende desarrollar a partir del mes de Enero hasta el mes de Junio en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutierrez, Chiapas para obtener un diseño personalizado de antebrazo con efector final con ayuda del programa de computo SolidWorks.



En este capítulo se presenta el comienzo, evolución y estado actual en el desarrollo de dispositivos robóticos y prótesis para la extremidad superior del cuerpo humano, mostrando una recopilación de los trabajos más relevantes en donde se describen las características y componentes utilizados para la construcción de los dispositivos, tales como mecanismos, actuadores, sensores, materiales de soporte.

2.1 Primeros hallazgos históricos

El brazo humano es la extremidad superior del hombre que tiene la habilidad de interactuar con su entorno, manipulando los objetos y ejerciendo trabajo sobre ellos consigue alterarlos para poder crear cosas útiles en su vida cotidiana, crea herramientas y las ajusta a la medida de su mano para realizar trabajos diversos también realiza proyectos artísticos,. En ocasiones se carece de dicho miembro, por lo cual se diseñan prótesis para tratar de recuperar la parte funcional o estética de la extremidad faltante de su cuerpo.

El brazo humano en conjunto con la mano tiene alta complejidad de imitar artificialmente en anatomía y fisiología. El avance en el diseño de prótesis ha estado ligado directamente con el avance en el manejo de los materiales empleados por el hombre, así como el desarrollo tecnológico y el entendimiento de la biomecánica del cuerpo humano (Figura 2.1).

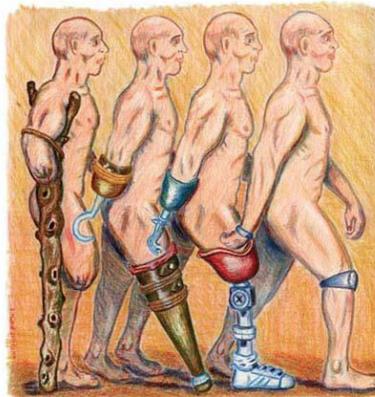


Figura 2.1 Representación de la evolución de las prótesis (2)

La primera prótesis de extremidad superior que se tiene conocimiento es del año 2000 a. C., encontrada en el antebrazo de una momia.

Con el manejo del hierro, el hombre pudo construir manos más resistentes y que pudieran ser empleadas para portar objetos pesados, tal es el caso del general

romano Marcus Sergius, que durante la Segunda Guerra Púnica (218-202 a.C.) fabricó una mano para él, con la cual portaba su espada, está es la primera mano de hierro registrada.

En el año de 1400 d.C. se fabricó la mano de Alt-Ruppín construida de hierro, que constaba de un pulgar rígido con el resto de los dedos y muñeca flexibles, que podían fijarse mediante un mecanismo de trinquete (3).



Figura 2.2 Mano de Alt-Ruppín construida con hierro en el año 1400 (3).

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, que podía fijar la posición de los dedos, mediante un sistema mecánico, que le permitió nuevamente blandir su espada y volver a combate.



Figura 2.3 Mano de Hierro de Berlichingen (4)

En el 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 2.4). 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. De igual forma, *paré* implementó la primera mano estética de cuero, con lo que dio avance considerable en la implementación de materiales para el diseño de prótesis de miembro superior (3).

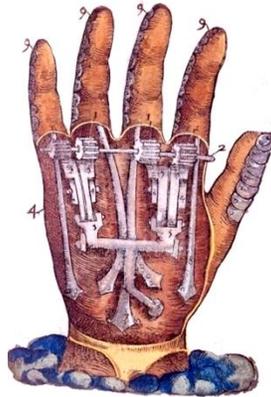


Figura 2.4 Mano artificial Le Petit Lorraine (5)

En el siglo XIX se emplean el cuero, los polímeros naturales y la madera en la fabricación de prótesis; los resortes contribuyen también al desarrollo de nuevos mecanismos para la fabricación de elementos de transmisión de la fuerza, para la sujeción, entre las innovaciones más importantes al diseño de prótesis de miembro superior, se encuentra la del alemán Peter Beil. El diseño de la mano cumple con el cierre y la apertura de los dedos pero, es controlada por los movimientos del tronco y hombro contra lateral, dando origen a las prótesis autopropulsadas.

Posteriormente el Conde Beafort da a conocer un brazo con flexión del codo activado al presionar una palanca contra el tórax, aprovechando también el hombro contra lateral como fuente de energía para los movimientos activos del codo y la mano. Este dispositivo constaba de un pulgar móvil utilizando un gancho dividido sagitalmente, parecido a los actuales ganchos Hook (3)

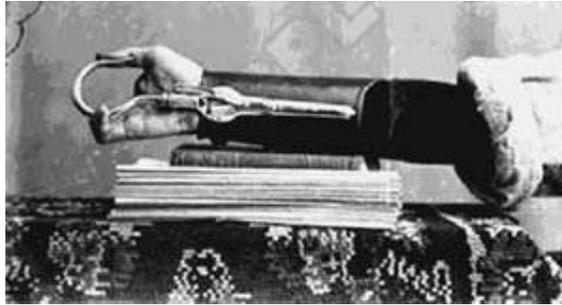


Figura 2.5 Prótesis de mano con pulgar móvil y gancho dividido sagitalmente (3).

Para el siglo XX, el objetivo de que los amputados regresaran a su vida laboral, es alcanzado gracias a los esfuerzos del médico francés Gripoulleau, quien realizó diferentes accesorios que podían ser usados como unidad terminal, tales como anillos, ganchos y diversos instrumentos metálicos, que brindaban la capacidad de realizar trabajo de fuerza o de presión (3).

En el año de 1912 Dorrance en Estados Unidos desarrolló el Hook, que es una unidad terminal que permite abrir activamente, mediante movimientos de la cintura escapular, además se cierra pasivamente por la acción de un tirante de goma. Con este dispositivo, algunos objetos eran sujetados e inclusive permitía desarrollar movimientos para empujar o jalar. Casi al mismo tiempo fue desarrollado en Alemania el gancho Fischer cuya ventaja principal era que poseía una mayor potencia y diversidad en los tipos de prensión y sujeción de objetos (3).



Figura 2.6 Prótesis actual de gancho Hook

Entre los años de 1850 y 1910, fue utilizado un sustituto de mano y brazo (Figura 2.7a), con la mayoría de las articulaciones y grados de libertad pero sin ser funcional. En Europa, entre 1914 y 1918, existía una prótesis más usual y común

(Figura 2.7b), conformada en su mayoría de cuero y un gancho doble de metal, mostrándose resistente y firme para algunas actividades rutinarias (6).

El origen de las prótesis activadas por los músculos del muñón se da en Alemania gracias a Sauerbruch, el cual logra idear como conectar la musculatura flexora del antebrazo con el mecanismo de la mano artificial, mediante varillas de marfil que hacía pasar a través de túneles cutáneos, haciendo posible que la prótesis se moviera de forma activa debido a la contracción muscular (Figura 2.7c).

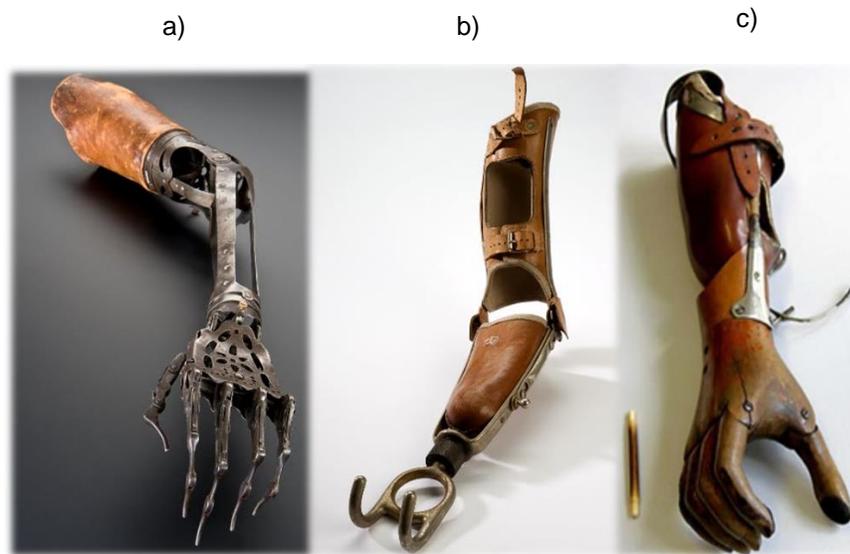


Figura 2.7 Prótesis: a) Europea 1850-1910 (6), b) De doble gancho (6) y c) Sauerbruch

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

Alrededor de 1960 surgen en Rusia las prótesis con control mioeléctrico, donde el control se basa en obtener pequeñas señales eléctricas producidas cuando un músculo se contrae, en sus inicios, este tipo de prótesis solo era colocada para amputados de antebrazo. Estas prótesis son actualmente el sustituto artificial de mayor nivel de rehabilitación, obteniendo un mejor desempeño con fuerza y velocidad de prensión (3).

2.2 Manos robóticas

En este apartado se analizará un estado del arte recopilado por Ramiro Cabás en su tesis doctoral, las manos robóticas están clasificadas en tres grupos dependiendo de la cantidad de dedos que tienen y de su configuración: manos robóticas antropomórficas, manos robóticas semiantropomórficas y manos robóticas no antropomórficas (7)

- Manos robóticas no-antropomórficas: todas aquellas manos robóticas que no tienen una configuración similar a la mano humana independientemente del número de dedos.
- Manos robóticas semiantropomórficas: Todas aquellas manos a las que les falta uno o varios dedos. Su configuración es similar a la de la mano humana.
- Manos robóticas antropomórficas: todas aquellas manos que poseen cuatro dedos y un pulgar. Su configuración es similar a la de la mano humano.

2.2.1 Manos robóticas no-antropomórficas

Stanford/JPL Hand – Universidad de Stanford (1983)

La Universidad de Stanford y el Jet Propulsión Laboratory (JPL) desarrollaron la Stanford/JPL Hand, también conocida como la Salisbury Hand. El diseño de pinza está motivado por consideraciones antropomórficas relacionadas a la cinemática y al control de la mano humana.

Su estructura está compuesta por 10 elementos y 9 articulaciones, haciendo que su configuración sea de tres dedos con tres articulaciones en cada uno. La pinza robótica no posee palma, ya que solo fue pensada para utilizar las yemas de los dedos y realizar tareas de manipulación fina o pinch grasping (Figura 2.8).



Figura 2.8 Stanford/JPL Hand – Universidad de Stanford

Los actuadores son motores eléctricos con reductores, Su movimiento es guiado a cada articulación a través de poleas y tendones en algunos tramos envainados.

El sistema sensorial está compuesto por sensores de posición de los motores (encoders), sensores de tensión de los tendones, sensores de tacto y una matriz de sensores de 8 x 8 en la superficie cilíndrica de las yemas de los dedos.

Baret Hand – Barrett Technology Inc.

La Barrett Hand, desarrollada por la empresa Barrett Technology Inc. por primera vez en 1998, fue una de las primeras manos robóticas no-antropomórficas con un sistema de control complejo que se comercializó. Ha ido evolucionando a través de los años manteniendo su configuración, la versión BH8-250 (Figura 2.9) es una de las últimas.



Figura 2.9 Barret Hand - Barrett Technology Inc.

Tanto la Barrett Hand BH8-250 como sus antecesoras están compuestas por una palma y tres dedos idénticos. Dos de ellos son capaces de cambiar su posición hasta ponerse en paralelo y en el mismo sentido que el tercero. Cada dedo posee dos articulaciones que son accionadas por un solo motor eléctrico. En la palma, se encuentra un cuarto motor que es el encargado de posicionar a los dos dedos móviles. El peso total de la pinza es de 1,18 kilogramos. Comercialmente la mano incorpora sensores de posición de los motores (encoders incrementales) y deja a voluntad del investigador o el usuario final el añadir otros sistemas sensoriales a la pinza.

MARS Hand y SARAH Hand – Universidad de Laval

El Laboratorio de Robótica de la Universidad de Laval en Canadá, viene investigando y desarrollando manos robóticas con mínima cantidad de actuadores (manos robóticas subactuadas) para aplicaciones espaciales desde principios de los 90. En estas investigaciones se desarrollaron dos manos robóticas no antropomórficas, la MARS Hand y la SARAH Hand, y de esta última surgieron diferentes prototipos como el P1, el M1, el CSA, el neumático y por último el UKAEA.

MARS Hand

Pinza desarrollada en 1996 con el objetivo de usarla como plataforma de ensayos para investigar el funcionamiento y los posibles diseños de manos robóticas subactuadas. La MARS Hand (Figura 2.10) posee una palma y 3 dedos con 3 articulaciones cada uno y están montadas directamente sobre el módulo de accionamiento.



Figura 2.10 MARS Hand - Universidad de Laval

Cada dedo es accionado por un solo motor eléctrico para los movimientos de apertura y cierre y la transmisión de dicho movimiento se hace a través de un husillo de bolas y correas dentadas.

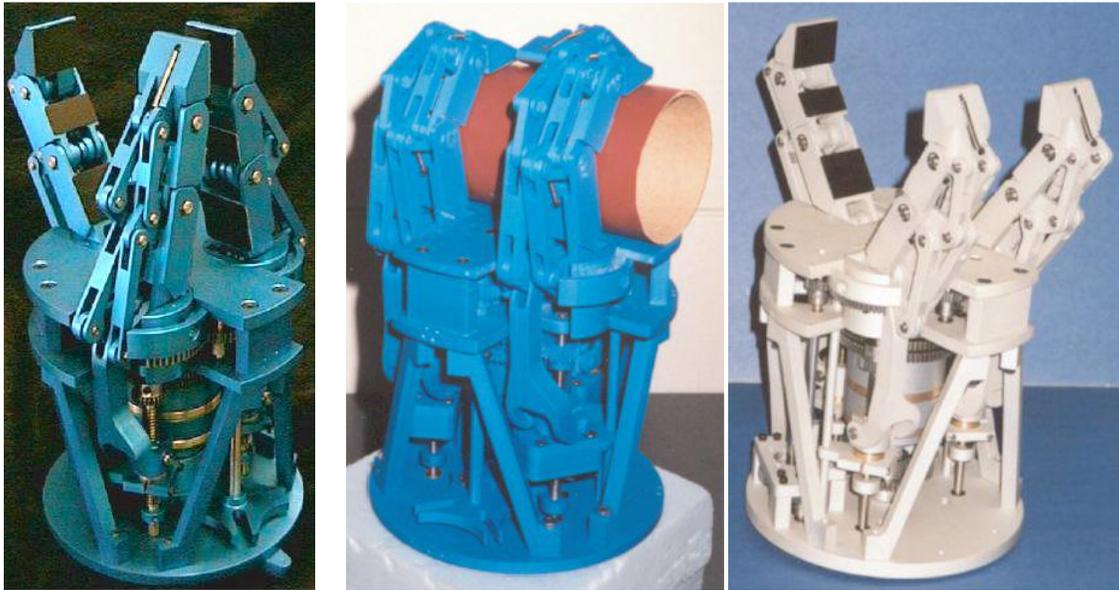
La MARS Hand posee un total de 6 actuadores que proporcionan el movimiento a 12 articulaciones con peso total de la pinza robótica de 9 Kg. El sistema sensorial se compone solamente de sensores de posición de los motores y sensores de tacto ubicados en la superficie plana de los dedos y en la palma.

SARAH Hand

Para reducir el número de actuadores montados en la MARS Hand y, por ende, reducir la complejidad del sistema de control necesario, la SARH Hand (Self-Adaptive Robotic Auxiliary Hand) introduce el concepto de subactuado en los dedos y en lo que hace entre ellos mismos. Por otro lado, se desarrolla un mecanismo denominado reductor diferencial, que permite emparejar el movimiento de orientación de los dedos.

La configuración de la pinza robótica es la misma que la de la MARS Hand: una palma y tres dedos con tres articulaciones más uno para el movimiento de orientación, estos son accionados con sólo dos actuadores.

La SARAH Hand tiene varios prototipos con diferentes aplicaciones, basándose en el mismo concepto de estructura.



**Figura 2.11 a) SARAH M1 Hand b) SARAH P1 Hand c) SARAH CSA Hand.
Universidad de Laval**

- Prototipo M1: fue desarrollado en colaboración con el MD Robotics Limited, fue adaptado para el SPDM (Special Purpose Dextrous Manipulator) del Canadian Space Arm y fue usado en la Estación Espacial Internacional. Su estructura está construida básicamente en aluminio anodizado de alta resistencia (Figura 2.11a).
- Prototipo P1: era una réplica del Prototipo M1, pero construido en plástico. Este prototipo tenía por finalidad la validación rápida de los mecanismos y el concepto general en tierra de la pinza robótica (Figura 2.11b).
- Prototipo CSA: fue diseñado por la Agencia Espacial Canadiense (CSA – Canadian Space Agency) para ser montado en uno de los dos brazos robóticos del CSA Automation and Robotic Testbed (CART). El tamaño y configuración es similar el Prototipo M1 (Figura 2.11c).

- Prototipo UKAEA: fue desarrollado por la United Kingdom Atomic Energy Authority para ser utilizado en tareas de limpieza en centrales nucleares (Figura 2.12a).
- Prototipo Neumático: Se reemplazó el reductor diferencial que provee el movimiento a los dedos por un actuador neumático (Figura 2.12b).

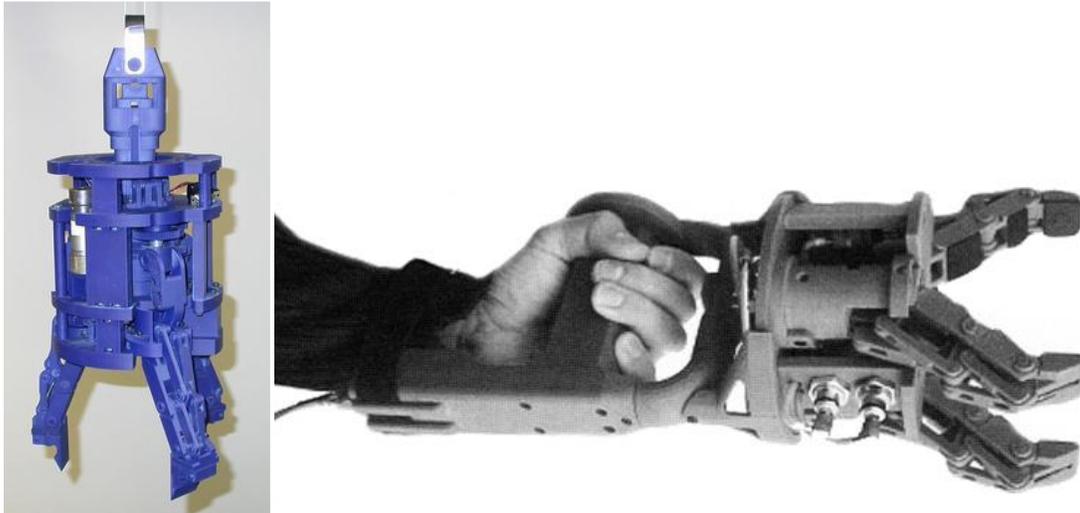


Figura 2.12 a) SARAH UKAEA Hand b) SARAH Pneumatic Hand. Universidad de Laval

High-Speed Tokyo Hand – Universidad de Tokyo (2001)

La High-Speed Tokyo Hand es una mano desarrollada especialmente para coger objetos a alta velocidad. Como se observa en la Figura 2.13, está formada por ocho articulaciones y tres dedos.

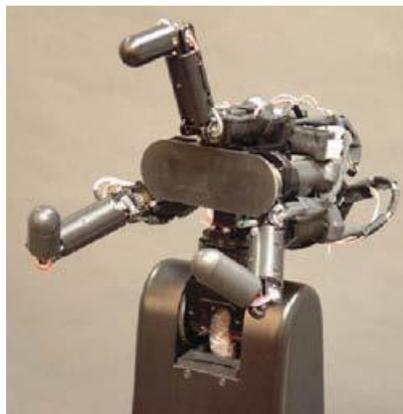


Figura 2.13 High-Speed Tokyo Hand - Universidad de Tokyo

La filosofía de diseño utilizada en esta pinza robótica se basa en maximizar la fuerza que pueda ejercer minimizando la cantidad de mecanismos que intervienen, particularmente está focalizado en tres aspectos: bajo peso, alta velocidad y aceleración y por último la precisión.

La estructura de la High-Speed Tokyo Hand está formada por tres dedos montados en una plataforma que no alcanza a ser una palma denominados dedo derecho, índice e izquierdo. El dedo índice posee dos GDLs mientras que los dedos derecho e izquierdo poseen tres GDLs cada uno, sumando así ocho GDLs en total.

Cada articulación es accionada por un mini-actuador de alta prestación con reductores Harmonic Drive, especialmente diseñados y adecuados para ella. Para la sensorización, a cada articulación se le incorporaron unas galgas extensiométricas y un sistema de visión. El conjunto mecánico de la mano tiene un peso de sólo 800 gramos, sin considerar el sistema de visión. Posee gran capacidad de movimiento a alta velocidad (puede cerrarse a una velocidad de 180 grados en 0,1 segundos) y un amplio poder de agarre (en la yema de los dedos se pueden efectuar fuerzas de hasta 28 newton).

El factor más importante del sistema de control es el feedback otorgado por la cámara de visión. Ésta compuesta por dos cámaras con un sistema masivo de visión paralela denominado CPV (Column-Parallel High Speed Vision System).



Figura 2.14 La High-Speed Tokyo Hand realizando tareas de manipulación de objetos

2.2.2 Manos robóticas semi-antropomórficas

Utah-MIT Dextrous Hand – Universidad de Utah y MIT (1983)

La Utah-MIT Dextrous Hand, desarrollada en cooperación con la Universidad de Utah y el Laboratorio de Inteligencia Artificial del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), construida a principios de los 80 que marcó grandes avances relacionados con la investigación sobre conceptos básicos de la teoría de la manipulación, diseños de sistemas de control y sensorización táctil de manos robotizadas.

Las articulaciones se mueven por medio de un par de tendones y cada tendón es actuado por un cilindro neumático. La configuración de la mano está compuesta por una palma, un pulgar, y tres dedos. Su estructura está formada por 17 elementos y 16 articulaciones, cada dedo posee cuatro articulaciones (tres realizan el movimiento de flexión/extensión y la cuarta es perpendicular a las anteriores, realizando el movimiento de radial) controlados con dos actuadores por articulación empleando un total de 32 actuadores (Figura 2.15).

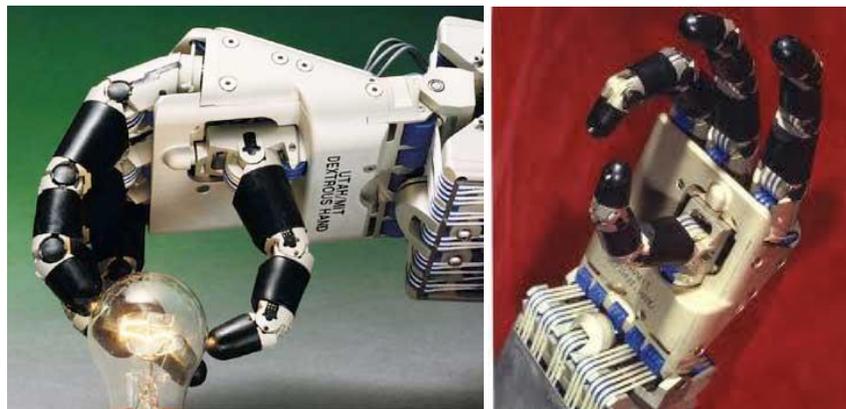


Figura 2.15 Mano robótica UTAH-MIT

Esta mano robótica fue diseñada para realizar pruebas y estudios de agarre y manipulación; por lo que las superficies de las yemas de los dedos de las falanges y las palmas son aptas para entrar en contacto con el objeto.

El sistema Sensorial de la mano está compuesta por diferentes sensores. Estos son sensores de posición; sensores rotativos de efecto hall; sensores de tensión de tendones; y sensores de tacto distribuidos en la yema de los dedos, las falanges y la palma.

Debido a la estructura cinemática tan compleja, el control necesitaba ser muy sofisticado y la capacidad de cómputo aún no estaba desarrollada lo suficiente para la implementación del mismo.

Mano robótica del Robot Humanoide COG – Laboratorio de Inteligencia Artificial del MIT (1997)

La mano robótica desarrollada para el Robot humanoide COG (Figura 2.16) en el Laboratorio de Inteligencia Artificial del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) tiene una particularidad de contener la totalidad de los actuadores, 36 sensores y la electrónica de control sobre la estructura de la propia mano robótica.



Figura 2.16 Robot Humanoide COG - Laboratorio de Inteligencia Artificial del MIT

La configuración de la mano robótica fue diseñada basándose en la teoría de que una pinza con cuatro dedos es capaz de sujetar el 99% de los objetos que retiene una mano humana. La mano robótica posee una palma, tres dedos y un pulgar ubicado de forma opuesta (Figura 2.17).

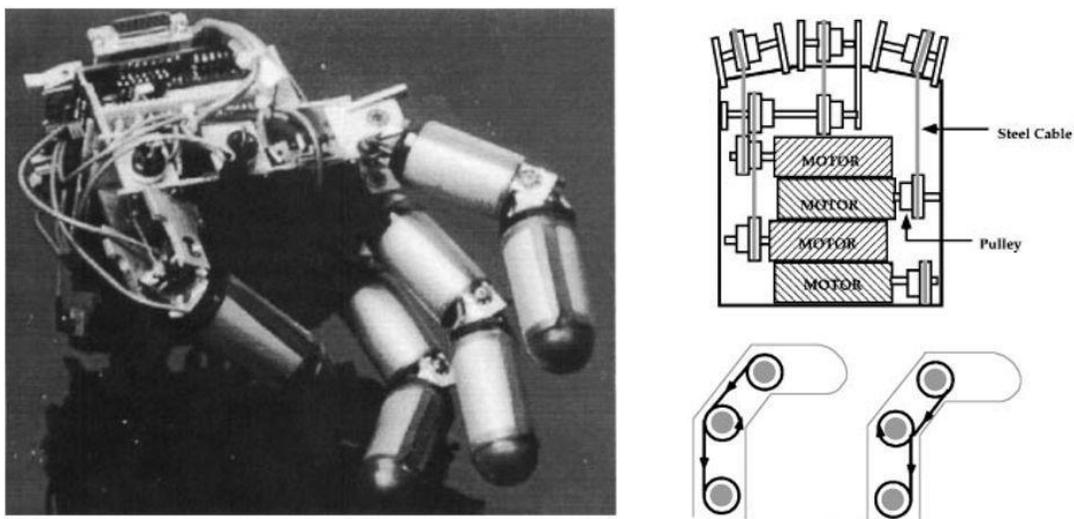


Figura 2.17 Mano robótica del Robot Humanoide COG - Laboratorio de Inteligencia Artificial del MIT

El objetivo principal de esta mano robótica no fue la de conseguir la mano mecánica más avanzada hasta el momento. Fue la de llegar a una herramienta que explore y aprenda el entorno, como haría la mano de un niño, manteniendo los mecanismos cruciales de una estructura antropomórfica simple.

Cada dedo posee dos articulaciones, mientras que cada falange está ahuecada para dejar espacio a la circulación de los tendones. Por otro lado, el pulgar sólo tiene una articulación y está fijado a la palma de la mano. En total, se suman siete articulaciones. Las puntas de los dedos están construidas de polietileno. Las superficies de los mismos están cubiertas de un delgado film de vinilo.

Las articulaciones no son controladas independientemente (un motor eléctrico por cada dedo y uno para el pulgar). Para poder reducir la cantidad de motores, cada uno realiza el movimiento en los dos sentidos de la articulación. Esto se logra rizando el tendón en la propia polea, tal y como se muestra en la [Figura 2.17](#). Para conseguirlo, la longitud del cable debe ser calculada con mucha precisión, para que quede tenso en todas las direcciones.

Su sistema sensorial está formado por 36 sensores que recogen valores de tacto, posición y torque de cada una de las falanges y articulaciones. Para el caso de los sensores de tacto, se han utilizado FSR (Force Sensor Resistor) comerciales, que tienen la propiedad de ser muy finos y flexibles, para el caso de los sensores de rotación, se han utilizado potenciómetros, con el objetivo de reducir el peso de la mano.

DIST-HAND – Universidad de Génova (1998)

La DIST-Hand fue desarrollada por el GRAAL-LAB DE LA Universidad de Génova en 1998. Su objetivo fue la de investigar con manos robotizadas antropomórficas a través de teleoperación en tareas de manipulación fina, es decir, solo utilizando las yemas de los dedos.

Esta mano robótica posee una palma, tres dedos y un pulgar en posición opuesta a los dedos, pero su tamaño es algo superior al de la mano humana. Su diseño modular es debido a que todos los dedos son exactamente iguales, simplificando su control y permitiendo en un futuro agregarle un dedo más y que su configuración sea antropomórfica. La estructura está formada por 17 elementos y 16 articulaciones, que son controladas en su totalidad, y su peso es aproximadamente de un kilogramo (Figura 2.18).

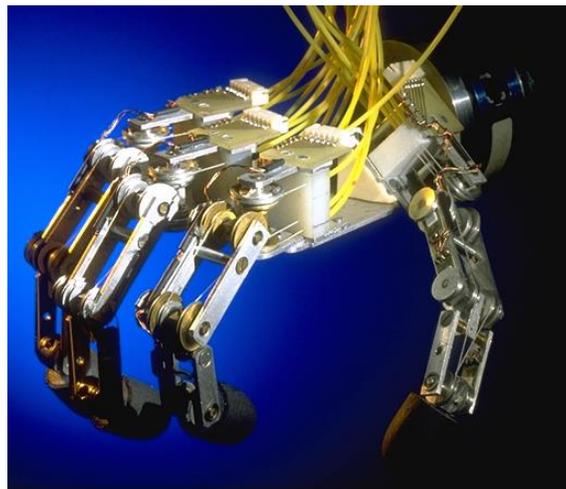


Figura 2.18 DIST-Hand – Universidad de Génova

La mano robótica posee 20 actuadores, motores eléctricos de bajo coste, ubicados de forma externa. Como no tiene antebrazo, los mismos deben ser fijados independientemente a la estructura que soporta la mano. Para que la ubicación de los motores no afecte directamente a las articulaciones, el movimiento de los mismos es realizado mediante tendones que son recubiertos con vainas flexibles. El sistema sensorial está compuesto por sensores de efecto hall, sensores de tacto intrínsecos de tres ejes y sensores de posición de los motores.

DLR-Hand- Centro de Investigación Aeroespacial Alemán (2000)

El Centro de Investigación Aeroespacial Alemán (DLR) inició a mediados de los 90 una nueva fase de diseño de manos robotizadas, que denominó DLR Hands. Esta línea de investigación tenía como principal objetivo el desarrollo de un brazo manipulador de los cuales se desarrollaron hasta la actualidad tres prototipos: el LWR-I, el LWR-II y el LWR-III, que es el último y más avanzado para ser teleoperado en tareas espaciales, desde la propia nave o desde tierra.

Referido a las manos robóticas, se desarrolló un primer prototipo, con el que se realizaron pruebas de manipulación. La DLR Three Finger Robotic Hand consistía en una pinza robótica de tres dedos con tres articulaciones, ubicados de forma simétrica (Figura 2.19). Era un diseño de laboratorio. No se montaba en ningún manipulador y sirvió como base para probar sistemas sensoriales.

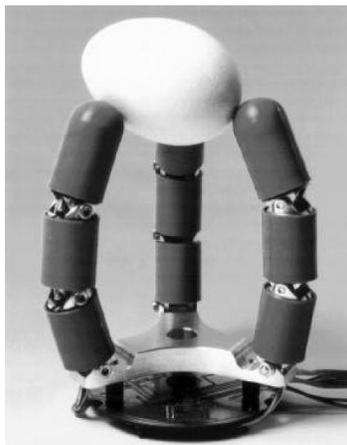


Figura 2.19 DLR Three finger robot hand - Centro de Investigación Aeroespacial Alemán

A partir de este prototipo, se fueron desarrollando diversas manos robóticas como la DLR Hand I, la DLR Hand II y, finalmente, con intenciones de ser comercializada la HIT/DLR Hand. A continuación se hará una breve descripción de cada una.

DLR Hand I

La DLR Hand I fue diseñada en 1997. Como puede apreciarse en la Figura 2.20 posee una palma, tres dedos y un pulgar compuestos por 17 elementos estructurales con un total de 16 GDLs. 12 de ellos son controlados. Los tres dedos y el pulgar son idénticos. En su momento, la particularidad de este desarrollo fue que la totalidad de sus actuadores estaban integrados en la palma o directamente en las articulaciones de los dedos. El tamaño de la DLR Hand I es 1,5 veces el de la mano humana.



Figura 2.20 DLR-Hand Centro de Investigación Aeroespacial Alemán (DLR)

El sistema sensorial de la mano está formado por 112 sensores, distribuidos básicamente entre sensores de posición, sensores de fuerza-par, sensores de tacto ubicados en las yemas de los dedos, sensores de temperatura y un sensor de fuerza-par de seis dimensiones en la muñeca.

DLR Hand II

La segunda generación de manos robóticas multi-sensoriales del DLR, la DLR Hand II (Figura 2.21), incorpora una gran cantidad de avances tecnológicos en materia de actuadores, materiales, sensores y arquitecturas de control. A nivel estratégico se realizaron grandes esfuerzos relacionados con la tecnología de agarre.

La configuración de la mano robótica mantiene su semi-antropomorfismo: una palma, tres dedos y un pulgar compuestos por 18 elementos estructurales con 17 GDLs de los cuales 13 de éstos son controlados con actuadores (motores eléctricos).



Figura 2.21 Mano robótica DLR Hand II

Debido a las complicaciones estructurales con la DLR Hand I, la DLR Hand II incorpora una estructura esquelética abierta con un mantenimiento más sencillo y con el concepto de ahorro de costes de fabricación. La palma tiene la propiedad de reconfigurarse dependiendo del objeto a sujetar o manipular. El pulgar y el cuarto dedo pueden cambiar su posición ayudando a la palma (Figura 2.22). Aunque se mantiene la filosofía de ubicar la totalidad de los actuadores sobre la palma y en las mismas articulaciones, los actuadores montados son más potentes que los de su antecesora.

El sistema sensorial de la mano está compuesto por sensores de posición de los motores, potenciómetros para conocer el ángulo de giro de las articulaciones y

sensores de fuerza de seis ejes en la yema de los dedos. Gracias a su configuración y el concepto de colocar toda su electrónica y la totalidad de los actuadores sobre la propia mano robótica, la DLR Hand II es totalmente independiente de cualquier sistema, lo que le permite ser montada en diferentes estructuras o brazos robóticos.

En el mismo año Borst, Fisher y Hirzinger hacen el análisis de la configuración más adecuada de la mano DLR-HAND II, necesaria para realizar trabajos que requieren una mayor destreza, como lo es el manejo de herramienta especializada (figura 2.22).

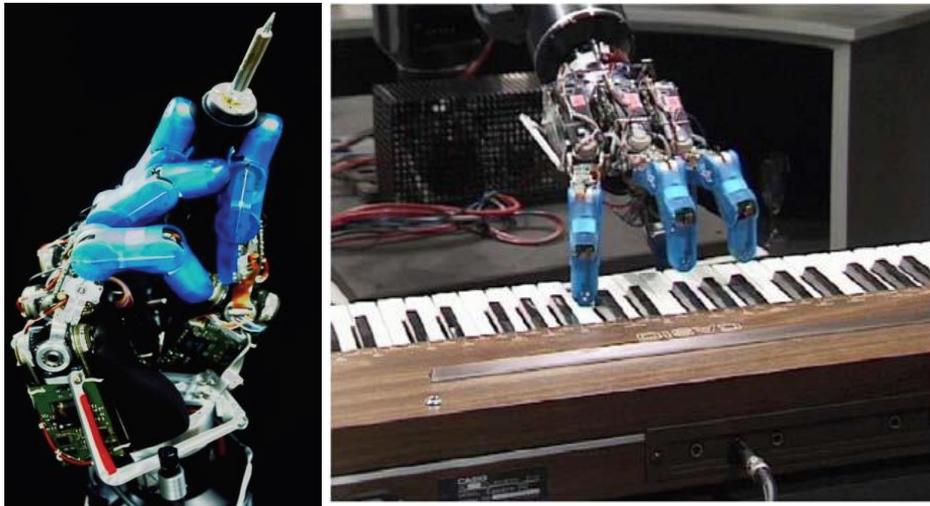


Figura 2.22 DLR Hand II sujetando un cautín y b) tocando el piano.

DLR/HIT Hand

La DLR/HIT Hand es una mano robótica creada en conjunto entre el Centro de Investigación Aeroespacial Alemán (DLR) y el Harbin Institute of Technology (HIT). Toma como base los conocimientos obtenidos en el desarrollo de la HIT AR Hand, la HIT/DLR Hand (Figura 2.23) y la DLR Hand II; e incorpora nuevos conceptos de fabricación y nuevas tecnologías con la idea final de ser comercializada.

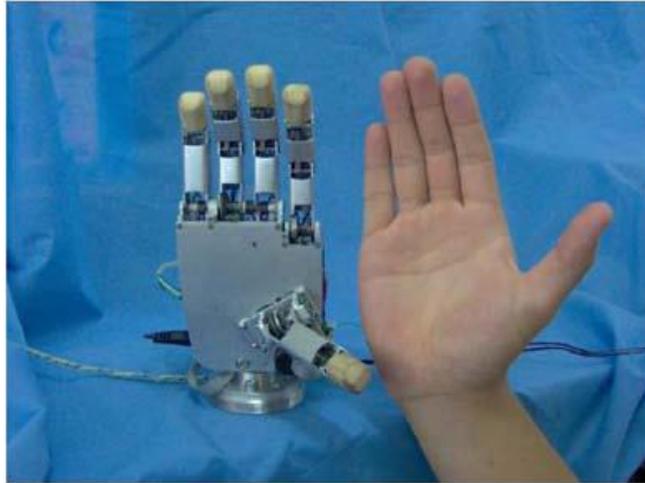


Figura 2.23 HIT/DLR hand- Harbin Institute of Technology y el Centro de Investigación Aeroespacial Alemán

Como la DLR Hand II, la DLR/HIT Hand [REF] posee una palma, tres dedos y un pulgar, tal como se puede observar en la Figura 2.24. Cada dedo tiene cuatro articulaciones y tres actuadores (motores eléctricos comerciales). Por otra parte, el pulgar agrega una articulación más para una manipulación más fina y un agarre más potente. El peso total de la mano robótica es 2,2 kilogramos.

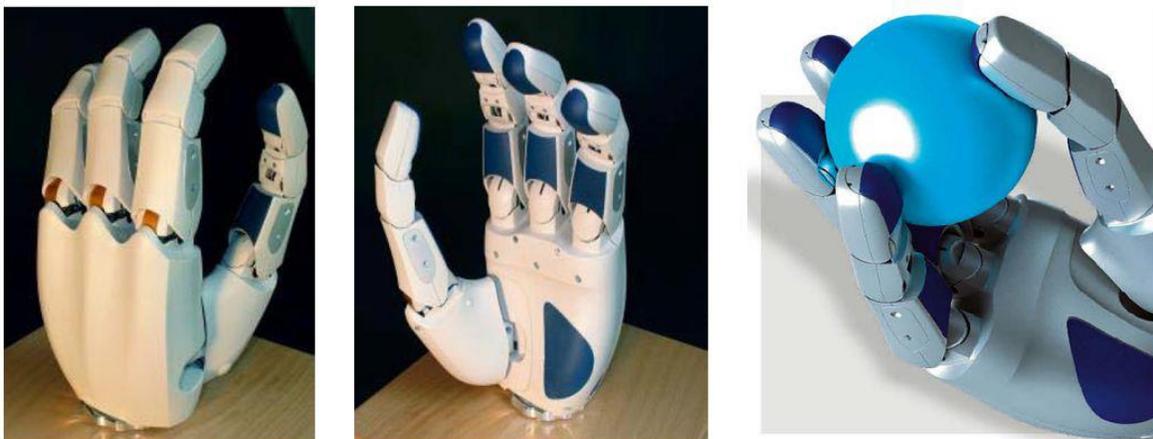


Figura 2.24 La DLR/HIT hand - Centro de Investigación Aeroespacial Alemán y el Harbin Institute of Technology

El sistema sensorial está compuesto en cada articulación por sensores magnéticos de ángulo y sensores de fuerza-par. Cada motor tiene su sensor de

posición y sensores de fuerza-par. Finalmente, cada yema de los dedos contiene sensores de tacto de seis ejes.

2.2.3 Manos robóticas antropomórficas

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. El mecanismo de cierre voluntario ofrecía un agarre con variación de fuerza (Figura 2.25), teniendo ubicadas las articulaciones en dimensiones similares a las del sistema natural.



Figura 2.25 Prótesis endoesquelética de mano

Robonaut Hand – NASA (1999)

El Robonaut fue diseñado para ayudar a los astronautas en tareas en el espacio (Extra Vehicular Activity – EVA). Se llegó a él después de muchos años de investigaciones destinadas exclusivamente a humanoides (Figura 2.26).

La finalidad del Robonaut es reemplazar a los astronautas en las tareas de la nave, tanto dentro como fuera de ella, y en aquellos lugares donde el ser humano corre peligro. Por este motivo, el robot fue concebido con forma y escala idéntica al hombre y es teleoperado.

La Robonaut Hand está compuesta por cuatro dedos y un pulgar. Junto con la muñeca y el antebrazo, poseen 22 articulaciones (20 en la mano y dos en la muñeca). De éstos, 14 (12 en la mano y 2 en la muñeca) son controlados y accionados de manera remota por motores sin escobillas ubicados en el antebrazo, cuyo diámetro es de cuatro pulgadas. La cinemática del dispositivo se aproxima, en alto porcentaje, a la de la estructura humana.

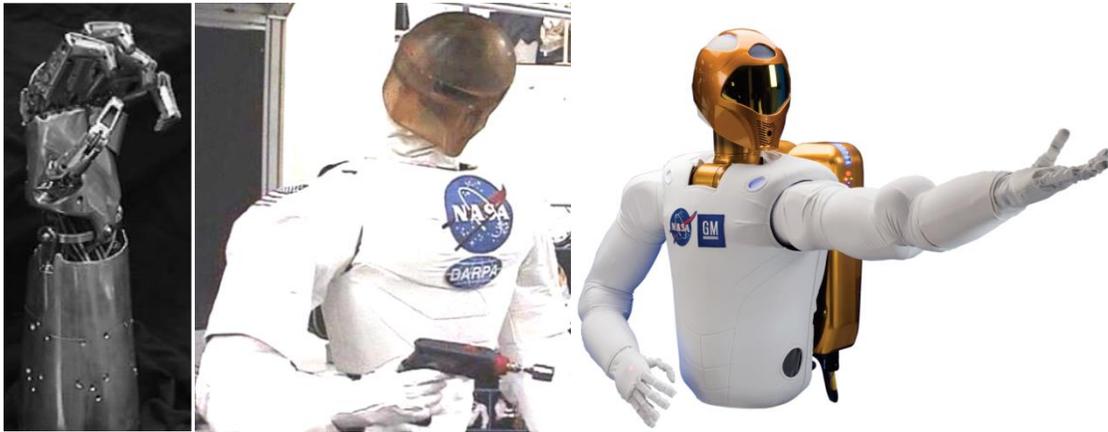


Figura 2.26 a) Mano robonaut sin guante b) NASA/DARPA Robonaut después de adquirir un taladro c) Robonaut 2

El conjunto de destreza está compuesto por dos dedos con tres GDLs (índice y central) y el pulgar, mientras que el conjunto de agarre consiste en dos dedos con un GDL (anular y meñique) y la palma con su GDL.

El accionamiento de los motores es guiado desde el antebrazo a través de tendones a cada una de las articulaciones controladas. Dichos tendones están fabricados con varas flexibles, que al ser giradas por los tendones, realizan un movimiento lineal dentro de la mano, utilizando unos tornillos modulares. Los drivers de los motores también se encuentran en el antebrazo.

El sistema sensorial de la mano está compuesto por 42 sensores (sensores de posición de los motores y de las articulaciones, sensores de tensión de los tendones).

Ultralight Anthropomorphic Hand – Research Center of Karlsruhe (2000)

La Ultralight Anthropomorphic Hand, desarrollada por el Centro de Investigación de Karlsruhe (Figura 2.27), es una de las manos robóticas más livianas en la actualidad considerando su relación peso-tamaño, tal y como indica su nombre. Su objetivo principal es el inicio de una línea de investigación para el desarrollo de manos robóticas para ser usadas en manos de robots humanoides o prótesis humanas.

La estructura de la mano está compuesta por 17 elementos independientes y 18 articulaciones, 13 de éstas (tres en la muñeca y diez en los dedos) son controlados. El tamaño de la Ultralight Anthropomorphic Hand es mayor que el de la mano humana, pero mantiene su cinemática antropomórfica.



Figura 2.27 Ultralight Anthropomorphic Hand - Research Center of Karlsruhe

La mano robótica está dividida en tres secciones. Una primera con los dedos que contienen los actuadores, con los sensores de flexión y con los sensores de tacto. Una segunda con el metacarpo, que se provee de espacio suficiente para alojar el microcontrolador, las micro-válvulas, la fuente de energía y el micro-compresor. Una última con la muñeca, que contiene los actuadores necesarios para flexionar la mano.

TUAT – Karlsruhe Humanoid Hand – Universidad de Tokyo y Karlsruhe (2000)

La mano robótica TUAT-Karlsruhe Humanoid Hand, desarrollada en conjunto entre la Universidad de Tokyo y la Universidad de Karlsruhe, fue diseñada para ser montada en el robot humanoide ARMAR y puede trabajar de forma autónoma o interactuar en cooperación con humanos. También se pensó como posible prótesis para seres humanos.

La TUAT-Karlsruhe Humanoid Hand tiene la habilidad de sujetar objetos de diferentes formas y tamaños. Su estructura interna es idéntica a la de la mano humana (cuatro dedos y un pulgar). Su principal propiedad reside en la forma de su palma. Ésta se modifica dependiendo de la posición en la que se ubiquen los dedos y el pulgar, con el fin de efectuar un mejor agarre, tal como sucede en la mano humana (Figura 2.28).

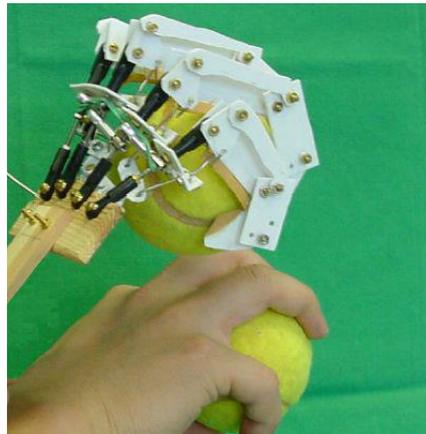


Figura 2.28 TUAT-Karlsruhe Humanoid Hand - Universidad de Tokyo y Karlsruhe

En total, la mano robótica posee 22 elementos estructurales y 24 articulaciones. Todas ellas son accionadas con un solo actuador (motor eléctrico) que puede ser montado dentro o alrededor de la mano. Esto hace que el diseño cinemático de la mano sea verdaderamente sorprendente, dejando claro que el prototipo está concebido sólo para tareas de agarre. En ese sentido, su configuración no le

permite hacer tareas de manipulación de objetos, puesto que el control sobre cada uno de los elementos estructurales es prácticamente nulo.

El sistema sensorial de la mano robótica se resume en un sensor de posición del motor y en un sistema de auto-adaptación de formas gracias al diseño de la estructura.

Manus Hand (2000)

La Manus Hand es un desarrollo en conjunto entre el Consejo Superior de Investigaciones Científicas-CSIC (España), la Universidad Católica de Leuven (Bélgica), el Centro de Recuperación de Minusválidos Físicos del IMSERSO (España), la Alorman Advanced Medical Technologies Ltd. (Israel) y el Advanced Material Technologies N.V. (Bélgica). El objetivo principal de este proyecto es el de desarrollar una mano robótica antropomórfica para prótesis en seres humanos. Esto justifica que su configuración sea igual a la de la mano humana.

Una de las características de diseño más importantes que se han tenido en cuenta en ella es lo que se denomina manos robóticas subactuadas. Es conseguir una máxima capacidad de agarre y manipulación con una gran cantidad de elementos estructurales, que permitan adaptarse a las tareas esperadas con la menor cantidad posible de actuadores. Esto significa que un solo actuador puede ejercer su acción en varias articulaciones activas.

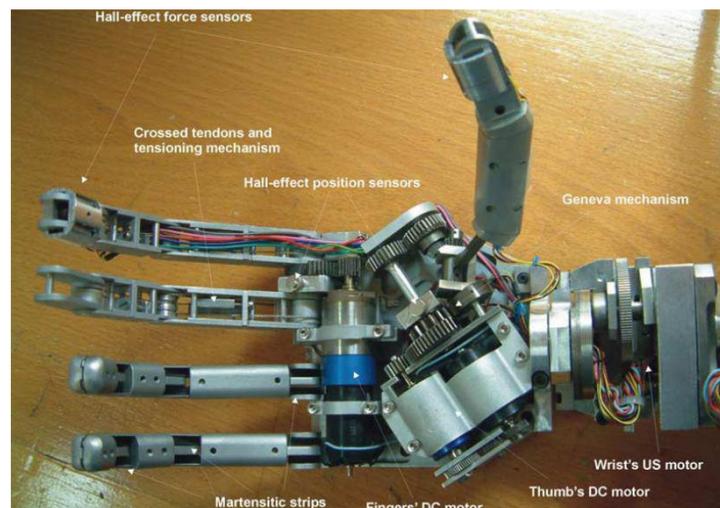


Figura 2.29 Manus – Hand

La estructura de la MANUS-Hand está compuesta por diez articulaciones. Sólo tres son controladas de forma independiente. El resto están asociadas con diferentes tipos de mecanismos a las articulaciones controladas (dedos subactuados). Se pueden identificar tres mecanismos independientes (Figura 2.30).

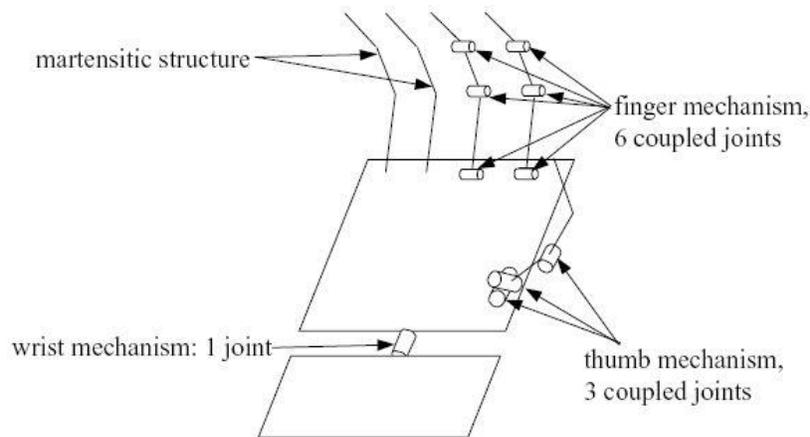


Figura 2.30 Mecanismos independientes de la Manus-Hand

- Mecanismo de los dedos índices y medio: un actuador acciona seis articulaciones, que están asociadas entre sí por medio de un sistema de poleas y tendones cruzados (Figura 2.31).
- Mecanismo del pulgar: un actuador acciona tres articulaciones y realiza sus movimientos ayudado por un mecanismo denominado Rueda de Génova, que hace que el pulgar se flexione y, por otro lado, se ponga en posición opuesta a los dedos. En la Figura 2.32, se puede apreciar el esquema de movimiento del pulgar.
- Mecanismo de la muñeca: un actuador para una articulación.

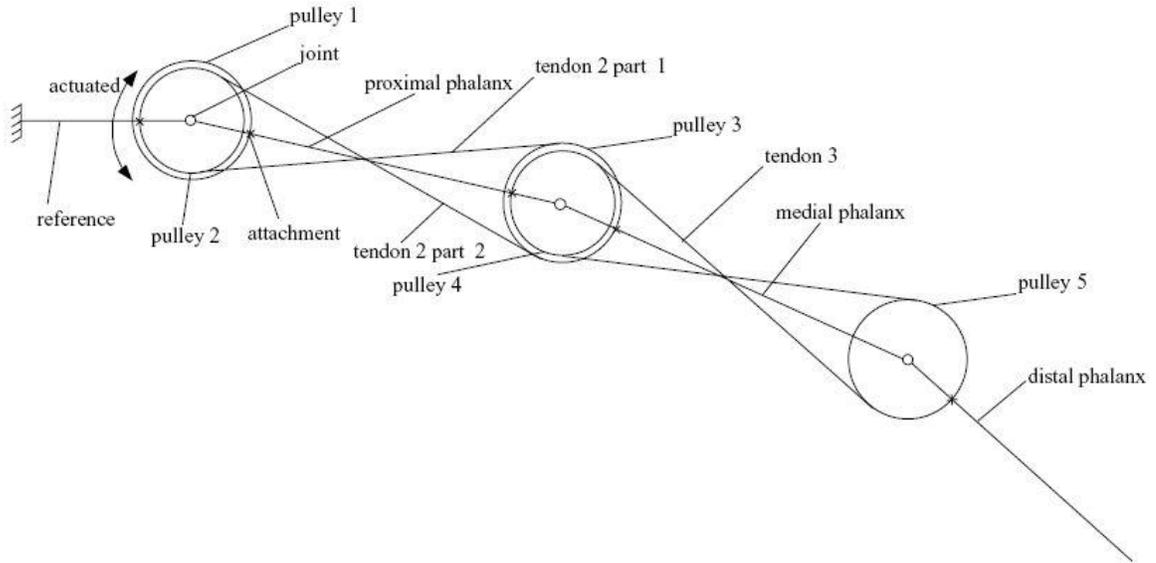


Figura 2.31 Esquema del sistema de poleas y los tendones cruzados de la Manus-Hand

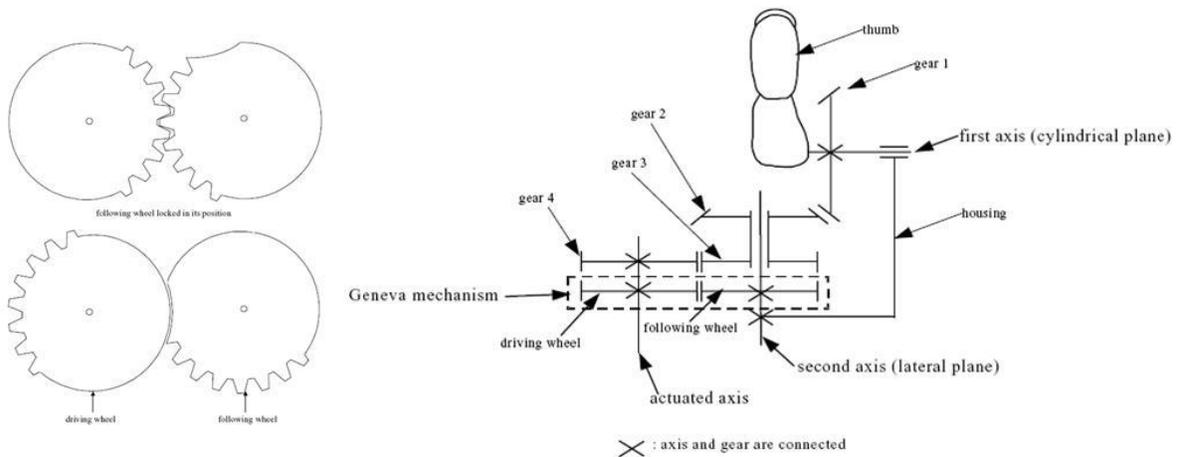


Figura 2.32 Esquema de la Rueda de Génova y esquema de funcionamiento del pulgar de la Manus-Hand

Cada dedo anular y meñique posee dos flejes de material martensítico de cuatro milímetros de ancho y un milímetro de espesor para que sus articulaciones sean flexibles y puedan doblarse. Estos dedos son posicionados manualmente para agarres de larga duración o simplemente por estética.

El control de las manos se hace a través de las señales EMG residuales de las personas amputadas y algunas pruebas realizadas a través de una HMI (Interfaz Hombre Maquina), simulada por un ordenador. Las tareas para las que fue creada son de agarre cilíndrico, de precisión, de gancho y lateral.

GIFU Hand – Universidad de GIFU (1997-2004)

La universidad de GIFU viene desarrollado manos robóticas, que llevan su nombre, desde 1997. Precisamente, en ese año se dio a conocer la GIFU Hand I, la primera de ellas. La GIFU Hand II surgió en 1999; La Gifu Hand III, en 2002 y; por último, la KH Hand Type S, en 2004.

En general las cuatro manos son muy similares a simple vista. Esto se debe a que el concepto de diseño se mantuvo en cada una de ellas, modificando y mejorando ciertos aspectos relacionados con las nuevas tecnologías y materiales.

Las manos fueron concebidas como plataforma de investigación en agarres y manipulación. Por tal motivo; son compactas, livianas y antropomórficas en términos de geometría y tamaño.

GIFU Hand II

La mano robótica GIFU Hand II (Figura 2.33) está compuesta por una palma, cuatro dedos y un pulgar. Su estructura está formada por 21 elementos y 20 articulaciones, 16 de ellas son controladas. El tamaño es similar al de una mano humana.

La diferencia entre la GIFU Hand I y la GIFU Hand II reside básicamente en dos cuestiones:

- Un rediseño estructural basado en elementos finitos que, por un lado, eliminaba la pérdida de fuerza ocasionada por el rozamiento de los reductores y, por el otro, permitía reducir el espesor de los elementos estructurales en lugares críticos.

- Una mejora en el sistema sensorial

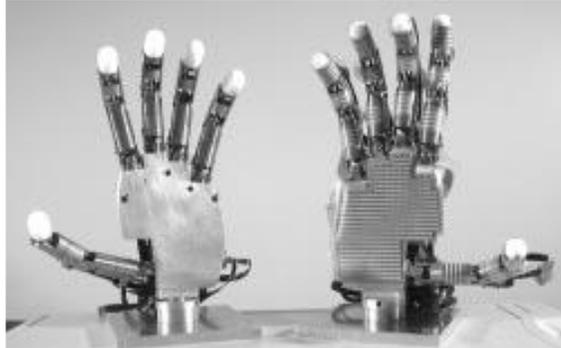


Figura 2.33 GIFU Hand II - Universidad de GIFU

Cada articulación controlada es accionada por servo-motores MAXON, que están ubicados sobre las falanges de los dedos y sobre la palma. Así, el accionamiento es directo. El pulgar tiene cuatro articulaciones con cuatro GDLs. Cada uno de los dedos, en cambio, tienen sólo tres GDLs. No obstante, también cuentan con cuatro articulaciones y con un eje ortogonal cercano a la palma, que intenta simular los movimientos de la mano humana.

El sistema sensorial de la mano está compuesto por sensores de posición de los motores, sensores de fuerza táctiles de seis ejes y sensores de tacto resistivos. Este último es capaz de detectar 624 puntos de contacto en toda la superficie (Figura 2.34a). A nivel de integración es una mano robótica que puede ser montada en cualquier brazo, ya que su funcionamiento es totalmente independiente del mismo.

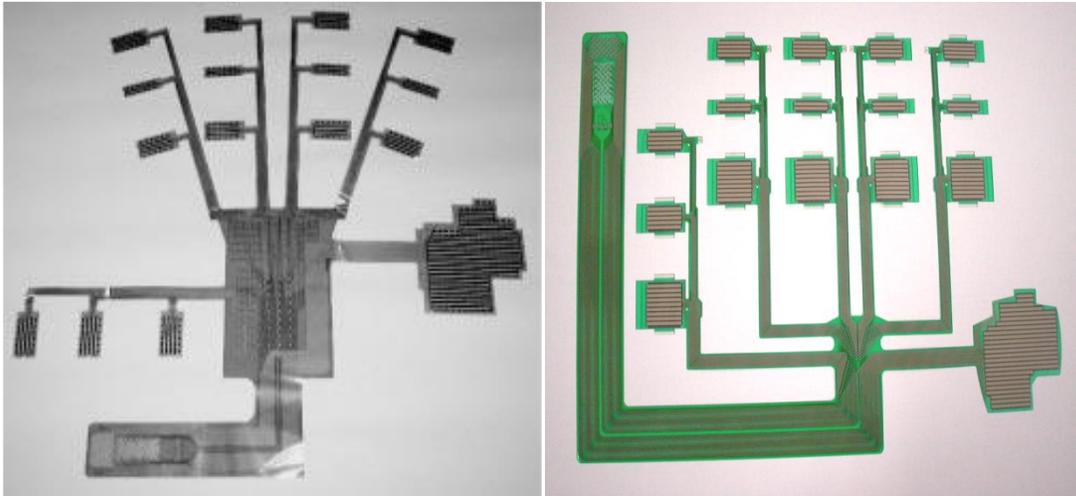


Figura 2.34 a) Sensores táctiles distribuidos de FSR de la GIFU Hand II b) de la GIFU Hand III

GIFU Hand III

En este caso, la diferencia entre la GIFU Hand II y la GIFU Hand III reside en las siguientes cuestiones:

- Una optimización en el diseño de los engranes
- Incorporación de un nuevo sensor de tacto distribuido que incrementa de 624 a 859 puntos de contacto (Figura 2.34b).
- Un nuevo sistema de control con operación en tiempo real llamado ART-Linux
- Una breve reducción en el tamaño de los dedos pero un incremento en la longitud total de la mano robótica.
- Optimización en el grado de movimiento de oposición del pulgar, consiguiendo de esta forma mejorar el agarre de la mano.
- Mejora en la cuarta articulación de los dedos, incorporando un nuevo diseño del mecanismo.

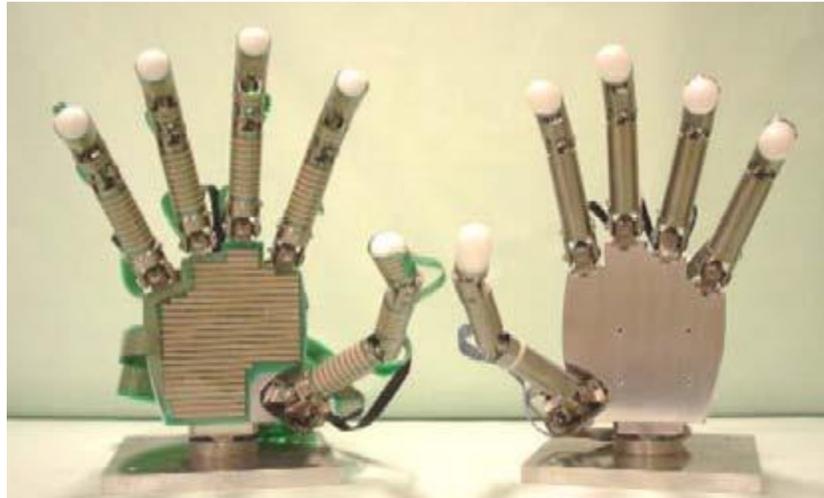


Figura 2.35 GIFU Hand III - Universidad de GIFU



Figura 2.36 Ejemplos de agarre esférico, cilíndrico y prismático de la GIFU Hand III

KH Hand Type S

Esta es la última versión de manos robóticas diseñadas por la Universidad de GIFU, las diferencias son las siguientes:

- Reducción del peso de la mano, reemplazando materiales metálicos con materiales poliméricos en la palma y titanio en los dedos.
- Una nueva optimización en el diseño de los engranajes, utilizando un cuerpo elástico.
- Una reducción en el tamaño de los dedos y en la longitud total de la mano robótica, en parte debida a un cambio en los motores eléctricos que se reducen de 12 a diez milímetros de diámetro.

La KH Hand Type S (Figura 2.37) su configuración estructural se mantiene idéntica a su antecesora, de 21 elementos con 20 GDLs. Pero, en este caso sólo hay 15 articulaciones controladas.

El peso total de la mano robótica es de unos 656 gramos, reduciéndolo en más de un 50% con respecto a su antecesora, la GIFU Hand III, que pesaba 1.400 gramos.

Para demostrar la efectividad de la mano robótica, fue montada en un brazo robótico y se construyó un sistema maestro-esclavo con retorno de fuerza para poder realizar tareas de teleoperación.

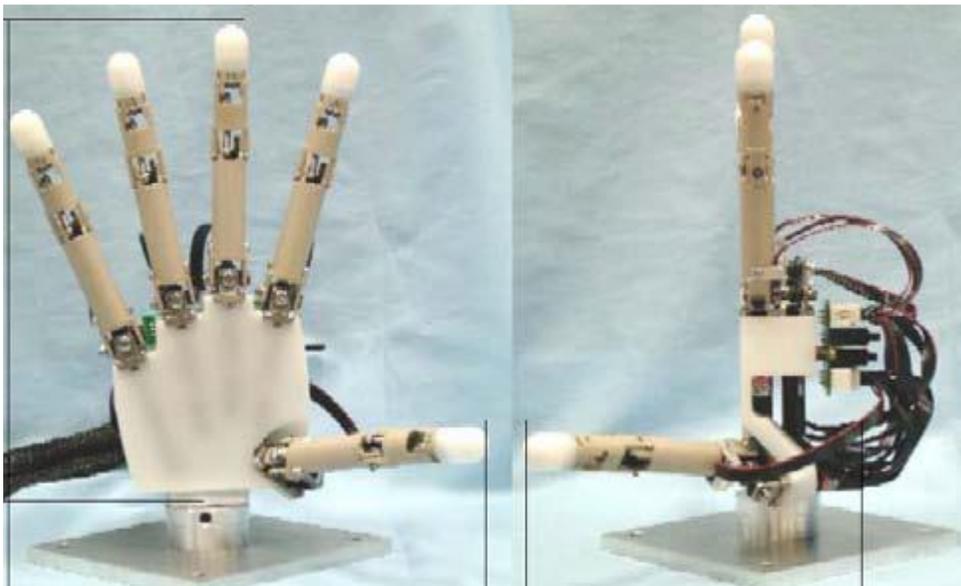


Figura 2.37 KH Hand Type S - Universidad de GIFU

UB Hand – Universidad de Bologna (1988 – 2004)

La Universidad de Bologna desarrolla manos robóticas desde 1988, año en el que presentó su primer prototipo, la UB Hand I [REF]. Su segunda versión, la UB Hand II fue construida en 1992. La tercera versión, y la más avanzada, la UB Hand III, fue construida en 2004.

El salto tecnológico entre la segunda versión y la tercera es muy grande. Sus configuraciones son completamente diferentes. De hecho, la segunda versión no es una mano robótica antropomórfica.

UB Hand II

La estructura de la segunda versión de la UB Hand es prácticamente idéntica a la de la primera. Está compuesta por una palma, dos dedos y un pulgar. Este último consta a su vez de 14 elementos independientes y 13 GDLs o articulaciones (dos en la muñeca y 11 en la mano), 13 son controladas. El tamaño de la mano es similar a la de la mano humana y todas sus superficies (palma, falanges y punta de los dedos) son aptas para entrar en contacto con el objeto (Figura 2.38).

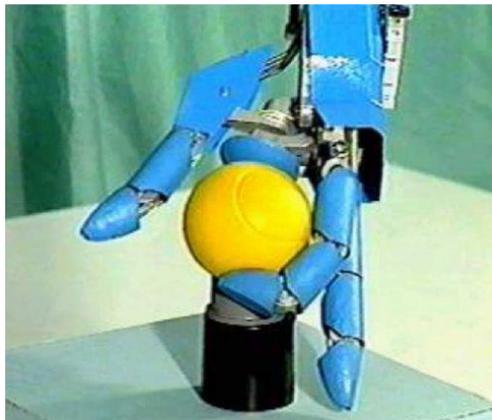


Figura 2.38 UB Hand II - Universidad de Bologna

La posición completamente opuesta del pulgar frente a los dos dedos permite a la mano robótica realizar una gran cantidad de agarres. Como experiencia de la primera versión, se mejoraron las superficies de contacto de la palma y los dedos. Cada elemento de los dedos fue mecanizado en un centro de mecanizado controlado por CNC.

La mano robótica está integrada a un antebrazo donde están situados los actuadores (motores eléctricos) y su acción es transmitida hasta las articulaciones por medio de poleas y tendones (Figura 2.39).

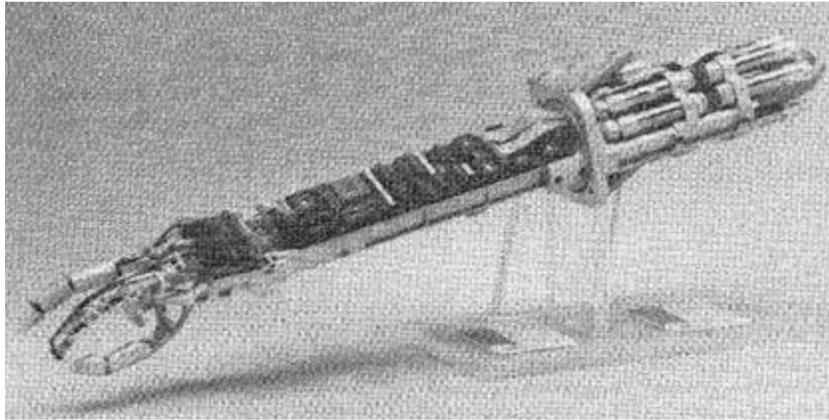


Figura 2.39 Integración de la UB Hand II con un antebrazo

El sistema sensorial de la mano está compuesto por sensores de posición de las articulaciones de efecto Hall y sensores IT (Intrinsic Tactile) de seis ejes, ubicados en las falanges y la palma.

UB Hand III

La estructura de la tercera versión de la UB Hand es totalmente diferente a las anteriores. Incorpora asimismo nuevas tecnologías y nuevos conceptos de diseño. La estructura de la UB Hand III está compuesta por una palma, un pulgar y cuatro dedos (Figura 2.40). Todos los dedos y el pulgar poseen cuatro GDLs y tienen la capacidad de ser accionados independientemente o en parejas, imitando el funcionamiento real de la mano humana.

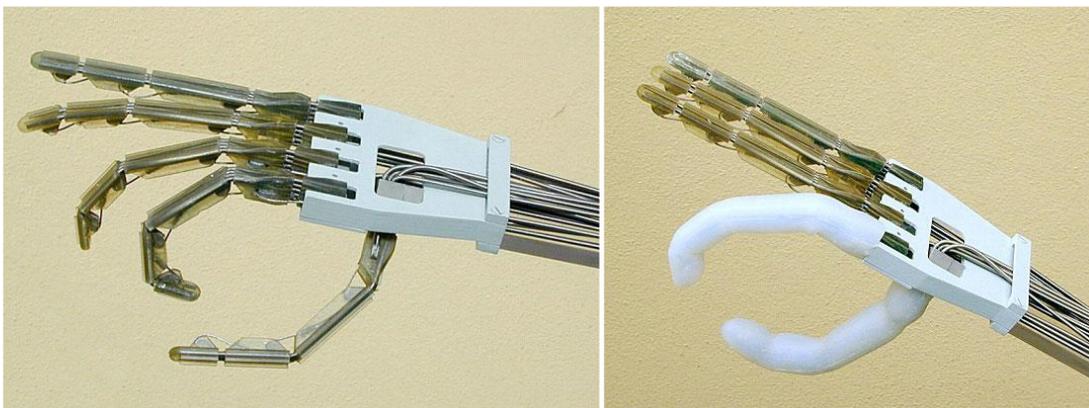


Figura 2.40 UB Hand III - Universidad de Bologna

La estructura del dedo es particularmente diferente a lo que se puede ver en las manos robóticas tradicionales. Su diseño está inspirado en el modelo biológico del dedo humano. No posee articulaciones convencionales rotativas. Por el contrario, sus falanges están unidas por medio de bisagras elásticas accionadas por tendones (Figura 2.41a). Este concepto de diseño hace que el dedo sea más simple y más económico, sin perjudicar el aspecto funcional del mismo. El dedo finalmente es recubierto y protegido por un material elástico y sintético que reproduce la textura de la piel humana (Figura 2.41b).

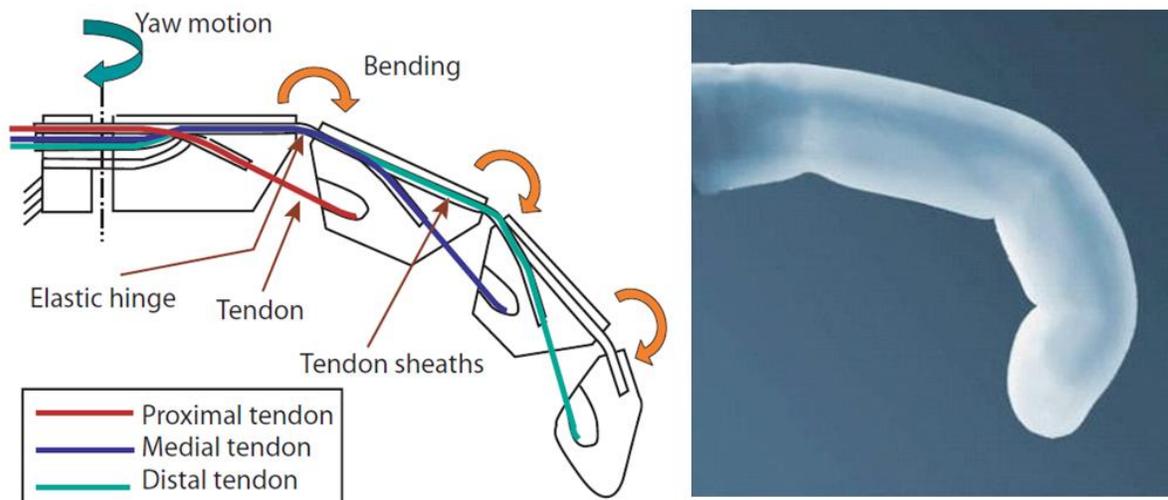


Figura 2.41 a) Esquema de la estructura interna del dedo de la UB Hand III b) Dedo recubierto

Con respecto al tipo de actuadores que utiliza, actualmente se están evaluando dos alternativas: actuadores basados en Músculos Artificiales de McKibben o motores sin escobillas con husillos de bolas. Los diseñadores aseguran que la mano robótica posee la versatilidad de adaptarse a cualquier tipo de actuador, tanto los existentes como los que puedan surgir. Los actuadores van ubicados en el antebrazo, debido al escaso espacio libre que queda en la estructura de la mano robótica (Figura 2.42).

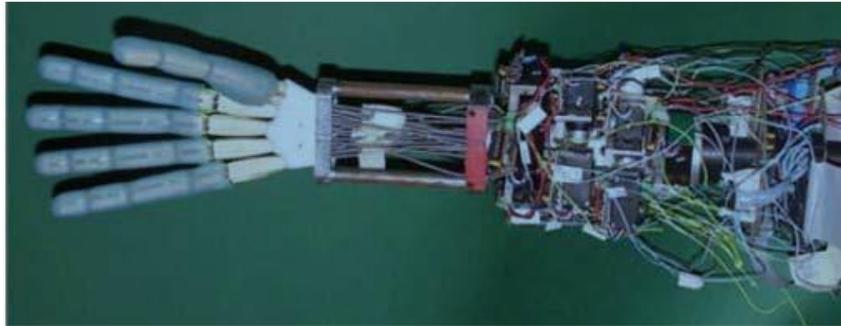


Figura 2.42 La UB Hand III integrada a su antebrazo

El sistema sensorial de la mano robótica está compuesto por sensores de fuerza (matriz de sensores de tacto y sensores de tacto intrínsecos), sensores en las articulaciones que permiten conocer la posición de la articulación y sensores de curvatura que eliminan errores de posición y saben si las articulaciones flexibles tienen alguna deformación indeseable.

Shadow Hand – Shadow Robot Company (2007)

La Shadow Robot Company es una empresa de robótica que en los últimos años ha enfocado una de sus principales líneas de investigación al desarrollo de una mano robótica, la Shadow Hand.

Esta mano robótica ha tenido varios prototipos y versiones, han evolucionado desde el Prototipo A hasta el más reciente, que es el Prototipo C. Básicamente, la diferencia entre ellos fueron avances tecnológicos en materia de control, nuevos materiales, mejoras estructurales y configuraciones más avanzadas que imitaban de mejor forma el movimiento y la cinemática de la mano humana. En la [figura 2.43](#), se pueden ver modelos anteriores a la Shadow Hand.

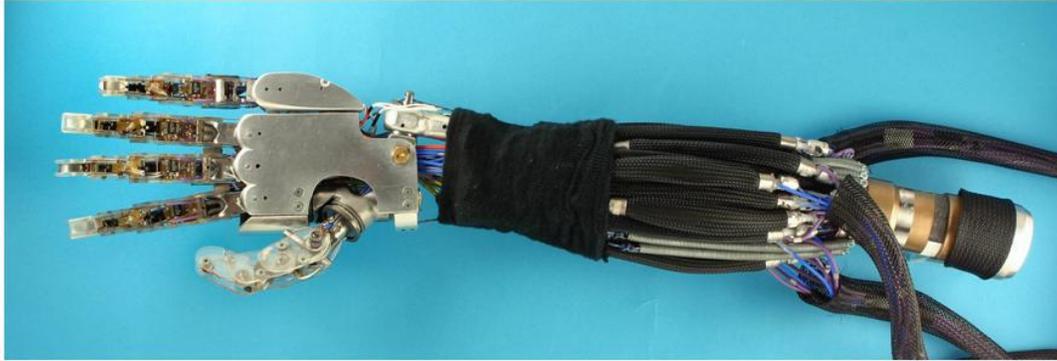


Figura 2.43 Prototipos anteriores de la Shadow Hand - Shadow Robot Company

La Shadow Hand es una mano robótica integrada a su antebrazo. Por ende, no se puede utilizar de forma independiente. La razón de esta característica se debe a que la totalidad de sus actuadores están ubicados en el antebrazo. Los materiales utilizados para la construcción de la estructura de los prototipos son una gran variedad de sintéticos, aluminios, aceros, otros metales especiales hasta corcho; haciendo que la mano robótica pese 3,9 kilogramos en su último prototipo (sin tener en cuenta su fuente de energía neumática).

La estructura del Prototipo B de la mano robótica está formada por 24 elementos y 23 articulaciones. De estos, 23 son controlados (16 de los dedos, cinco del pulgar y dos de la muñeca). El prototipo C incrementa en dos los GDLs, transformando a la estructura a 26 elementos y 25 articulaciones (Figura 2.44).



Figura 2.44 Shadow Hand C3 - Shadow Robot Company

La mano robótica es accionada por medio de actuadores neumáticos basados en los Músculos de McKibben. Su movimiento es guiado desde el antebrazo hasta cada articulación a través de tendones. Para el funcionamiento de toda la mano, se necesitan, en un principio, 32 de estos actuadores y, después, en la última versión 40.

El sistema sensorial del Prototipo B sólo posee sensores de efecto Hall y sensores de tacto. La Shadow Robot Company desarrolló, en cooperación con la Universidad de Bielefeld, unos sensores de tacto divididos en 34 regiones dentro de la misma yema del dedo (Figura 2.45) para añadir al Prototipo C.

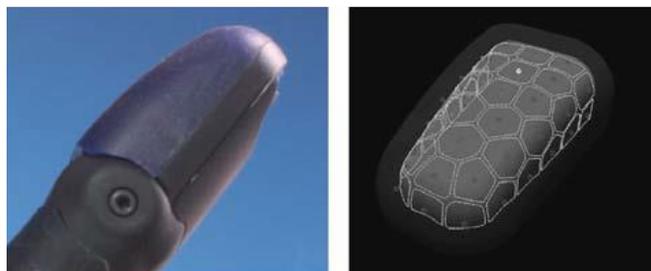


Figura 2.45 Sensores de tacto desarrollados en cooperación con la Universidad de Bielefeld para la Shadow Hand

La Shadow Hand es la primera mano robótica antropomórfica avanzada que es comercial. Además de la propia mano robótica, se pueden adquirir diferentes

accesorios como, por ejemplo, un prototipo del dedo de la mano totalmente independiente.

Actualmente existen 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 antropofornismo.

Prótesis de mano Bebionic

La prótesis mioeléctrica y totalmente articulada Bebionic fue presentada oficialmente en el Congreso Mundial de la Sociedad de Prótesis y Ortesis. Contiene microprocesadores que monitorean constantemente la posición de los dedos, de manera que las secuencias de agarre sean siempre acertadas. 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 2.46).



Figura 2.46 Prótesis Bebionic

El modelo i-LIMB de TouchBionic, 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 2.47).



Figura 2.47 Prótesis i-LIMB

La prótesis de Michelangelo de Otto Bock, imita con gran similitud a la mano humana en aspecto físico, rapidez y movimientos. 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 2.48a). La prótesis Myo Hand tiene una fuerza de agarre de 100N y puede sujetar velozmente y con precisión (Figura 2.48b). Los objetos se fijan mediante señales musculares, ya que el sistema electrónico de la prótesis no reajusta automáticamente la fuerza de agarre.



Figura 2.48 Prótesis: a) Michelangelo y b) Myo Hand

La compañía Motion Control, fabricante de prótesis mioeléctricas establecida en Estados Unidos, presenta un brazo para amputación superior al codo denominado UTAH ARM donde la mano y la muñeca tienen costo adicional; el brazo se puede mover a velocidad variable (Figura 2.49). Utiliza 2 microprocesadores para que exista un control simultáneo del codo y la mano.

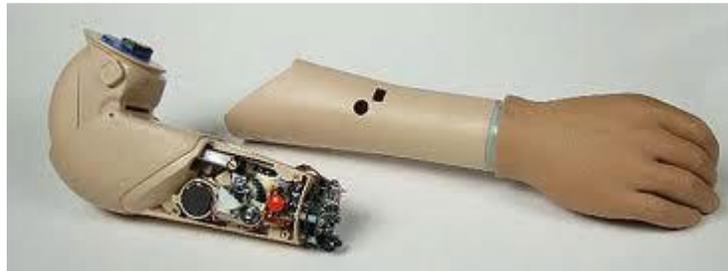
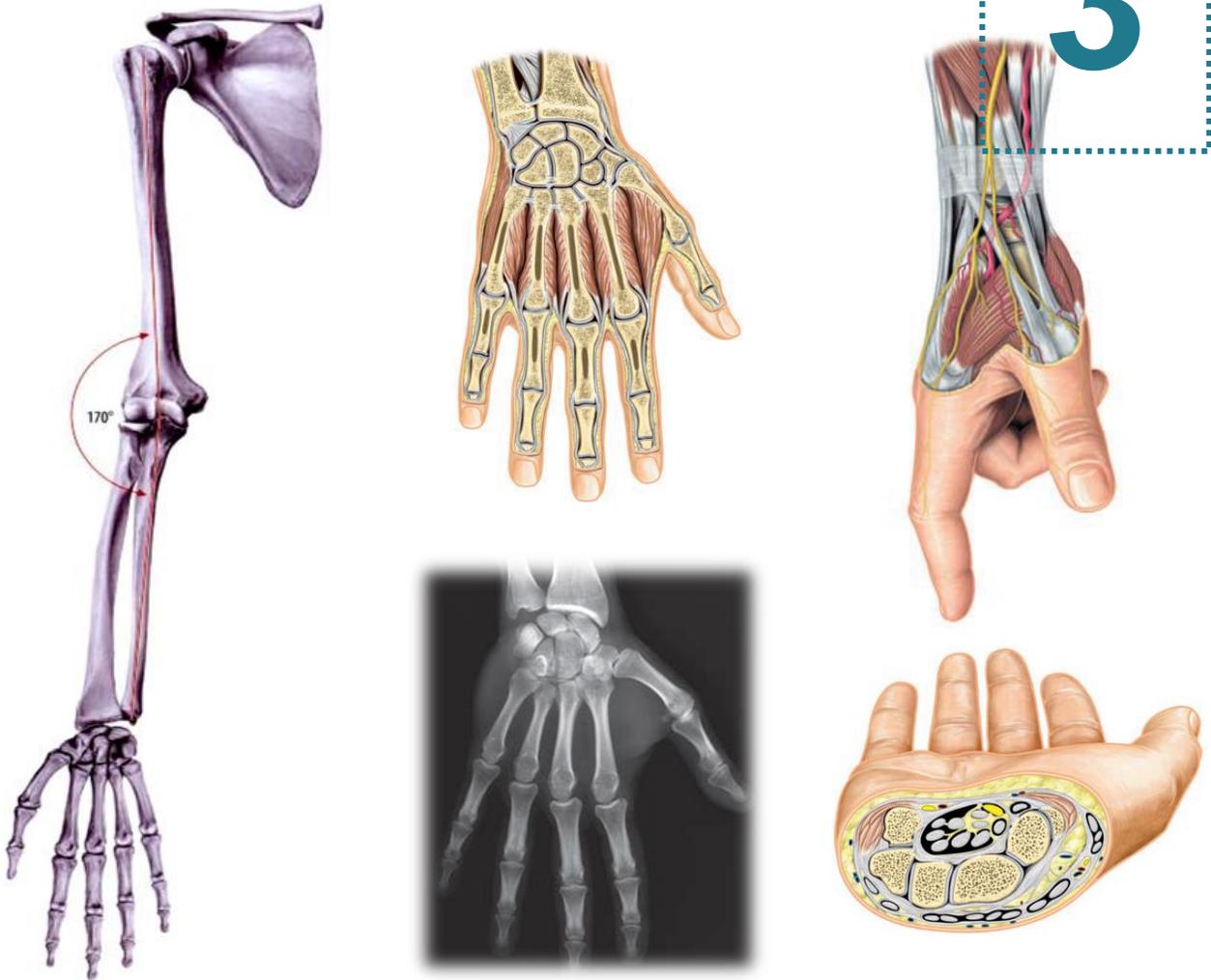


Figura 2.49 Prótesis UTAH ARM

Además de la prótesis antes mencionada, 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 pinas o manos según la necesidad del paciente.

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3



En este capítulo se aborda la descripción anatómica, fisiológica y biomecánica del antebrazo y mano, con dicha información el diseñador tomará decisiones en cuanto al diseño de su dispositivo robótico y determinará la relación entre el sistema natural del cuerpo y su modelo de diseño con la intención de que el dispositivo tenga antropometría es decir con características similares al brazo humano.

3.1 Lesiones y niveles de amputación

3.1.1 Niveles de amputación de la extremidad superior

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 3.1).

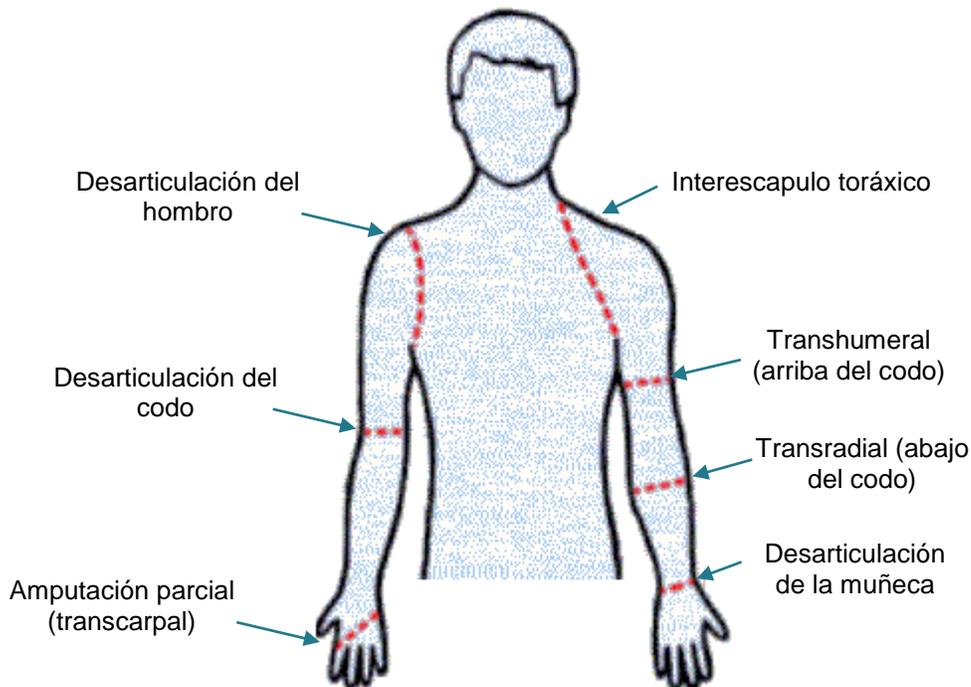


Figura 3.1 Desarticulaciones y amputaciones de la extremidad superior (8)

Las amputaciones y desarticulaciones son ocasionadas por lesiones traumáticas y no traumáticas. 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 (8).

Tabla 3.1 Causas de amputación y porcentaje (1)

Causa	Descripción
Diabetes Mellitus Tipo (DT2)	Es la principal patología en la causa de amputación (enfermedades vasculares), contribuye con el 81% de los casos. Periodo de latencia muy largo.
Amputaciones traumáticas	Representan el 16%, en este tipo de pacientes el periodo de latencia es muy corto y generalmente se acompaña por una no aceptación del paciente de su condición.
Tumores malignos o por causas congénitas	Representan el 3% de los casos

Uno de cada diez personas con miembros amputados se rehabilita, y solo el 30% de los rehabilitados saben usar la prótesis. El 75% de los que sufren amputaciones traumáticas son hombres (1).

Las amputaciones son irreversibles, existen formas de sustituir al miembro pero nunca llegará a funcionar como el miembro original. Después de la amputación queda una parte residual de la extremidad, llamada muñón.

El muñón permite realizar algunas de las actividades que antes de la amputación se realizaban, además de ser indispensable para la colocación de una prótesis. Por lo tanto, tener un buen manejo de una prótesis, el muñón debe cumplir con ciertas características, como son: un tamaño mínimo que ofrezca un brazo de palanca suficiente para el manejo de una prótesis, no presentar dolor, además de soportar roces y presiones. Por estas causas, al realizar una amputación se debe procurar que el muñón sea capaz de recibir y adaptarse a una prótesis, dejando el tamaño o nivel adecuado en la amputación, además de que las articulaciones del muñón sean suficientemente móviles. Para que un muñón sea totalmente

funcional es necesario que cuente con una buena musculatura, es decir que posea potencia.

3.2 Prótesis

Una prótesis es un elemento fabricado para sustituir de forma parcial o completa, alguna parte afectada del cuerpo. Se entiende por prótesis robótica como una extensión artificial, dotada de una o combinación 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.

Las prótesis del miembro superior reproducen movimientos complejos, como el posicionamiento de la mano en el espacio para realizar maniobras específicas de prensión y manipulación. Las prótesis no reproducen de forma adecuada la sensibilidad táctil que proporcionan los dedos (9).

El encaje de las prótesis de la extremidad superior se fabrica a medida, para proporcionar un contacto total, y permite a la articulación afectada la máxima amplitud de movimiento. La suspensión se logra por aspiración o con un arnés axilar: el arnés también proporciona un punto de anclaje para el cable que controla el dispositivo terminal. El arnés debe ser cómodo de llevar. La mejor suspensión para personas que llevan cargas pesadas con la prótesis es un arnés axilar de silla de montar (9).

La articulación protésica de muñeca puede proporcionar un cierto grado de supinación y pronación, y de flexión y extensión, además de constituir el encaje para los diversos elementos terminales intercambiables. La articulación del codo para la prótesis por debajo del mismo suele fabricarse con bisagras flexibles unidas al manguito del tríceps braquial. En las amputaciones por debajo del codo

con poca movilidad de éste, se emplea una articulación policéntrica o un encaje abierto con bisagras escalonadas para aumentar la amplitud de los movimientos.

Las prótesis por encima del codo requiere un modelo de codo que pueda bloquearse en diversas posiciones de flexión y permita la rotación humeral pasiva. Los dispositivos terminales para las prótesis de la extremidad superior reproducen algunas de las funciones de prensión de la mano. Los más comunes son los ganchos y las manos funcionales con apertura voluntaria: otros incluyen sierras, martillos, tenazas y otras herramientas. Las manos protésicas funcionales están cubiertas por un guante que imita la piel.

Las articulaciones del miembro superior están controladas por cables y arneses manejados con el cuerpo, por electrodos mioeléctricos y baterías externas que proporcionan energía eléctrica, o por interruptores eléctricos. Los cables de control convencionales están unidos al arnés, y el paciente opera el dispositivo terminal con movimientos de la escápula y del hombro. La articulación del codo posee un cable para activar el bloqueo del codo y otro para controlar la flexión, cuando la articulación está desbloqueada, o el dispositivo terminal cuando el codo está bloqueado. El sistema de control mioeléctrico utiliza electrodos superficiales colocados en la cara interna del encaje sobre los músculos apropiados. Cuando el músculo se contrae, el motor mueve el dispositivo (9).

3.2.2 Clasificación de los tipos de prótesis del miembro superior

3.2.2.1 Según nivel de amputación:

Desarticulados (hombro, codo, muñeca) transhumerales, transradiales, parciales de mano.

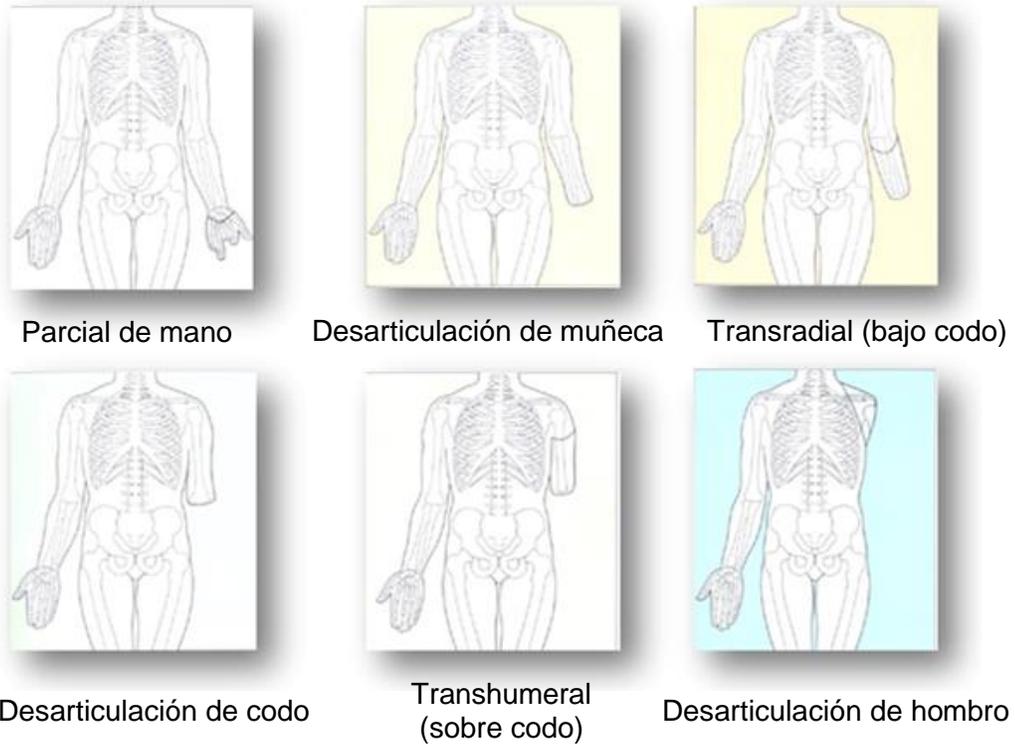


Figura 3.2 Niveles de amputación en miembro superior

3.2.2.2 Según su función:

- Pasivas (cosméticas): Tipo de prótesis cuya función básica es la estética o la cosmética, sirven para restablecer el aspecto exterior (imagen corporal). Para fabricarlas se emplean de manera recurrente tres materiales: PVC rígido, látex flexible o silicona.



Figura 3.3 Prótesis cosméticas

- Activas(funcionales)

3.2.2.3 Según la fuente de energía impulsora:

- **Prótesis impulsadas por el cuerpo o mecánicas**

También llamadas prótesis convencionales, estas prótesis son activadas y controladas por movimientos del cuerpo, los movimientos son capturados por un sistema de arneses sujeto a un cable que se conecta a un dispositivo terminal. Su funcionamiento requiere fuerza y excursión. Fuerza para jalar el cable que acciona la prótesis y la excursión que determina la magnitud del movimiento que se traducirá en amplitud de movimientos. Buscando esta combinación de características se han encontrado algunos movimientos del cuerpo que las proveen como:

- Flexión glenohumeral, un adulto puede generar entre 18 y 27 kilogramos fuerza con este movimiento, más que suficientes para controlar una prótesis.
- Elevación/depresión del hombro, generan el bloqueo y desbloqueo de codo.
- Expansión del pecho, generan el bloqueo y desbloqueo de codo.
- Abducción o aducción escapular se utiliza para operar el dispositivo terminal o la flexión del codo.

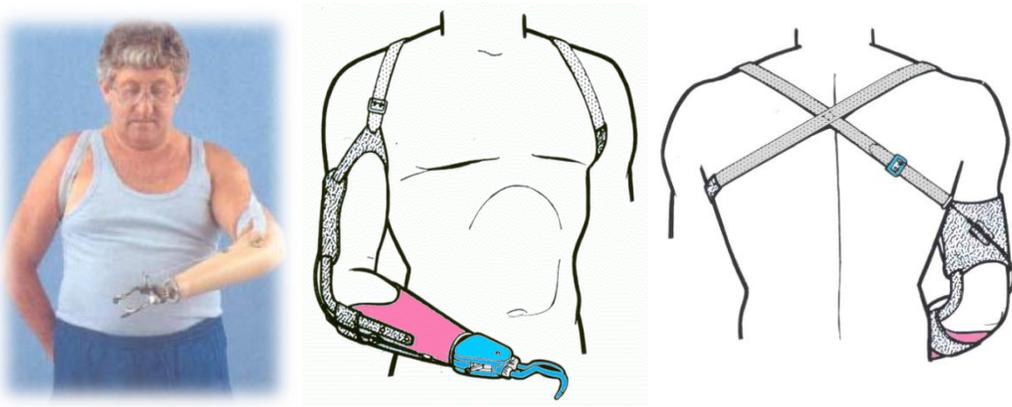


Figura 3.4 Prótesis mecánicas (8)

El problema de las prótesis mecánicas es que requieren movimiento general del cuerpo para operarlas, además de fuerza que responda y la necesidad de un arnés

apretado para realizar el control. Tienen como ventajas su precio, ligereza y tolerancia al uso rudo.

- **Prótesis impulsadas por elementos externos al cuerpo**

Prótesis eléctricas

Usan motores eléctricos en el dispositivo terminal, muñeca o codo con una batería recargable. Pueden controlarse por medio de un servocontrol, botón pulsador o botón con interruptor de arnés. En ciertas ocasiones se combinan estas formas para su mejor funcionalidad. Su adquisición y reparación es más costosa que las mecánicas, además de que son más pesadas y se deben de tener mayores precauciones al usarla.

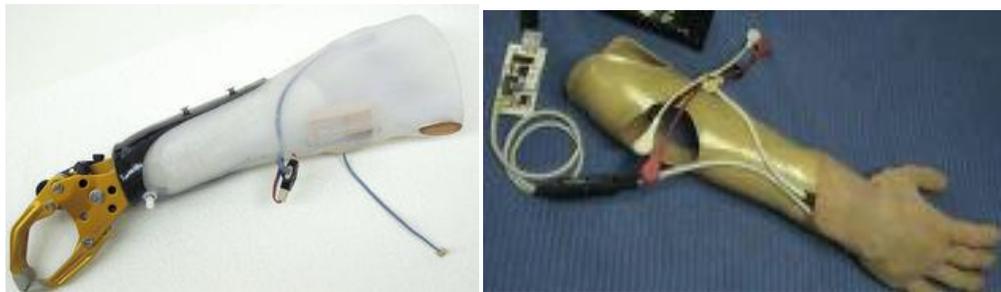


Figura 3.5 Prótesis eléctricas

Prótesis mioeléctricas

Prótesis eléctricas controladas por medio de señales mioeléctricas. Una señal mioeléctrica es una señal generada de manera voluntaria, que puede utilizarse para controlar interfaces hombre-máquina. Son producidas en los músculos cuando éstos se contraen o distensionan, produciendo una pequeña señal eléctrica, creada por la interacción química del cuerpo. Esta pequeña señal oscila los 5 y 20 μ Volts. Para la obtención de esta señal se utilizan electrodos como sensores, que al entrar en contacto con la superficie de la piel permiten registrarla. Una vez registrada la señal se acondiciona, este proceso consiste en la ampliación de la señal, debido a los bajos niveles de voltaje que se presentan, y el filtrado de ésta para eliminar componentes de ruidos que la distorsionan. La señal obtenida se

utiliza en el control de los actuadores, teniendo como fin último el movimiento de la prótesis, ya sea la mano, muñeca, codo u hombro.

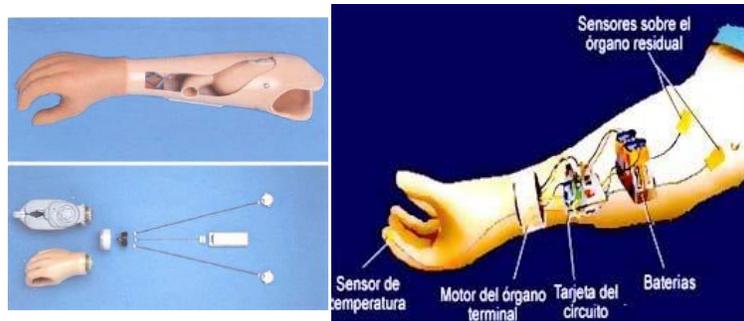


Figura 3.6 Prótesis mioeléctricas (8)

- **Prótesis híbridas**

Combinación de prótesis accionadas por el cuerpo con el accionamiento por electricidad. En su mayoría, las prótesis híbridas sirven para individuos que tienen amputaciones o deficiencias transhumerales (arriba del codo). Las prótesis híbridas utilizan con frecuencia un codo accionado por el cuerpo y un dispositivo terminal controlado en forma mioeléctrica (3).



Figura 3.7 Prótesis híbridas

3.2.3 Componentes de prótesis de miembro superior

1. Elementos de suspensión (arnés en forma de 8).
2. Encaje (socket, cuenca en material sintético o cono de enchufe).
3. Articulaciones (según nivel de amputación).

4. Elementos de control: Sistema de cables (cables Bowden) o sistema eléctrico o mioeléctrico.
5. Dispositivo terminal: mano cosmética, gancho metálico funcional, mano mecánica o mioeléctrica (8).



Figura 3.8 Componentes de prótesis de miembro superior

3.3 Efectores finales

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 causa.

Es considerado como efector final a todo elemento que se fija al final del brazo manipulador, el cual se emplea como herramienta para la ejecución de una tarea sencilla ó especializada, lo que representa del 5 al 20% del costo total del robot. De forma general y dependiendo de su aplicación, los efectores finales de un manipulador pueden clasificarse en Herramientas y Pinzas (10) (11).

Las pinzas se utilizan para tomar un objeto, normalmente la pieza de trabajo y sujetarla durante el ciclo de operación del robot.

Una herramienta se utiliza como efector final en aplicaciones en donde se exija al robot realizar alguna operación sobre la pieza de trabajo.

3.3.4 Efector final de pinza o dedos mecánicos

Los efectores finales de sujeción se utilizan para agarrar, sostener y colocar los objetos a manipular, en posición y orientación adecuada para el trabajo previsto, a este tipo de efectores finales se le denomina efector de pinzas (12) (13). Dentro de los efectores finales de pinza más comunes, se encuentran los de dedos angulares o paralelos (14). El efector final con dos dedos es utilizado comúnmente para sujeción interna o externa de piezas huecas o sólidas. Las pinzas con tres dedos asemejan la utilización del dedo pulgar, el índice y el dedo medio; mientras que el efector final con cuatro dedos, es de gran utilidad para la sujeción de piezas cuadradas.



Figura 3.9 Efector final con dedos mecánicos

3.3.5 Parámetros y limitaciones de las pinzas

Los parámetros más importantes considerados en el diseño de un efector final de pinzas, comprende dos rubros importantes: el objeto a manipular y el método de agarre. Los parámetros del objeto considerados son: su masa, forma, dimensiones y tolerancias, la posición del centro de gravedad, estabilidad, propiedades superficiales, material, rigidez y temperatura (15).

Los datos necesarios para determinar el método de agarre de la pinza incluyen los propios errores de posicionado, aceleración de los ejes y condiciones de conexión.

Los parámetros relacionados con el espacio de trabajo, como el espacio disponible para el agarre, las condiciones de asentamiento, la suciedad, humedad y vibraciones que existieran por la aplicación específica del manipulador representan variables que influyen en la tarea a realizar (16) (17).

3.3.6 Efector final multiarticulado

Este tipo de efectores finales cuentan con un alto grado de precisión, conformados por sensores de presión, proximidad y microcontroladores para coordinar la fuerza necesaria en la manipulación de objetos frágiles. La complejidad de los movimientos hechos por la mano de los seres vivos, la cual trata de imitar, hace más complicado el diseño de este tipo de efectores finales.

3.3.7 Manos robóticas como efectores finales

La mano es capaz de sujetar y manipular objetos con diferentes formas y tamaños con gran habilidad y destreza, pero esto es funcionalmente muy difícil de imitar, puesto que la mano posee más de 20 grados de libertad y una arquitectura muy elaborada por lo que los movimientos de ésta son muy complejos.

Los manipuladores robóticos son capaces de realizar una tarea determinada de forma adecuada únicamente cuando éste es equipado con la herramienta correcta y el método de agarre apropiado (18). El diseño de dichas tareas requiere el conocimiento de varios aspectos interrelacionados como son: el diseño o estructura mecánica del efector final, fuerza, posición, rigidez, destreza de control y la configuración de agarre.

Las pinzas son la interfaz directa entre los manipuladores robóticos y los objetos a manipular, por lo que para su selección es necesario considerar la geometría, características físicas de los objetos y las condiciones de operación. En determinadas tareas o aplicaciones se presentan casos donde la geometría y

tamaño de los objetos difieren mucho uno de otro, dificultando la selección de pinzas o efectores finales estándar que resultan ser inadecuados, siendo necesario desarrollar una pinza especial.

Desde el punto de vista industrial, el efector final es un dispositivo que está diseñado para interactuar con uno o varios objetos de peso, tamaño y forma similar para desempeñar tareas de sujeción y manipulación de “Poca precisión” (14), dichas tareas se pueden realizar empleando un efector final o pinza de dos dedos. El uso de dichas estructuras se limita a ciertas funciones y no es capaz de proporcionar “Movimiento Fino” o con un mayor control (19).

Los efectores finales con dos dedos o pinzas son ampliamente utilizados, principalmente en aplicaciones industriales (20), mientras tanto, dispositivos robóticos con múltiples dedos tratan de imitar el desempeño de las manos de los seres vivos.

Con el objeto de realizar tareas más precisas y que el manipulador robótico pueda cubrir un amplio campo de trabajo, se están incorporando manos robóticas como efectores finales para la ejecución de diversas tareas en las que se requiere de una mayor precisión y destreza en el manejo de objetos. Se han realizado trabajos relacionados con manos robóticas de múltiples dedos, de forma antropomórfica, con mecanismos sub-actuados e incluso con un control muy sofisticado, tratando de emular las funciones de la mano (21) (19) (22).

Dentro de los trabajos de investigación relacionados con manos robóticas, destacan los que se han enfocado al desarrollo de mecanismos para sintetizar el movimiento de la mano. Algunos mecanismos que se emplean para reproducir éstas funciones, comprenden desde los más esenciales, como mecanismos de cuatro barras, combinaciones de polea y banda, así como los mecanismos de cadenas cinemáticas abiertas que simulan los movimientos de los dedos, entre otros (23).

3.4 Introducción a la anatomía del brazo humano

El miembro superior se caracteriza por su movilidad y su capacidad para agarrar, golpear y llevar a cabo acciones motoras finas (manipulación).

Las articulaciones del miembro superior interaccionan de forma sincronizada para coordinar los segmentos participantes en la realización de movimientos suaves y eficientes a la distancia o en la posición, más operativas necesarias para una tarea en concreto. La eficiencia de la función de la mano se debe, en gran parte, a la capacidad para situarla en la posición adecuada mediante movimientos de las articulaciones de la cintura escapular, del hombro, del codo, radiocubitales y del carpo (24).

3.4.8 Anatomía de la superficie del miembro superior

3.4.8.1 Superficie de la mano

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 (26), esta sección no contiene pelo ni glándulas sebáceas.

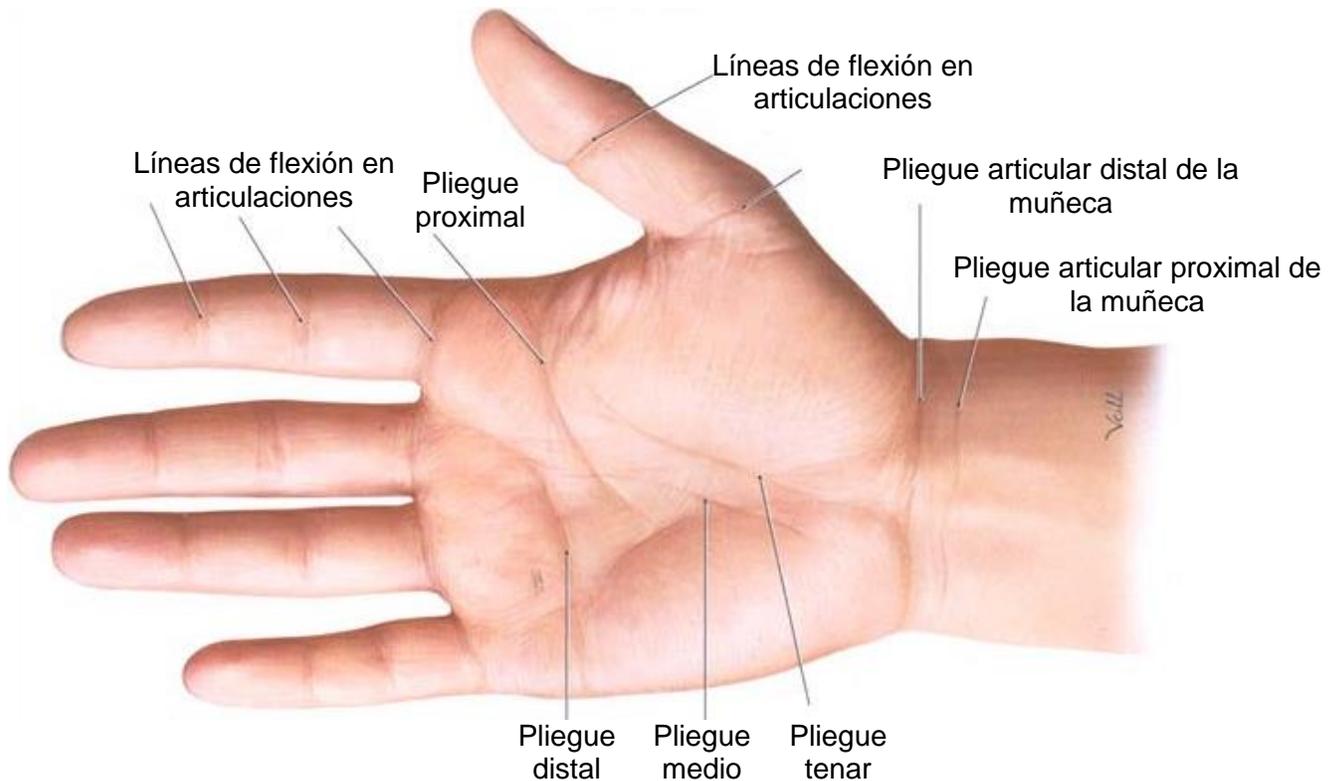


Figura 3.10 Vista palmar de la mano (26)

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 3.10). 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.

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 3.11) así como la red venosa dorsal siendo lo anterior una característica del dorso de la mano (25). También son visibles los surcos distal y proximal, que suelen hacerse más profundos cuando se realiza extensión de la extremidad.



Figura 3.11 Vista dorsal de la mano (26)

3.4.9 Sistema óseo

Cada miembro superior (extremidad superior) tiene 30 huesos en tres localizaciones: 1) el húmero, en el brazo; 2) el radio y el cúbito en el antebrazo; y 3) los 8 huesos carpianos en el carpo (muñeca), los 5 metacarpianos en el metacarpo (palma) y las 14 falanges (huesos de los dedos), en la mano.



Figura 3.12 Regiones del miembro superior (27)

Los brazos están formados por un solo hueso, el **húmero**, que se extiende desde el hombro al codo. Es un hueso largo, par, con una cabeza redondeada, que se articula con la cavidad glenoidea de la escápula. El extremo inferior presenta una superficie articular, el cóndilo, por donde se articula con el radio; y tres prominencias, la tróclea, que se articula con el cúbito, el epicóndilo y la epitróclea; en ellas se fijan los ligamentos y cartílagos que conforman la articulación del codo (27).

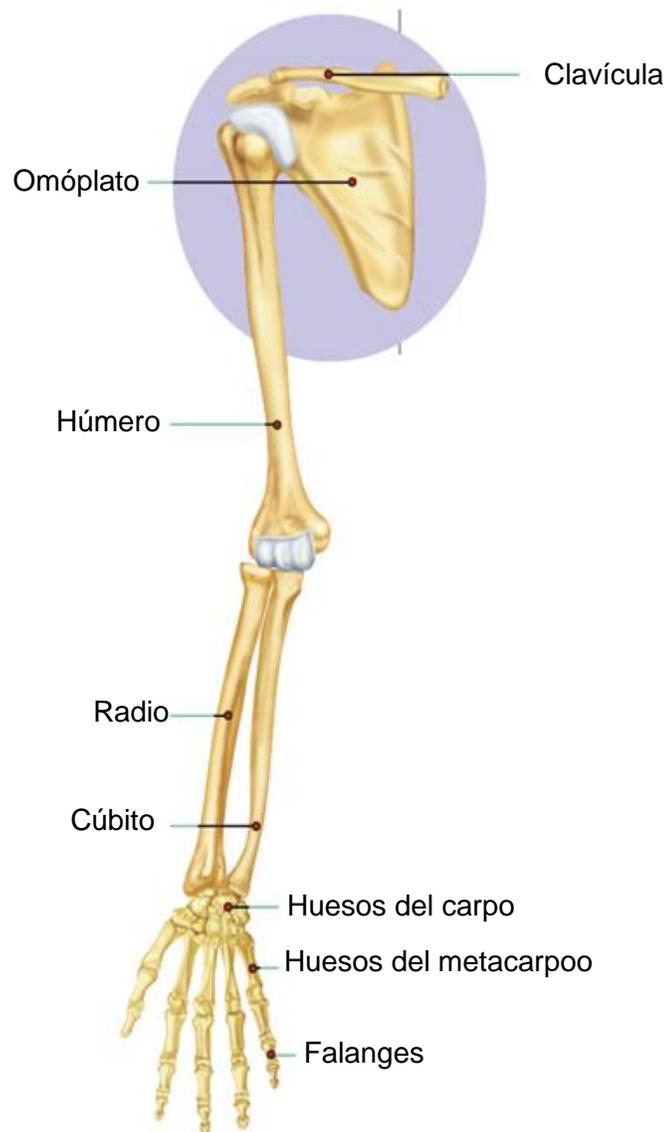


Figura 3.13 Huesos del miembro superior (27)

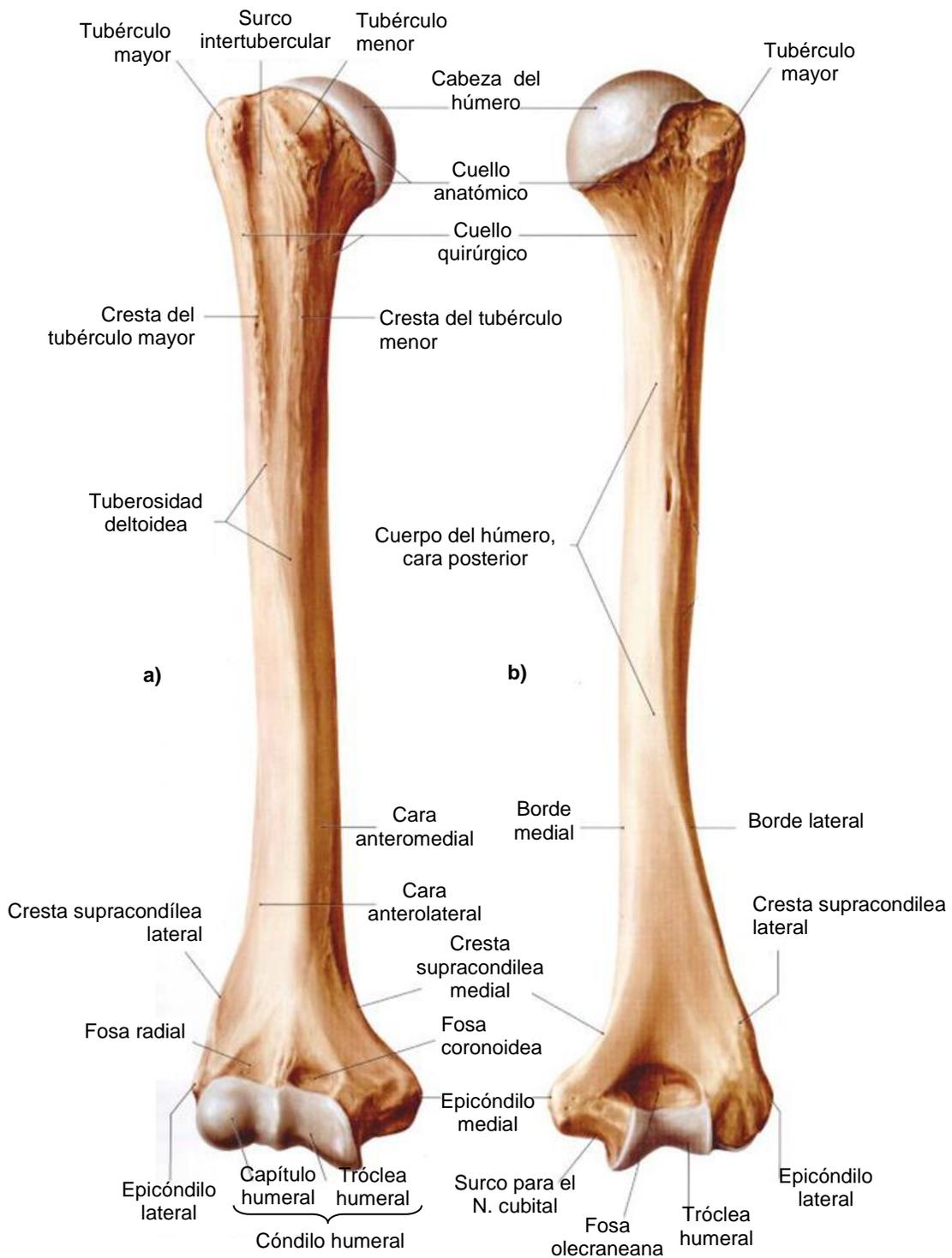


Figura 3.14 Húmero derecho a) Visión ventral b) Visión dorsal (26)

El radio y el cúbito en la Figura 3.15 no están colocados en su posición normal, sino que se han separado un poco uno del otro para poder mostrar las superficies articulares de las articulaciones radiocubitales proximal y distal.

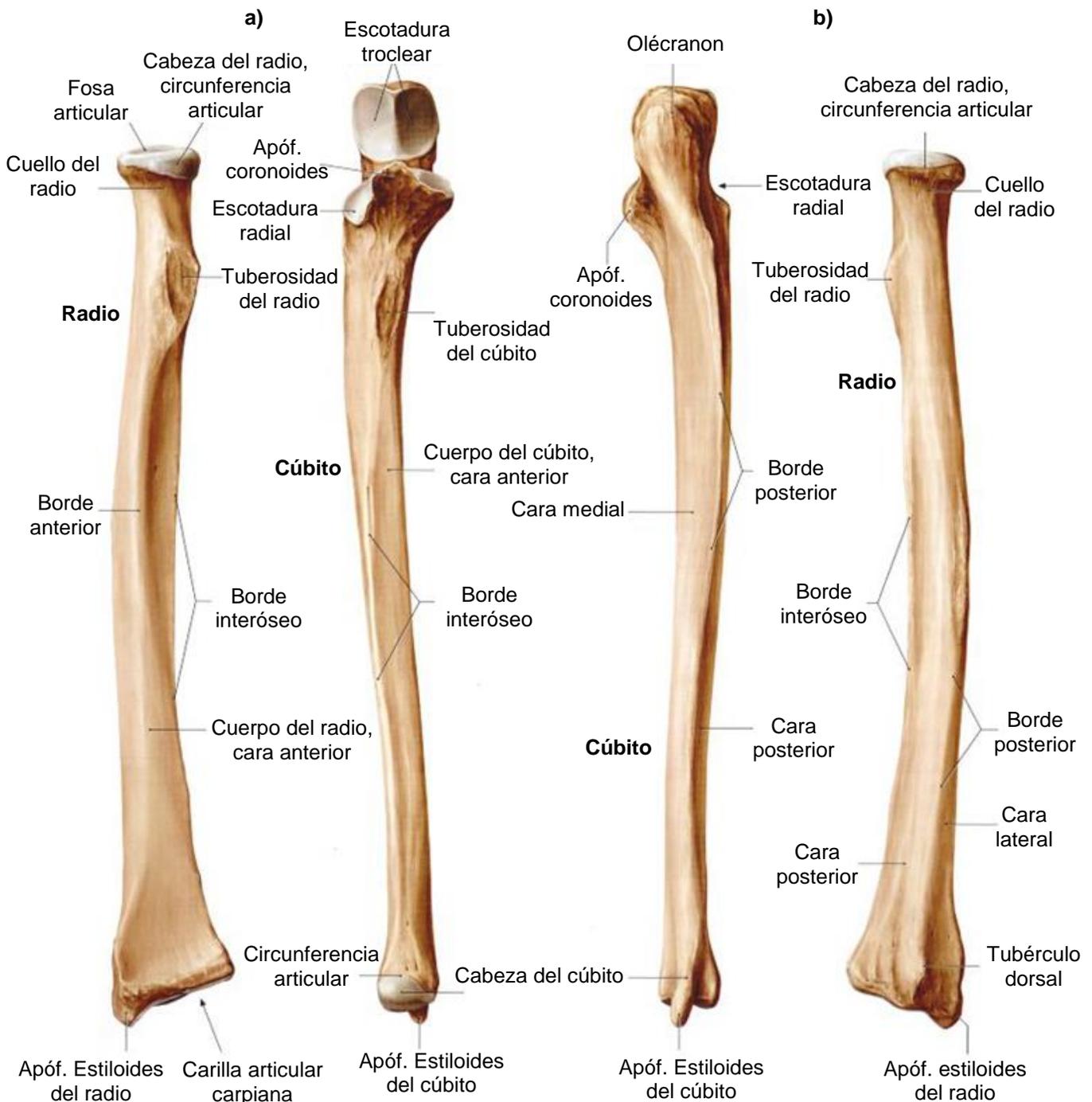


Figura 3.15 Radio y cúbito de un antebrazo derecho a) Visión ventral b) Visión dorsal (26)

Los antebrazos presentan dos huesos, el **cúbito** (interno) y el **radio** (externo). El **cúbito** es un hueso par, largo y más grueso en su parte superior, que forma el borde posterior del antebrazo y se extiende desde la parte de atrás del codo hasta la muñeca, paralelamente al radio. Su extremo superior presenta una eminencia parecida a un garfio, el olecranon-que forma la punta del codo- y una superficie

curva interior-la cavidad sigmoidea- por la que se articula con el humero. Su extremo inferior se articula con los huesos del carpo.

El **radio**, hueso par largo, forma el borde anterior al brazo. Su extremo inferior es más grueso que el superior, y se articula con el cúbito y con los huesos del carpo. Su extremo superior se articula con el cúbito y el húmero. El cúbito y el radio se articulan entre sí, tanto en el extremo superior como en el inferior. Cuando giramos la palma de la mano hacia arriba y hacia abajo, ambos huesos se cruzan (27).

Una mano se forma por un total de 27 huesos, 8 en el carpo, 5 metacarpianos y 14 falanges (28). 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 (29). Los 8 huesos del carpo están divididos en dos filas: proximal y distal. Los huesos de la fila distal son el trapecio, trapecoide, grande y ganchoso (figura 13), que juntos forman una unidad sin movimiento que se articula con los metacarpianos para formar las articulaciones CMC.

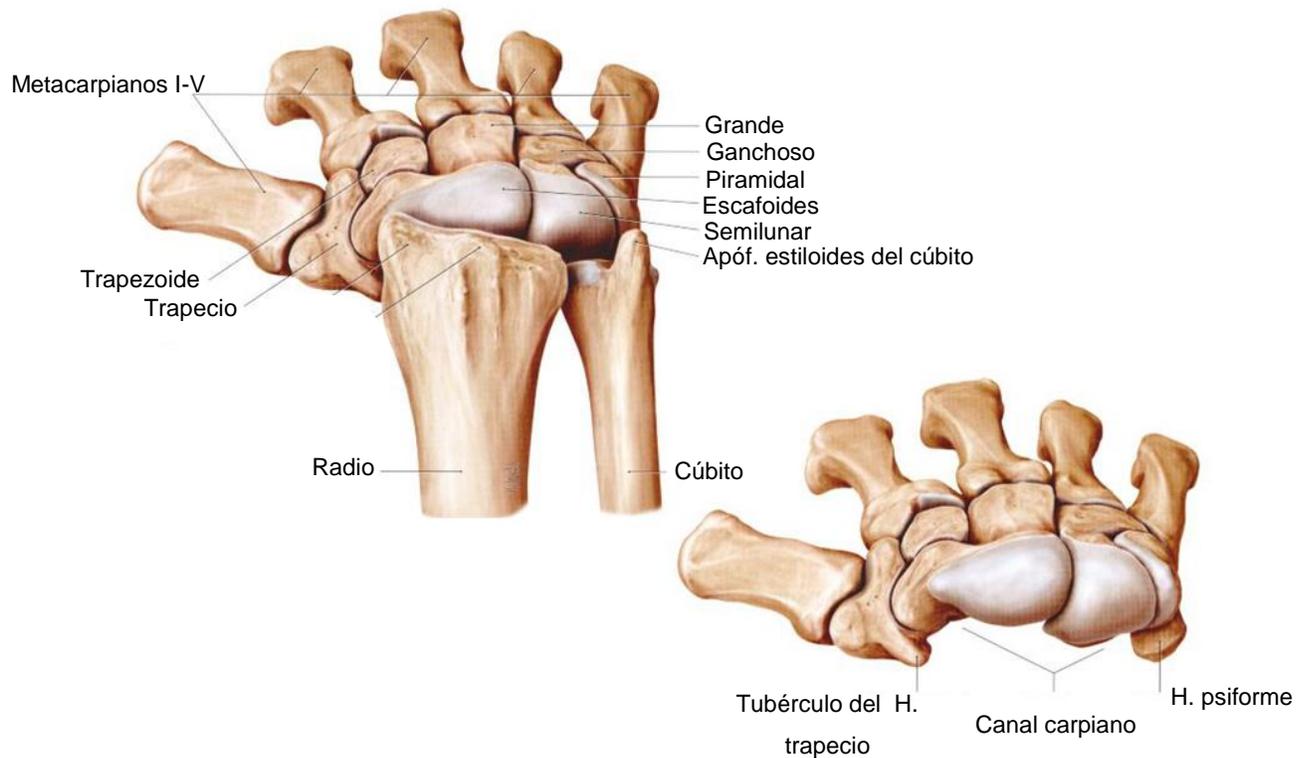


Figura 3.16 Huesos del carpo de la mano derecha en una visión proximal (26)

Los huesos de la fila proximal son el escafoides, semilunar y piramidal (Figura 3.16), 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[29]. Las falanges forman el esqueleto de los dedos (Figura 3.17), 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[24]: 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.

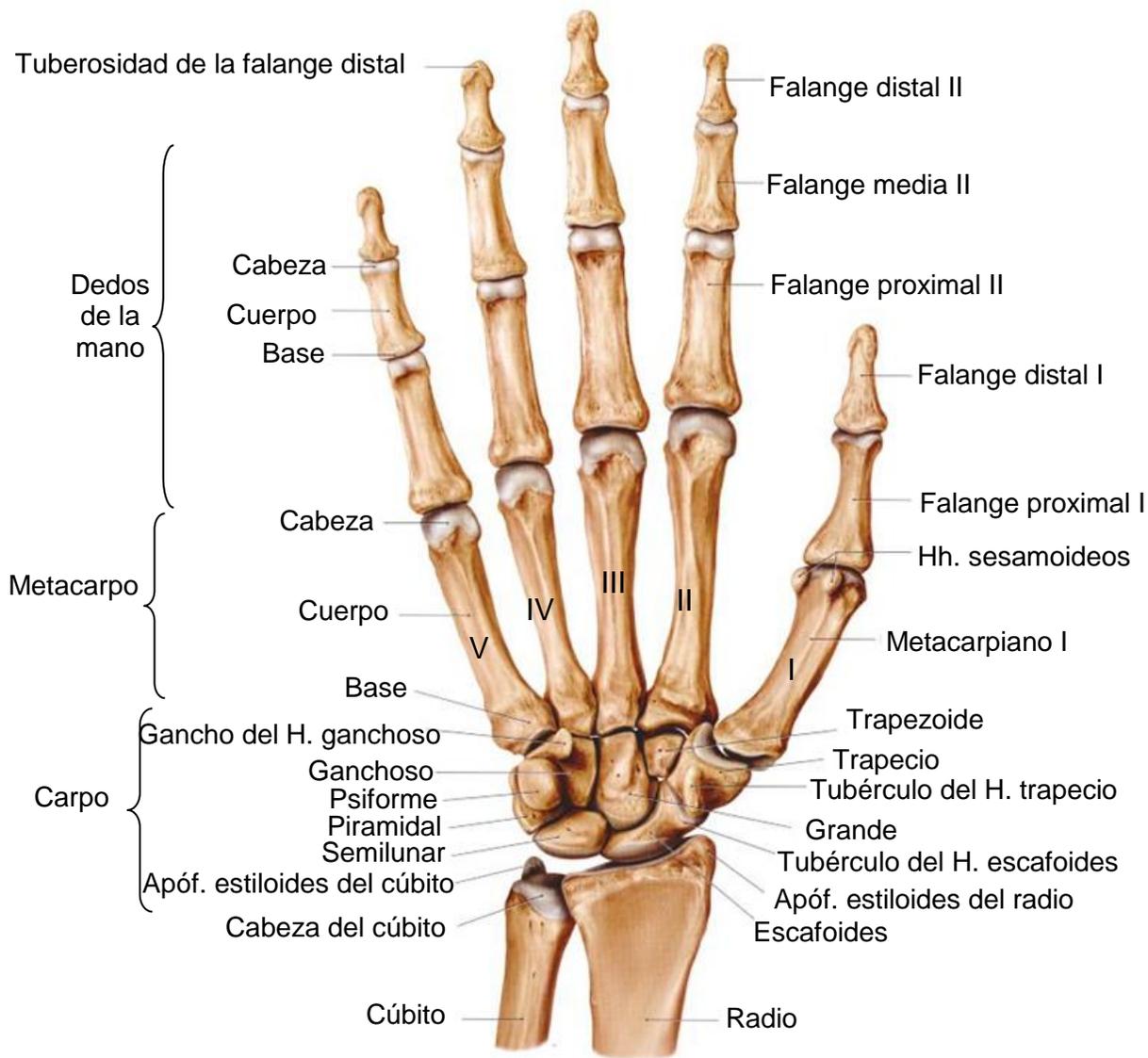


Figura 3.17 Huesos de la mano derecha en una visión palmar (26)

3.4.10 Sistema articular

En el codo se articulan el húmero y los huesos del antebrazo, radio y cúbito. Estos tres huesos forman tres articulaciones dentro de la articulación del codo:

- Articulación humerocubital entre el húmero y el cúbito;
- Articulación humerorradial entre el húmero y el radio; y,
- Articulación radiocubital proximal entre los extremos proximales del cúbito y del radio.

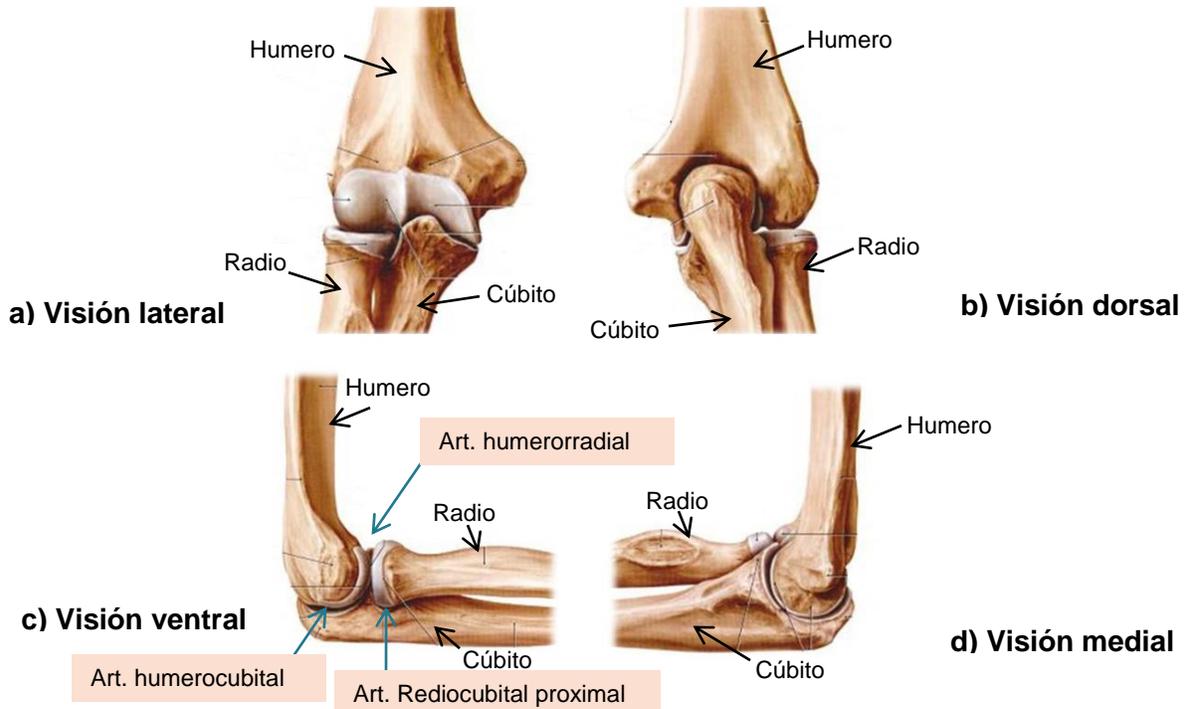


Figura 3.18 Elementos esqueléticos implicados en la articulación del codo derecho (26)

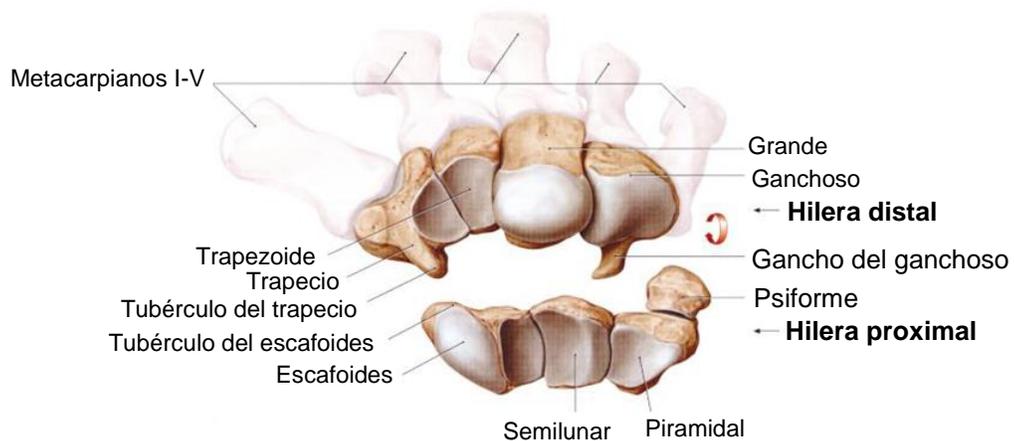


Figura 3.19 Superficies articulares de la articulación mediocarpiana de la mano derecha (26)

En la imagen 3.19 se dá la visión de la hilera distal de los huesos del carpo desde proximal y de la hilera proximal desde distal.

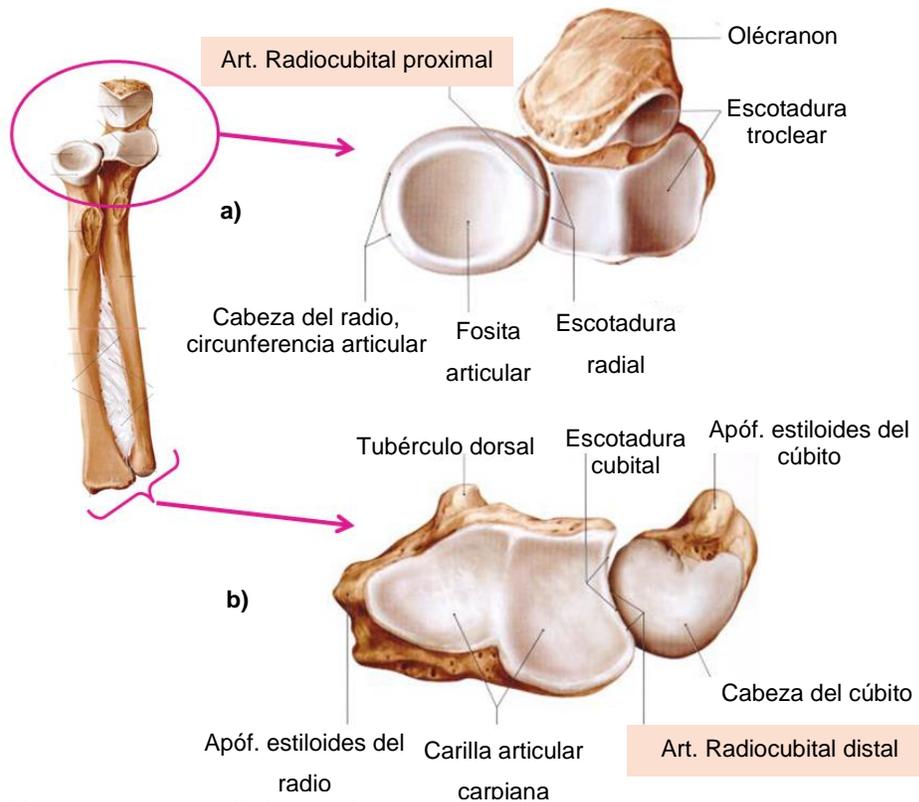


Figura 3.20 Visión de las superficies articulares de un antebrazo derecho del radio y del cúbito a) Proximales b) Distales (26)

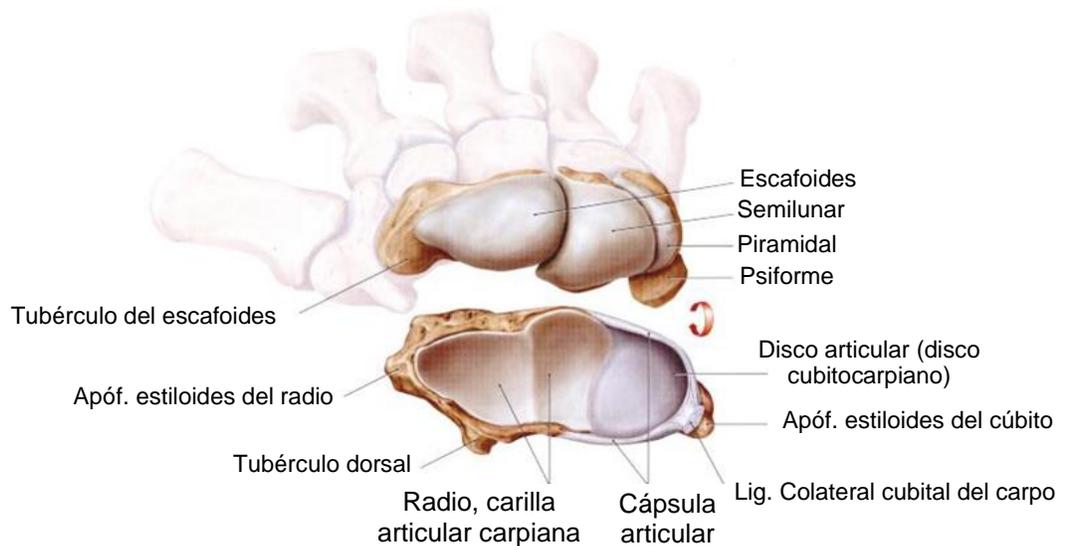


Figura 3.21 Superficies articulares de la articulación radiocarpiana de la mano derecha (26)

En la imagen 3.21 se muestra visión de la hilera proximal de los huesos del carpo desde proximal y de las superficies articulares del radio, del cúbito y del disco articular (disco articular cubitocarpiana) desde distal.

Las uniones de los diversos huesos que componen la mano y producen algún movimiento se conocen como articulaciones (30). 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 3.22).

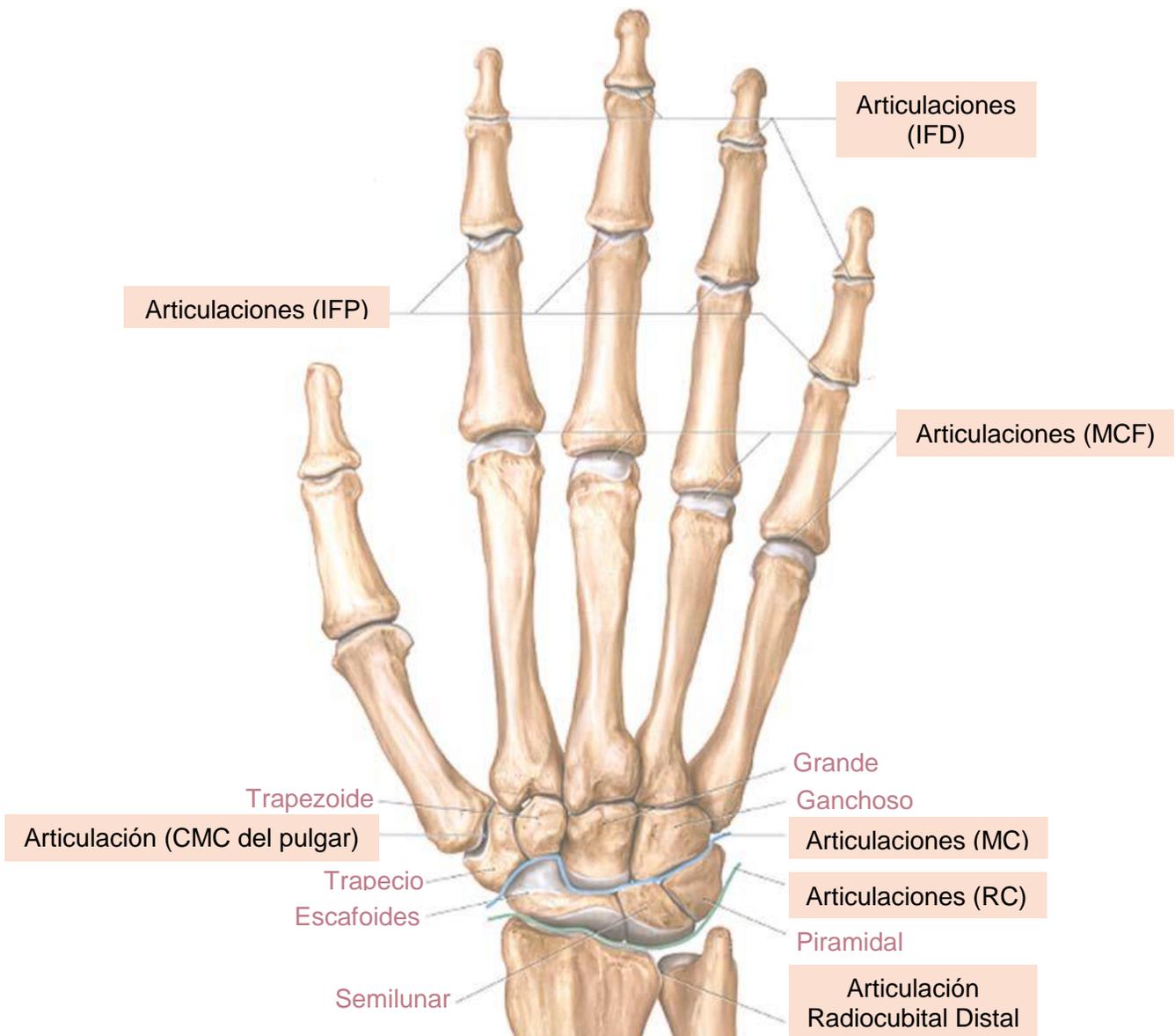


Figura 3.22 Articulaciones de la mano derecha (vista dorsal) (26)

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 (24). 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 del carpo.

3.4.11 Ligamentos y tendones

Los ligamentos constan principalmente de tejido fibroso que une a los huesos entre sí, con la función de mantener estable las estructuras óseas, mientras que los tendones unen los músculos con los diferentes huesos y sirven para mover el sistema óseo (28).

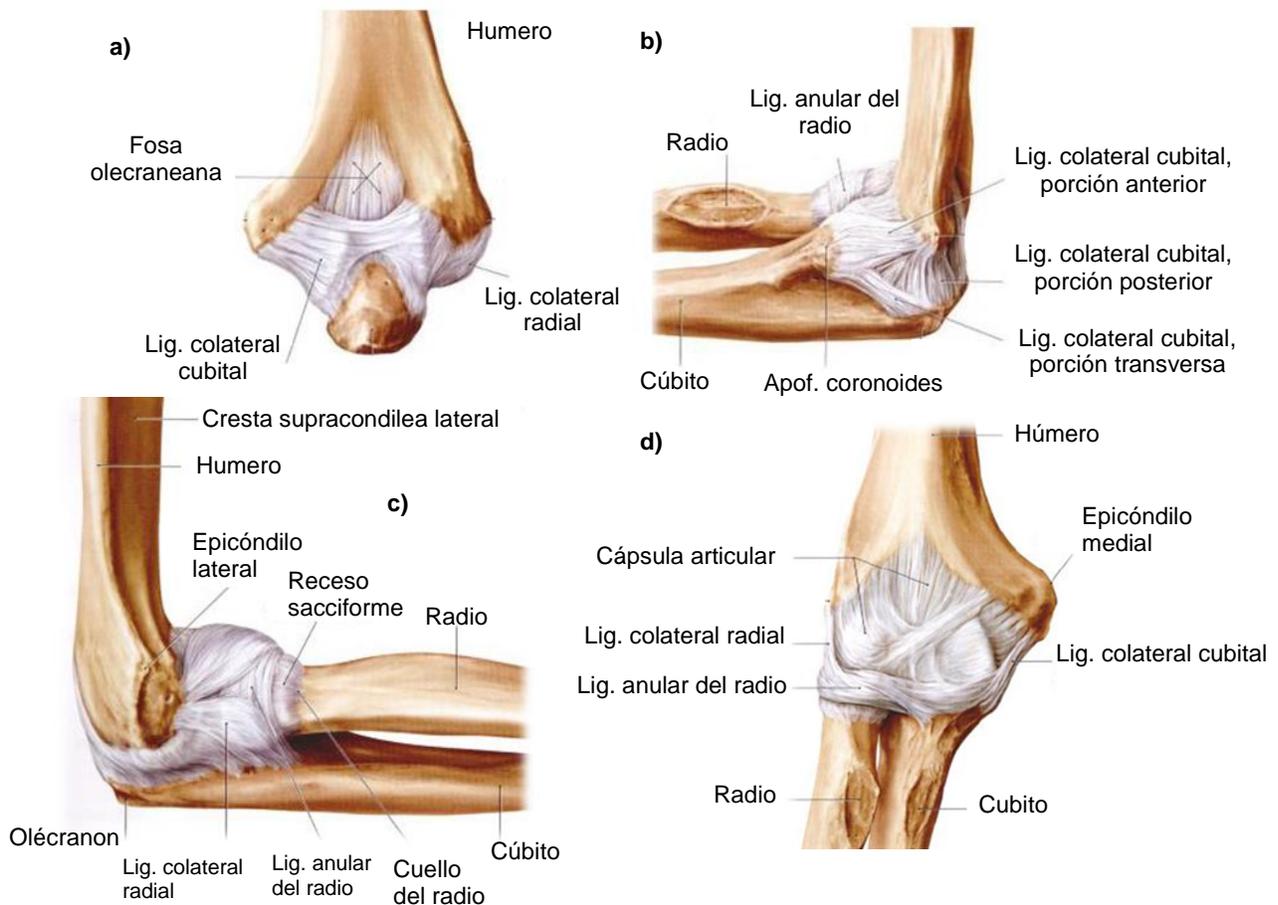


Figura 3.23 Complejo capsuloligamentario de la articulación del codo derecho en posición de 90° de flexión a) visión dorsal; b) Visión medial c) Visión lateral d) en posición de extensión, vista ventral (26)

La cápsula articular de la articulación del codo recubre las tres partes de la articulación. Mientras que es muy fina por delante y por detrás, lateralmente está reforzada por los ligamentos colaterales, estos están dispuestos en forma de abanico, de forma que proporcionan sostén lateral a la articulación en cualquier posición. El ligamento anular del radio estabiliza la articulación radiocubital proximal.

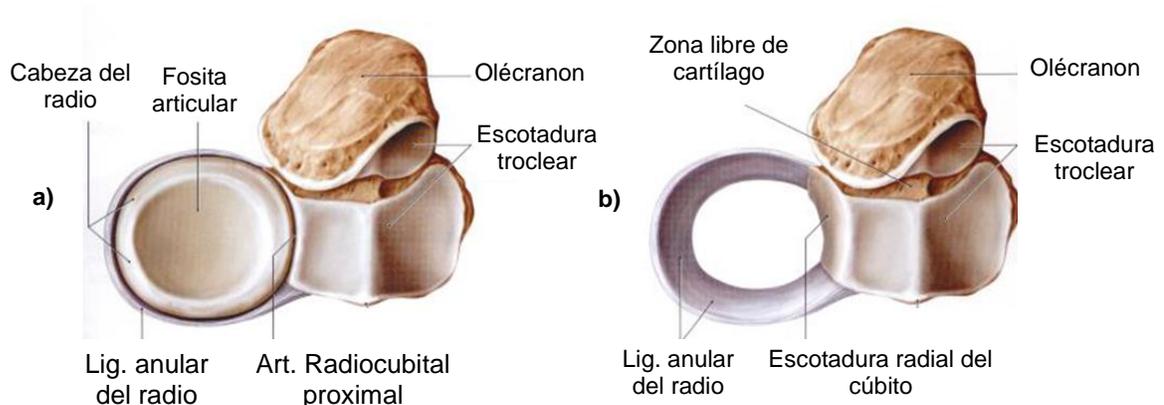


Figura 3.24 Disposición del ligamento anular del radio en la articulación radiocubital proximal derecha, a) después de haber retirado el húmero b) después de retirar al radio (26)

Según su situación y su ordenación, se diferencian cuatro grupos de ligamentos en la mano (Figura 3.25):

1. Ligamentos situados entre el antebrazo y los huesos del carpo (Ligamentos radiocarpianos y cubitocarpianos, ligamentos colaterales);
2. Ligamentos situados entre los huesos del carpo (ligamentos intercarpianos);
3. Ligamentos situados entre los huesos del carpo y los huesos del metacarpo (ligamentos carpometacarpianos);
4. Ligamentos situados entre las bases de los huesos metacarpianos (ligamentos metacarpianos).

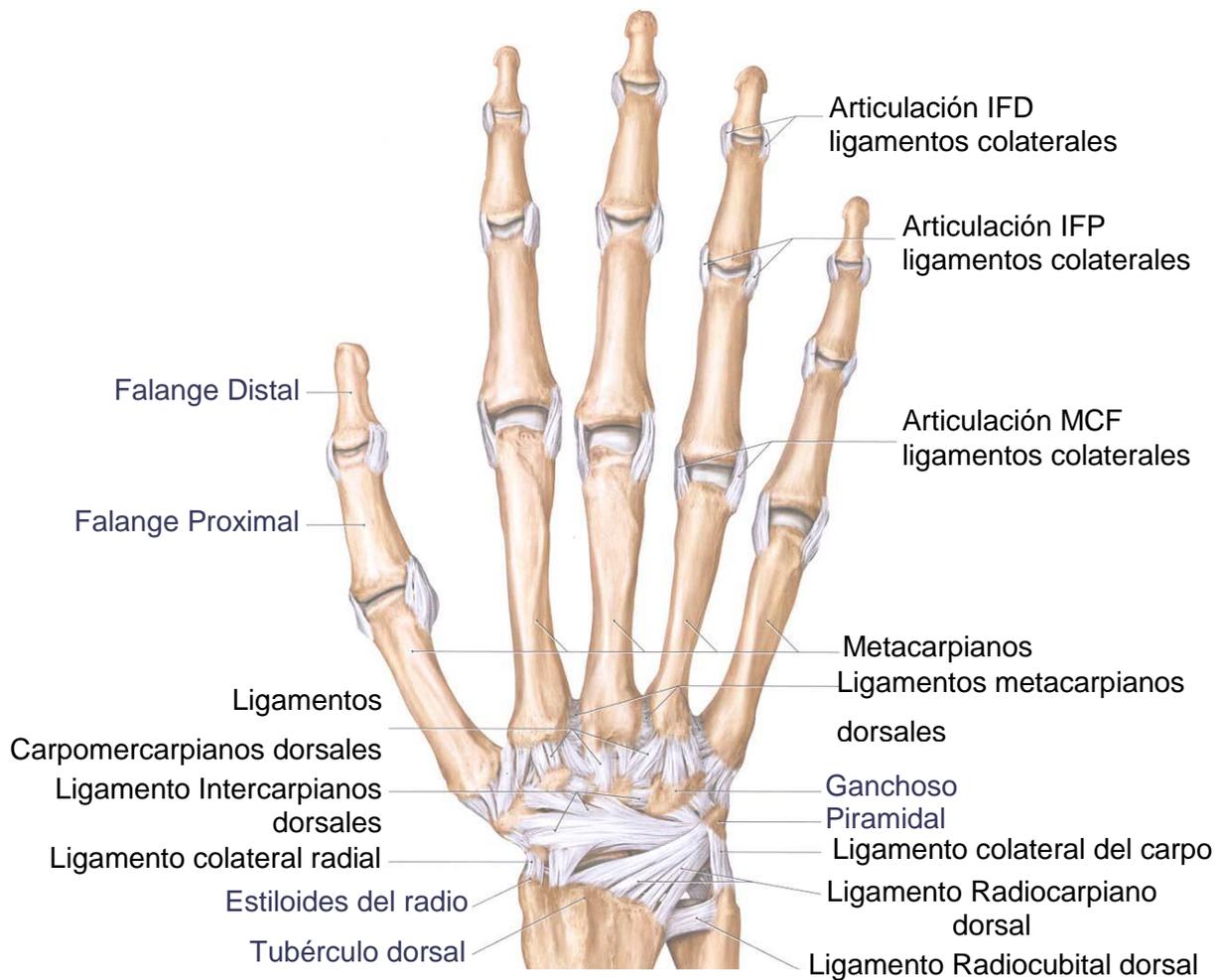


Figura 3.25 Ligamentos de la mano (vista dorsal) (26)

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 (29). 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 3.26). 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 3.26 Ligamentos de la mano (vista palmar) (26)

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 (26), 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 (29). El sistema del tendón flexor en los dedos es el más desarrollado de todos. En la figura mostrada a continuación (figura 3.27), se puede observar el sistema ligamentario de los dedos, donde A1, A2, A3, A4, A5 es un ligamento anular y C1, C2 y C3 es un ligamento cruciforme o también llamado oblicuo.

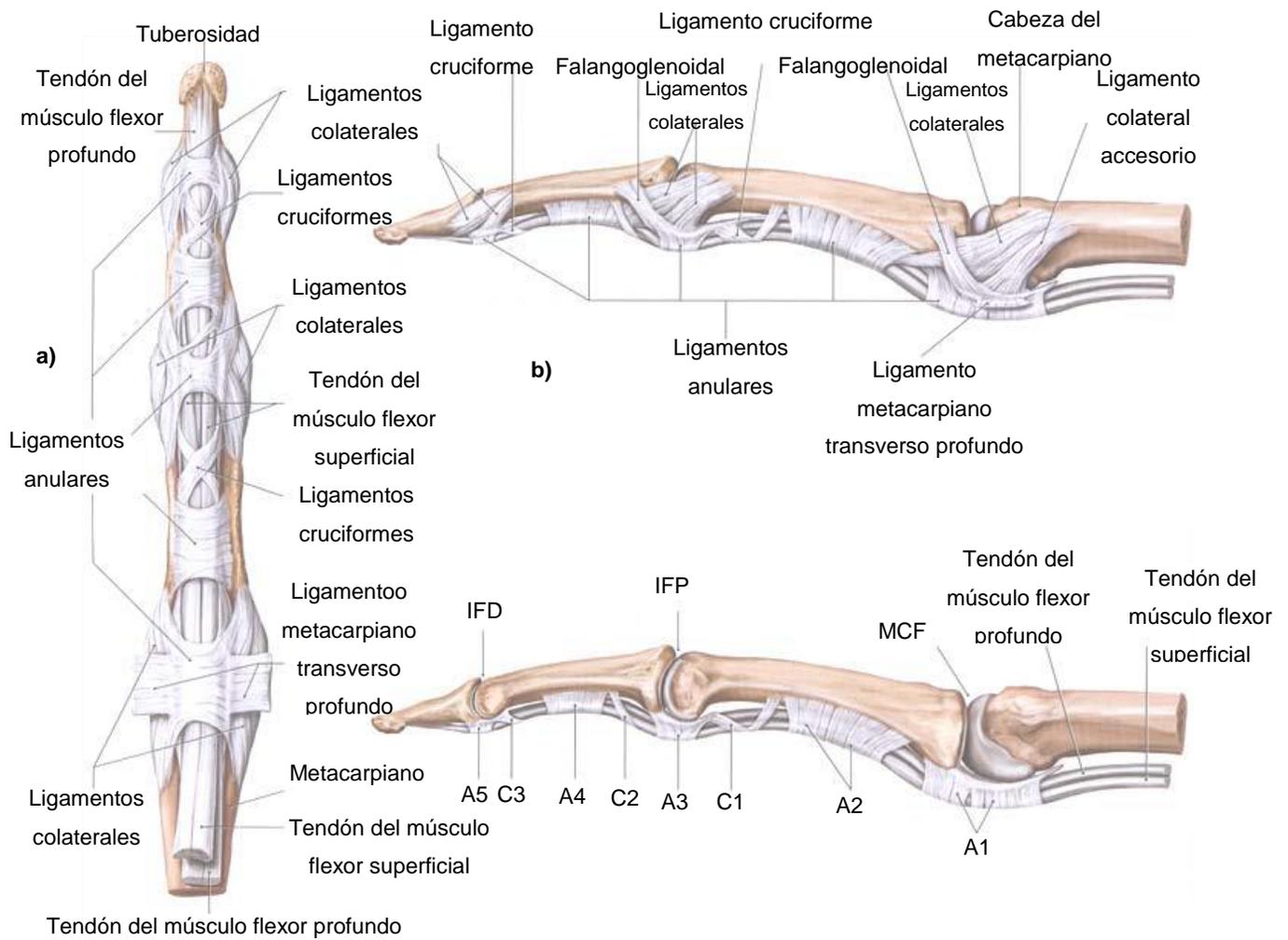


Figura 3.27 Complejo capsuloligamentario y vaina tendinosa digital del dedo medio derecho a) Visión palmar; b) Visión lateral (26)

3.4.12 Musculatura del brazo

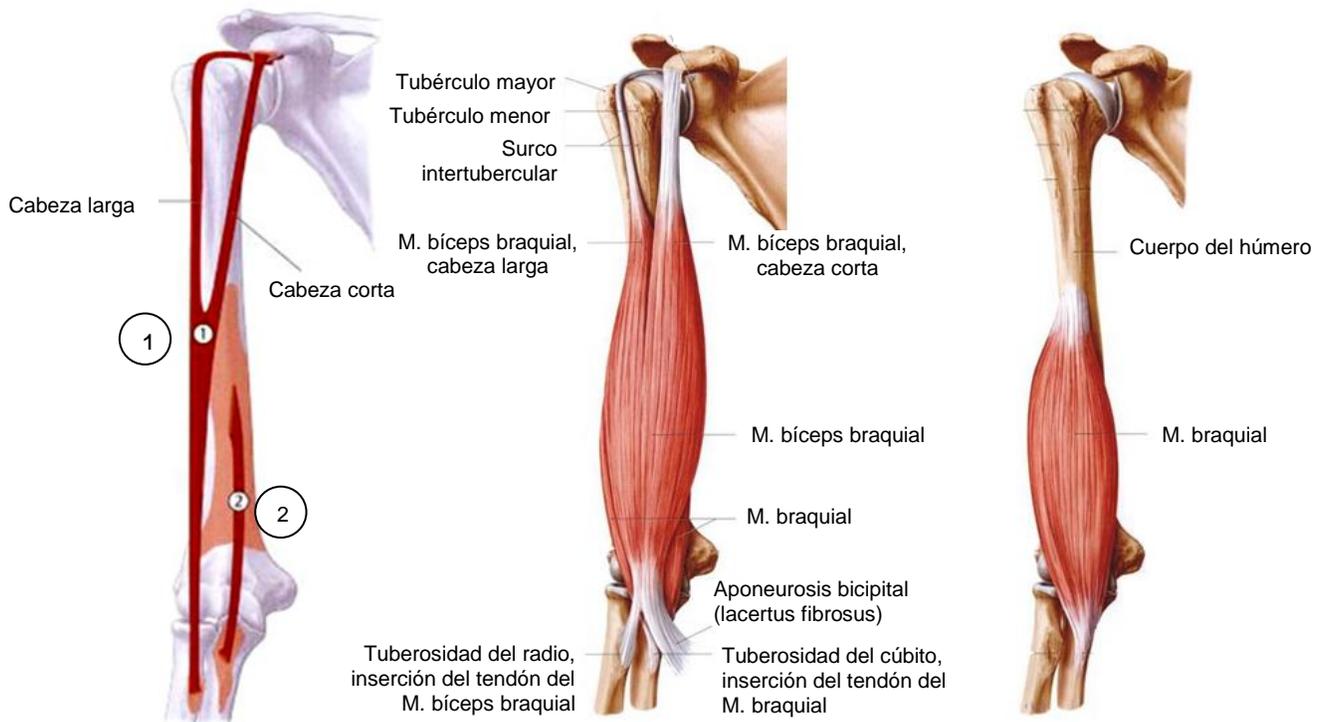


Figura 3.28 Músculos bíceps braquial y braquial, brazo derecho, visión ventral (26)

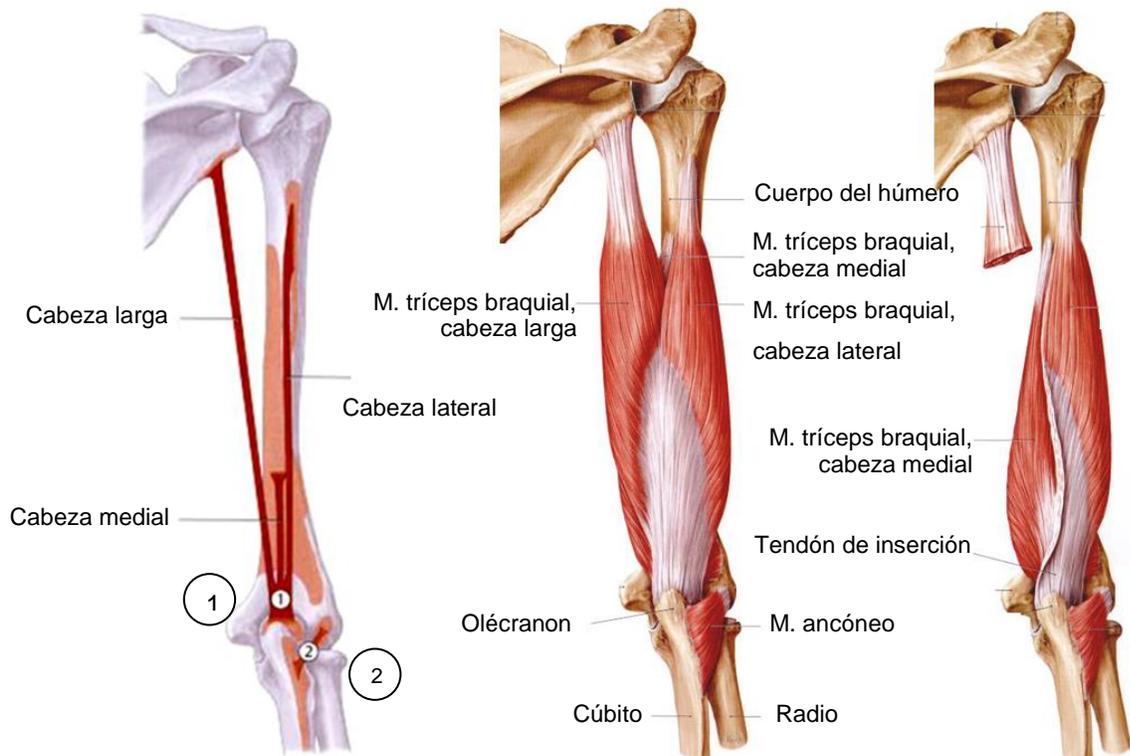


Figura 3.29 Músculos tríceps braquial y ancóneo. Brazo derecho, visión dorsal (26)

Musculatura del antebrazo: Flexores superficiales y profundos

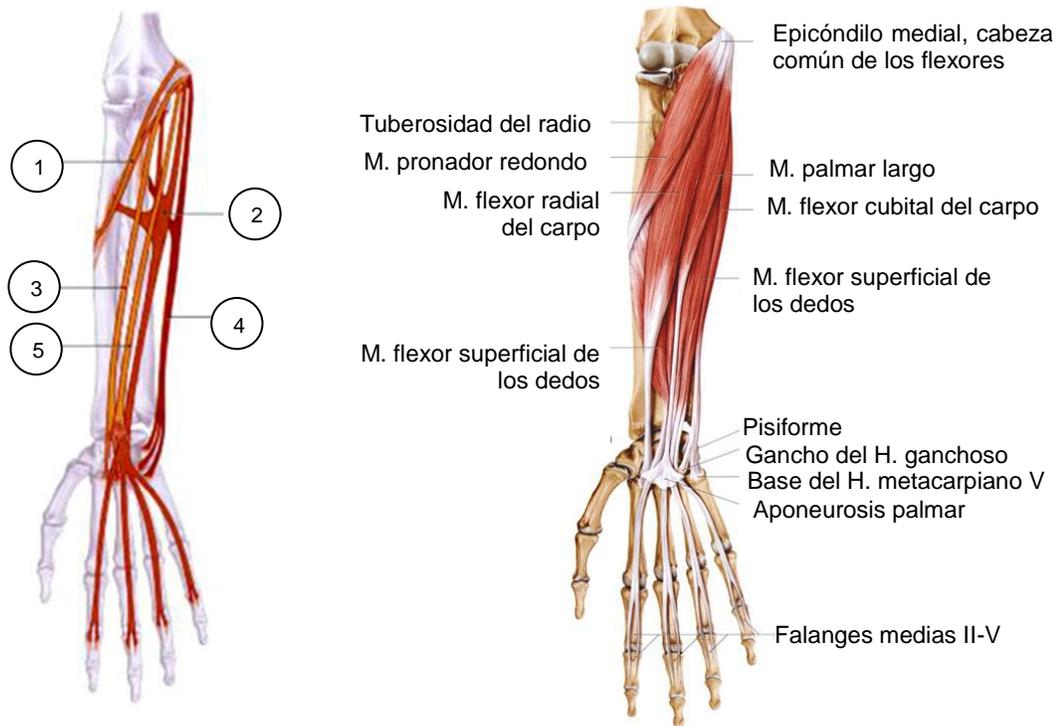


Figura 3.30 Flexores superficiales (M.m. pronador redondo, flexor superficial de los dedos, flexor radial del carpo, flexor cubital del carpo y palmar largo) antebrazo derecho, visión ventral (26).

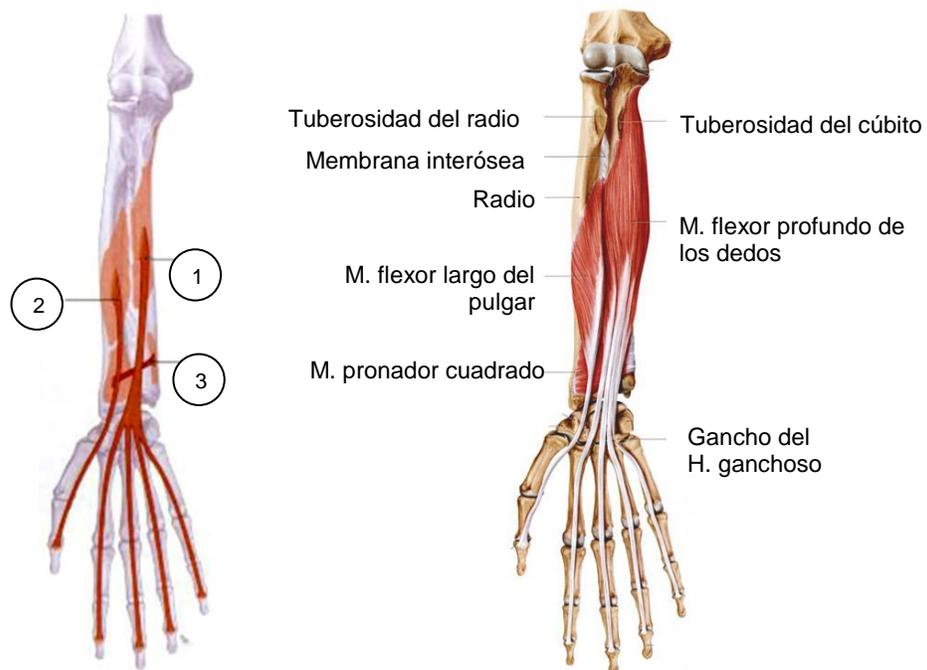


Figura 3.31 Flexores profundos (Mm. flexor profundo de los dedos, flexor largo del pulgar y pronador cuadrado) antebrazo derecho, visión ventral (26).

Musculatura del antebrazo: Musculatura radial

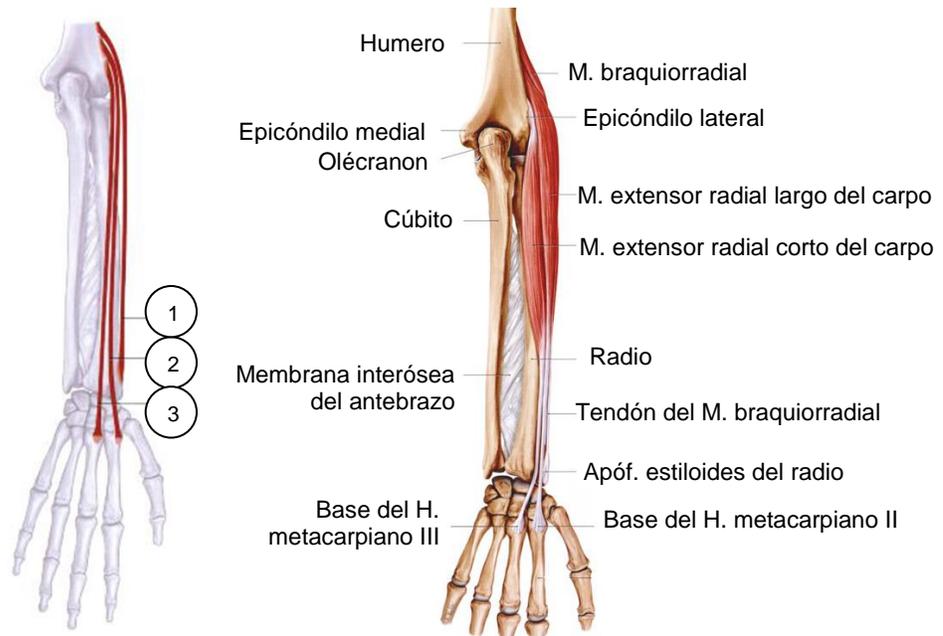


Figura 3.32 Musculatura radial (Mm. braquiorradial, extensor radial largo del carpo y extensor radial corto del carpo) antebrazo derecho, visión dorsal (26)

Musculatura del antebrazo: Extensores superficiales y profundos

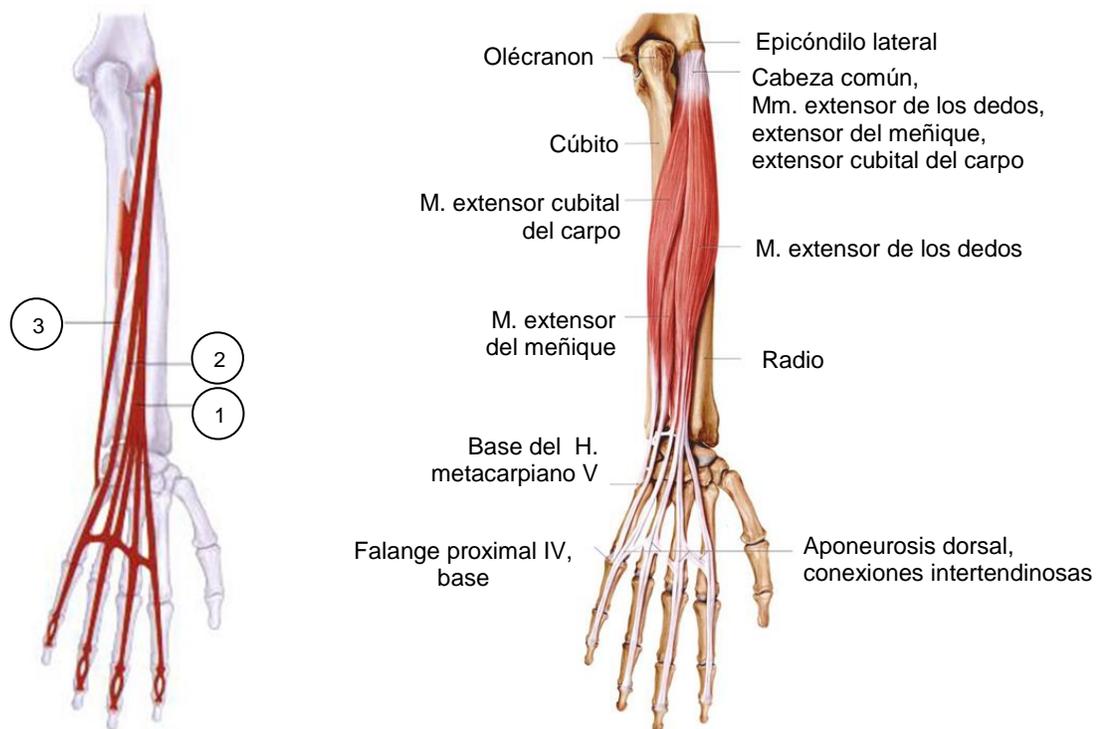


Figura 3.33 Extensores superficiales (Mm. extensor de los dedos, extensor del meñique y extensor cubital del carpo) antebrazo derecho, visión dorsal (26).

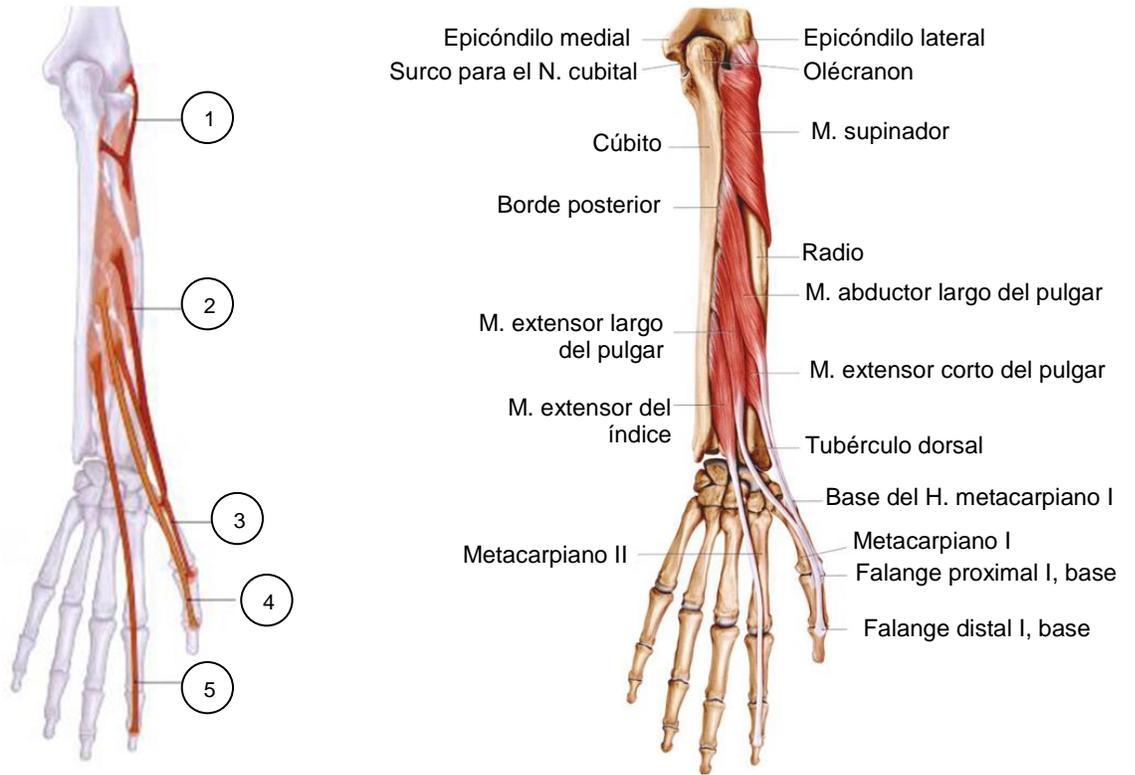


Figura 3.34 Extensores profundos (Mm. supinador. abductor largo del pulgar, extensor corto del pulgar, extensor largo del pulgar y extensor del índice), antebrazo derecho, visión dorsal (26).

Músculos cortos de la mano: Musculatura tenar e hipotenar

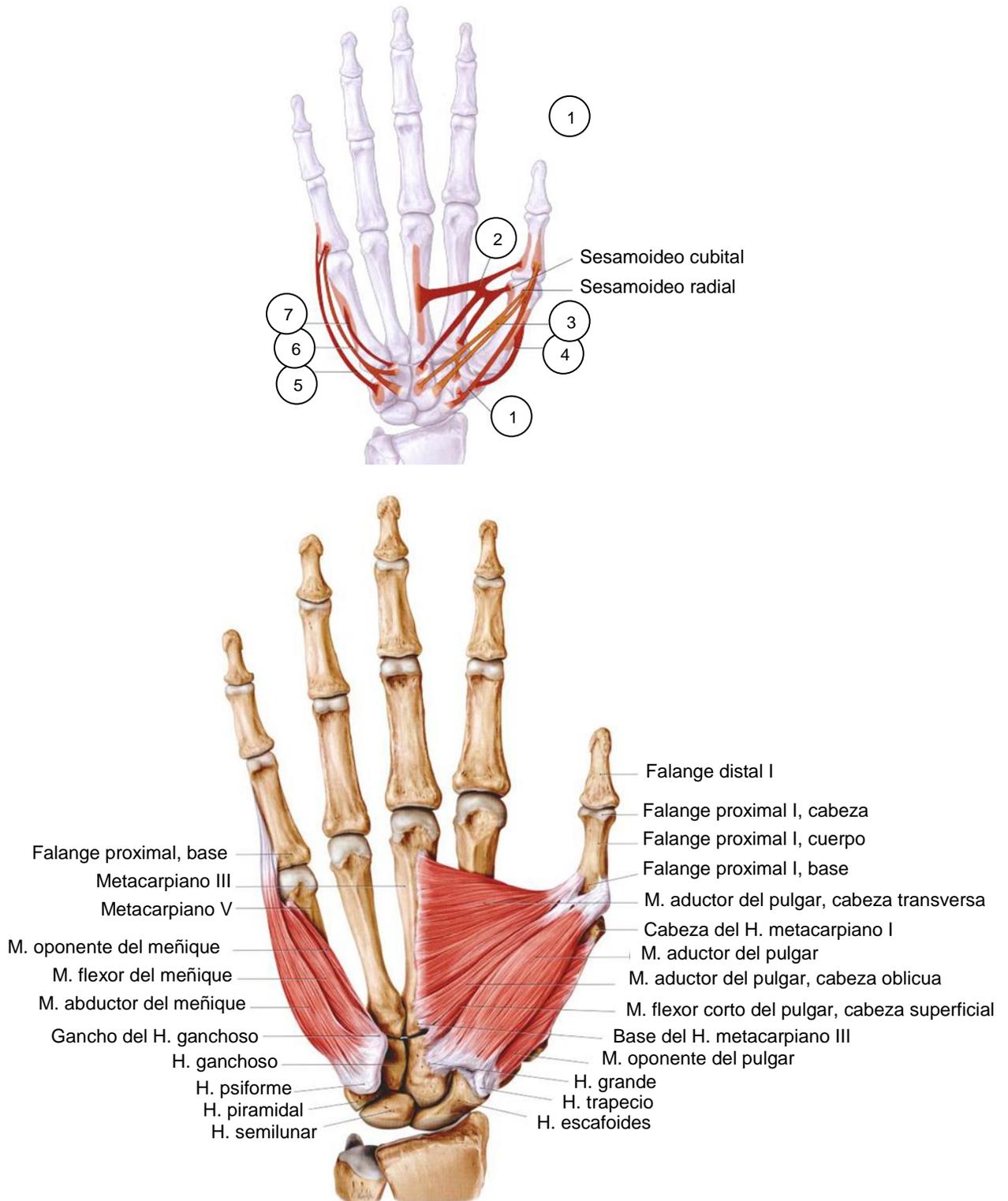


Figura 3.35 Musculatura de la eminencia tenar (Mm. abductor corto del pulgar, aductor del pulgar, flexor corto del pulgar y oponente del pulgar) y de la eminencia

hipotenar (Mm. abductor del meñique, flexor del meñique y oponente del meñique)

Mano derecha, palmar (26)

Musculos cortos de la mano: Musculatura del metacarpo

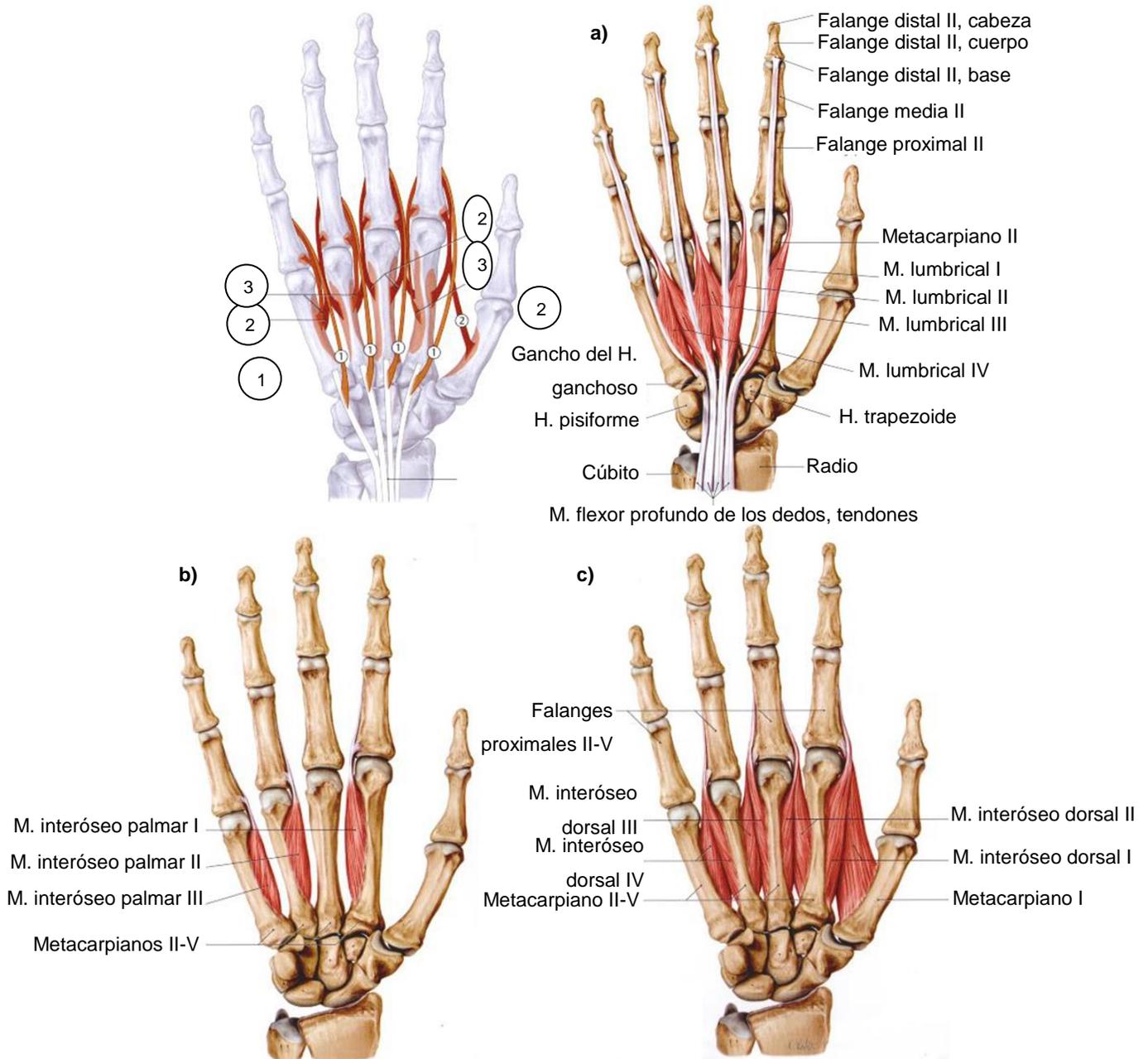


Figura 3.36 Musculatura del metacarpo, mano derecha, visión palmar. a) Mm. lubricales I-IV; b) Mm. interóseos palmares I-III; c) Mm. interóseos dorsales I-IV (26).

3.4.13 Movimientos del brazo

El codo es la unión del brazo con el resto del miembro superior, teniendo como finalidad última conseguir una adecuada situación espacial de la mano. Por ejemplo, llevar la mano hacia la parte alta del cuerpo: hacia la boca para comer, hacia la cabeza para peinarse, etc. Los movimientos que esta configuración permiten son dos:

- Flexo-extensión, participando la articulación humerocubital y humeroradial.

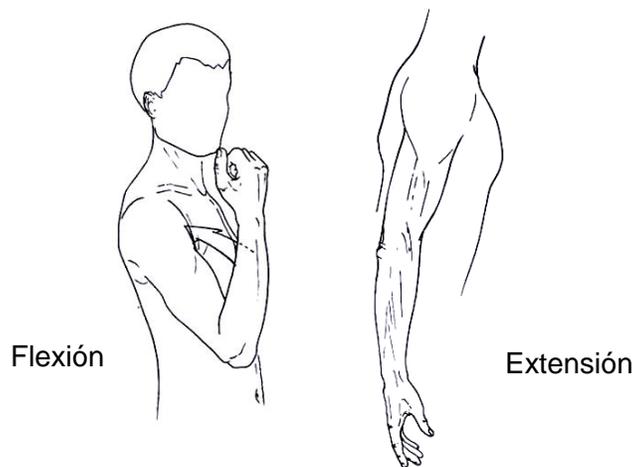


Figura 3.37 Movimiento del codo flexo-extensión

- Prono-supinación, realizada en la articulación radiocubital superior en combinación con la articulación radiocubital inferior.

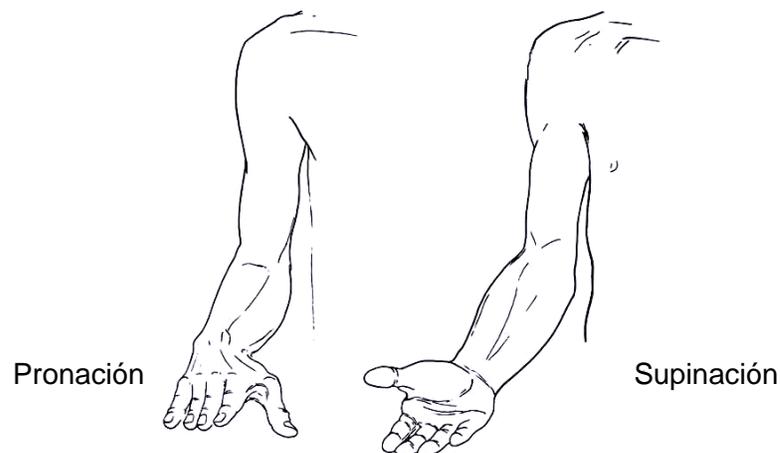


Figura 3.38 Movimiento del codo pronosupinación

Las manos son un órgano con movimiento de elevada complejidad y son valoradas de acuerdo al grado de intervención de realizar tareas prensiles. Además, posee la capacidad de adaptabilidad a un sin número de geometrías.

3.4.13.1 Movimientos de las articulaciones en la muñeca

El movimiento de extensión (flexión dorsal) en condiciones normales del carpo presenta un ángulo de entre 40° y 60° aproximadamente con respecto a un eje neutro de 0° (Figura 3.39), mientras que el ángulo del arco de flexión palmar se encuentra aproximadamente entre 60° y 80° . 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 (31), donde la desviación cubital tiene un arco aproximado de 30° a 40° y la desviación radial es de 20° .

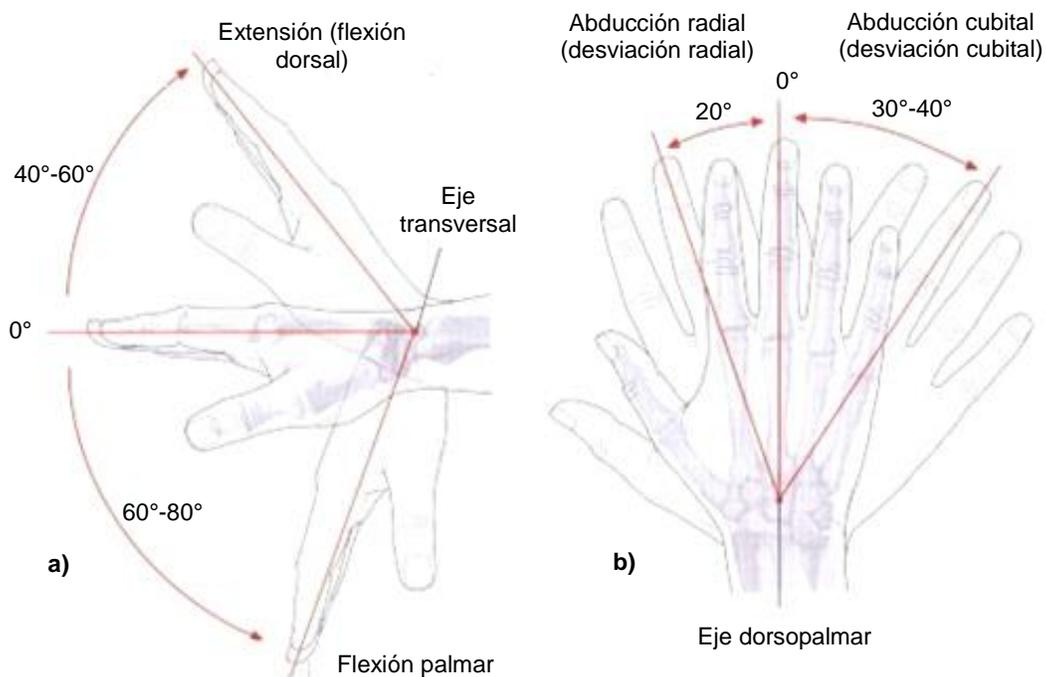


Figura 3.39 Movimientos de la muñeca: a) flexión y extensión, b) cubital y radial (26)

3.4.13.2 Movimiento de los dedos

El movimiento desarrollado por los dedos se mide en el grado máximo de flexión hasta el grado máximo de extensión (31). La flexión de los dedos a la altura de las articulaciones MCF puede formar un ángulo aproximado de 90° desde el origen(Figura 3.40). Por otra parte, la extensión de los dedos es hasta 45° aproximadamente en dirección opuesta.

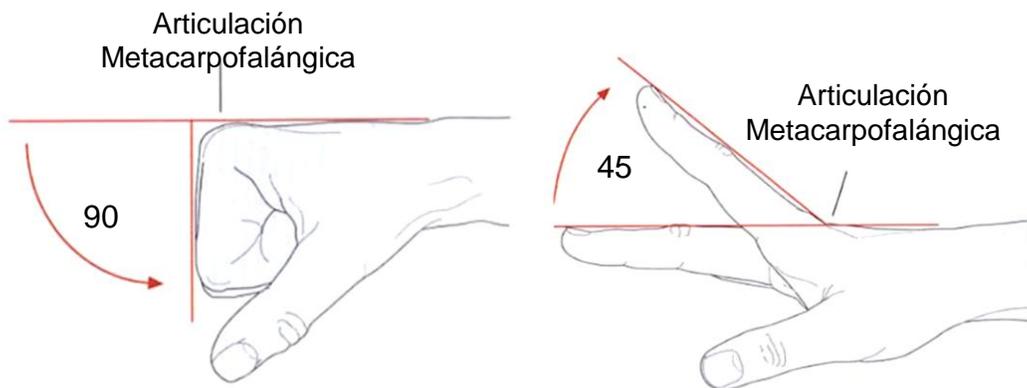


Figura 3.40 Movimientos de la articulación MCF (26)

Las articulaciones IFP no pueden desarrollar movimientos de extensión. Sin embargo, la flexión de los dedos se puede dar hasta por 100° aproximadamente (Figura 3.41).

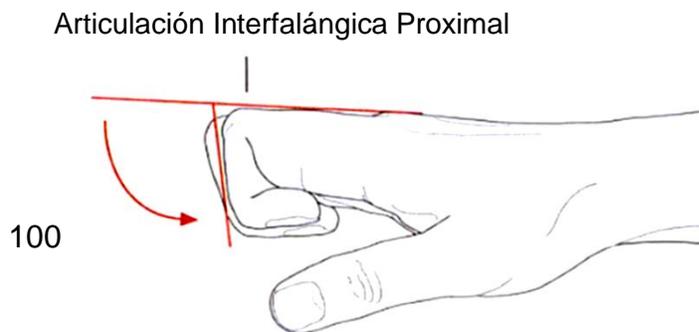


Figura 3.41 Flexión de las articulaciones IFP (26)

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

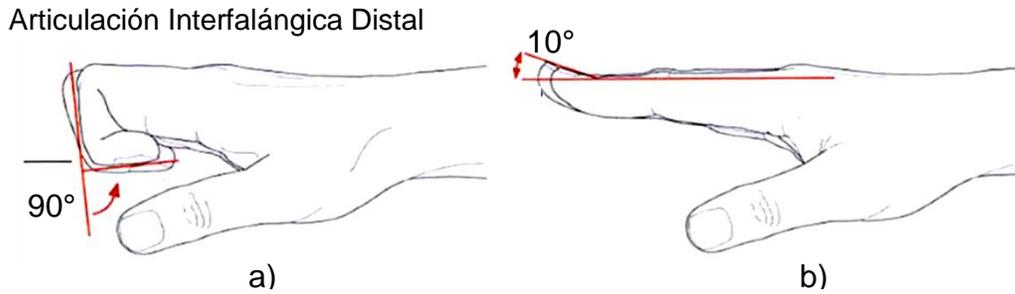


Figura 3.42 a) Flexión y b) Extensión de las articulaciones IFP (26).

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 (26), donde la denominación de dichas trayectorias se hace a partir del dedo medio; todos los movimientos que se apartan del dedo medio se designan como abducción, y los que se acerca a él como aducción y es de aproximadamente 20° (Figura 3.43).

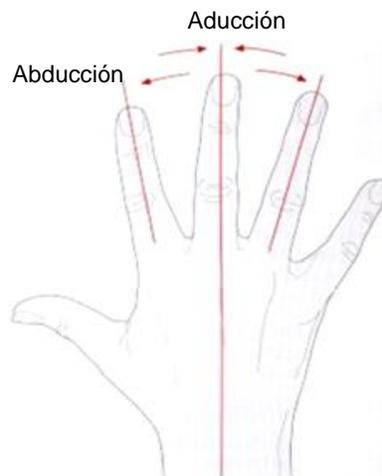


Figura 3.43 Aducción y Abducción de las articulaciones MCF (26)

3.4.13.3 Movimiento del pulgar

La superficie articular del Trapecio con forma de silla de montar[26], permite la ejecución de movimientos en 2 ejes principales: un eje de abducción-aducción y un eje de flexión-torsión(Figura 3.44).

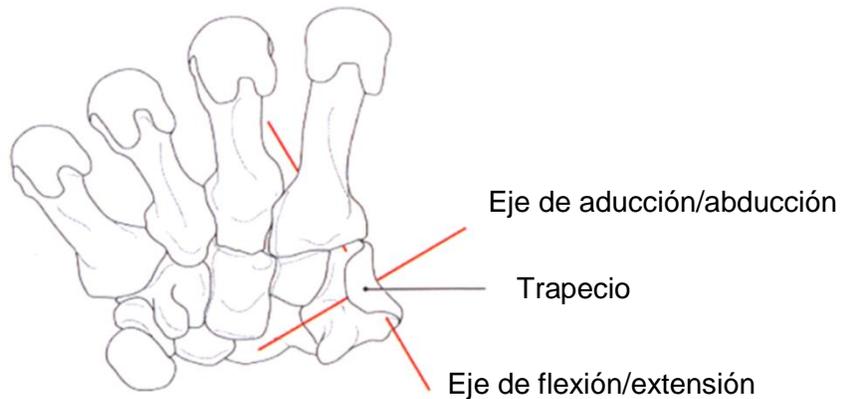


Figura 3.44 Ejes de movimiento (mano derecha, vista palmar) (26)

La flexión y extensión de la articulación MCF transcurren de forma transversal y desarrolla un ángulo de movimiento aproximado de 50° con respecto al dedo índice (Figura 3.45 a). Sin embargo, cuando el pulgar se encuentra en máxima abducción (32°), forma con el dedo índice un ángulo aproximado de 70° 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° mientras que la extensión es de 20° (Figura 3.45 b).

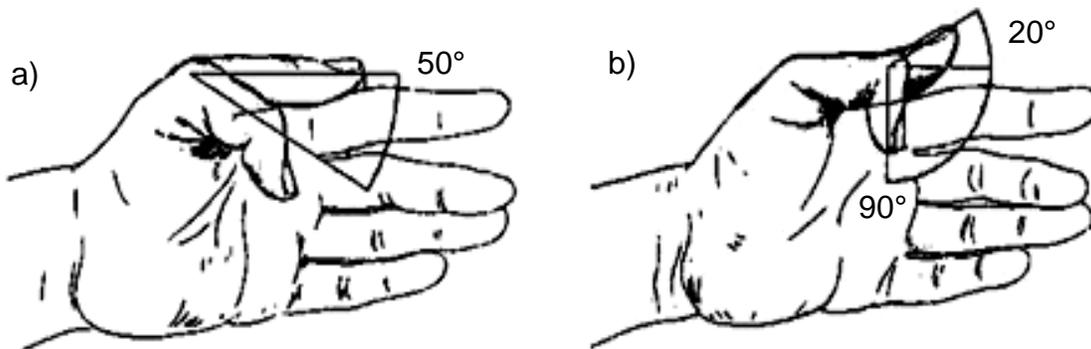


Figura 3.45 Flexión y extensión del pulgar en a) MCF y b) IF (32)

El rango de movimiento de las distintas articulaciones del codo y la mano desarrolla valores aproximados en flexión y extensión; de ésta forma se pueden resumir dichos movimientos en la Tabla 3.2

Tabla 3.2 Rango de movimiento en articulaciones

Articulaciones	Rango de movimiento
Articulación del codo (humeroradial y humerocubital) y (radio cubital superior e inferior)	<ul style="list-style-type: none"> • Flexión 0-150° • Extensión 0° • Prono-supinación 0°-180°
Muñeca	<ul style="list-style-type: none"> • Flexión 0°-80° • Extensión 0°-60° • Radial 0°-20° • Cubital 0°-40°
Articulación MCF de los dedos	<ul style="list-style-type: none"> • Hiperextensión 0°-45° • Flexión 0°-90°
Articulación IFP de los dedos	<ul style="list-style-type: none"> • Extensión 0° • Flexión 0°-100°
Articulación IFD de los dedos	<ul style="list-style-type: none"> • Extensión 0°-10° • Flexión 0°-90°
Pulgar Metacarpofalángica	<ul style="list-style-type: none"> • Hiperextensión 0°-10° • Flexión 0°-50°
Pulgar Interfalángica	<ul style="list-style-type: none"> • Hiperextensión 0°-20° • Flexión 0°-90°
Pulgar Carpometacarpiana	<ul style="list-style-type: none"> • Aducción Palmar 0° • Abducción Palmar 0°-45° • Aducción Radial 0° • Abducción Radial 0°-60°

3.4.13.4 Ejes de los dedos en cierre palmar

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 escafoides. 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 3.46), obteniéndose simetría en la vista palmar.

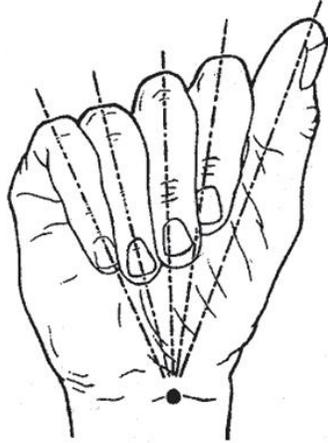


Figura 3.46 Cierre palmar

3.4.14 Arcos de la mano

Los huesos y articulaciones ubicados en la mano, forman entre sí 3 arcos conocidos como el arco transversal proximal, el arco transversal distal y el arco longitudinal. Estos arcos le dan forma cóncava a la palma de la mano(figura 3.47a). 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 (32). El arco transversal proximal está ubicado a nivel carpiano mientras que el arco distal se ubica a nivel de cuello de los metacarpianos(figura 3.47b) y el tercero se ubica a lo largo del sentido longitudinal desde el centro de la palma.

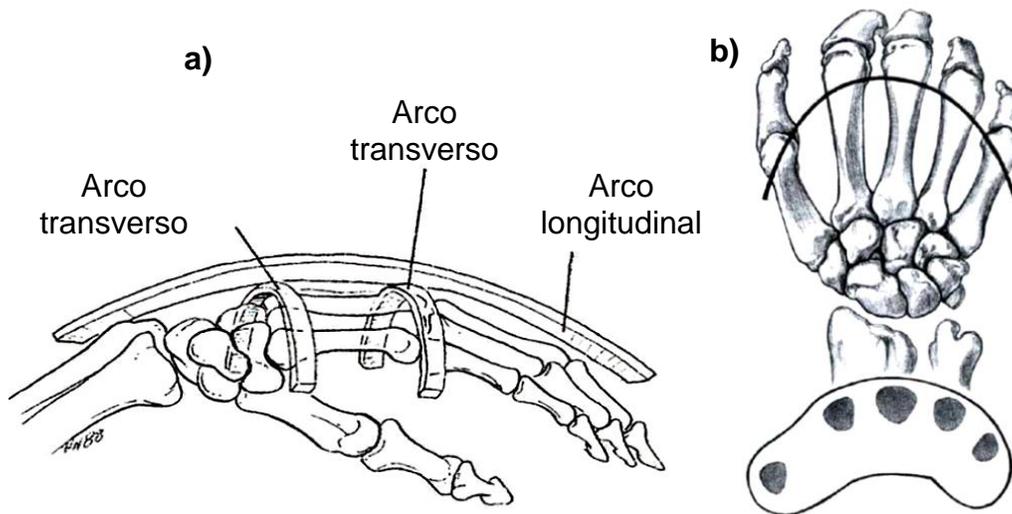


Figura 3.47 a) Arcos de la mano (29) y b) Arco distal proximal (33)

3.4.15 Sujeción de objetos

La mano como dispositivo terminal es un elemento increíble funcional que permite realizar actividades en extremo delicadas y con alta precisión. Sin mencionar que tienen 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 (28). Estas formas de sujeción son obtenidas mediante el cambio de 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 (29). También son utilizados en una gran 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 (34): 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 3.48).

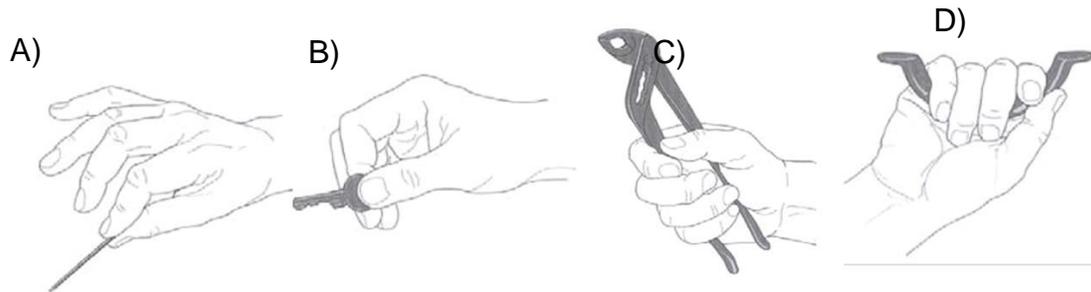


Figura 3.48 Sujeción : A) Puntual, B)Lateral, C)Palmar y D) Gancho (26)

La sujeción palmar se usa para sostener objetos con geometrías variables de mayor longitud (28). 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 3.49), mientras que el Esférico se emplea para sujetar objetos con circunferencia definida.

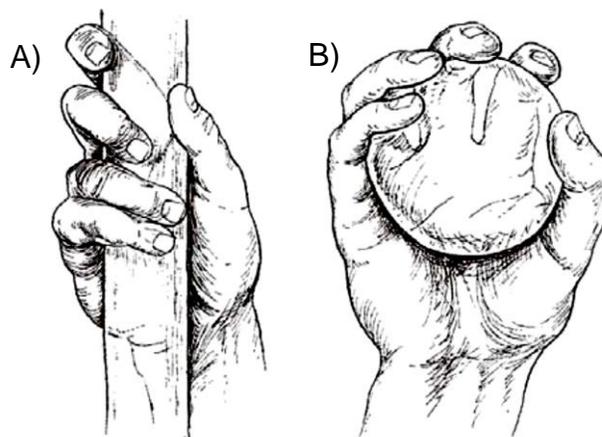
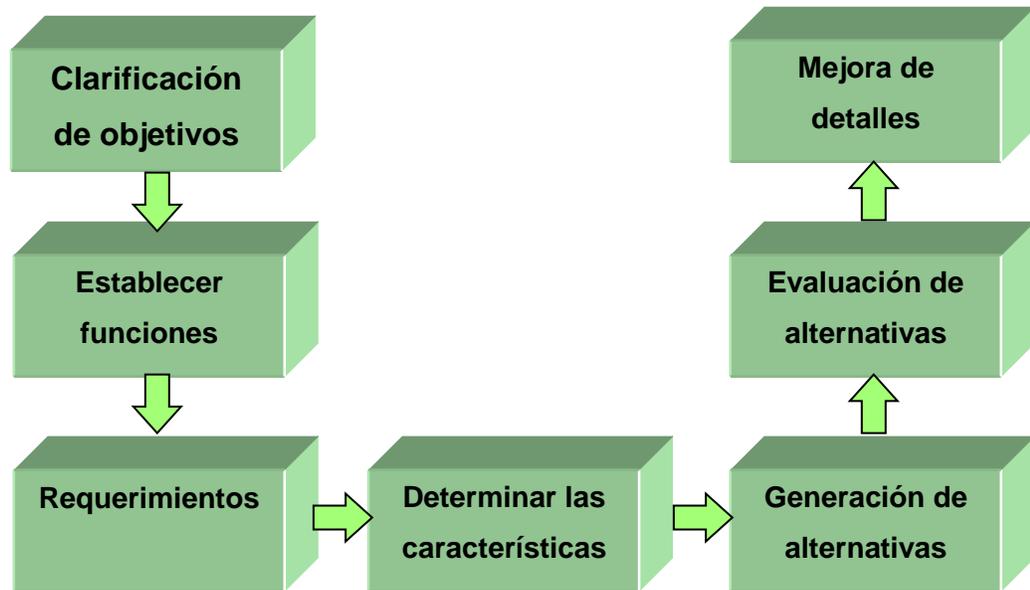


Figura 3.49 Sujeción: A) Cilíndrica y B) Esférica (29)

4 METODOLOGÍA DE DISEÑO

4



En esta sección se plantea una metodología para el desarrollo del antebrazo y el efector final (mano robótica), siguiendo la metodología utilizada por Mauricio Aarón Pérez Romero.

4.1 Metodología de diseño

La metodología de diseño es un instrumento de la actividad científica, que se basa directamente en el estudio del método. 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. Un método riguroso conduce a resultados precisos, mientras que un método vago sólo lleva a resultados confusos.

4.2 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 (35), 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 (35). Estas etapas se correlacionan una con otra además de estar directamente en armonía con el modelo del problema y solución(Figura 4.1).

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, en el siguiente paso 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 (35).

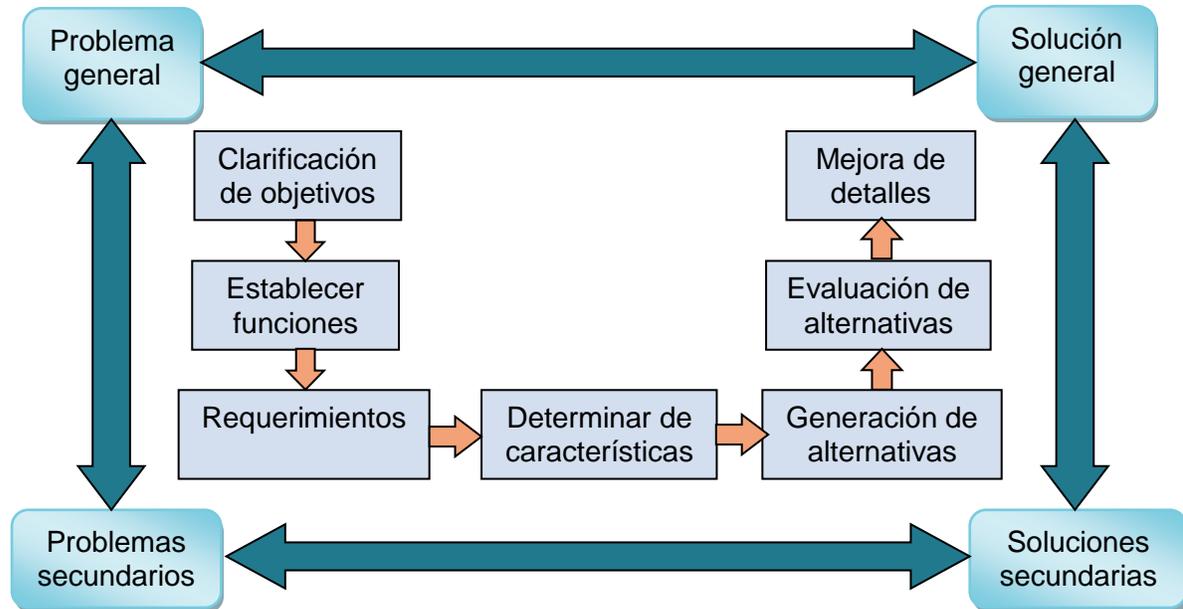


Figura 4.1 Método de diseño (35)

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

4.2.1 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 (35). 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 4.2).

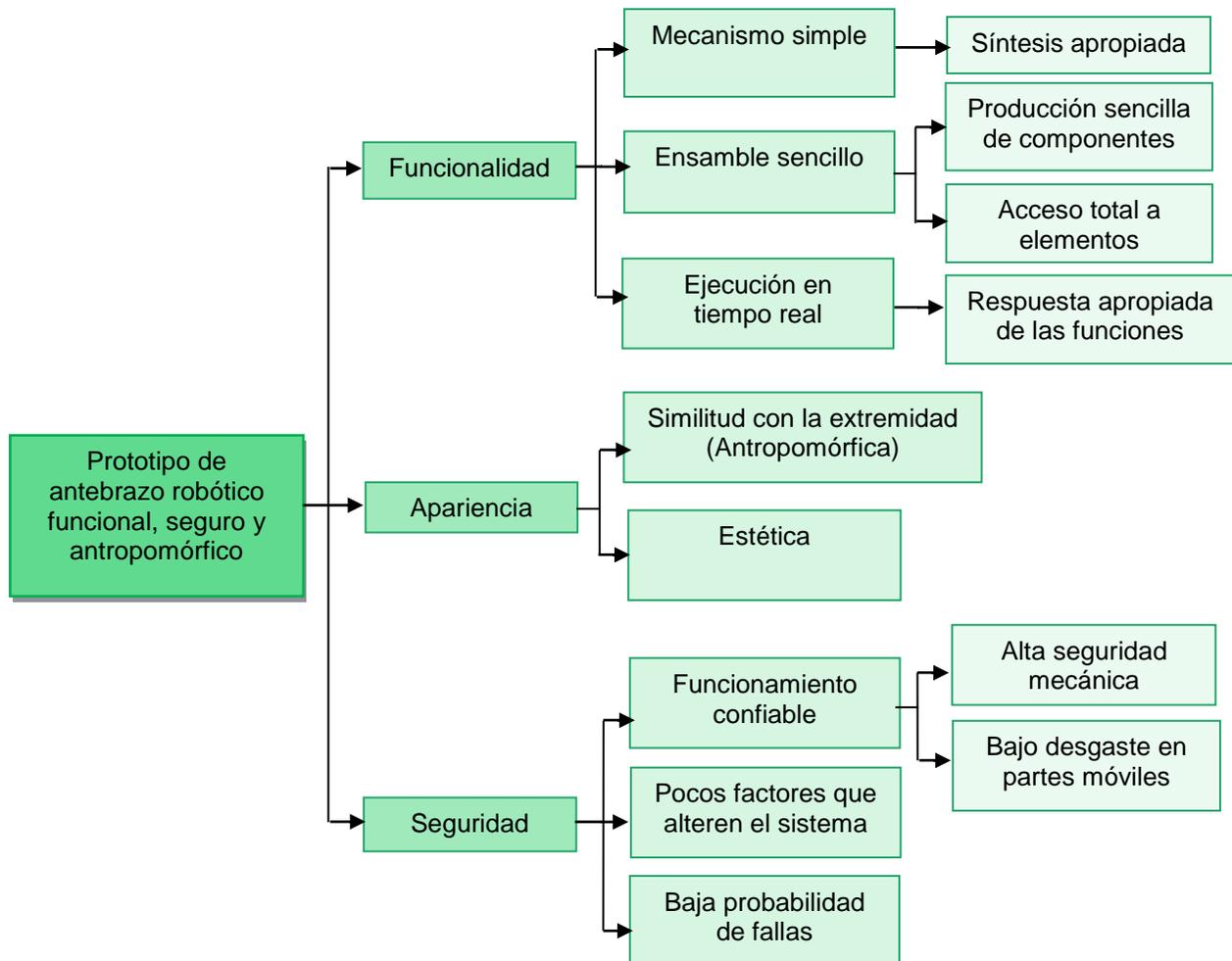


Figura 4.2 Árbol de objetivos del antebrazo robótico

El diagrama anterior (figura 4.2), es el preámbulo para tener una idea más 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 más 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.

4.2.2 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 4.3). Esta analogía plantea que la caja negra contiene la función requerida para transformar entradas en la salida deseada.

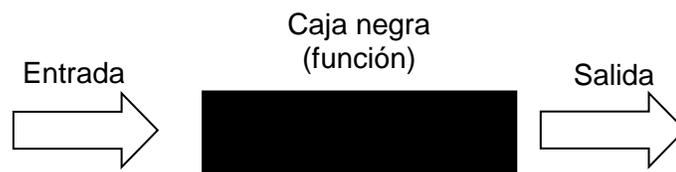


Figura 4.3 Caja negra para establecer funciones

Para el diseño del antebrazo robótico, 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 de bloques mostrando las interacciones entre las funciones secundarias (figura 4.4). Además, el diagrama de bloques también debe contener los límites funcionales que definen el diseño.

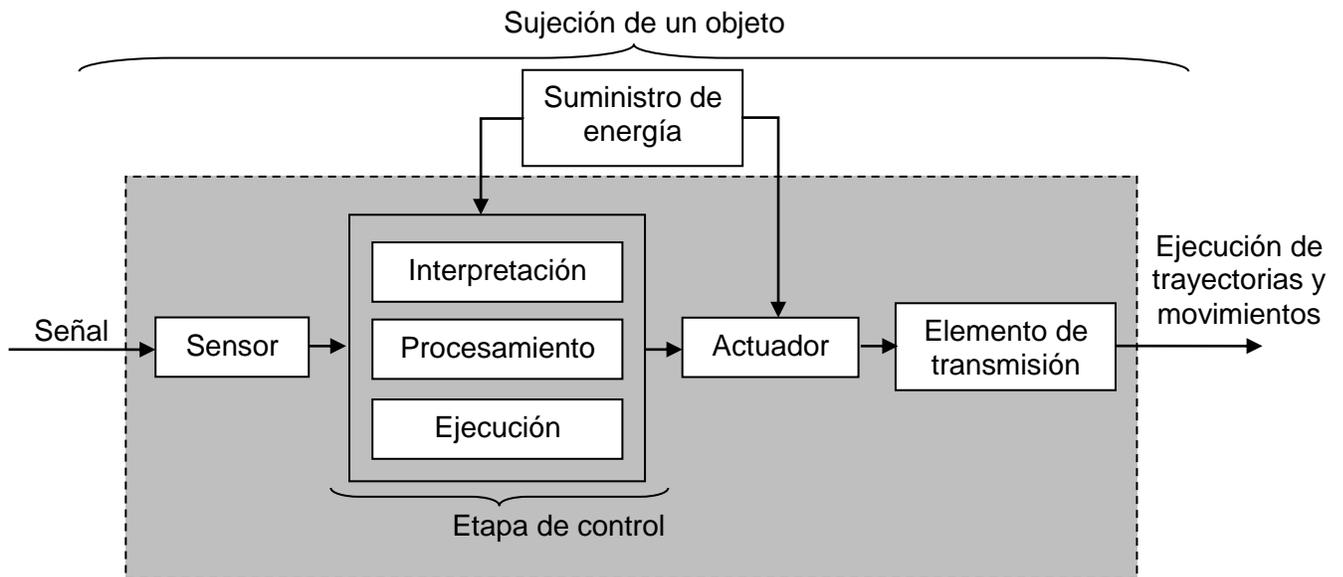


Figura 4.4 Diagrama de función principal

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.

4.2.3 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 toma 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 conlleva 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 y brazos robóticos. Donde como resultado se elaboró una tabla con las especificaciones y características adecuadas para el funcionamiento óptimo del antebrazo robótico (Tabla 4.1). Por otra parte, se clasificaron como requeridas o deseadas.

Tabla 4.1 Especificaciones del equipo

Especificaciones		Requerida	Deseada
Características generales	5 Dedos		X
	Antebrazo	X	
	17 articulaciones		X
	Sujeción puntual, palmar, lateral, gancho, cilíndrico y esférico		X
	Rango de movimientos en articulaciones (Tabla #)	X	
Dimensiones	Medidas de la mano (Tabla #)	X	
	Medidas del antebrazo (Implementar una metodología de diseño).	X	
Peso	Peso neto máximo del modelo 1.2 kg		X
	Capacidad de carga 300 gr		X
Características del mecanismo	Cumplir con la trayectoria deseada	X	
	3 articulaciones por dedo, 2 GDL por dedo		X

	Tendones		X
Actuador	Torque adecuado y capacidad de carga	X	
	Compatible con las dimensiones de la mano	X	
	Disponibilidad comercial	X	
Sensor	Resolución aceptable	X	
	Disponibilidad comercial	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

4.2.4 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 4.1.

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 4.2).

Tabla 4.2 Ponderación de requerimientos deseables

Requerimientos deseados		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	Σ	%
D1	Dimensiones del diseño	---	+	+	+	-	-	-	-	3	10.71
D2	Capacidad de carga	-	---	-	-	-	-	-	-	0	0
D3	Disponibilidad de dispositivos	-	+	---	+	-	-	-	-	2	7.14
D4	Mantenimiento mínimo y sencillo	-	+	-	---	-	-	-	-	1	3.57
D5	Acceso total a elementos	+	+	+	+	---	-	+	+	6	21.42
D6	Metodología de diseño de antebrazo	+	+	+	+	+	---	+	+	7	25
D7	Seguridad	+	+	+	+	-	-	---	+	5	17.85
D8	Estética	+	+	+	+	-	-	-	---	4	14.28
Total										28	100

Esta evaluación se realizó 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 a dichos porcentajes (TABLA 4.3).

Tabla 4.3 Despliegue de los requerimientos

Importancia	Requerimientos		Σ	%
1	D6	Metodología de diseño de antebrazo	7	25
2	D5	Acceso total a elementos	6	21.42
3	D7	Seguridad	5	17.85
4	D8	Estética	4	14.28
5	D1	Dimensiones del diseño	3	10.71
6	D3	Disponibilidad de dispositivos	2	7.14
7	D4	Mantenimiento mínimo y sencillo	1	3.57
8	D2	Capacidad de carga	0	0

4.2.5 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 4.5).

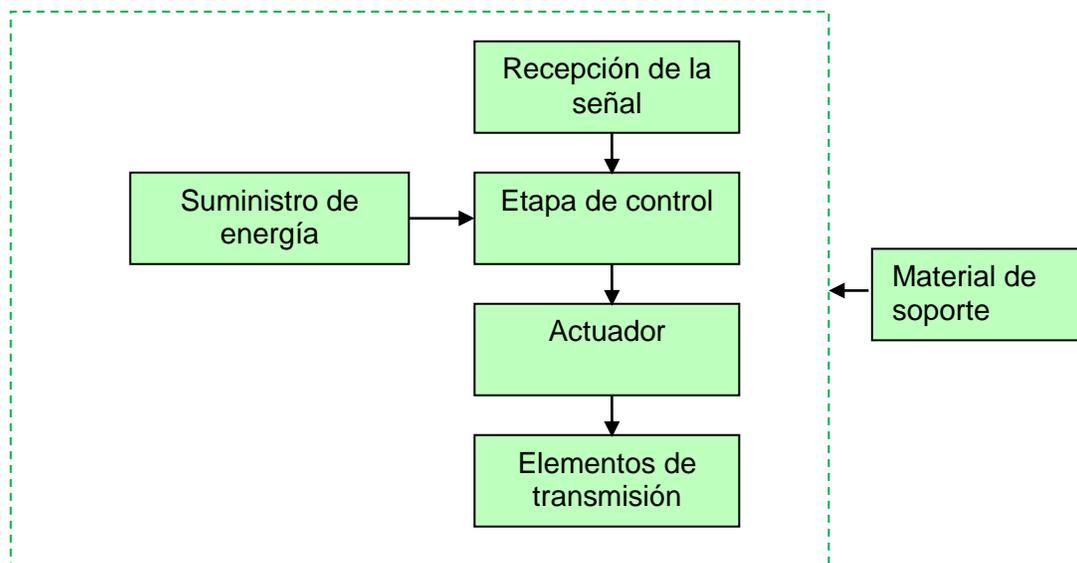


Figura 4.5 Funciones secundarias

Posteriormente se elaboró un diagrama que contiene las soluciones secundarias más importantes posibles (Figura 4.6). Este diagrama representa el espacio total conformado por las combinaciones posibles por las soluciones secundarias del sistema.

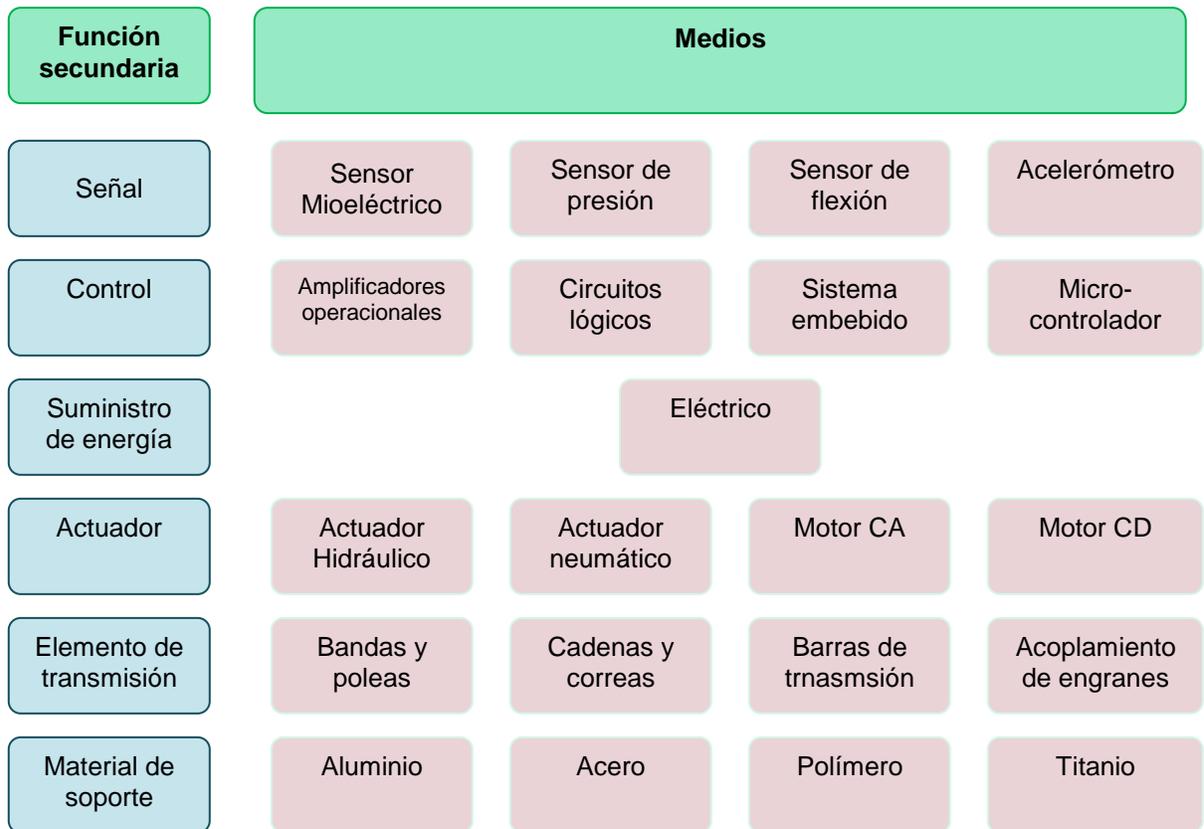


Figura 4.6 Diagrama morfológico de posibles soluciones

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 nos ayuden a descartar opciones que no van de acuerdo a nuestro proyecto. Estos filtros son utilizados en la evaluación de alternativas.

4.2.6 Evaluación de alternativas

La evaluación de alternativas tiene como fin, 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.

4.2.6.1 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, entre otros (Figura 4.7). Estos componentes son elementos esenciales para cumplir con la función principal del sistema.

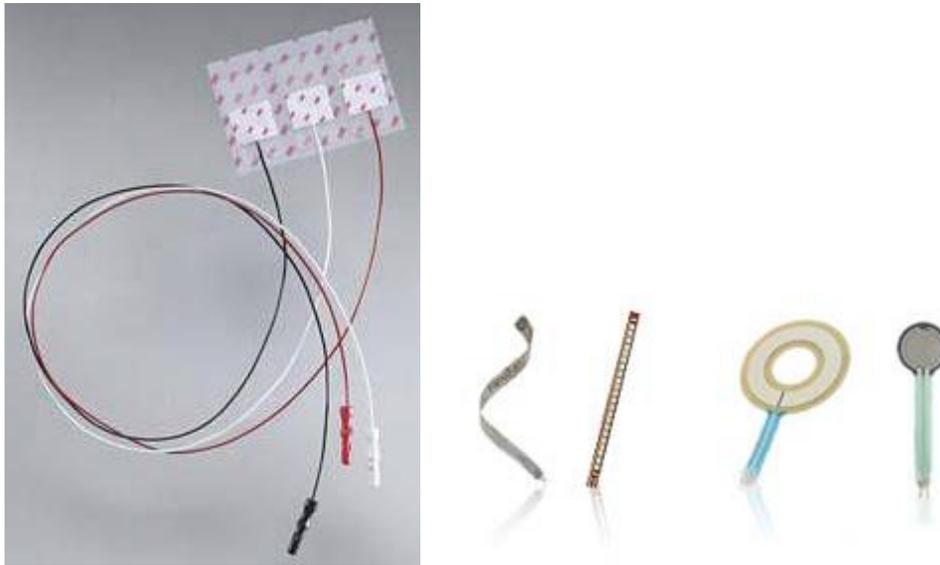


Figura 4.7 Sensores adaptables al sistema: a) Mioeléctrico, b) Flexión y c) Presión

Debido a que la amputación de la extremidad superior es el resultado de una malformación y/o lesión con pérdida de tejido, músculo y hueso, es importante resaltar la enorme complejidad que posee la estructura músculo-esquelética del brazo, 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 simultánea. 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.

4.2.6.2 Dispositivo de control

El dispositivo de control 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.

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.) (36). 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 sobrepasaría 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 plástico o cerámica (37). 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 mas extensa. Por otra parte, se requeriría un circuito integrado en cada motor 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 del antebrazo robótico.

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 (38). 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 de 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 (39). 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 del antebrazo robótico.

4.2.6.3 Elementos de transmisión

Los elementos de transmisión son parte fundamental para transmitir potencia entre dos o más elementos (40). De igual forma, pueden transformar un movimiento en otro con diferentes características.

4.2.6.4 Actuadores

Actualmente no existe una definición exacta de actuador, si aceptamos que la palabra actuador deriva del idioma inglés actuador nos encontramos con una gran cantidad de definiciones dependiendo del ámbito en la que se la quiera definir. Las siguientes definiciones son las que más se acercan al tema de este trabajo (7):

IEEE Terms and Definitions – *A mechanical device that accepts a data signal and performs an action based on that signal.*

RobotWorx (www.robot.com) - *A piece of equipment that allows a robot to move by conversion of different energy types such as electrical or mechanical processes using liquid or air.*

Bettcomputers – *A device which performs the physical movement of a robot.*

Wikipedia – *An actuator is a mechanical device for moving or controlling a mechanism or system. It takes energy, usually transported by air, electric current, or liquid, and converts that into some kind of motion.*

Como se puede observar la palabra actuador no está asociado a un solo elemento sino a un conjunto de elementos que a través de un determinado evento es capaz de transformar un tipo de energía en un movimiento, acción o fuerza.

Basándonos en esta definición de actuador, podemos decir que el mismo está compuesto por diferentes elementos que se pueden ver representados en el diagrama de la Figura 4.8.

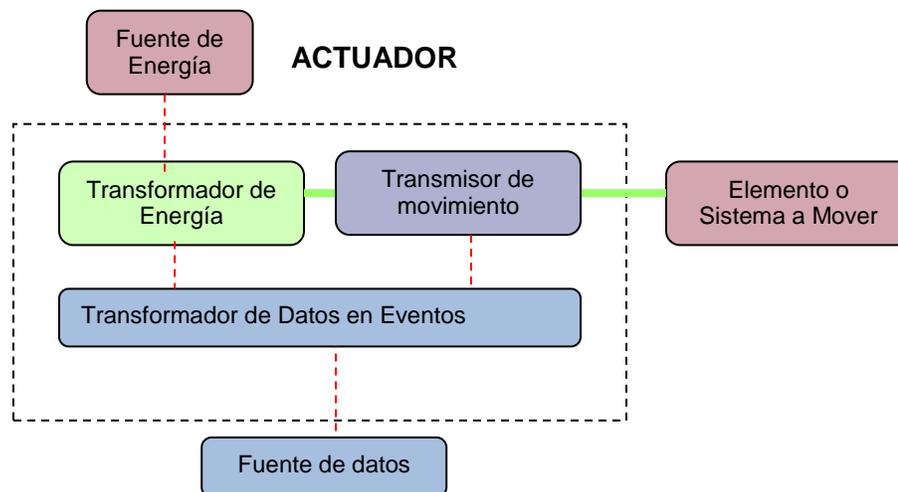


Figura 4.8 Componentes de un actuador

Uno de los elementos más importantes de un actuador es el transformador de energía ya que es un elemento indispensable del mismo y es el encargado de transformar un determinado tipo de energía (eléctrica, neumática e hidráulica) en algún tipo de movimiento (lineal o rotacional). Dependiendo del tipo de movimiento que el transformador de energía entrega es necesario que el actuador incorpore un sistema de transmisión de movimiento. Éste se encarga tanto de cambiar el tipo de movimiento como de trasladar simplemente ese movimiento de un sitio a otro. Para finalizar, el sistema de transformación de datos en eventos, es el elemento que adquiere información exterior y la transforma de forma tal que se ven reflejadas las acciones que el actuador llevará a cabo. Es importante aclarar que los datos que recibe el sistema de transformación de datos en eventos obtiene datos ya elaborados por un sistema central de control o una unidad central de procesos (CPU).

Clasificación de actuadores

A los transformadores de energía se les puede diferenciar según el tipo de fuente de energía que utilizan y el tipo de movimiento que otorgan al actuador. La que se considera en esta sección, y la que es más habitual de encontrar, es priorizando el tipo de fuente de energía y luego en un segundo plano el tipo de movimiento que otorga al actuador.

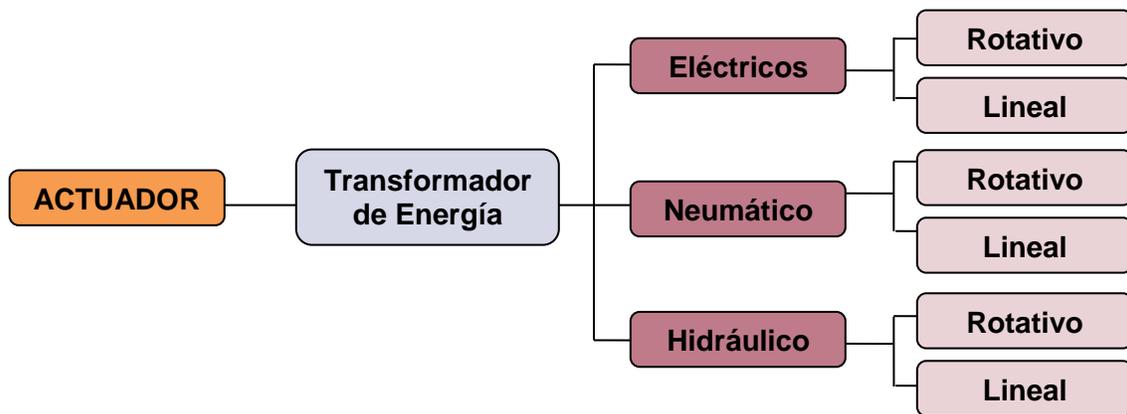


Figura 4.9 Clasificación de actuadores según la energía que utilizan sus transformadores de energía.

4.2.6.5 Suministro de energía

La elección de una fuente de energía está más delimitada con la selección de algunos componentes, es decir, las características que debe cumplir este elemento están en función directa del sistema embebido, de los actuadores, de los sensores, y características dimensionales del antebrazo así también como del peso que se evita exceder. Se busca integrar una fuente de alimentación portátil, con el requisito de ser una batería recargable.

4.2.6.6 Material de soporte

Con la aparición de las impresiones 3D los plásticos se incorporan cada vez más a la industria a de los materiales, que tienen como principales cualidades ser muy ligeros (en comparación con un metal) y resistentes a la oxidación. Existen múltiples alternativas de solución a los requerimientos que exige de la industria tal es el caso de Nylamid, termoplástico que ha sustituido diseños y componentes fabricados con otros materiales como acero, bronce, aluminio, madera y cerámica, en un sin número 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 como se muestra en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Comparación de los termoplásticos Nylamid

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



Figura 4.10 Tipos de Nylimid

4.3 Diseño conceptual

Una vez seleccionado cada componente que brinde la solución adecuada a cada una de las funciones secundarias, se procede a puntualizar en lo que sería una opción general del sistema (Figura 4.11). De esta forma, ya se tiene definido cada uno de los parámetros y por consiguiente, el prototipo toma cierta forma.

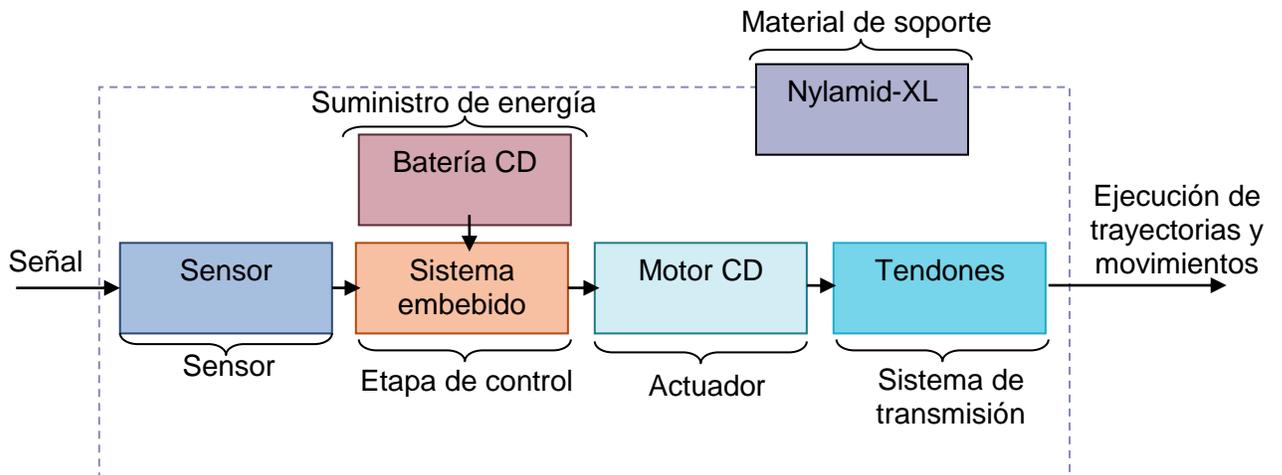


Figura 4.11 Esquema general de la mano robótica

Por otra parte, es importante representar de forma ambigua y simple, un esquema general que muestre los componentes principales que integran el sistema (Figura #), siendo este el primer paso para obtener un diseño conceptual. Asimismo, se debe mencionar que es posible retroalimentar al diseño conceptual conforme avanza el proyecto.

5 MODELADO TRIDIMENSIONAL

5

En este capítulo se establece la metodología para obtener el modelo del antebrazo y mano, partiendo de la obtención de mediciones con el Calibrador “Vernier” para el diseño en SolidWorks del efector final. Se plantea una metodología de modelado tridimensional del antebrazo por medio de fotografías obteniendo curvas guías y perfiles. De igual forma se describe ensamble de los mismos.

5.1 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 (41). La simulación computacional permite realizar los 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 (42).

Se describen los pasos para la obtención de medidas de la mano con el instrumento de medición vernier seguido de la obtención de fotografías a una pieza de silicón para obtener sus curvas guía y perfiles, se exportan las magnitudes y las imágenes al programa de computo Solidwors (CAD) para diseñar el antebrazo con efector final.

5.2 Obtención de las mediciones

Se describen los pasos para obtener las magnitudes de la mano (43).

1. La mano del sujeto se extiende en vista palmar y con el vernier se mide la distancia desde la línea de base del pliegue de la muñeca hasta la punta del dedo más largo.
2. El pulgar se mantiene lejos de los dedos y se hace medición de la anchura de la mano entre las articulaciones metacarpofalangianas II y V.
3. Se pasa una cinta de medición sobre las articulaciones metacarpiano-falangianas II y V y se hace medición de la circunferencia de la mano.



Figura 5.1 Posiciones de la mano para los pasos 1, 2 y 3

4. La mano del sujeto se extiende, la cinta se coloca en posición perpendicular al eje largo del antebrazo y se hace medición de la circunferencia de la muñeca al nivel de su pliegue.
5. Mida con el vernier la anchura de la muñeca a nivel del pliegue.
6. Mida el espesor máximo de la articulación metacarpo-falángica del dígito III.
7. La mano del sujeto se extiende con el pulgar adyacente a la superficie del dígito II. Mida la profundidad máxima desde el lado lateral del pulgar hasta la superficie dorsal de la mano.

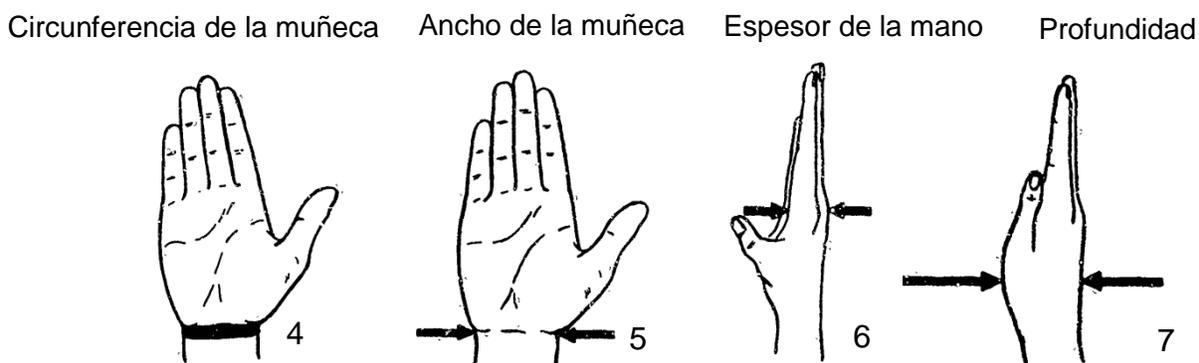


Figura 5.2 Posiciones de la mano para los pasos 4, 5, 6 y 7

8. Las mediciones de las articulaciones se obtienen de la siguiente manera:



Figura 5.3 Posiciones de la mano para las mediciones de las articulaciones interfalángicas del paso 8

- La mano del sujeto se extiende y se mide la amplitud máxima y la profundidad máxima de la articulación interfalángica del falange I.
- Usando la fórmula $c = 2\pi\sqrt{\frac{a^2+b^2}{2}}$ calcule la circunferencia de la articulación. La fórmula utilizada presenta una aproximación de la circunferencia articular donde a= amplitud de la articulación; b= profundidad de la junta.

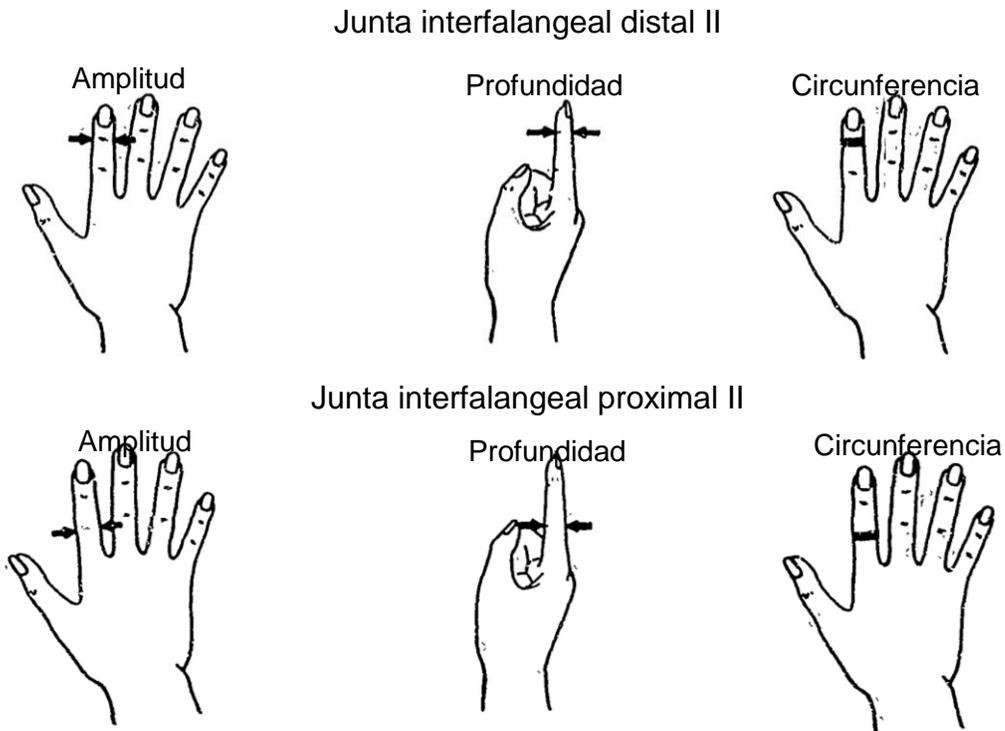


Figura 5.4 Posiciones de la mano para la obtención de medidas del falange II

9. Se mide la distancia desde la posición perpendicular de la línea de base del pliegue de la muñeca hasta el punto medio de la punta de la falange.
10. Se mide la distancia desde la posición perpendicular de la línea base del pliegue de la muñeca hasta el nivel de entrededo de la mano.

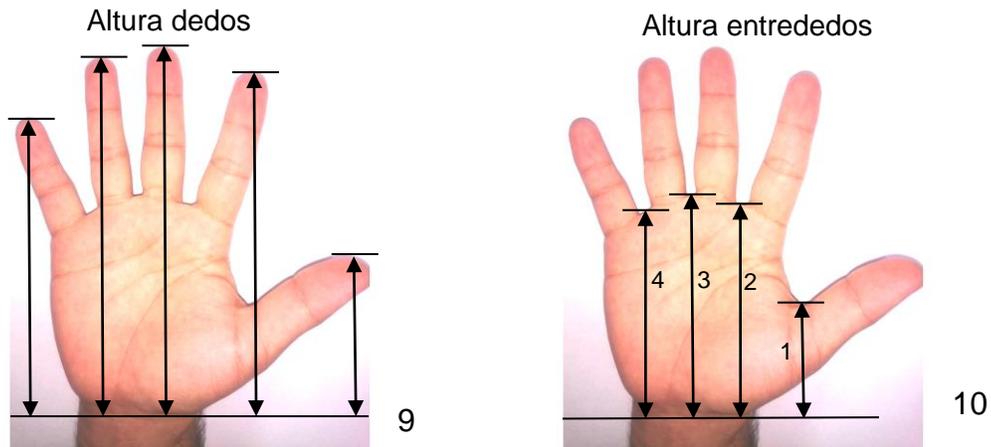


Figura 5.5 Posiciones de la mano los pasos 9 y 10

11. Se mide la distancia a lo largo del eje de la falange desde el punto medio de la punta del dedo hasta el nivel del entrededo.
12. Se mide la distancia a lo largo del eje de la falange desde el punto medio de la punta del dedo hasta la línea base del pliegue de la muñeca.

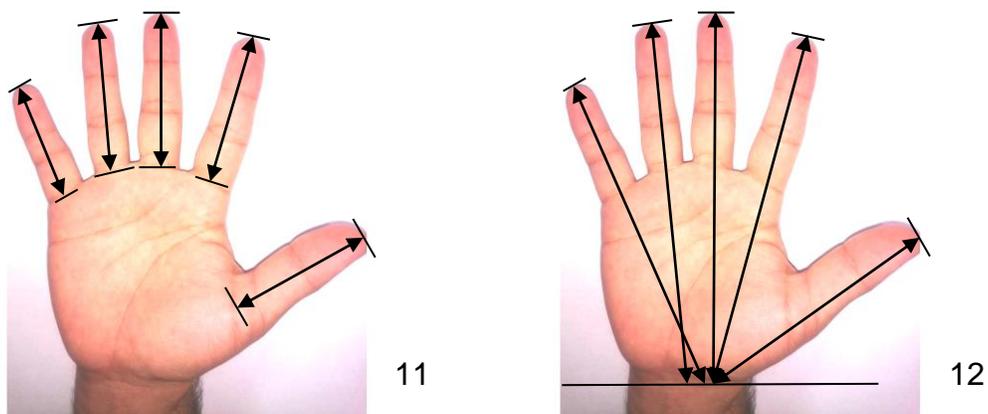


Figura 5.6 Posiciones de la mano para los pasos 11 y 12

13. Se miden las amplitudes de las falanges distal, medial y proximal, aproximadamente a la mitad de estas como se muestra en la figura.

14. Se miden con el vernier las profundidades de las falanges distal, medial y proximal, aproximadamente a la mitad de estas.

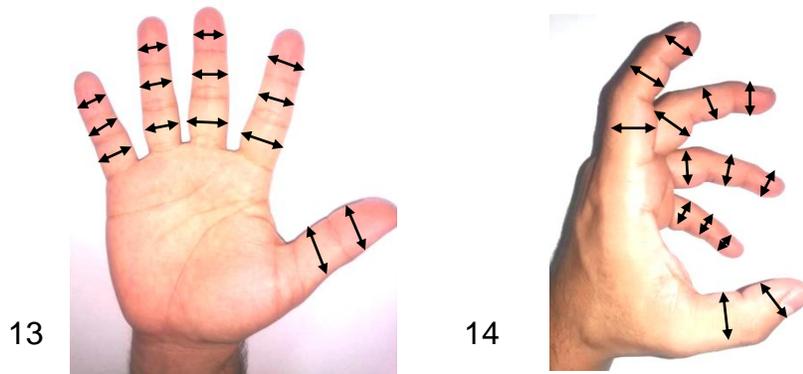


Figura 5.7 Posiciones de la mano para los pasos 13 y 14

Tabla 5.1 Medidas de la mano del paciente

Num.	Descripción	Medidas en mm	
1	Longitud de la mano	180	
2	Anchura de la mano	76	
3	Circunferencia de la mano	185	
4	Circunferencia de la muñeca	170	
5	Ancho de la muñeca	59	
6	Espesor de la mano	30	
7	Profundidad	49	
8	Mediciones de las articulaciones del falange I	IF Amplitud	21
		IF Profundidad	18
		IF Circunferencia	65
		MCF Amplitud	24
		MCF Profundidad	23
		MCF Circunferencia	8
	Mediciones de las articulaciones de la falange II	IFD Amplitud	17
		IFD Profundidad	13.5
		IFD Circunferencia	52.9
		IFP Amplitud	19
		IFP Profundidad	18
	Mediciones de la articulaciones de la falange III	IFD Amplitud	17
		IFD Profundidad	15
		IFD Circunferencia	55.26
		IFP Amplitud	19
IFP Profundidad		18	
	IFP Circunferencia	63.11	

	Mediciones de las articulaciones de la falange IV	IFD Amplitud	16	
		IFD Profundidad	13	
		IFD Circunferencia	50.55	
		IFP Amplitud	19	
		IFP Profundidad	17	
		IFP Circunferencia	61.54	
	Mediciones de las articulaciones de la falange V	IFD Amplitud	15	
		IFD Profundidad	12	
		IFD Circunferencia	47.41	
		IFP Amplitud	16	
		IFP Profundidad	16	
		IFP Circunferencia	55.26	
9	Altura de los dedos	Pulgar I	100	
		Índice II	170	
		Medio III	180	
		Anular IV	170	
		Meñique V	139	
10	Altura de los entrededos	1	57	
		2	98	
		3	97	
		4	92	
11	Distancia de la punta del dedo a entrededo.	Pulgar I	67	
		Índice II	75	
		Medio III	81	
		Anular IV	75	
		Meñique V	60	
12	Longitud de la punta del dedo a la base de la muñeca	Pulgar I	12.4	
		Índice II	17.7	
		Medio III	18.5	
		Anular IV	17.8	
		Meñique V	15.5	
13	Amplitudes medias de las falanges	Pulgar I	F. Distal	21
			F. Proximal	19
		Índice II	F. Distal	16
			F. Media	17
			F. Proximal	18
		Medio III	F. Distal	17
			F. Media	18
			F. Proximal	18
		Anular IV	F. Distal	16
			F. Media	16
			F. Proximal	19
		Meñique V	F. Distal	14
F. Media	15			
F. Proximal	16			

14	Profundidades medias de las falanges	Pulgar I	F. Distal	14
			F. Proximal	18
		Índice II	F. Distal	13
			F. Media	14
			F. Proximal	20
		Medio III	F. Distal	12
			F. Media	15
			F. Proximal	20
		Anular IV	F. Distal	13
			F. Media	14
			F. Proximal	19
		Meñique V	F. Distal	11.5
F. Media	13			
F. Proximal	17			

5.3 Metodología del modelado

El programa utilizado para generar un modelo tridimensional fue Solidworks 2016, 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 (44). 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 5.8a), posteriormente se debe seleccionar la representación gráfica que desea elaborarse, para este caso se selecciona la opción de pieza (Figura 5.8b). A continuación se elige el plano de trabajo (Figura 5.8c), con el propósito de tener comodidad visual al momento de modelar la pieza.

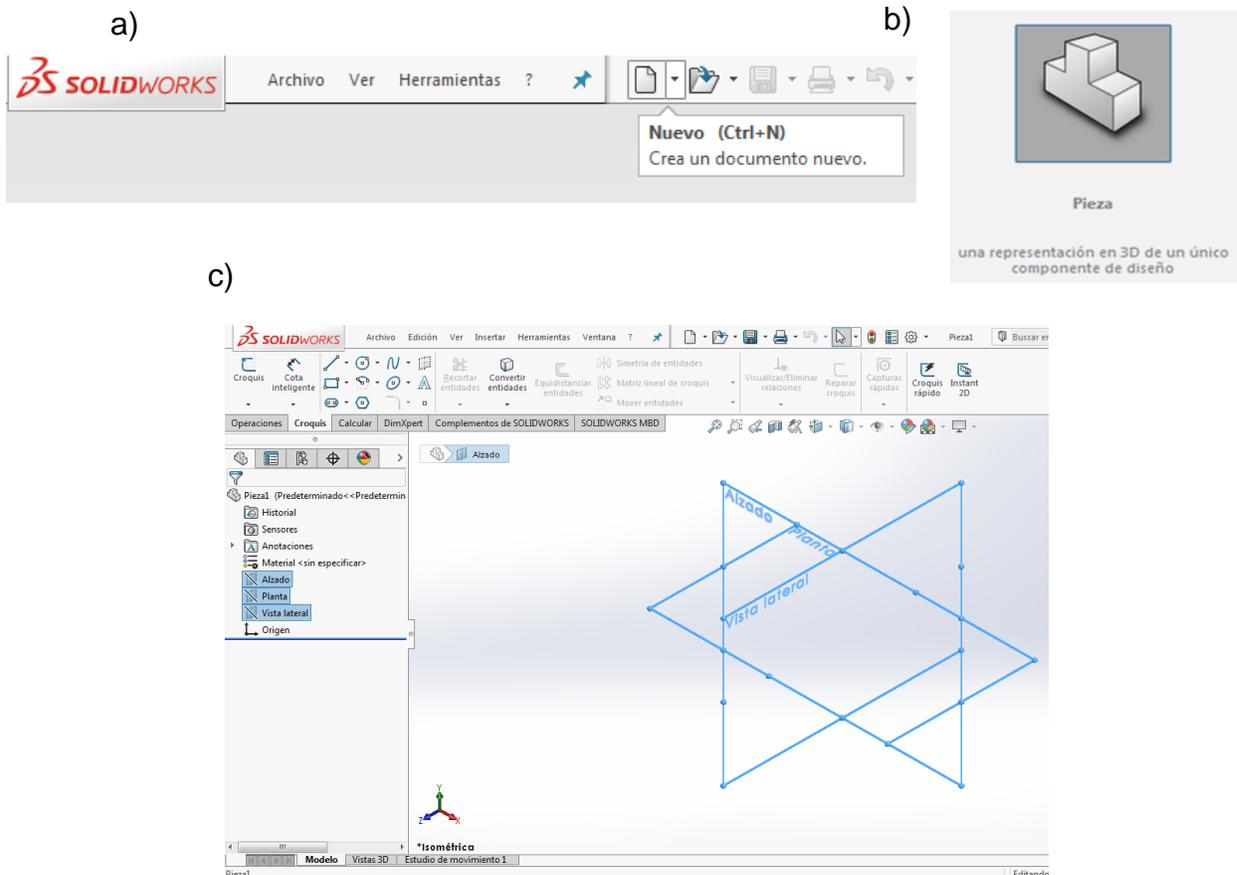


Figura 5.8 a) Creación de un documento, b) Representación y c) Plano de trabajo

5.3.1 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 5.9a), que posteriormente se extruiría para formar un contorno tridimensional en base a las especificaciones propuestas (Figura 5.9b).

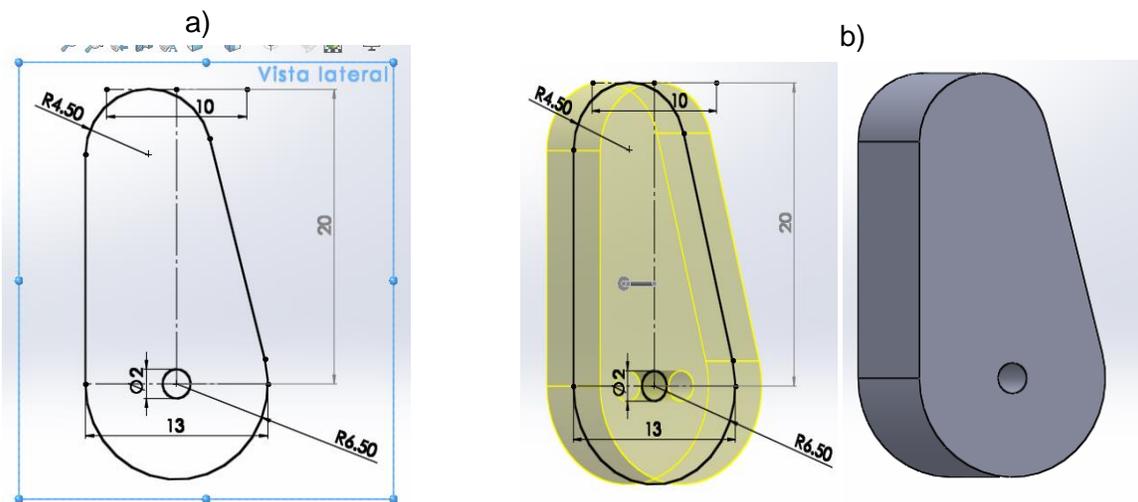


Figura 5.9 a)Trazado de falange distal b)Extruido

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 distal del dedo (Figura 5.10a), posteriormente se hizo el barreno y seccionados correspondientes que servirán para adaptar una flecha que tiene como objetivo funcionar como articulación (Figura 5.10 b). Asimismo se realizó redondeos en las esquinas con radio de 2 mm (Figura 5.10 c).

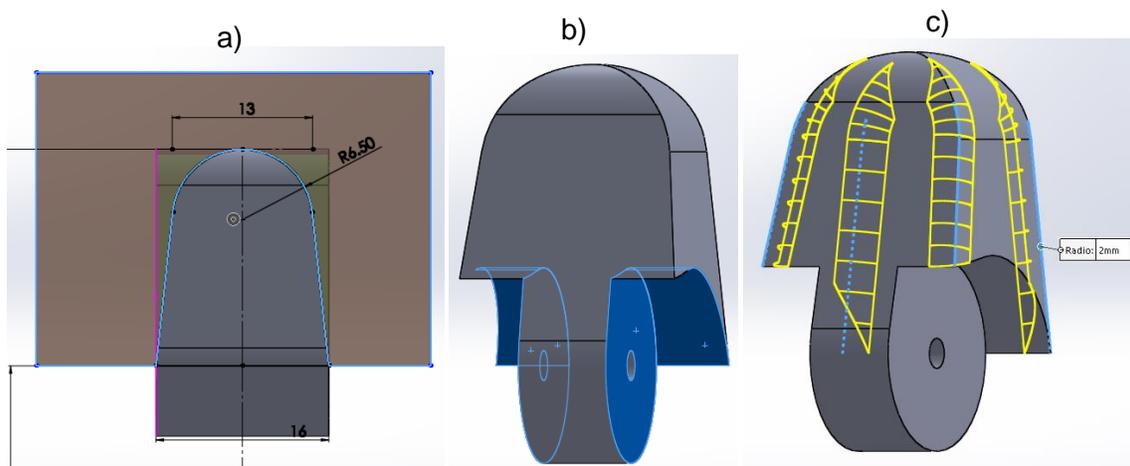


Figura 5.10 a) Cortes de forma b) Cortes para articulación c) Redondeos

Es relevante mencionar que todos los cortes y extruidos fueron obtenidos mediante geometría básica, además de utilizar técnicas de redondeo para eliminar aristas rectos entre los cortes del modelo.

5.3.2 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 5.11a), que posteriormente se extruiría para formar un contorno tridimensional en base a las especificaciones propuestas (Figura 5.11 b).

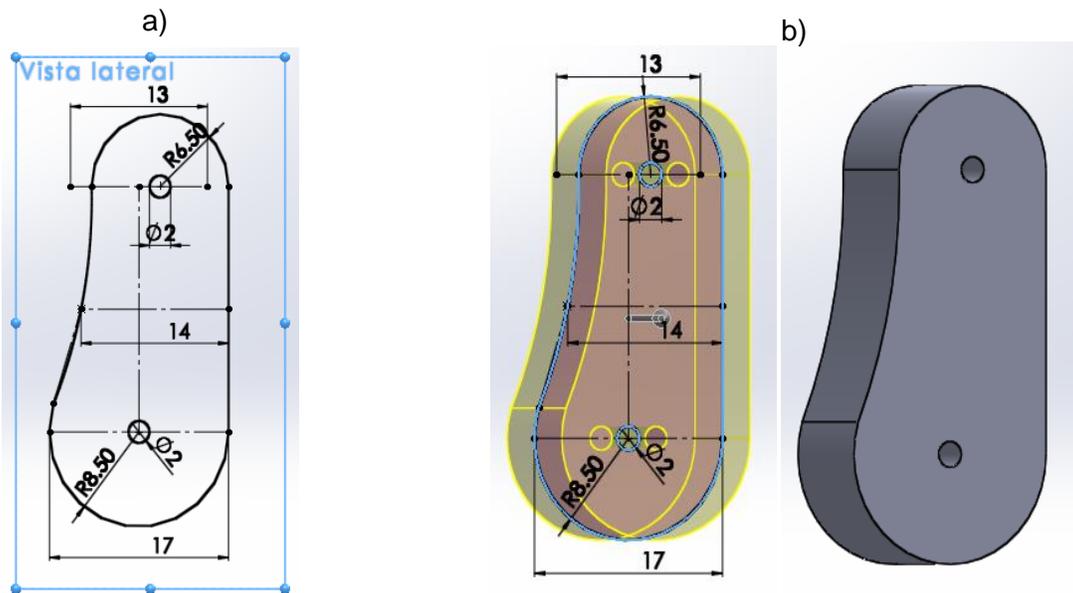


Figura 5.11 a) Trazado de la falange media b) Extruido

Una vez obtenido el sólido primario, se dio forma a la falange media realizando una serie de cortes, extruidos y redondeos. El primer corte da forma a la parte medial del dedo (Figura 5.12a) y los siguientes sirven para adaptar la falange distal y falange proximal en las articulaciones (Figura 5.12a), asimismo se desarrolló el barreno y seccionados correspondientes que servirán para adaptar una flecha que tiene como objetivo funcionar como articulación. Se aplican redondeos a los aristas de la falange (Figura 5.12c)

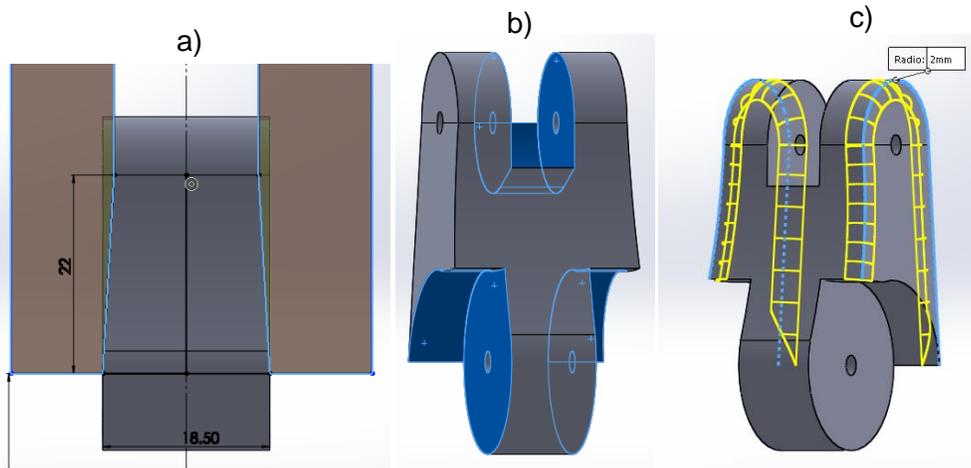


Figura 5.12 a) Cortes de forma b) Cortes para articulación c) Redondeos

De igual forma, se continuó con el seccionado del lugar donde se insertara el tendón u orificios para guiar su trayectoria.

5.3.3 Falange Proximal

Dadas las dimensiones de la pieza a modelar, se procedió a desarrollar un croquis primario desde una vista lateral de la falange (Figura 5.13a), que posteriormente se extruiría para formar un contorno tridimensional en base a las especificaciones propuestas (Figura 5.13b).

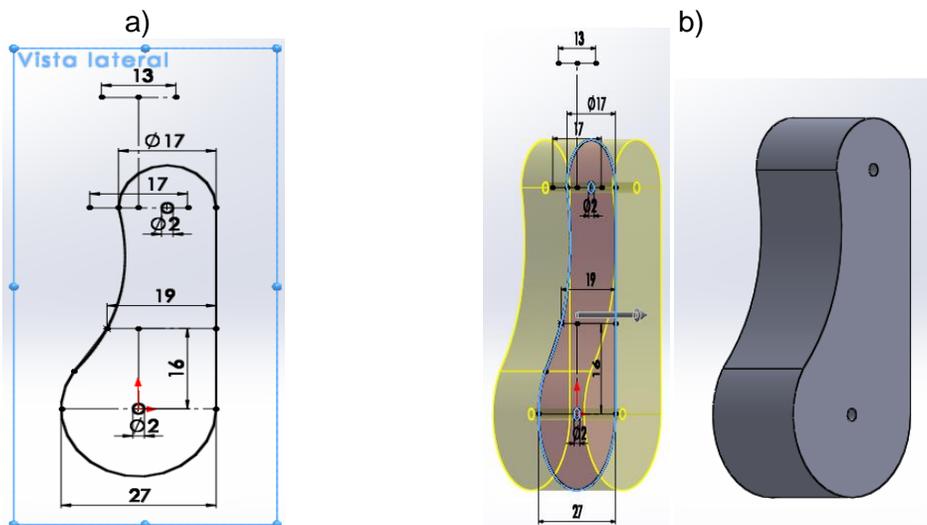


Figura 5.13 a) Trazado de la falange proximal b) Extruido

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. Se desarrollan los cortes requeridos para adaptar este modelo con la falange medial y también para adaptar a la palma (Figura 5.14a). Se continuó con redondeos y con el seccionado del lugar donde será adaptada el tendón para la transmisión de fuerza, además de un orificio para guiar su trayectoria (Figura 5.14b).

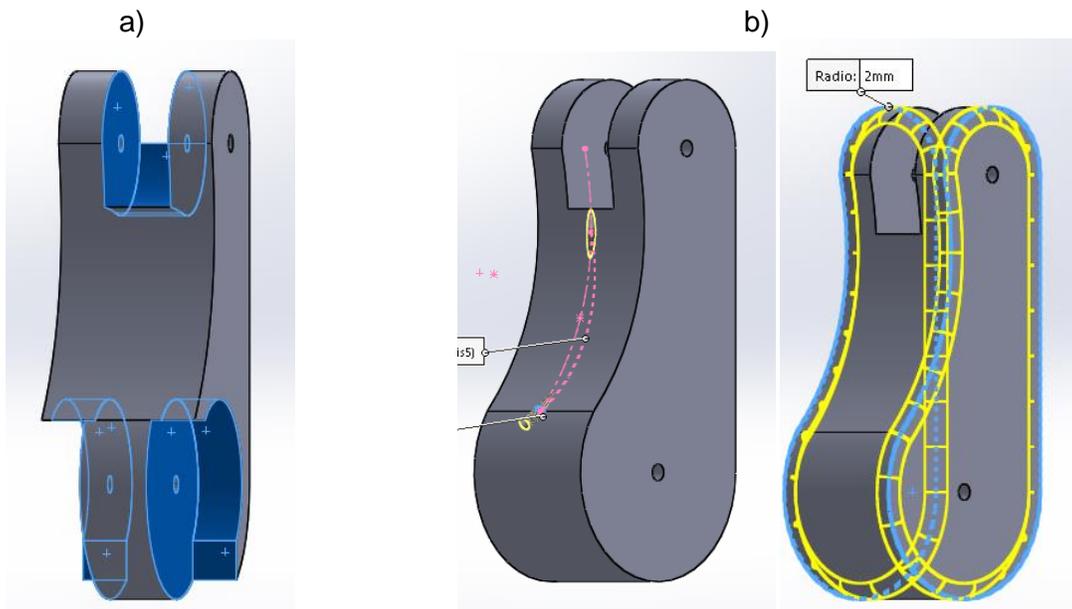


Figura 5.14 a) Cortes para articulación b) Orificio de trayectoria de tendón y redondeos

El modelado tridimensional de cada dedo se realizó siguiendo los pasos aquí mostrados, evidentemente con dimensiones, seccionados y extruidos de diferente magnitud.

5.3.4 Palma

Para el modelado de la palma, se procedió a desarrollar un croquis primario desde un plano Alzado (Figura 5.15a), se crean 4 planos en vista lateral (Figura 5.15b) y se crean croquis para las juntas MCF posteriormente (Figura 5.15 c), se realizaron los extruidos para obtener las articulaciones MCF de los dedos (Figura 5.15 d),

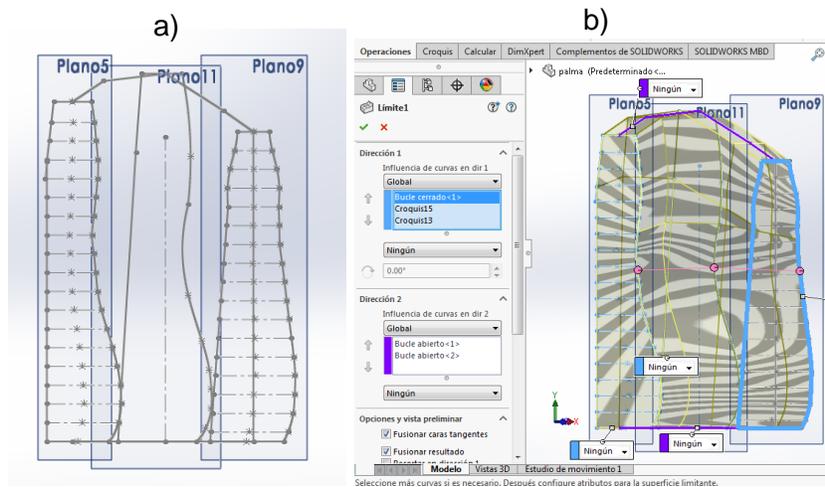


Figura 5.16 Diseño del contorno de la palma

5.3.5 Antebrazo

Para la obtención de los perfiles del antebrazo se tomarán fotografías a dicho miembro del cuerpo, para brindar comodidad al paciente se construye una pieza de silicón obtenida por medio de moldes de yeso debido a que se realizarían gran cantidad de pruebas con el antebrazo. Se desea que las fotografías puedan distinguirse el contorno o el cambio de color entre la pieza y el fondo, con lo que se construye una caja de luz para disminuir de contaminación y aumentar la luminosidad. La Pieza se introduce en la caja de luz, se toman fotografías y se exporta las imágenes al programa de computo Solidworks en donde se obtendrán los perfiles y curvas guías de la pieza para hacer el diseño tridimensional.

A continuación se describe una metodología

- I. Se construye un molde de yeso, para su elaboración se elabora un recipiente con material de tubo de PVC unido a una caja de plástico, éstos son partidas a la mitad y mediante bisagras se logra la apertura y cierre del mismo. El vaciado del yeso se hace en dos partes, la primera mitad del molde se obtiene con el recipiente abierto en donde el sujeto sumerge su mano y antebrazo hasta la mitad de la mezcla,

posteriormente se lubrican las superficies se coloca la mano en posición y se cierra el recipiente, se hace el vaciado del yeso para crear la mitad restante del molde. Una vez obtenido el molde se juntan las dos partes y se cierran, se derrite silicón en un horno y se vierte sobre el molde de yeso para obtener la pieza.

- II. Se desea que las fotografías puedan distinguirse el contorno o el cambio de tono de color entre la pieza y su alrededor por lo que se construye una caja de luz, este cubo está elaborado con tres de sus lados cubiertos con un papel blanco dicho material deja pasar cierta cantidad de luz y el fondo es decir en la parte trasera se coloca papel oscuro, también se colocan 3 focos a unos 10 cm de sus superficie, de los cuales 2 están situados en los costados y uno en la cara superior del cubo.

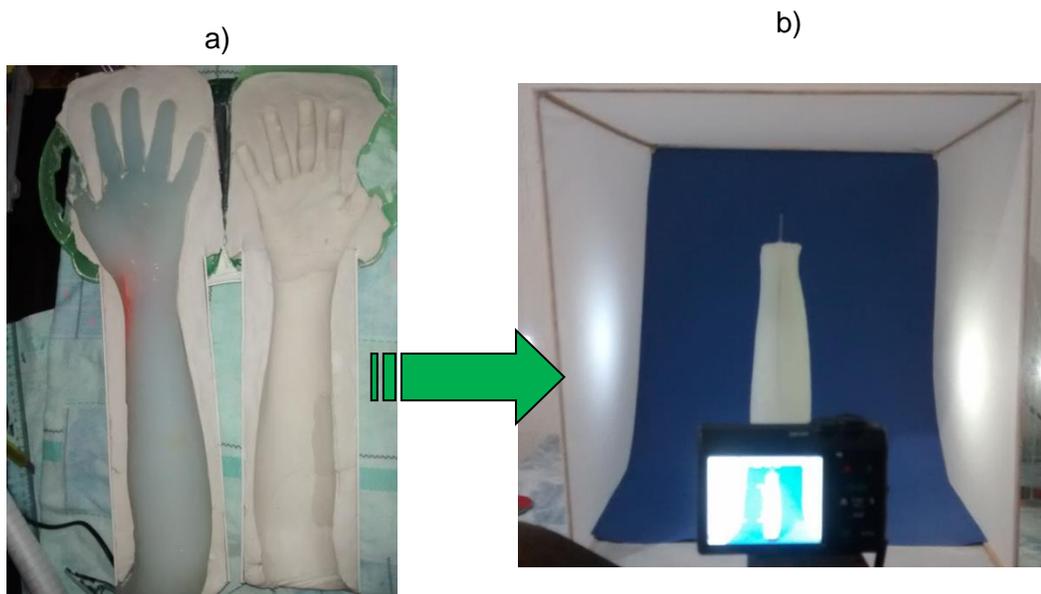


Figura 5.17 a) Pieza de silicón con molde de yeso b) Caja de luz y cámara

- III. Se considera tomar cuatro fotografías, la cámara utilizada en el presente trabajo es una cámara portátil Canon de 16 Megapíxeles, la captura de las fotografías se hicieron de la siguiente manera: la primera toma se hizo en posición arbitraria en visión palmar o dorsal, la segunda captura de la pieza se rotará 90° aproximadamente, la tercera es en vista

superior y la cuarta toma se hizo en vista inferior. Es importante mencionar que en la fotografía se debe tener una medida conocida, en este caso se colocó un cubo de 1cm de lado.

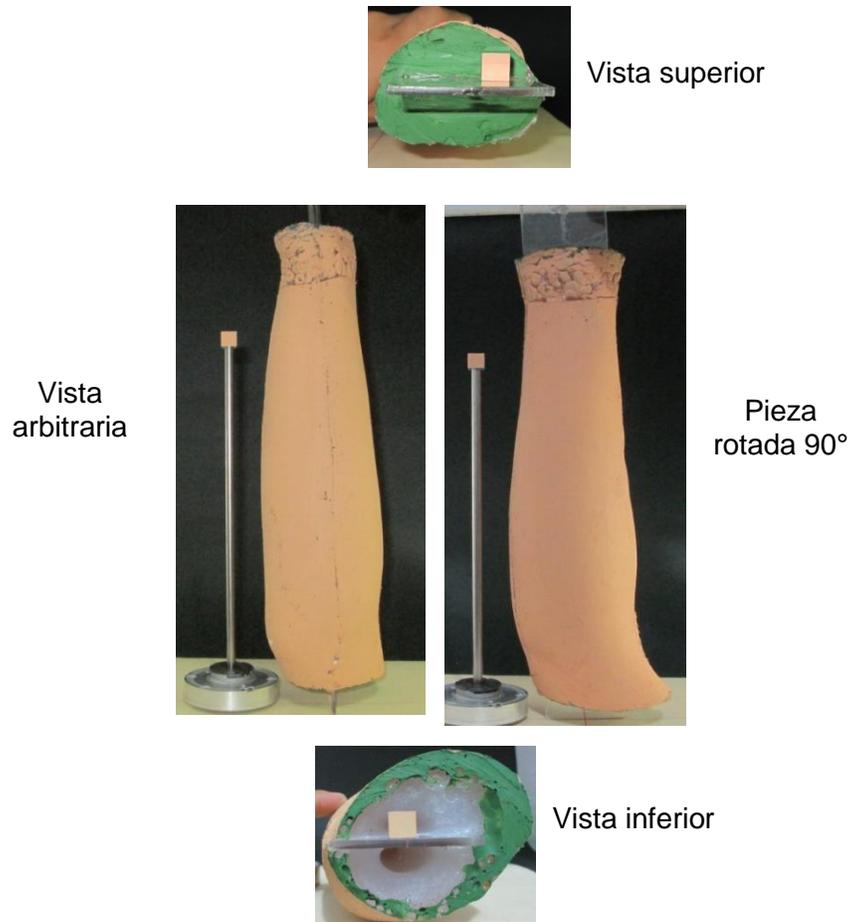


Figura 5.18 Fotografías para el diseño del antebrazo

Nota: En el vaciado del silicón se introdujo una regla a lo largo del eje longitudinal, dicho elemento sirve como guía al momento de acoplar las 4 dibujos en sus planos en Solidworks.

- IV. Al ejecutar el programa de cómputo Solidworks se verifica que se encuentre activo el complemento de Autotrace.

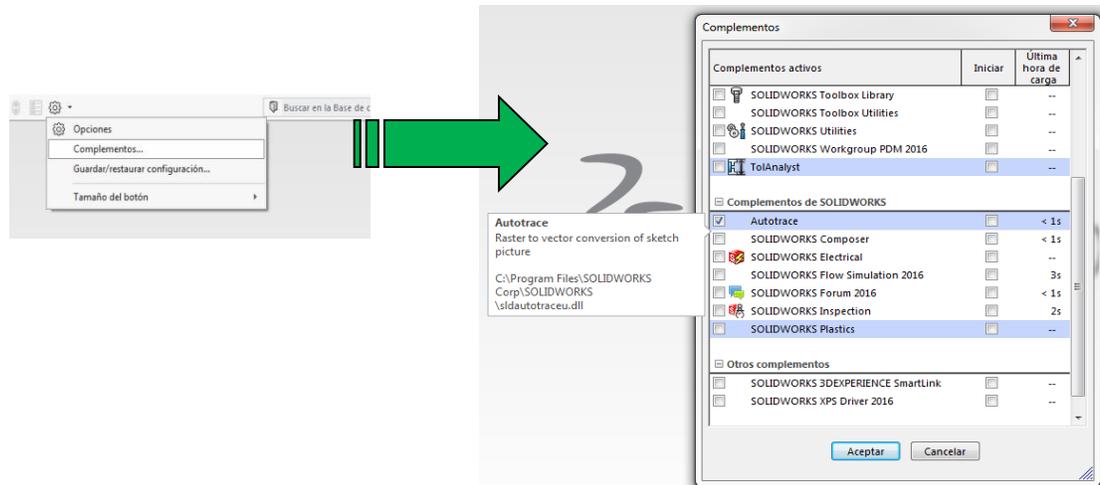


Figura 5.19 Activar Autotrace

V. Aplicamos a nuevo documento y creamos pieza.

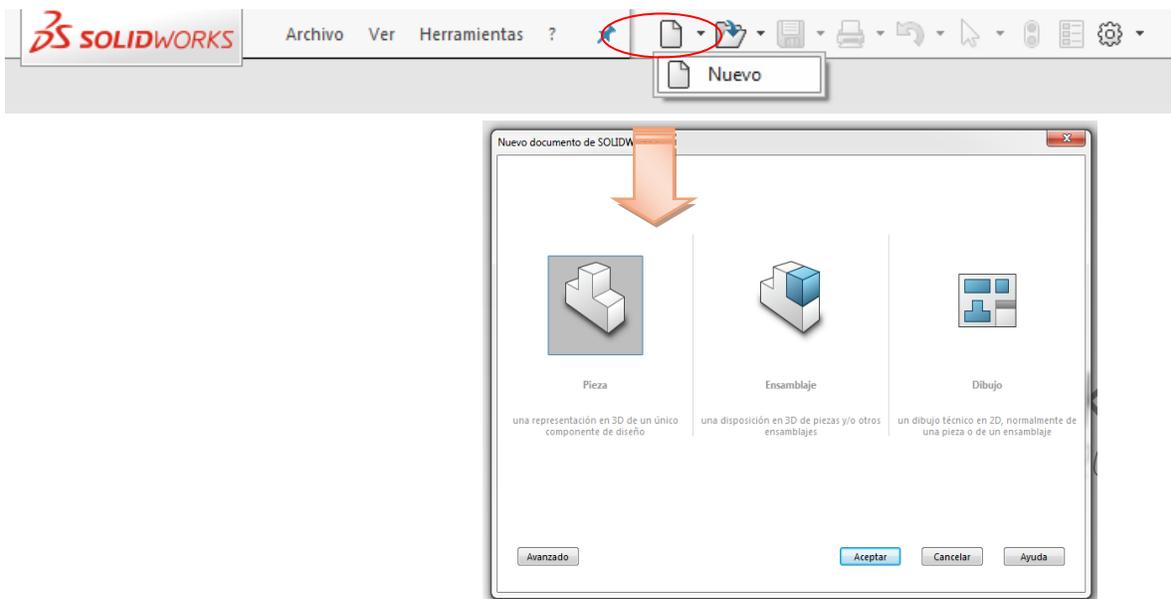


Figura 5.20 Creación de nueva pieza

VI. Elegimos el plano para la primera imagen de nuestra pieza y creamos un croquis, para introducir la imagen se usa el icono de “Herramientas”, después “Herramientas de croquizar” y luego “Imagen de croquis”...

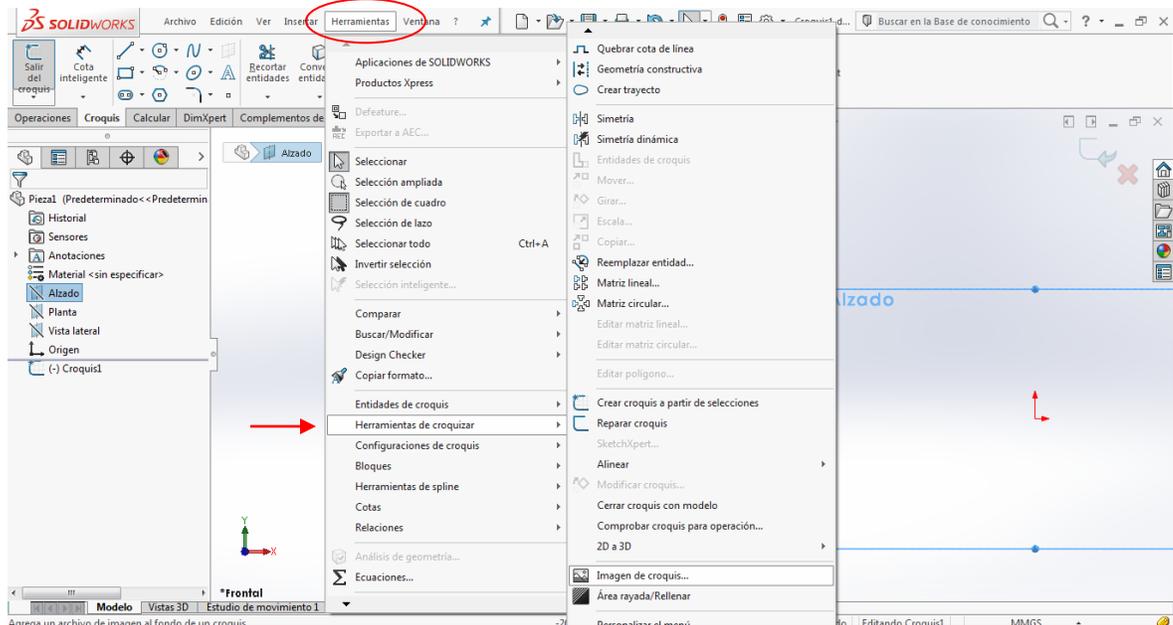


Figura 5.21 Insertar imagen en Solidworks

VII. Dependiendo de la luminosidad o calidad de tu fotografía y de los tonos de fondo es posible encontrar dificultad en obtener las curvas guía con el complemento Autotrace, es importante mencionar que también puedes dibujar el contorno mediante un Spline.

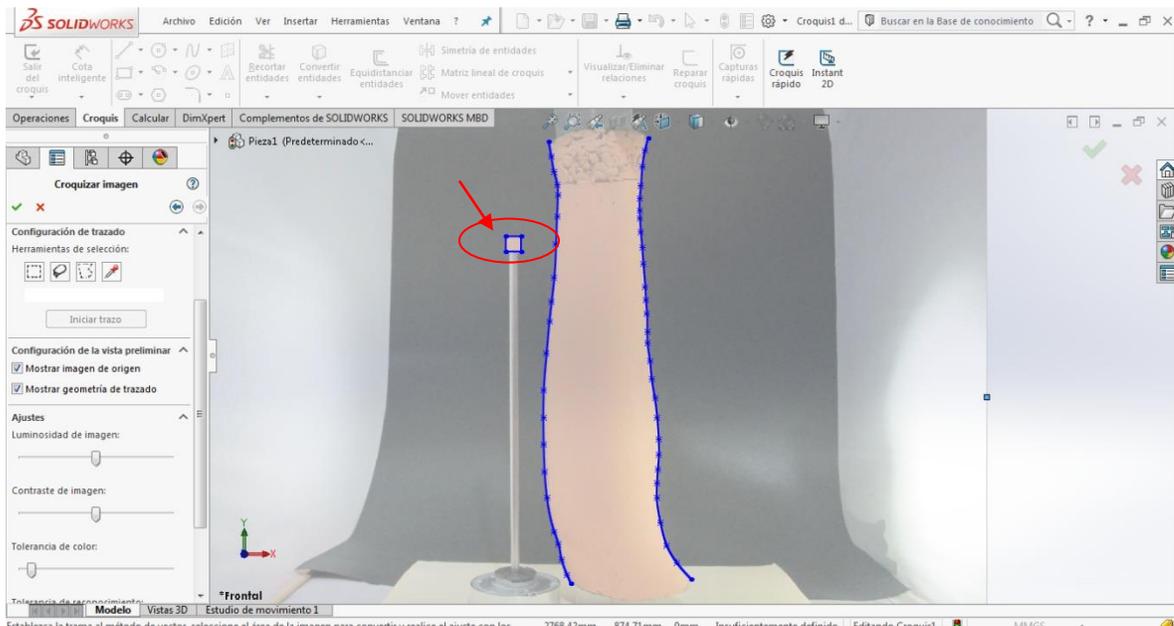


Figura 5.22 Curvas guía

Para encontrar una escala de la fotografía se acota la medida conocida en la imagen en este caso es un cubo de 1cm de lado.

VIII. Las curvas guía y los perfiles tienen una relación de perforación en sus extremos.

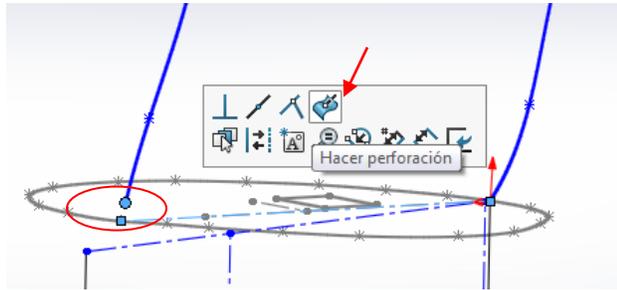


Figura 5.23 Relación de perforación entre las curvas guía y los perfiles

IX. En total se obtienen 4 curvas guía y dos perfiles como se muestra en la figura, se utiliza la función de recubrir y se obtiene un sólido.

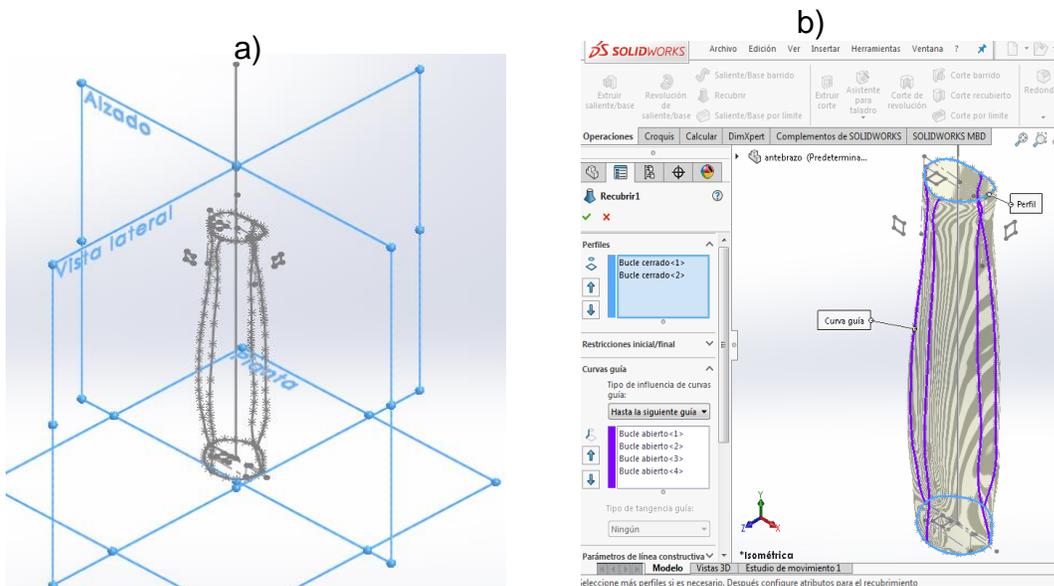


Figura 5.24 a) Curvas guía y perfiles b) función recubrir

5.3.6 Ensamble

Para el ensamble de los dedos se aplican relaciones de posición (coincidente, concéntrica, tangente y otros).

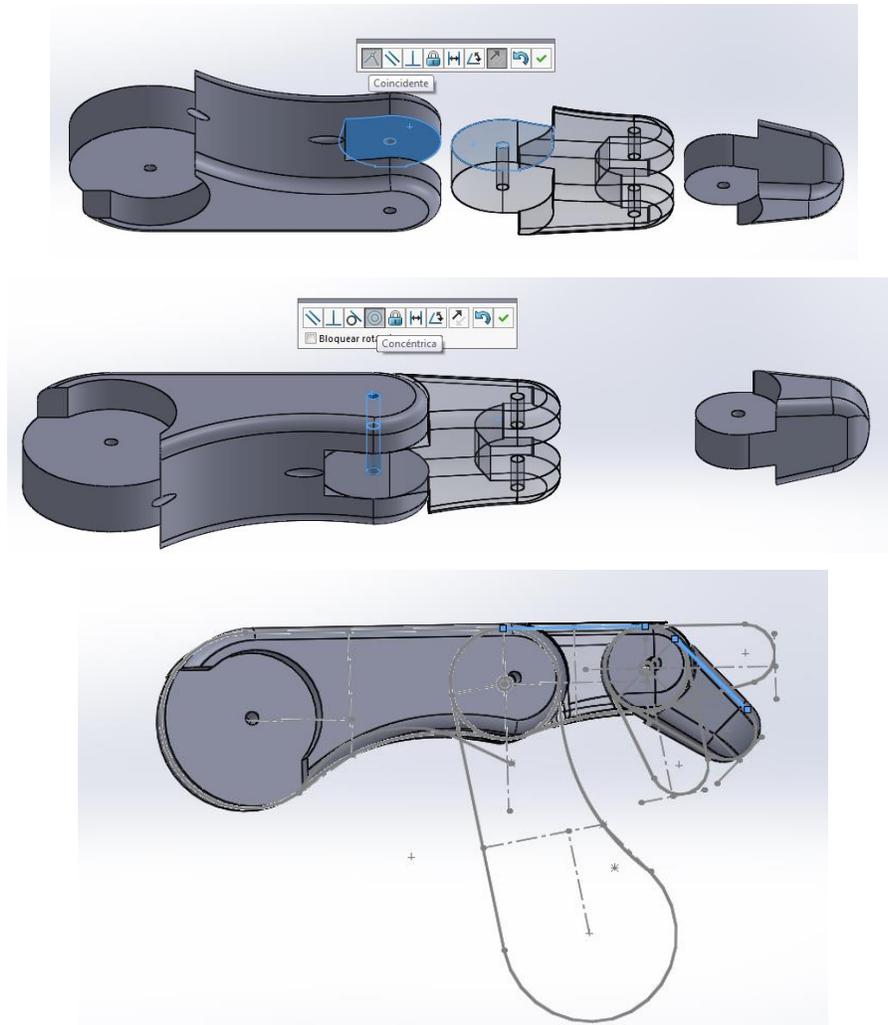


Figura 5.25 Relación de posición de a) coincidente b) concéntrica c) Relaciones avanzadas

6 Resultados

En las secciones anteriores se presentó un estado del arte sobre la evolución de las prótesis del miembro superior y dispositivos robóticos, en los cuales se presenta información sobre las características y componentes utilizados para la construcción de los dispositivos, así como mecanismos, actuadores, sensores, materiales de soporte que sirven de análisis para el diseño en la solución del planteamiento del problema.

La recopilación de información presentada en fundamentos teóricos respecto a la anatomía, fisiología y mecánica del movimiento referente al miembro superior, da los parámetros necesarios para tratar de replicar algunas funciones del mismo.

En la metodología de diseño se obtuvo un bosquejo del modelo completo, así como los requerimientos y especificaciones del diseño del proyecto a futuro, este diseño conceptual abarca hasta construcción, elección de sensado y control del sistema robótico.

Se obtiene un modelo tridimensional con apoyo de equipo de cómputo en donde se plantean información y conocimientos planteados en el estado del arte y fundamentos teóricos, además de la creación de una metodología de diseño mediante fotografía para obtener perfiles del antebrazo.

- Se obtienen cinco dedos, una palma y un antebrazo, los dedos son personalizados pero todos tienen geometría similar de construcción, la palma se considera dejar ahuecada para posibles impresiones tridimensionales así también en el antebrazo se realizaron vaciados y cortes.

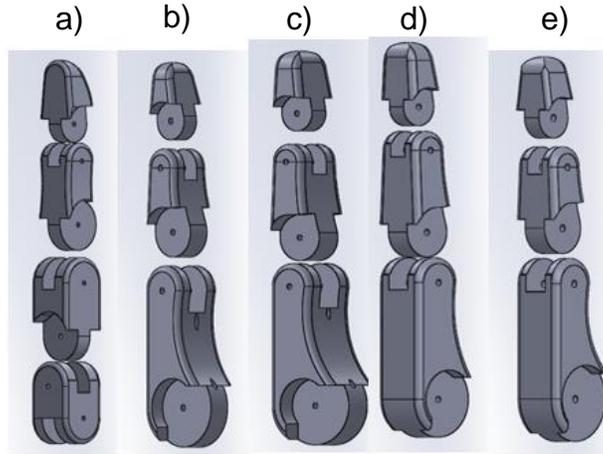


Figura 6.1 Piezas a) Pulgar b) Índice c) Medio d) Anular e) Menique

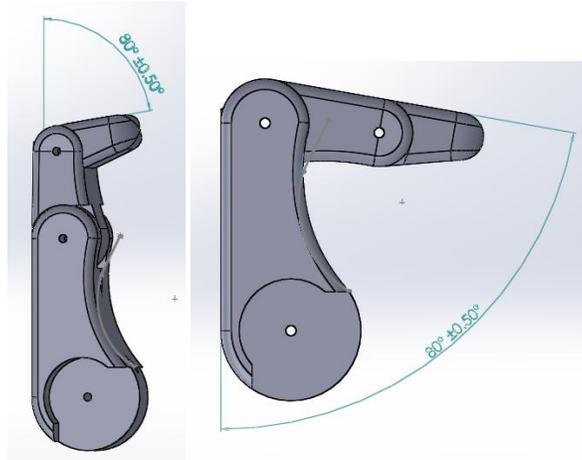


Figura 6.2 Rango de movimientos en las articulaciones del dedo índice

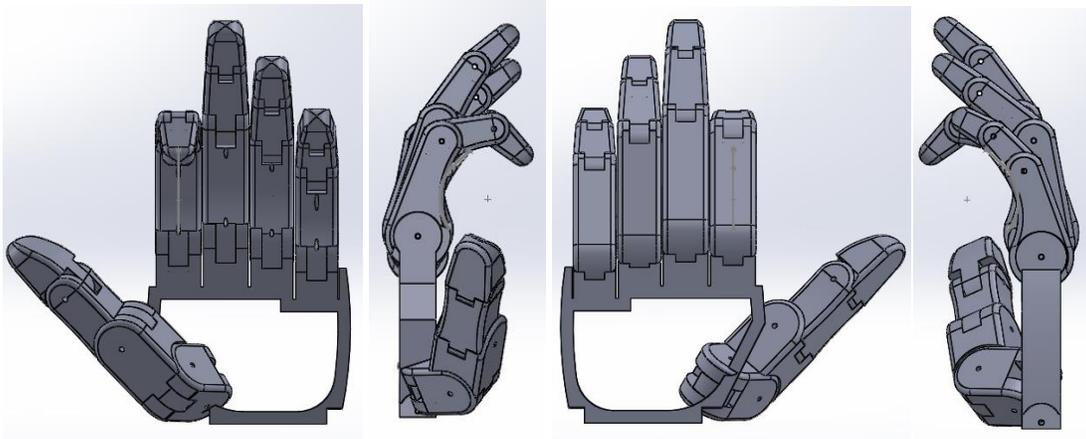


Figura 6.3 Vistas para el ensamble de la mano

Se modificaron los modelos tridimensionales del prototipo para posibles impresiones tridimensionales o técnicas de moldeo, mediante vaciados y cortes.

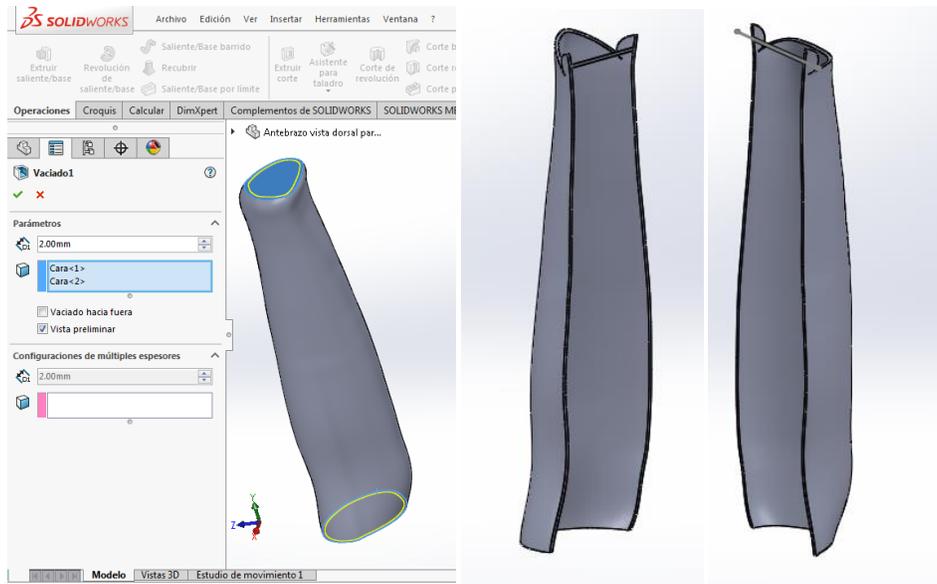


Figura 6.4 Operación vaciado y cortes para obtener dos piezas del antebrazo.

El ensamblaje completo del antebrazo está constituido por las uniones de los subensamblajes de los dedos, la palma, y antebrazo.

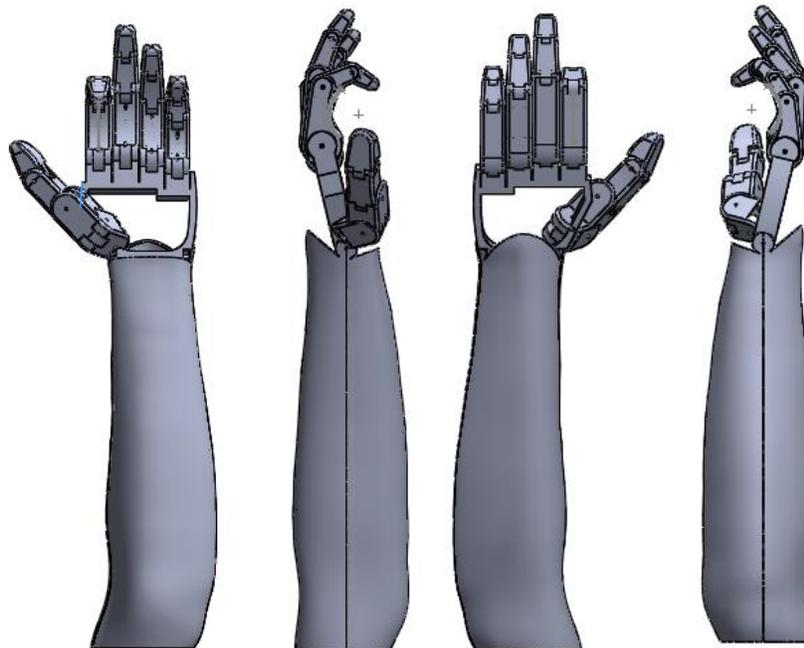


Figura 6.5 Ensamble de falanges, palma y antebrazo

Se observa cómo se conservan la simetría o estética del brazo humano acorde a lo establecido en la metodología de diseño

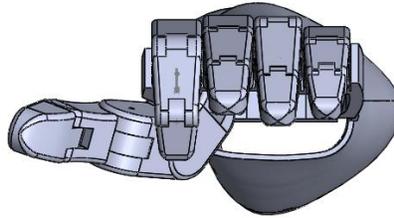


Figura 6.6 Vista superior del ensamble

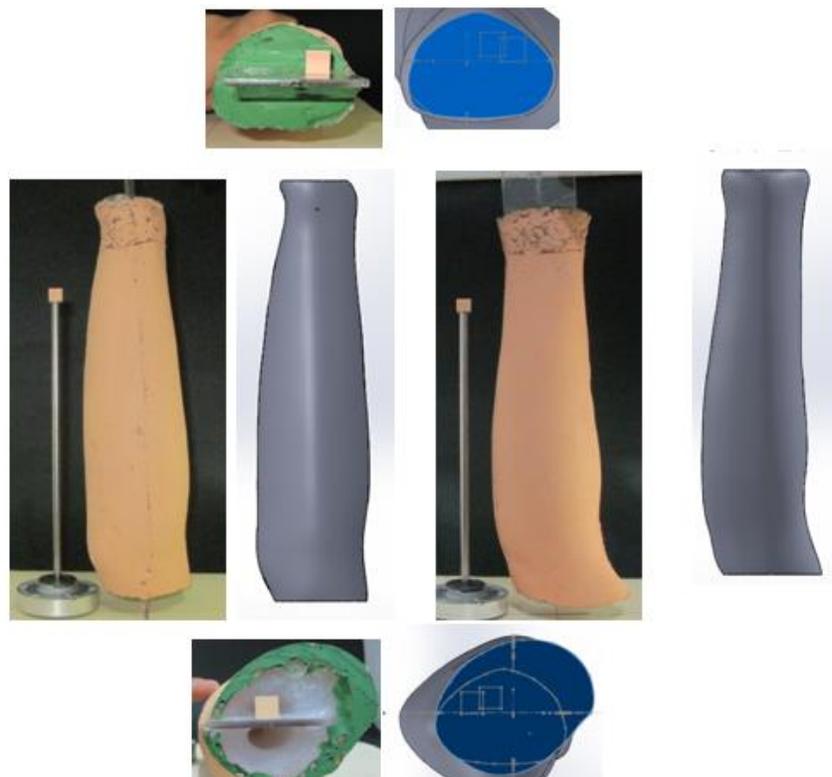


Figura 6.7 Comparación de las fotografías y el modelo obtenido en Solidworks

7 Conclusiones

Formamos parte de una sociedad que avanza constantemente en el conocimiento de su entorno, el hombre realiza observaciones, análisis, y experimentos logrando manipular o alterar la materia. Hacer uso de la información y de los conjuntos de conocimientos razonados y sistematizados que hacen la ciencia, nos ayuda a la solución de nuestra problemática, es por eso que la recopilación de información respecto a los avances y desarrollos obtenidos por muchos autores en cuanto a las prótesis y dispositivos robóticos presentados en este trabajo son de mucha relevancia para su análisis y comprensión para el diseño del antebrazo y efector final.

Es necesario contar con fundamentos teóricos respecto al tema del miembro superior, para que al momento de intentar replicarlo pueda obtenerse un modelo lo más cercano posible en apariencia y funcionamiento.

La metodología de diseño ayudó a plantear un diseño conceptual que permitió delimitar las características del diseño tridimensional logrando así evitar rediseños.

Con la implementación de la metodología de modelado del antebrazo con ayuda fotografías nos ayudó a tener un modelo relativamente rápido, económico y personalizado sin la necesidad de utilizar aparatos como escáneres.

8 Recomendaciones

Se recomienda al diseñador estudiar los movimientos realizados por el dedo pulgar, con el objetivo de encontrar una síntesis de mecanismo para dicha falange.

Realizar análisis numéricos en forma estática y dinámica de los elementos que componen el modelo, con la finalidad de determinar los puntos críticos que posee el prototipo y así realizar adecuaciones necesarias que aseguren el óptimo funcionamiento del sistema.

Implementar el prototipo con materiales y dispositivos planteados en la metodología de diseño, además de diseñar un programa que calcule los movimientos para las formas de sujeción más comunes o utilizadas por el paciente.

9 Fuentes de información

1. *Los amputados, un reto para el estado*. **Vázquez Vela, Eduardo y Hiar Medina, Martha**. 04 de marzo del 2015. Los amputados, un reto para el estado. págs. 1-9.
2. *Un breve recorrido por la historia de la protésica*. **Norton, Kim**. 7, Noviembre/Diciembre de 2007, InMotion, Vol. 17, págs. 1-5.
3. *Robótica y prótesis inteligentes*. **Dorador González, Jesús Manuel**. 1, 18 de Enero de 2004, Revista Digital Universitaria, Vol. 6, págs. 1-15.
4. *Recuperado de <http://web.archive.org/web/20120704075556/http://historiasconhistoria.es/2008/07/25/gotz-mano-de-hierro-berlichingen.php>*
5. *Recuperado de https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/68/Pare%2C_Hand%2C_showing_mechanical_movement%2C_Welcome_L0005772.jpg*
6. *Rehabilitación y Medicina Física, Recuperado de <http://www.rehabilitacionblog.com/2010/05/i-limb-pulse-nueva-mano-bionica.html>*
7. **Cabás, Ramiro**. *Metodología de diseño de manos robóticas basada en los estados de su sistema accionador*. Universidad Carlos III de Madrid. 2011.
8. *Recuperado de www.arcesw.com/niveles.htm* . 2017.
9. **Netter, Frank H**. *Colección Netter de ilustraciones médicas tomo VIII/3 SISTEMA MUSCULOESQUELETICO traumatología, evaluación y tratamiento*. s.l. : MASSON, 1994,1995,2001.
10. **Groover, Werss y Odrey**. *Robótica Industrial: Tecnología, Programación y Aplicaciones*. s.l. : Mc Graw-Hill, 1996.
11. **Mecloy y Harris**. *Robótica: Una introducción*. s.l. : Limusa, 1994.
12. **Balcells**. *Autómatas Programables*. s.l. : Marcombo, 1992.
13. **Pham y Heginbotham**. *Robot Grippers*. s.l. : Bedford, 1986.
14. **Penisi, Carbone y Ceccarelli**. *Optimum Design and Testing of Mechanics for two fingers Grippers. International Symposium on Multibody Systems and Mechatronics*. 2002.

15. **Hesse.** *Las pinzas y sus Aplicaciones.* USA : Festo AG & Co.115, 2004.
16. **Hasegawa, Murakami y Matsuoka.** *Grasp Planning for Precision manipulations by multifingered robotic hand.* Department of electrical engineering, Fukuoka University. Japan : s.n., 1998.
17. **Prattichizzo y Bicchi.** *Dynamic analysis of mobility and graspability of general manipulation systems.* s.l. : IEEE Transactions on robotics and automation, 1998.
18. **Boubekri y Chakraborty.** *Robotic Gransping: Gripper Designs, control methods and grasp configurations.* Department of industrial engineering, University of Miami. Miami CA : s.n., 2001.
19. **Lee y Tsai.** *Structural synthesis of multi-fingered hands.* s.l. : Transactions of the ASME, 2002.
20. **Ceccarelli, Jauregui y Nava.** *Experimental activity for designing a hand with 1 DOF anthropomorphic fingers of human size.* s.l. : 12th international workshop on robotics in alpe-adria-danube Region RAAD´03, 2003.
21. **Crossley y Umholtz.** *Design of three fingered hand.* s.l. : Mechanism and machine theory, 1977.
22. **Salisbury y Roth.** *Sintesis estructural de un mecanismo de una mano de tres dedos.* 1983.
23. **Figliolini, Rea y Principe.** *Mechatronic design .* s.l. : 12th international workshop on robotics, 2003.
24. **Moore, Keith L., Dalley, Arthur F. y Anne, M. R.** *Anatomía con orientacion clinica.* s.l. : Lippincott Williams & Wilkins, 2010.
25. **Netter, Frank H. y Md.** *Atlas de Anatomía Humana.*
26. **Schünke, Schulte y Schumacher.** *PROMETHEUS: Texto y Atlas de anatomia.* págs. 208-330. Vol. 1.
27. *Anatomía y fisiología del cuerpo humano.* Buenos Aires Rep. Argentina : Cultural Librería Americana S.A: GRUPO CLASA.
28. **Sánchez, Velazquez.** *Caracterización cinemática e implementación de una mano robótica multiarticulada.* 2008.
29. **Nordin y Frankel.** *Biomecanica básica del sistema musculoesuquelético.* s.l. : McGraw Hill, 2004.

30. **Ariyan y S.** *Ciruga de la mano*. s.l. : El manual moderno, 1984.
31. **Weinzweig y J.** *Secretos de la cirugía de mano y muñeca*. s.l. : McGraw Hill.
32. **Hoppenfeld y S.** *Exploración física de la columna vertebral y las extremidades*. s.l. : El manual Moderno, 1979. págs. 102-162.
33. **Trumble y T.E.** *Principles of hand surgery and therapy*. s.l. : Saunders Company, 2000. págs. 1-56.
34. **Skinner y F.** *Designing a multiple prehension manipulator*. Mechanical Engineering Society. 1975. págs. 30-37.
35. **Cross y N.** *Métodos de diseño: Estrategias para el diseño de productos*. s.l. : Limusa Wiley, 2008. págs. 29-174.
36. **Coughlin, y otros.** *Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales*. s.l. : Prentice Hall, 1999. págs. 1-45.
37. **Fitchen y F.C.** *Circuitos integrados y sistemas*. s.l. : Reverté, 1975. págs. 1-35.
38. **Pérez, Valdez, y otros.** *Microcontroladores: Fundamentos y aplicaciones con PIC*. s.l. : Carles Parcerisas CLvit, 2007. págs. 11-75.
39. *Robotics & electronics recuperado de <http://www.pololo.com/>*. marzo 2017.
40. **Mott y R.L.** *Diseño de elementos de máquinas*. s.l. : Pearson Educación, 2006. págs. -56.
41. **Pfaeffle, y otros.** *Development and validation of a computed tomography-based methodology to measure carpal kinematics*. s.l. : Journal of BiomechanicalEngineering, 2005. págs. 541-548.
42. **Muñoz, Ruiz y E.R.** *Análisis de la estabilidad segmentaria en especímenes de columna lumbar porcina (L1-L5) con cerclaje interespinoso empleando un cinturón de poliamida 6/6*. ESIME IPN. México : Tesis de maestría, 2010. págs. 160-175.
43. **John, W y Garret.** *Anthropometry of the air force female hand*. 1970.
44. **Torres, San Miguel y R., C.** *Análisis de esfuerzos de una válvula introbronquial*. ESIME IPN. México : Tesis de Maestría, 2006.
45. —. *Análisis de esfuerzos de una válvula introbronquial*. ESIME IPN. México : Tesis de maestría, 2006.