UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE

DESARROLLO DE MANO MECÁNICA PARA EMULACIÓN Y DETERMINACIÓN DE MOVIMIENTOS

JORGE ESTEBAN SALAS GORDÓNIZ

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERÍA CIVIL MECÁNICA

PROFESOR GUÍA: DR. ING. DANILO ESTAY BARRIENTOS
PROFESOR CORREFERENTE: DR. ING. SHEILA LASCANO FARAK

OCTUBRE 2017

“When there is freedom from mechanical conditioning, there is simplicity.”

Bruce Lee

1 RESUMEN

Buscando desarrollar un sistema con una destreza similar al de la mano humana; se construyó un prototipo que emula sus movimientos. El prototipo, fabricado principalmente mediante impresión 3D, utiliza 47 servomotores que actúan de forma antagónica, tensando un conjunto de tendones, lo que permite una mano mecánica con 24 grados de libertad; con los movimientos de flexión, extensión, abducción y aducción; tanto en la muñeca como en los cinco dedos (con sus respectivas falanges), además de la oposición del pulgar, y meñique. Aunque la mano carece de un sistema de control coordinado; puede mover individualmente cada una de sus partes, permitiendo modificar su postura.

Palabras clave: Prototipo, mano antropomórfica, mano mecánica, movimientos, mano hábil.

2 ABSTRACT

In the searching to develop a system with a similar dexterity as the human hand, a prototype which emulates its movements, has been built. The prototype, made using a 3D printing process, works with 47 servos, which tense a set of tendons, resulting in a mechanical hand with 24 degrees of freedom; with the movements of flexion, extension, abduction and adduction; included in the wrist and the five fingers (with their phalanges), as well as the opposition of the thumb, and pinky. Although the hand lacks a coordinated control system; can move, individually, each of its parts, being able to modify its position.

Keywords: Prototype, anthropomorphic hand, mechanical hand, movements, dexterous hand.

3 GLOSARIO

Abducción Cubital:	Inclinación **medial** de la mano (hacia el lado del hueso del cúbito, o el dedo meñique).
Abducción de la mano:	Ver **abducción cubital** y **abducción radial**.
Abducción Radial:	Inclinación **lateral** de la mano (hacia el lado del hueso del **radio**, o el dedo pulgar).
Aducción de la mano:	Ver **Abducción cubital**.
Ancho:	Dimensión perpendicular a la **longitud**, observada desde una vista **anterior** o **posterior**.
Anterior:	Orientación anatómica. Posición respecto al frente del cuerpo.
Arcada flexionada:	Forma que toma la mano en posición de reposo, con los dedos flexionados; siendo el índice el menos flexionado.
Articulación Carpometacarpiana:	Articulación entre los huesos del carpo, y los metacarpos de los dedos.
Articulación condilar:	**Articulación sinovial** que permite el movimiento en torno a dos ejes perpendiculares.

Articulación sinovial:	Articulación en donde los huesos se encuentran separados por una cavidad articular, y pueden describirse por su forma.
Articulación sinovial plana:	Articulación que permite el deslizamiento entre la superficie de dos huesos.
Articulación trapeciometacarpiana:	Articulación que une el **trapecio** (hueso del carpo) con el metacarpo del pulgar.
Articulación elipsoide:	Ver **Articulación condilar.**
Circunducción:	Combinación de los movimientos de **flexión**, **extensión** y **abducción** en la mano.
Cóndilos carpianos:	Denominación de la articulación **mediocarpiana** y **radiocarpiana.**
Cúbito:	Hueso alargado ubicado en el antebrazo, paralelo al **radio**.
Diáfisis:	Cuerpo del hueso, ubicado entre la cabeza y la base, o los extremos del mismo.
Distal:	Referencia anatómica. Posición de lejanía con respecto al origen de una estructura.

Dorsal:	Ver **Posterior.**
Eje longitudinal de la mano:	Eje de la mano, que pasa por el hueso **grande**, el dedo medio, y el metacarpo III.
Eje longitudinal del pulgar:	Eje que pasa por el hueso del metacarpo del dedo pulgar.
Eje sagital de la mano:	Eje perpendicular a los ejes **transversal** y **longitudinal**, es el eje por donde se produce el movimiento de **abducción** de la mano.
Eje transversal de la mano:	Eje de los movimientos de **flexión** y **extensión**. En conjunto con el **eje longitudinal**, forman un plano paralelo a la palma.
Extensión de la mano:	O extensión palmar. Aleja la palma a la cara **anterior** del antebrazo.
Extensión de los dedos:	De los dedos. Aleja los dedos de la palma.
Extensión Pasiva:	Extensión forzada, que no se realizar mediante los músculos intrínsecos o extrínsecos de la misma mano.
Flexión de la mano:	Aproxima la palma a la cara **anterior** del antebrazo.

Flexión de los dedos:	Aproxima los dedos a la palma (cara **anterior** de la mano).
Flexión Palmar:	Ver **flexión de la mano**.
Grande:	Ver **Hueso Grande**.
Hiperextensión:	Movimiento que se obtiene al realizar una **extensión pasiva**, superando la extensión normal de la mano.
Hueso grande:	Hueso de la fila **distal** del carpo. Se articula con la base del metacarpiano del dedo medio, y es usado como referencia para los movimientos de abducción (radial y cubital) de la muñeca.
Lateral:	Orientación anatómica. Posición alejada al **plano longitudinal** del cuerpo. Toma como referencia el cuerpo erguido, con los brazos hacia abajo, y las palmas en posición **anterior**.
Ligamento:	Cordón fibroso que une los huesos a las articulaciones.
Longitud:	Dimensión que se puede identificar como la de mayor magnitud de un elemento.

Medial:	Orientación anatómica. Posición cercana al plano longitudinal del cuerpo. Toma como referencia el cuerpo erguido, con los brazos hacia abajo, y las palmas en posición **anterior**.
Articulación Mediocarpiana:	Articulación entre las dos filas de los huesos del carpo.
Músculo:	Órgano con la capacidad de contraerse para realizar movimientos en los animales.
Plano longitudinal:	Referencia anatómica. Usado como el plano que divide el cuerpo humano en dos mitades semejantes, pasando por el **eje longitudinal**, quedando una extremidad en cada mitad.
Posición anatómica:	De la mano. Considera la mano en **supinación**, con los dedos y la palma extendida.
Posterior:	Orientación anatómica. Posición respecto a la parte de atrás del cuerpo.
Profundidad:	Dimensión perpendicular a la **longitud**, observada desde una vista **lateral** o **medial**.
Pronación:	Movimiento del antebrazo, que gira la mano para llevar la palma hacia la posición **posterior**.

Proximal:	Referencia anatómica. Posición de cercanía con respecto al origen de una estructura.
PWM:	Del inglés "pulse width modulation", modulación por ancho de pulso.
Radio:	Hueso alargado que se ubica en el antebrazo, bajo el dedo pulgar.
Articulación Radiocarpiana:	Articulación entre los huesos del carpo, y el hueso del radio. Punto de unión entre la muñeca y el antebrazo.
Supinación:	Movimiento del antebrazo, que gira la mano para llevar la palma hacia la posición **anterior**.
Tendón:	Conjunto de fibras que une los **músculos** a los huesos.
Trapecio:	Hueso de la fila **distal** del carpo, y que se articula con el metacarpiano del pulgar.

4 ÍNDICE

1 RESUMEN i

2 ABSTRACT ii

3 GLOSARIO iii

4 ÍNDICE ix

5 INTRODUCCIÓN xiii

6 OBJETIVOS xiv

6.1 Objetivo General xiv

6.2 Objetivos Específicos xiv

7 MARCO TEÓRICO 1

7.1 La Mano 1

7.2 El Antebrazo 4

7.3 LOS MOVIMIENTOS DE LA MANO 8

7.3.1 Movimientos de Flexión, Extensión y Abducción de la mano 9

7.3.2 Pronación y Supinación 13

7.4 MOVIMIENTO DE LOS DEDOS 15

7.4.1 Articulaciones metacarpofalángicas de los dedos 16

7.4.2 Músculos de la eminencia hipotenar 22

7.4.3 Movimientos de las falanges medial y distal 23

7.4.4 Músculos lumbricales 24

7.4.5 Capuchones Extensores 25

7.4.6 Movimientos del dedo pulgar 27

7.5 MÚSCULOS DEL ANTEBRAZO 31
7.5.1 MÚSCULOS DEL PLANO SUPERFICIAL DEL COMPARTIMENTO ANTERIOR DEL ANTEBRAZO 32
7.5.2 MÚSCULOS DEL PLANO INTERMEDIO DEL COMPARTIMENTO ANTERIOR DEL ANTEBRAZO 34
7.5.3 MÚSCULOS DEL PLANO PROFUNDO DEL COMPARTIMENTO ANTERIOR DEL ANTEBRAZO 36
7.5.4 PLANO SUPERFICIAL DEL COMPARTIMENTO POSTERIOR DEL ANTEBRAZO 38
7.5.5 PLANO PROFUNDO DEL COMPARTIMENTO POSTERIOR DEL ANTEBRAZO 42
7.6 DESARROLLOS DE MANOS ARTIFICIALES 46
7.6.1 Serie Gifu Hand [11] 47
7.6.2 UTAH/M.I.T. Dextrous Hand [12] 50
7.6.3 Mano Hábil por Shadow Robotics para Clawar [13] 51
7.6.4 Mano Hábil “Shadow” [14] 55
7.6.5 “Anatomically Correct Testbed (ACT) Hand” [15] 62
7.6.6 Mano antropomórfica, impresa en 3D con 20 grados de libertad. [16] 69
8 DESARROLLO DEL PROTOTIPO DE MANO ROBÓTICA 70
8.1 Necesidades 70
8.2 Categorización de Objetivos 71
8.3 Análisis de Restricciones 72
8.4 Análisis funcional 73
8.5 Especificaciones técnicas de ingeniería 75
8.5.1 Especificaciones Geométricas 75

8.5.2 Especificaciones de Desempeño 80
8.6 Búsqueda de tecnologías 81
8.7 Generación de conceptos 86
8.7.1 Concepto: La Mano 86
8.7.2 Concepto: El Accionamiento 91
8.7.3 Concepto: La Estructura 94
8.7.4 Concepto: Eléctrica 95
8.7.5 Concepto: El Control 96
8.7.6 Bocetos 96
8.8 Diseño Básico 102
8.8.1 Arquitectura basada en Funciones 103
8.8.2 Organización de componentes 104
8.9 Selección de componentes 106
8.9.1 Material de impresión 106
8.9.2 Servomotores 106
8.9.3 Cables Eléctricos 107
8.9.4 Tendones 108
8.9.5 Fuente eléctrica 109
8.9.6 Sujeción de partes de la mano 110
8.9.7 Sujeción de la estructura 110
8.9.8 Elementos para el control 111
8.10 Diseño General 111
8.11 Conexión Eléctrica y Electrónica 119
8.12 Propuesta de control 120

8.13 Mapa de servomotores 121
8.14 Prototipo 124
9 CONCLUSIONES 127
10 TRABAJOS FUTUROS 130
11 REFERENCIAS 131
12 ANEXOS 139
12.1 Anexo A 139
Desambigüación “Dextrous Hand” 139
12.2 Anexo B 141
Servomotores 141
12.3 Anexo C 142
Bocetos 142
12.4 Anexo D 157
Materiales de impresión 3D 157
12.5 Anexo E 158
Cálculo para selección de servomotores 158
12.6 Anexo F 172
Programa de control en Arduino 172

5 INTRODUCCIÓN

La idea de desarrollar una mano mecánica que posea la capacidad de moverse imitando lo más posible a una mano humana, nace como un requerimiento interno dentro del Departamento de Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María, para contar con un sistema en el que se pueda evaluar la necesidad y/o utilidad de ciertos movimientos en la realización de diferentes tareas cotidianas. De esta forma, se hace necesario un estudio general de la anatomía de la mano humana, y de sus movimientos, así como los métodos de actuación, que se centran principalmente en el concepto de que los músculos tiran de los huesos a través de los tendones; por lo tanto, los tendones se insertan o adhieren en puntos específicos del esqueleto, generando un movimiento que puede ser evaluado, tanto en magnitud, como en su forma. Además de esto, se buscan otros mecanismos, que han sido denominados en esta memoria como “manos hábiles”, en base al inglés “dexterous hand”, para evaluar los alcances de diseños logrados en el mercado. Finalmente, se logra construir una mano hábil que posee 24 grados de libertad, fabricada principalmente en impresión 3D, siendo capaz de imitar los movimientos de la mano humana.

6 OBJETIVOS

6.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y desarrollar una mano mecánica, que cumpla con los grados de libertad necesarios para ser utilizada como una herramienta cinemática para la emulación de los movimientos de la mano de una persona adulta.

6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Identificar el movimiento de la mano humana, así como la composición y sistemas biológicos que permiten sus movimientos.

Identificar, reconocer y analizar las manos artificiales utilizadas para estudios cinemáticos, así como sus componentes y medios de funcionamiento.

Definir y diseñar una mano artificial para emular el movimiento de una mano humana.

Construir un prototipo funcional de la mano artificial.

7 MARCO TEÓRICO

7.1 LA MANO

Se define mano a: “Parte del cuerpo humano unida a la extremidad del antebrazo y que comprende desde la muñeca hasta la punta de los dedos” [1]. Así mismo, el antebrazo se encuentra entre la articulación del codo (conectado al brazo) y la muñeca. La mano se considera como la parte distal a la articulación de la muñeca (Figura 7.1). [2]

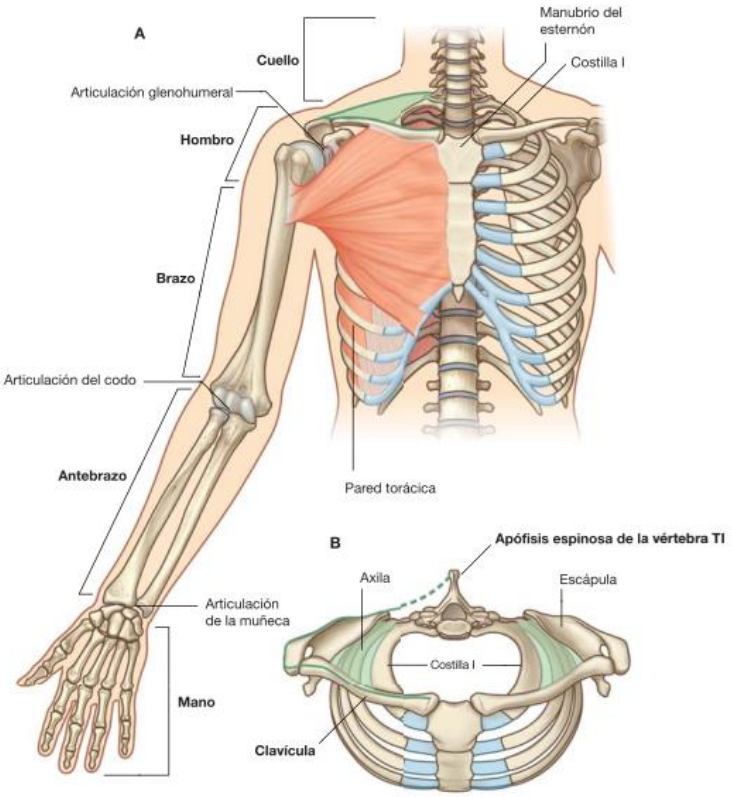

Figura 7.1: Vista anterior de la extremidad superior. [2]

La mano se subdivide en la muñeca (formada por ocho huesos del carpo), cinco metacarpianos (I a V, desde el pulgar hasta el dedo meñique) y los dedos, constituidos por las falanges (Figura 7.2). Los cinco dedos son el pulgar, en posición lateral, y los

cuatro dedos mediales a éste: índice, medio, anular y meñique. Los dedos poseen tres falanges (proximal, medial y distal; ordenadas según la cercanía con la articulación de la muñeca), mientras que el pulgar solo posee las falanges proximal y distal. Además, presenta una superficie anterior (palma) y una superficie dorsal o posterior (dorso de la mano). [2]

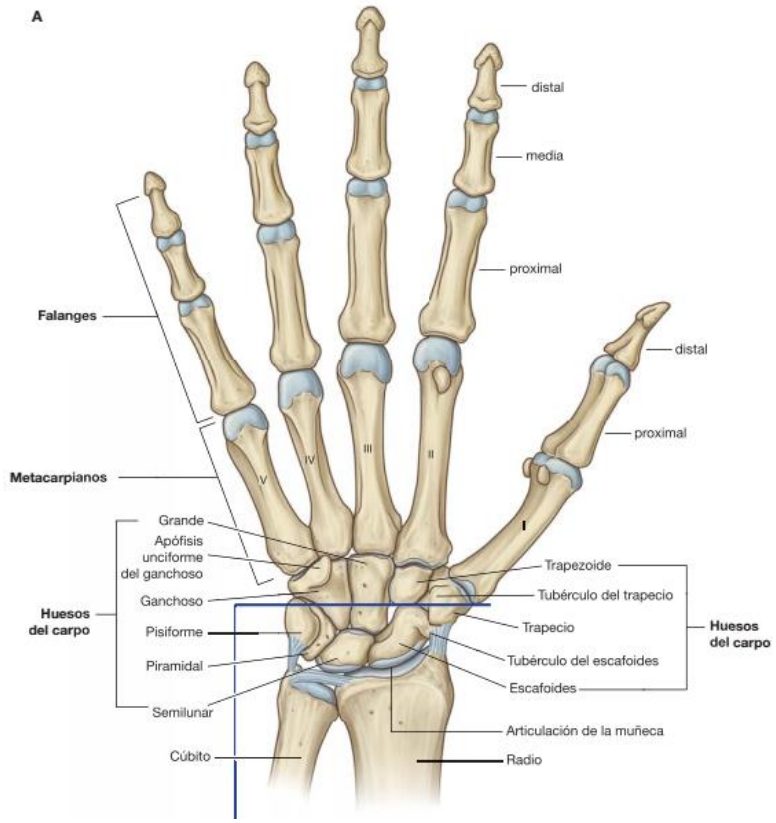

Figura 7.2: Huesos de la mano y la muñeca. Vista anterior. [2]

La fila proximal de los huesos del carpo, de manera lateral a medial, está formada por los huesos: escafoides, semilunar, piramidal, y pisiforme. La fila distal está formada por los huesos: trapecio (con cuatro lados y que se articula con el metacarpiano del pulgar), trapezoide, el grande (que se articula con la base del III metacarpiano, o metacarpiano del dedo medio) y el ganchoso (Figura 7.2). [2]

Cada uno de los metacarpianos se relaciona con un dedo; el I metacarpiano se relaciona con el pulgar, y los metacarpianos II a IV lo hacen con el dedo índice, medio, anular y meñique, respectivamente. [2]

Cada metacarpiano está formado, de forma proximal a distal, por una base (articulada con los huesos del carpo, y con las bases de los demás metacarpianos), una diáfisis (cuerpo) y una cabeza (articulada con las falanges proximales de los dedos). Cuando las falanges proximales de los dedos se flexionan, las cabezas de los metacarpianos forman los nudillos en la superficie dorsal de la mano. [2]

Además, cada falange se puede dividir en una base, una diáfisis y una cabeza, desde la posición proximal a la distal. La base de cada falange proximal se articula con la cabeza del hueso metacarpiano correspondiente. [2]

Cuando la mano se encuentra abierta, la palma se ubica en posición anterior. Lateralmente, posee dos eminencias: por el exterior, la eminencia tenar (en la base del pulgar) (Sección 7.4.6.2); por el interior (medial), la eminencia hipotenar (en la base del meñique) (Sección 7.4.2). [3]

7.2 EL ANTEBRAZO

El esqueleto óseo del antebrazo está formado por dos huesos paralelos, el radio y el cúbito (Figura 7.3 y Figura 7.4) [4]. Los músculos que pasan a través del antebrazo permiten los movimientos de la muñeca, además de la extensión y flexión de los dedos. [2]

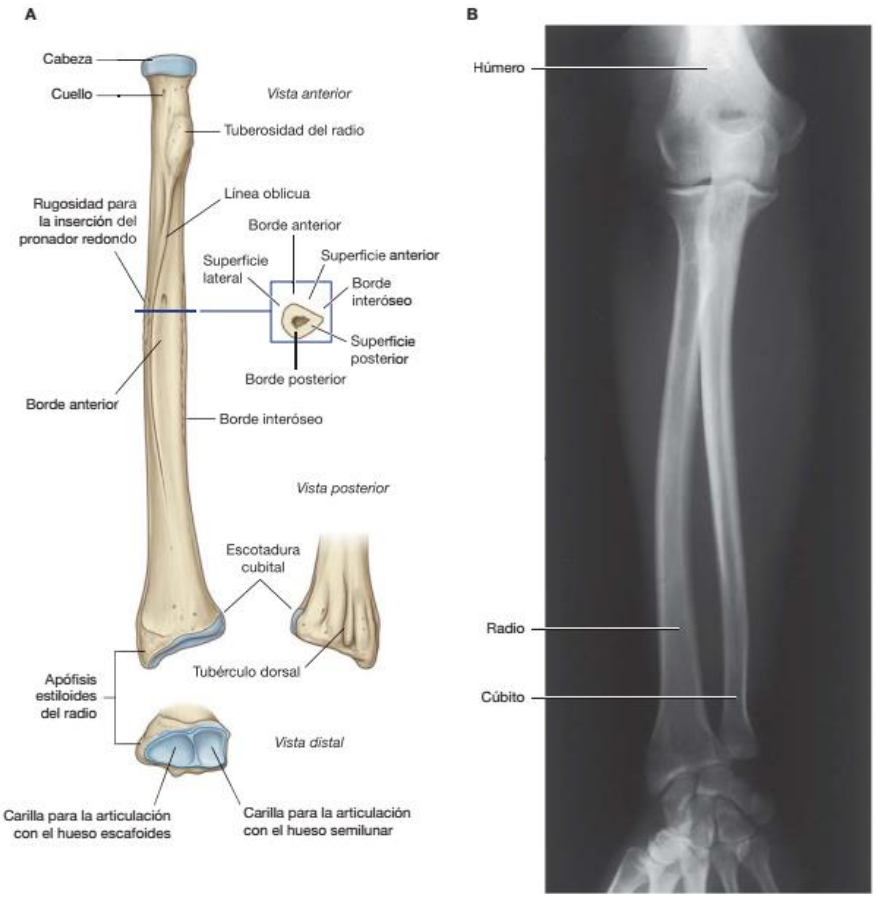

Figura 7.3: Radio. A. Diáfisis y extremo distal del radio derecho. B. Radiografía del antebrazo. [2]

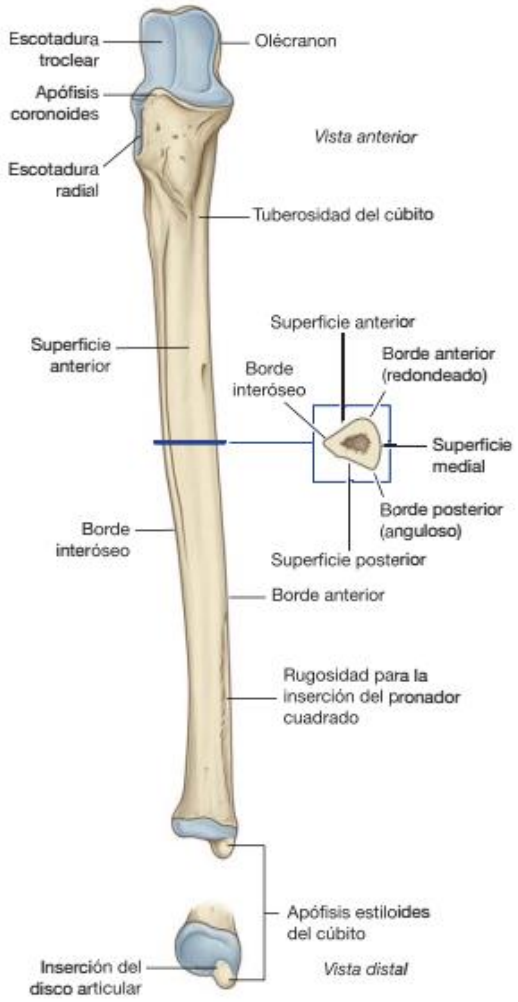

Figura 7.4: Diáfisis y extremo distal del cúbito derecho. [2]

El antebrazo está dividido en compartimentos anterior y posterior. [2]

Los músculos del compartimento anterior (flexor) del antebrazo se disponen en tres planos: superficial, intermedio y profundo. En general, estos músculos se asocian con:

- Movimientos de la articulación de la muñeca.
- Flexión de los dedos, incluido el pulgar.
- Pronación. [2]

Los músculos del compartimento posterior del antebrazo se disponen en dos planos: un plano superficial y un plano profundo. Estos músculos se relacionan con:

- Los movimientos de la articulación de la muñeca.
- La extensión de los dedos y del pulgar.
- La supinación. [2]

La mayor parte de los tendones que provienen desde el antebrazo, lo hacen a través del túnel del carpo, el que se ubica en la parte anterior de la muñeca (Figura 7.5), y está formado por un arco, constituido por los huesos del carpo y por el retináculo flexor (Figura 7.6). [2]

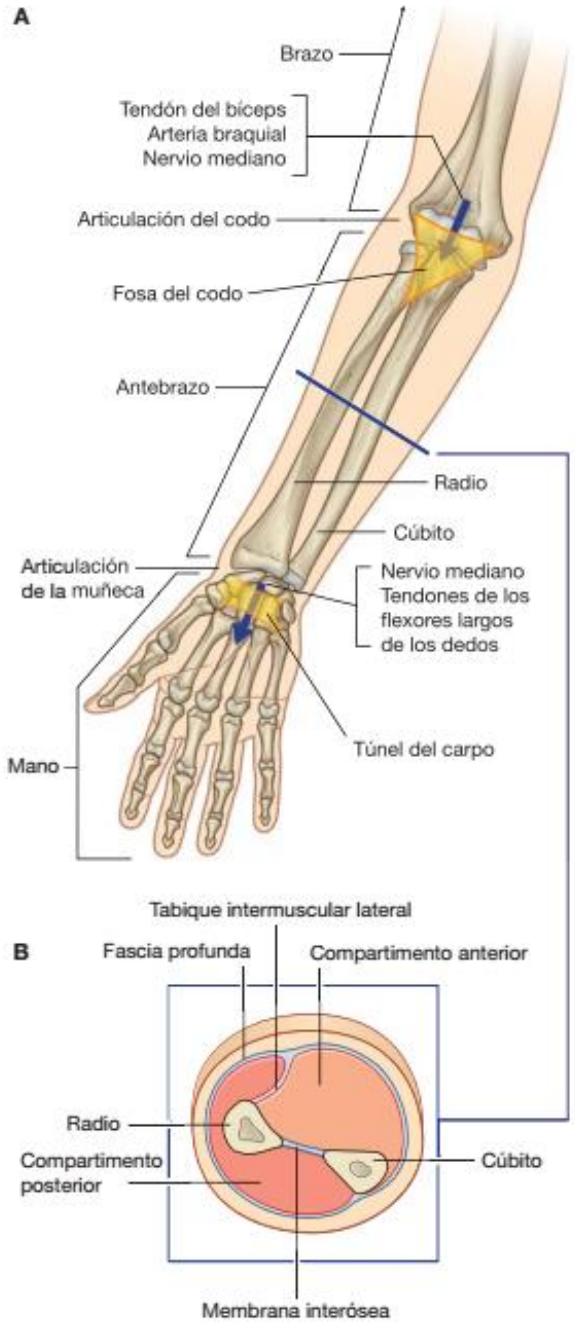

Figura 7.5: Antebrazo. A. Relaciones proximales y distales del antebrazo. B. Corte transversal a través de la zona medial del antebrazo. [2]

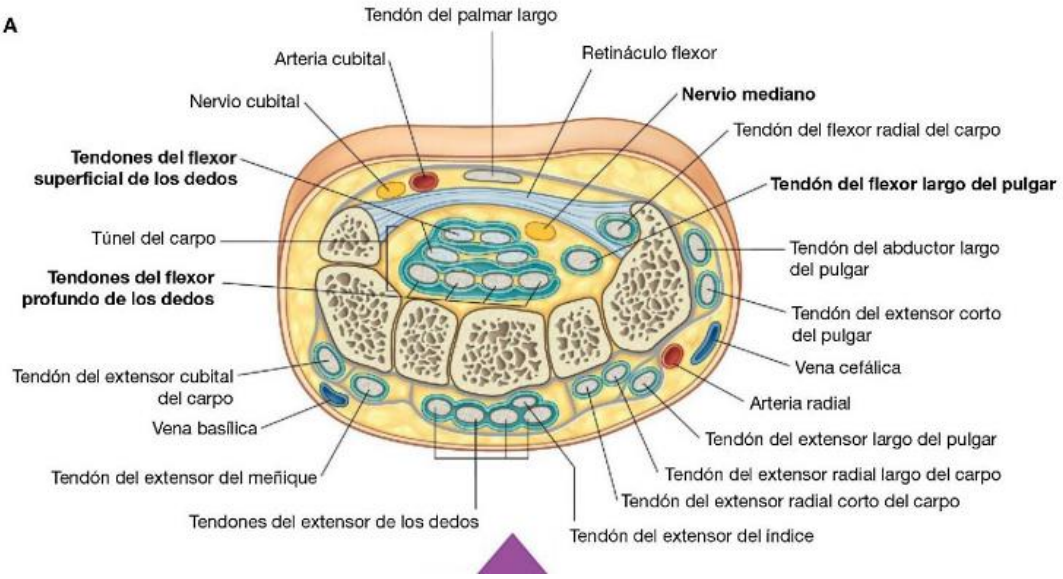

Figura 7.6: Estructura y relaciones del túnel del carpo. [2]

El retináculo flexor es un ligamento que cubre el espacio entre los extremos de la base del arco del carpo, y que lo transforma en el túnel del carpo. También, mantiene la posición de los tendones en la muñeca. [2]

7.3 LOS MOVIMIENTOS DE LA MANO

Una de las principales funciones de la mano es agarrar y manipular objetos. Para agarrar objetos se suele necesitar flexionar los dedos y enfrentarlos al pulgar. Según el tipo de agarre, los músculos actúan:

- Modificando la acción de los tendones largos, que llegan desde el antebrazo (Sección 7.5) y se insertan en los dedos de la mano.
- Combinando los movimientos de las articulaciones de cada dedo que no se pueden realizar mediante los tendones flexores y extensores largos que vienen del antebrazo (Sección 7.4). [5]

Los músculos intrínsecos de la mano que poseen funciones móviles son los músculos interóseos, el aductor del pulgar (Sección 7.4.6.1), músculos de la eminencia tenar (en la base del pulgar) (Sección 7.4.6.2), de la eminencia hipotenar (en la base del meñique) y los lumbricales (Sección 7.4.2 y 7.4.4). Estos músculos realizan movimientos de mayor precisión entre los dedos y el pulgar; diferenciándose de los músculos extrínsecos (que provienen del antebrazo y poseen funciones de agarre). [2]

7.3.1 MOVIMIENTOS DE FLEXIÓN, EXTENSIÓN Y ABDUCCIÓN DE LA MANO

Los movimientos de flexión, extensión, abducción y aducción (Figura 7.7) se realizan en los huesos del carpo de la muñeca; en las articulaciones radiocarpianas, mediocarpianas y carpometacarpianas; siendo determinadas a partir de la posición anatómica, es decir, en máxima supinación (con la palma apuntando de forma anterior) [4] [6].

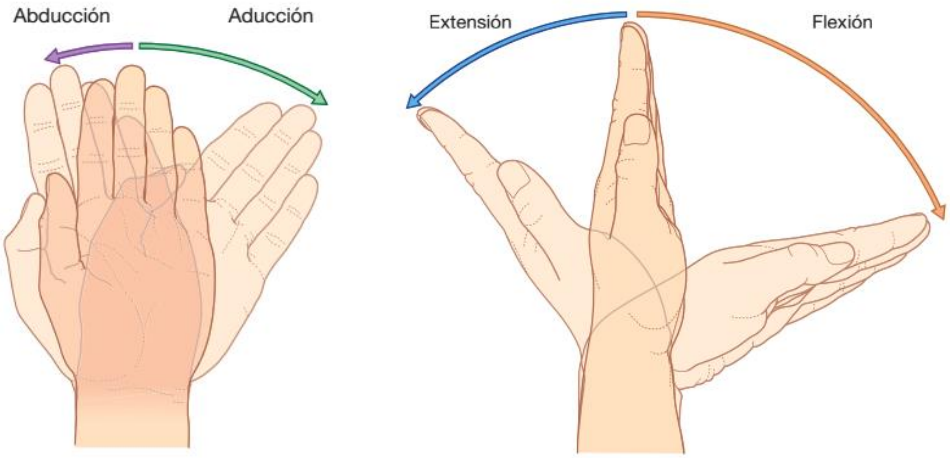

Figura 7.7: Movimientos de la mano, con respecto a la articulación de la muñeca. A la izquierda, abducción y aducción. A la derecha, extensión y flexión. [2]

El esqueleto carpiano es el que participa en los movimientos de la mano, excepto en la columna ósea del pulgar; que une el pulgar al radio por medio de los huesos trapecio y escafoides.[5]

La flexión de la mano (flexión palmar) es un movimiento que aproxima la palma a la cara anterior del antebrazo y, por otra parte, la extensión de la mano aleja la palma. [5]

La amplitud de los movimientos se mide a partir de la posición anatómica. [6]

La flexión alcanza 50 grados en la articulación radiocarpiana y 30 grados en la articulación mediocarpiana, con un total de 80 a 85 grados respecto al eje del antebrazo. Mientras que la extensión llega hasta 30 grados en la articulación radiocarpiana y hasta 50 grados en la articulación mediocarpiana pudiendo llegar, también, hasta los 85 grados. De esta forma, la articulación radiocarpiana tiene mayor efecto en la flexión y la articulación mediocarpiana en la extensión (Figura 7.8). [5] [6]

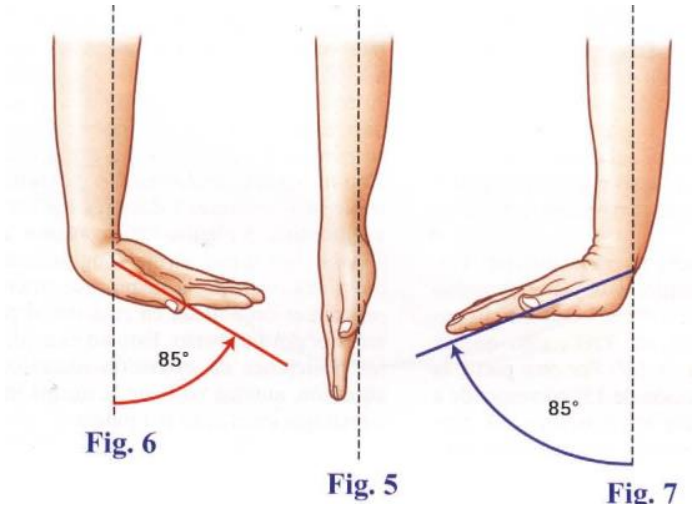

Figura 7.8: A la izquierda, movimiento de flexión. En la derecha, movimiento de extensión. Ambas tomadas con referencia a la posición anatómica de la mano (en el centro). [6]

Los músculos flexores de la mano son los tres músculos flexores de los dedos; el flexor superficial de los dedos (Sección 7.5.2.1), el flexor profundo de los dedos (Sección 7.5.3.1) y el flexor largo del pulgar (Sección 7.5.3.2). A estos músculos principales hay que añadir medialmente el músculo flexor cubital del carpo (Sección 7.5.1.1), así como el músculo flexor radial del carpo (Sección 7.5.1.3), que se fija en la base de los huesos metacarpianos II y III. Por último, hay que considerar accesoriamente la acción del músculo abductor largo del pulgar (Sección 7.5.5.2). [5]

Los músculos extensores de la mano o flexores dorsales están representados por los músculos: extensor de los dedos (sección 7.5.4.4), extensor del índice (sección 7.5.5.5) y, con menor importancia, el músculo extensor largo del pulgar (sección 7.5.5.2), en cambio, es más potente la acción del músculo extensor cubital del carpo (sección 7.5.4.6), el músculo extensor radial largo del carpo y el músculo extensor radial corto del carpo (secciones 7.5.4.2 y 7.5.4.3). [5]

La mano puede realizar una inclinación lateral (hacia el pulgar) o medial (hacia el meñique) respecto a un eje longitudinal que pasa a través del hueso grande, hasta el tercer hueso metacarpiano y el dedo medio. La inclinación hacia el lado radial (inclinación lateral) se denomina abducción radial de la mano, y la inclinación hacia el lado cubital (inclinación medial), se denomina abducción cubital (o aducción) de la mano. [5]

La amplitud del movimiento de abducción cubital puede considerarse de 40 a 45 grados en total. Debido a que la apófisis estiloides del radio se proyecta más distal que la apófisis estiloides del cúbito (Figura 7.3 y Figura 7.4), la mano se puede aducir dos a tres veces más de lo que se puede abducir de forma radial (15 grados aproximadamente). [5] [6]

En realidad, los movimientos naturales de la muñeca son movimientos combinados en torno a ejes oblicuos: flexión/aducción y extensión/abducción [6]. Y se efectúan según dos ejes principales. Por lo tanto, es posible considerar que los huesos del carpo se hallan unidos al radio por articulaciones elipsoideas o condíleas denominándose cóndilos carpianos, tanto para la articulación mediocarpiana, como la articulación radiocarpiana (Figura 7.9 A). [5]

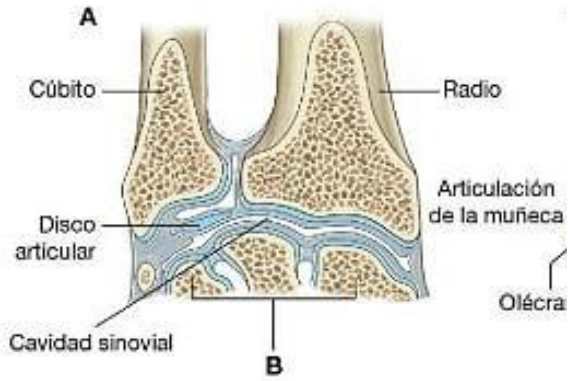

Figura 7.9: A. Articulación condilar (muñeca). B. Articulaciones planas (deslizantes) entre los huesos del carpo. [2]

Las articulaciones condíleas (elipsoides), son articulaciones sinoviales, que permiten el movimiento en torno a dos ejes perpendiculares, uno respecto del otro; regulan los movimientos de flexión, extensión, abducción y circunducción (la combinación de los cuatro movimientos anteriores). [7]

En su condición de articulaciones elipsoideas o condíleas, las dos filas de los huesos del carpo efectúan movimientos de flexión y extensión, siguiendo un eje transversal, y de abducción radial y cubital siguiendo un eje sagital perpendicular al anterior. En la abducción (radial y cubital), se produce, además, un movimiento de rotación alrededor de la cabeza del hueso grande. Debido a su situación central, la integridad de este hueso es fundamental para todos los movimientos de la mano. [5]

En las articulaciones sinoviales, las superficies óseas, normalmente, no contactan entre sí de forma directa (Figura 7.10), así mismo, se suelen describir de acuerdo a su forma. [7]

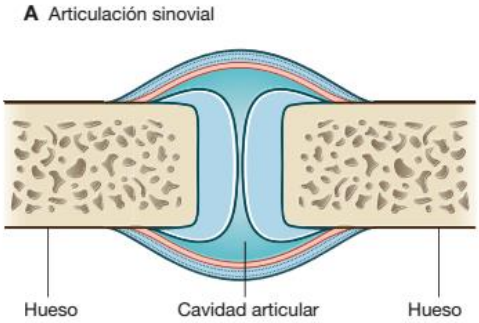

Figura 7.10: Articulación sinovial. [2]

Además, los huesos del carpo están estrechamente unidos por ligamentos interóseos, formando articulaciones sinoviales planas (Figura 7.9 A), y participan en la ejecución de los movimientos generales de la mano. [5]

Las articulaciones sinoviales planas (Figura 7.9 B), permiten movimientos de desplazamiento cuando un hueso se desplaza sobre la superficie de otro. [7]

7.3.2 PRONACIÓN Y SUPINACIÓN

La pronación y la supinación de la mano se producen completamente en el antebrazo, e implican la rotación del radio en el codo y el desplazamiento del extremo distal del radio sobre el cúbito. [2]

Hay dos músculos que supinan (posicionar la palma en forma anterior) y dos músculos que pronan (posicionar la palma en forma posterior) la mano (Figura 7.11). [2]

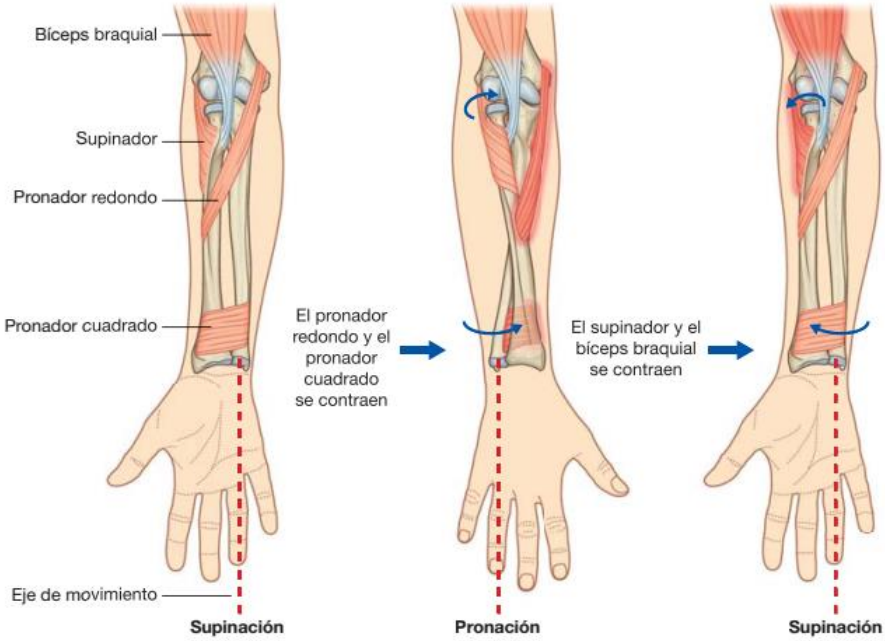

Figura 7.11: Pronación y supinación. [2]

Los músculos supinadores son: el músculo bíceps braquial y el supinador. Así mismo, los músculos pronadores son: el pronador cuadrado y el pronador redondo. [2]

El músculo bíceps braquial es un potente supinador, además de ser flexor de la articulación del codo. [2]

El supinador (sección 7.5.5.1) rodea y se inserta en el radio. El tendón del músculo bíceps braquial y del músculo supinador envuelven el extremo proximal del radio cuando la mano está en pronación. Cuando se contraen, se desenvuelven del hueso y producen la supinación de la mano. [2]

La pronación es consecuencia de la acción de los músculos pronador redondo y pronador cuadrado. Cuando estos músculos se contraen, desplazan el extremo distal del radio sobre el cúbito, y así consiguen la pronación de la mano. [2]

7.4 MOVIMIENTO DE LOS DEDOS

En la posición de reposo, los dedos forman una arcada flexionada y el índice es el dedo menos flexionado (Figura 7.12). En la posición anatómica, los dedos están extendidos y el eje longitudinal del pulgar se encuentra rotado en 90 grados con respecto del resto de los dedos, con la yema del pulgar apuntando en sentido medial; por tanto, los movimientos de flexión de las falanges del pulgar se definen de manera perpendicular respecto a los movimientos de los otros dedos de la mano. [2]

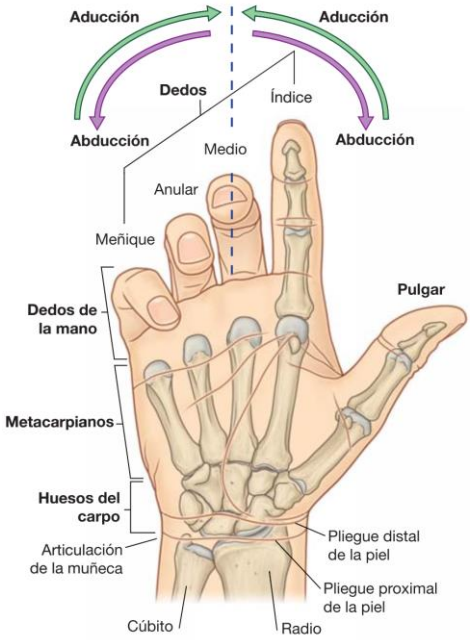

Figura 7.12: Mano. Los dedos se muestran en la posición normal de reposo, formando una arcada debido a su flexión. [2]

Gracias a las articulaciones carpometacarpianas en el II a V metacarpiano, y los huesos del carpo, la mano puede realizar movimientos intrínsecos que modifican su forma. [5]

Las articulaciones carpometacarpianas de los dedos son menos móviles que la articulación carpometacarpiana del pulgar, y solo permiten deslizamientos limitados. El movimiento de las articulaciones más mediales (cercanas al cuerpo con la palma en posición anterior) es mayor que el de las articulaciones laterales, de modo que el V metacarpiano (metacarpiano del dedo meñique) se desliza más que los demás. [2]

7.4.1 ARTICULACIONES METACARPOFALÁNGICAS DE LOS DEDOS

Las articulaciones entre las cabezas distales de los metacarpianos y las falanges proximales (articulaciones metacarpofalángicas) son esferoideas o condíleas; por lo tanto, sus movimientos se efectúan en tres ejes: flexión-extensión, abducción-aducción y una rotación limitada. [2] [5]

La cápsula de estas articulaciones se encuentra reforzada por el ligamento palmar y los ligamentos colaterales medial y lateral (Figura 7.13). [2]

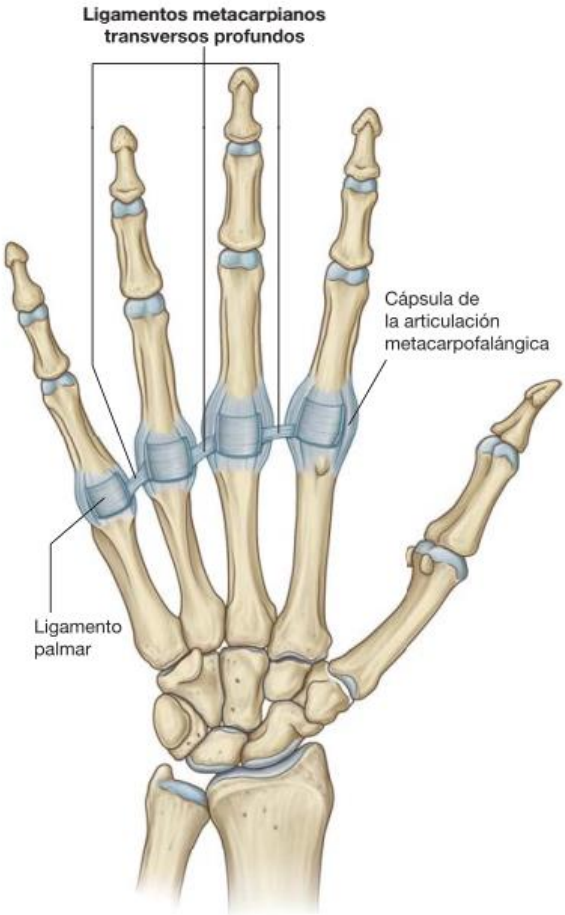

Figura 7.13: Ligamento**s** metacarpianos transversos profundos uniendo los ligamento**s** palmares, que restringen el movimiento de las cabezas de las cabezas de los metacarpianos II a V. [2]

Tres ligamentos metacarpianos transversos profundos conectan los ligamento**s** palmares de las articulaciones metacarpofalángicas de los dedos entre sí. Al mantener las cabezas de los metacarpianos, limitan los movimientos de estos huesos entre sí, colaborando en la formación de un esqueleto óseo unificado en la palma de la mano. [2]

La ausencia del ligamento metacarpiano transverso profundo entre el ligamento palmar de la articulación metacarpofalángica del pulgar y el ligamento palmar del dedo índice,

además de la presencia de una articulación en silla de montar entre el I metacarpiano y el trapecio, permite la independencia del pulgar, permitiendo su mayor movilidad respecto al resto de los dedos de la mano. [2]

7.4.1.1 Flexión-Extensión

Este movimiento se efectúa alrededor de un eje transversal. En la posición anatómica, la falange proximal del dedo se encuentra inicialmente en extensión, en la prolongación del hueso metacarpiano correspondiente. Cuando se produce una extensión provocada y pasiva, la falange se sitúa en un plano posterior al que ocupaba originalmente. [5]

El movimiento de extensión alcanza normalmente una amplitud de 30 a 40 grados (Figura 7.14), pero puede llegar a 90 grados en hiperextensión, como consecuencia de un apoyo forzado (extensión pasiva) (Figura 7.15). [3] [5]

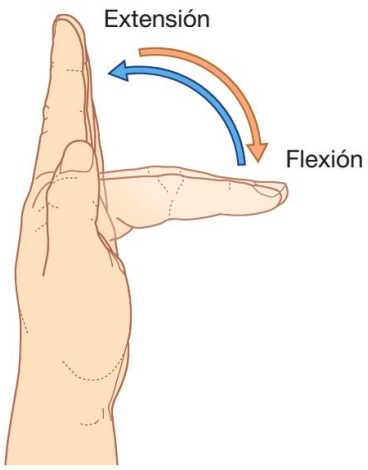

Figura 7.14: Movimientos de flexión y extensión de las falanges proximales. [2]

Figura 7.15: Hiperextensión de las falanges proximales, mediante un apoyo externo. [3]

En la flexión de la falange proximal, la base se desliza bajo la cara palmar de la cabeza de hueso metacarpiano. Este movimiento alcanza normalmente 90° (Figura 7.14). [3] [5]

Debido a la musculatura propia del dedo meñique, el hueso metacarpiano de este dedo es susceptible a desplazarse anteriormente de 20 a 25 grados. [5]

7.4.1.2 Abducción-Aducción de los dedos

El eje longitudinal de la mano pasa por el tercer hueso metacarpiano y por el dedo medio. La abducción, aleja los dedos de esta línea, mientras que la aducción los aproxima. [5]

La función de aducir y abducir los dedos proviene de los músculos interóseos, dorsales y palmares. La inserción de estos músculos se produce en la falange proximal de cada uno de los dedos y en el capuchón extensor; debido a esto, también colaboran en los movimientos de extensión y flexión (Figura 7.16 y Figura 7.17). [2] [5]

Los músculos interóseos dorsales son los músculos situados más dorsalmente de todos los músculos intrínsecos de la mano. Existen cuatro músculos interóseos ubicados entre

las diáfisis de los metacarpianos adyacentes, e insertados en ellos. Además, se insertan en la base de la falange proximal y en el capuchón extensor del dedo correspondiente. [2]

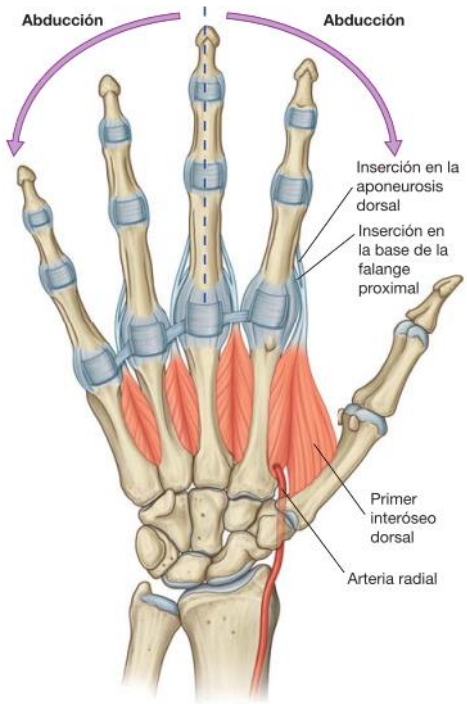

Figura 7.16: Músculos interóseos dorsales. Vista palmar. [2]

El dedo medio tiene músculos interóseos dorsales en ambos lados, por lo que se puede abducir en sentido medial y lateral, respecto de su eje longitudinal. [2]

Los dedos pulgar y meñique no cuentan con músculos interóseos dorsales, siendo el movimiento de abducción provocado por músculos abductores propios, pertenecientes a los grupos musculares de las eminencias tenar e hipotenar (Secciones 7.4.6.2 y 7.4.2 respectivamente). [2]

Los cuatro músculos interóseos palmares se encuentran anteriores a los interóseos dorsales, y se originan en los metacarpianos de los dedos con los que se relacionan (Figura 7.17). [2]

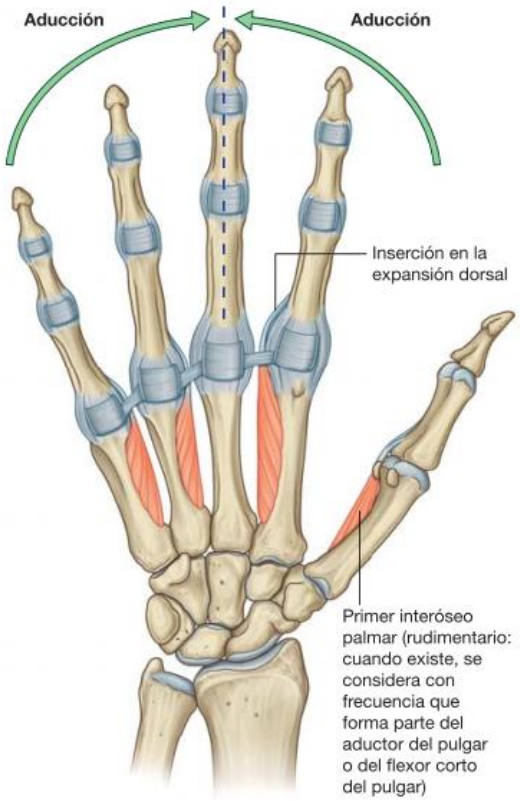

Figura 7.17: Músculos interóseos palmares. Vista palmar. [2]

El primer músculo interóseo palmar es rudimentario y se suele considerar como parte del flexor corto o del aductor del pulgar (sección 7.4.6). [2]

Los músculos interóseos palmares aducen los dedos, excepto el dedo medio; y como se insertan en los capuchones extensores, también producen movimientos de flexión y extensión en los dedos. [2]

La amplitud de los movimientos de abducción y aducción, son mayor cuando los dedos se hallan en extensión; pudiendo alcanzar hasta 60 grados para el dedo índice, y 45 grados para los dedos anular y meñique. [5]

Cuando los dedos se hallan en hiperextensión, disminuye la amplitud del movimiento; mientras que, cuando están flexionados, la abducción y la aducción no son posibles. [5]

7.4.1.3 Rotación

La rotación activa se considera imposible debido a la ausencia de músculos que la permitan, aunque se admite cierto grado de rotación, que permite la adaptación de los dedos a la forma del objeto que se desea tomar entre ellos. Así mismo, se pueden hacer girar los dedos pasivamente de 50 a 80 grados alrededor de su eje longitudinal. [3] [5]

7.4.2 MÚSCULOS DE LA EMINENCIA HIPOTENAR

Los músculos de la eminencia hipotenar son: el oponente del meñique, el abductor del meñique y el flexor corto del meñique. Estos músculos forman una prominencia muscular (eminencia hipotenar) situada en el extremo medial de la palma, en la base del dedo meñique. (Figura 7.18). [2]

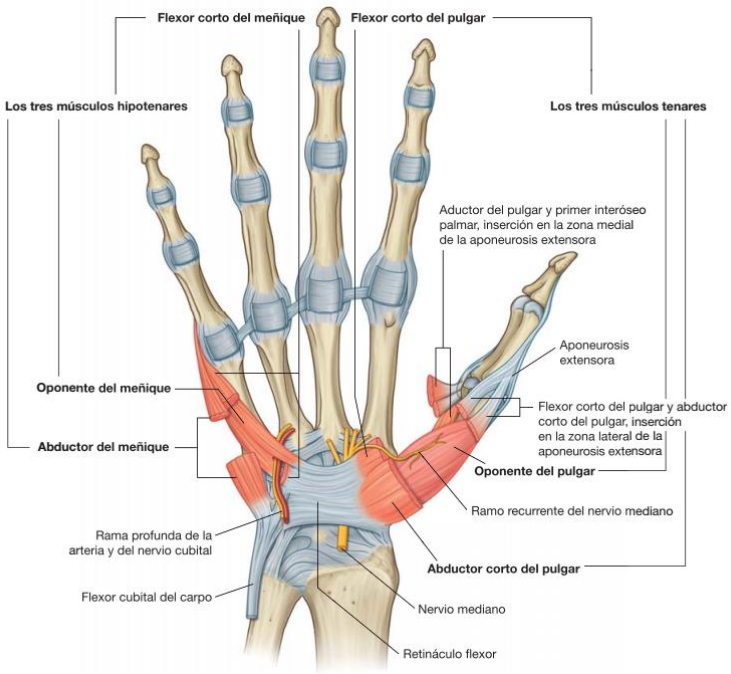

Figura 7.18: Músculos de la eminencia tenar e hipotenar de la mano. [2]

El abductor del meñique es responsable del movimiento de abducción de este dedo. [2]

El flexor corto del meñique es lateral al abductor del meñique y flexiona la articulación metacarpofalángica. Se inserta junto con el músculo abductor del meñique en la cara medial de la base de la falange proximal del meñique. [2] [5]

El músculo oponente del meñique es el encargado de enfrentar este dedo al pulgar y contribuye a elevar el borde cubital de la mano. [5]

7.4.3 MOVIMIENTOS DE LAS FALANGES MEDIAL Y DISTAL

Las articulaciones interfalángicas son articulaciones de un solo eje, pudiendo realizar un único par de movimientos voluntarios: la flexión-extensión. [5]

La flexión de la falange media sobre la falange proximal puede alcanzar casi los 110 a 130 grados. Por último, la flexión de la falange distal sobre la media presenta una amplitud de 65 a 90 grados (Figura 7.14). [5]

La falange media se flexiona por la acción del músculo flexor superficial de los dedos (Sección 7.5.2.1) e, indirectamente, por la del músculo profundo de los dedos (Sección 7.5.3.1). [5]

El movimiento de extensión posee un aparato más complejo: la falange media se extiende por acción de los músculos extensor de los dedos, extensor del índice y extensor del meñique (Secciones 7.5.4.4, 7.5.5.5 y 7.5.4.5, respectivamente), junto con la de los músculos interóseos. Los músculos lumbricales son flexores de la falange proximal y extensores de las falanges medial y distal. Los músculos: abductor corto del meñique y flexor corto del meñique participan en la extensión de la falange media. La falange distal tiene el mismo aparato extensor que la falange media. [5]

7.4.4 MÚSCULOS LUMBRICALES

Hay cuatro músculos lumbricales, relacionándose con cada uno de los dedos (no se considera el pulgar). Estos músculos se originan en los tendones del flexor profundo de los dedos, en la palma (Figura 7.19). [2]

Los músculos lumbricales se dirigen en sentido dorsal, rodeando la zona lateral de cada uno de los dedos, para insertarse en el capuchón extensor. Los tendones de los músculos lumbricales son anteriores a los ligamentos metacarpianos transversos profundos. [2]

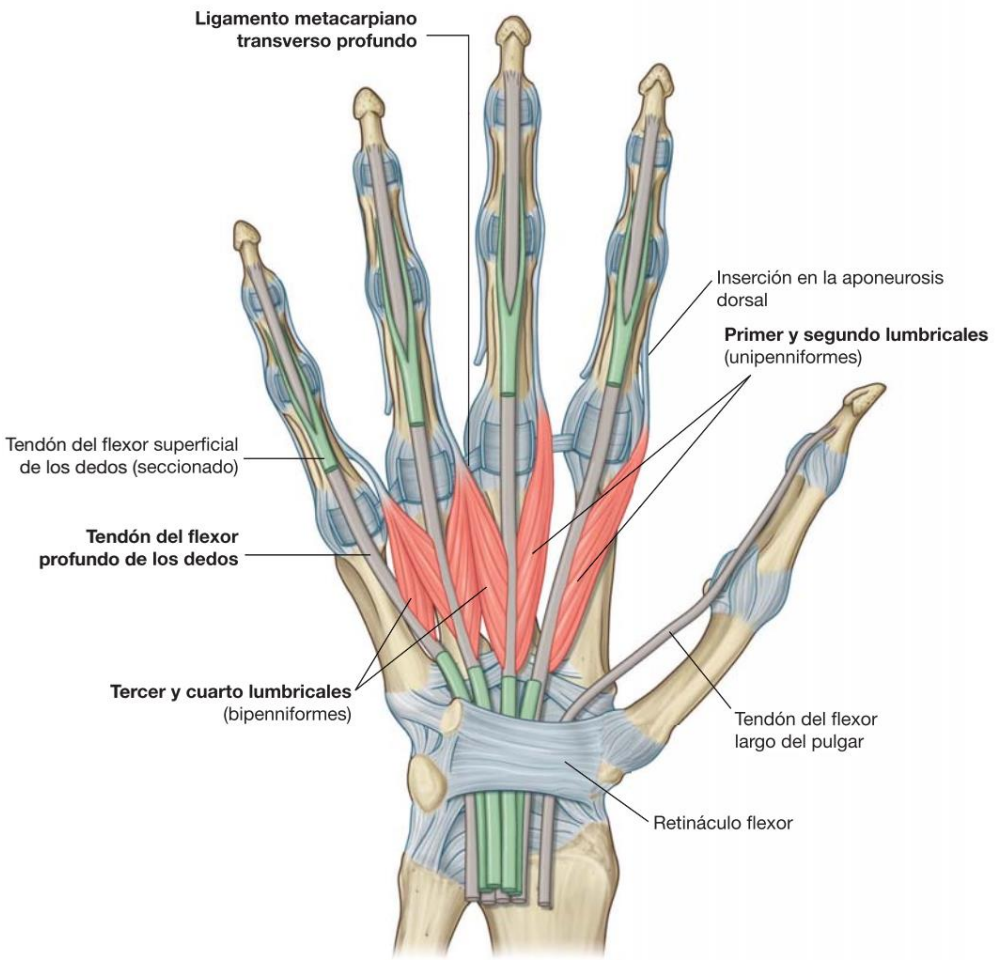

Figura 7.19: Músculos lumbricales. Vista palmar. [2]

7.4.5 CAPUCHONES EXTENSORES

Los tendones del extensor de los dedos y del extensor largo del pulgar (Secciones 7.5.4.4 y 7.5.5.4, respectivamente) pasan por la cara dorsal de los dedos y se expanden por las falanges proximales para formar capuchones extensores (Figura 7.20). Además, se unen en los capuchones: los tendones del extensor del dedo meñique (Sección 7.5.4.5), del extensor del índice (Sección 7.5.5.5) y del extensor corto del pulgar (Sección 7.5.5.3). [2]

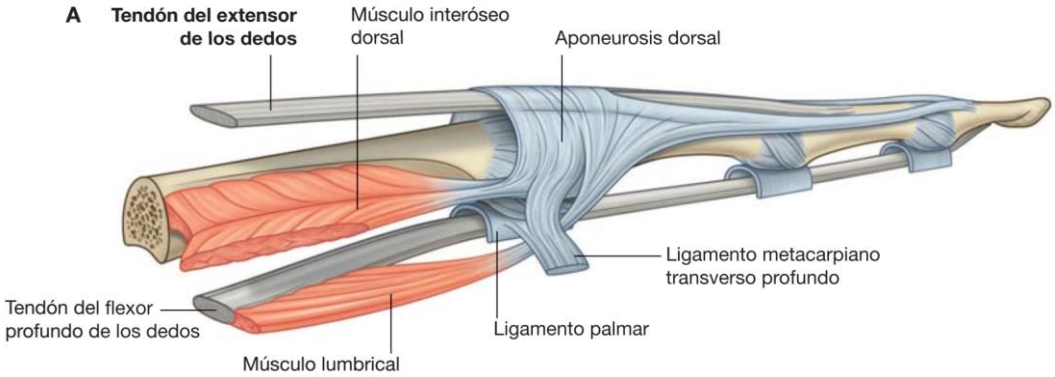

Figura 7.20: Capuchón extensor. [2]

Los capuchones tienen forma triangular y cuentan con: un vértice insertado en la falange distal, una zona central insertada en la falange medial (para los dedos índice, medio, anular y meñique) o en la proximal (para el pulgar). [2]

Muchos de los músculos intrínsecos de la mano se insertan en el borde libre del capuchón extensor, a cada lado. Al insertarse en esta zona, son responsables de los movimientos complejos y delicados de los dedos, que no podrían realizarse por los tendones flexores y extensores largos por sí mismos. [2]

En los dedos: índice, medio, anular y meñique, los músculos lumbricales, interóseos y el abductor del dedo meñique se insertan al capuchón extensor. En el pulgar, los músculos; aductor del pulgar y abductor corto del pulgar, lo hacen en el capuchón extensor y se anclan a él. [2]

La fuerza de los músculos intrínsecos de la mano se transmite al capuchón extensor en el fulcro de las articulaciones metacarpofalángicas, flexionando dichas articulaciones. Cuando la fuerza se transmite por la zona dorsal del capuchón se extienden las articulaciones interfalángicas (Figura 7.21), mientras que se flexiona la articulación metacarpofalángica. [2]

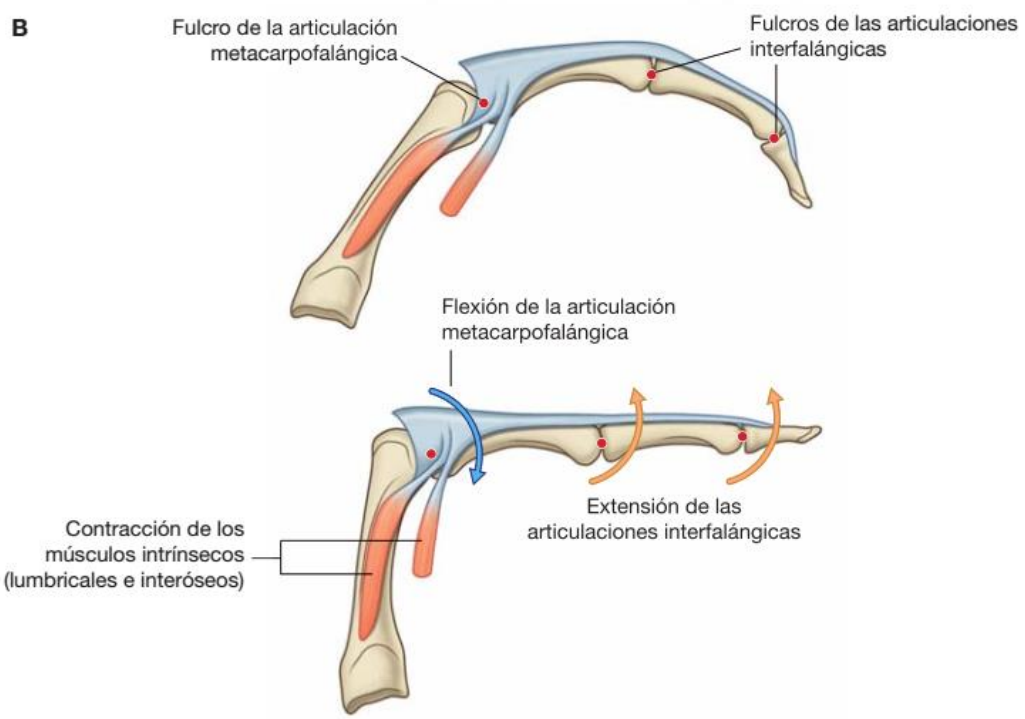

Figura 7.21: Capuchón extensor. La flexión y extensión se provocan al transmitir la fuerza de los músculos intrínsecos en el capuchón. [2]

7.4.6 MOVIMIENTOS DEL DEDO PULGAR

"El dedo pulgar es el agente de la pinza pulgar-dedos. Sin él, los movimientos de los dedos constituirían solo prensiones globales en vez de movimientos precisos." [5]

La columna del dedo pulgar sigue el lado lateral de la mano; y alcanza la parte media de la primera falange del dedo índice [3]. Este conjunto óseo comprende los huesos escafoides, trapecio, el primer hueso metacarpiano y las dos falanges del pulgar (proximal y distal). En la articulación carpometacarpiana del pulgar (articulación trapeciometacarpiana), se forma una articulación en silla de montar [2] que confiere al dedo pulgar su orientación en el espacio y su posibilidad de rotación automática. [5].

Las articulaciones en silla de montar (Figura 7.22), son articulaciones sinoviales, permiten el movimiento en torno a dos ejes que se hallan en ángulo recto, uno respecto del otro; las superficies articulares tienen forma de silla de montar y regulan los movimientos de flexión, extensión, abducción. [2]

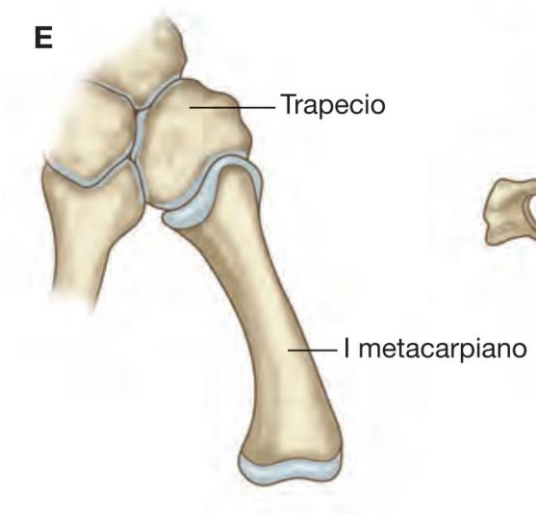

Figura 7.22: Articulación tipo silla de montar (carpometacarpiana del pulgar o trapeciometacarpiana). [2]

Las demás articulaciones metacarpofalángicas e interfalángicas producen la flexión y extensión del dedo pulgar. [5]

El dedo pulgar puede efectuar dos pares de movimientos principales, en torno a dos ejes no perpendiculares:

- Abducción-Aducción, cuyo eje pasa por la base del metacarpo del pulgar.
- Flexión-Extensión, cuyo eje pasa por el trapecio.

Ambos movimientos se realizan en base a ejes no perpendiculares, que forman un ángulo de 72,7±8,4 grados [8].

No obstante, gran parte de la bibliografía no refleja los movimientos del pulgar según la manera anterior, e indican sus desplazamientos de forma medial (alejar el pulgar del índice, o abrir la mano), de hasta 40 grados (otra bibliografía considera que este movimiento se puede realizar hasta los 80 grados [9]), u oposición (proyectar el pulgar acercándolo al resto de los dedos), de hasta 60 grados. [5]

En el caso de la separación del pulgar hacia el frente de la palma, tiene una magnitud de unos 70 grados. [9]

7.4.6.1 Aductor del pulgar

El músculo aductor del pulgar es un músculo de forma triangular que cruza la palma, en una posición anterior a los músculos interóseos (Figura 7.23). [2]

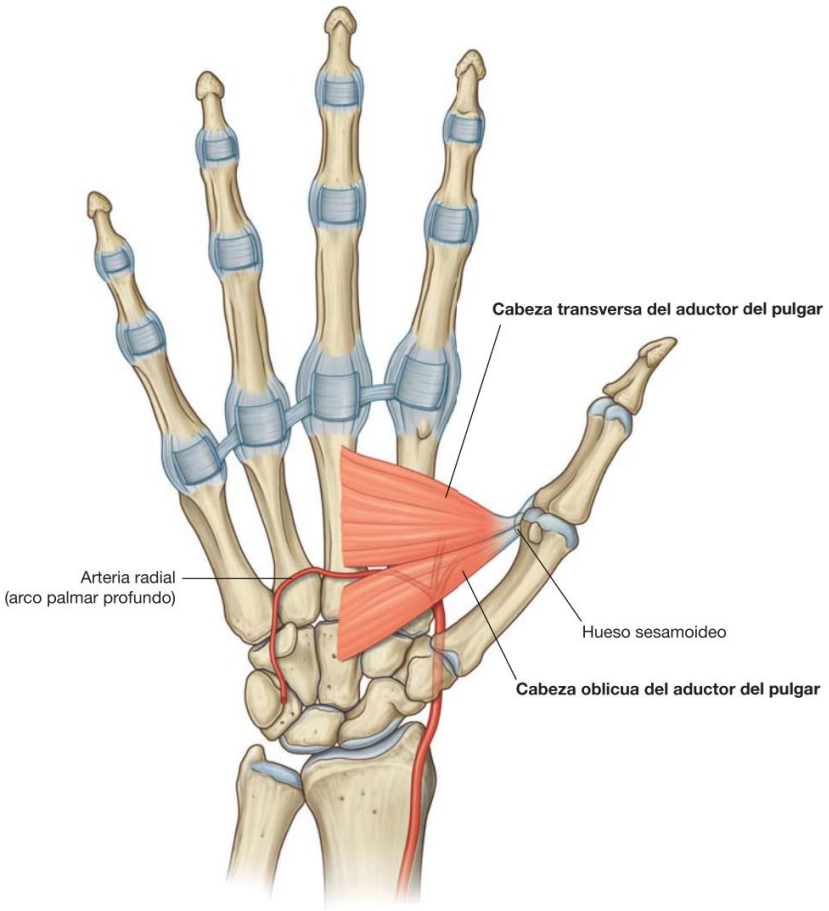

Figura 7.23: Músculo aductor del pulgar. [2]

El músculo aductor del pulgar converge en la zona lateral y forma un tendón. Se inserta en la cara medial de la base de la falange proximal del pulgar y en el capuchón extensor. Este músculo también apoya en la oposición del dedo pulgar con respecto a los demás durante el agarre. [2]

7.4.6.2 Músculos de la eminencia tenar

Los músculos: el oponente del pulgar, el flexor corto del pulgar, y el abductor corto del pulgar, conforman la prominencia muscular en la zona lateral de la palma, en la base del pulgar, denominada eminencia tenar (Figura 7.18). [2]

El músculo oponente del pulgar es el mayor músculo de la eminencia tenar, y se ubica en profundidad a los otros dos. Se inserta en el margen lateral del I metacarpiano y en la superficie palmar de éste (Figura 7.18). [2]

El oponente del pulgar rota y flexiona el I metacarpiano sobre el trapecio, situando la yema del pulgar, enfrentándola a la de los otros dedos. [2]

El músculo abductor corto del pulgar se ubica sobre el oponente del pulgar y es proximal al músculo flexor corto del pulgar (Figura 7.18). Este músculo abduce el primer dedo, principalmente en la articulación metacarpofalángica. [2]

El músculo flexor corto del pulgar se sitúa distal al abductor corto del pulgar (Figura 7.18) y flexiona la articulación metacarpofalángica del primer dedo. [2]

7.5 MÚSCULOS DEL ANTEBRAZO

Además de los músculos intrínsecos de la mano, existen músculos extrínsecos que provienen del antebrazo, y apoyan a los músculos intrínsecos en la realización de movimientos menos precisos y realización de movimientos propios del antebrazo como lo es el par pronación-supinación (pronosupinación), al mismo tiempo que actúan sobre la articulación de la muñeca. [6]

Los músculos del antebrazo se dividen en dos compartimentos, compartimento anterior, y compartimento posterior; el compartimento anterior posee tres planos: plano superficial, plano intermedio y plano profundo (Secciones 7.5.1, 7.5.2 y 7.5.3, respectivamente); en el caso del compartimento posterior, se encuentra el plano superficial y plano profundo (Secciones 7.5.4 y 7.5.5).

7.5.1 MÚSCULOS DEL PLANO SUPERFICIAL DEL COMPARTIMENTO ANTERIOR DEL ANTEBRAZO

Los cuatro músculos del plano superficial (flexor cubital del carpo, palmar largo, flexor radial del carpo y pronador redondo) se extienden distalmente desde el antebrazo hasta la mano, con excepción del pronador redondo (Figura 7.24). [2]

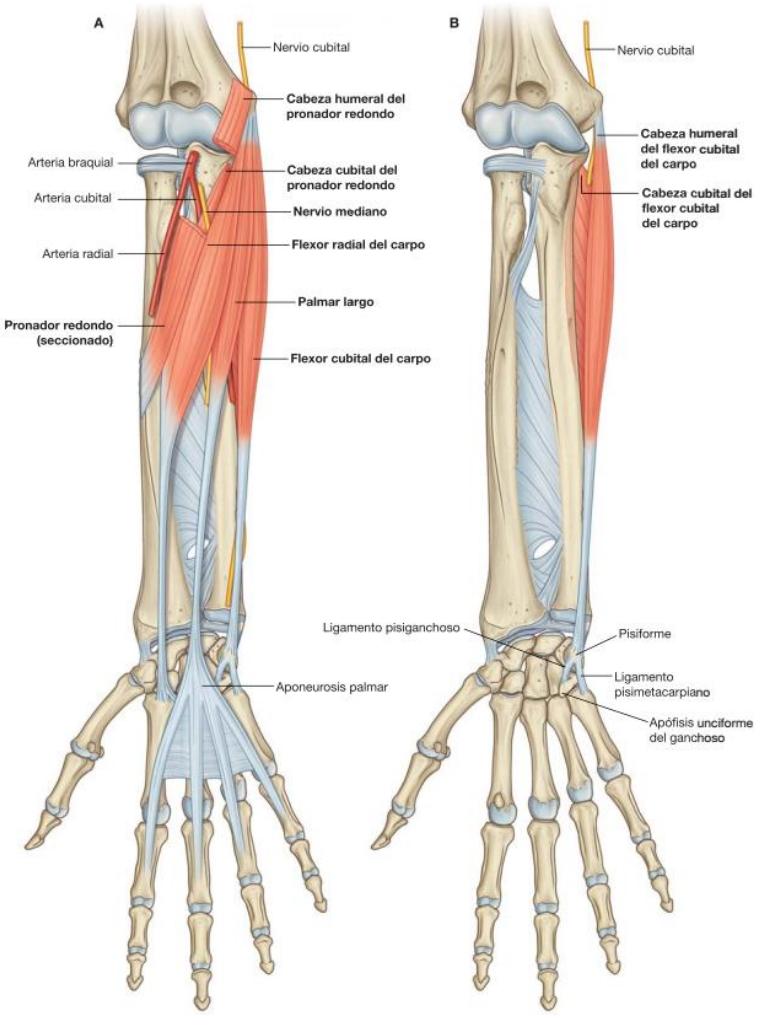

Figura 7.24: Músculos del plano superficial del antebrazo. A. Músculos superficiales B. Músculo flexor cubital del carpo. [2]

7.5.1.1 Flexor cubital del carpo

El flexor cubital del carpo es el más medial de los músculos flexores del plano superficial (Figura 7.24 B) y es un músculo flexor y aductor de la muñeca. Las fibras musculares convergen en un tendón que se dirige distalmente y se inserta en el hueso pisiforme de la muñeca. [2] [6]

7.5.1.2 Palmar largo

El músculo palmar largo, ausente en cerca del 15% de la población, se sitúa entre los músculos flexor cubital del carpo y flexor radial del carpo (Figura 7.24 A). Además de su función como flexor accesorio de la muñeca, también se opone a las fuerzas que desplazan la piel durante el agarre. Es un músculo con un tendón largo, que pasa por la mano y se inserta en el retináculo flexor. [2] [6]

7.5.1.3 Flexor radial del carpo

El músculo flexor radial del carpo se sitúa lateral al palmar largo, y tiene un tendón largo en la mitad distal del antebrazo (Figura 7.24 A), siendo el músculo capaz de flexionar la muñeca, y también abducir esta articulación. Su tendón se inserta en la cara anterior de la base del segundo metacarpiano, y de forma accesoria, en el trapecio y base del tercer metacarpiano. [2] [6]

7.5.1.4 Pronador redondo

El músculo pronador redondo cruza el antebrazo y se inserta en una zona rugosa ovalada, en la superficie lateral del radio, aproximadamente en el punto medio del hueso (Figura 7.24 A). El pronador redondo forma el borde medial de la fosa del codo y, durante la pronación, rota el radio sobre el cúbito. [2]

7.5.2 MÚSCULOS DEL PLANO INTERMEDIO DEL COMPARTIMENTO ANTERIOR DEL ANTEBRAZO

El músculo del plano intermedio del compartimento anterior del antebrazo es el músculo flexor superficial de los dedos (Figura 7.25).

7.5.2.1 Flexor superficial de los dedos

El flexor superficial de los dedos flexiona la articulación metacarpofalángica y la interfalángica proximal de cada dedo; también flexiona la articulación de la muñeca. [2]

En la zona distal del antebrazo, el flexor superficial de los dedos forma cuatro tendones, que pasan por el túnel del carpo de la muñeca y se dirigen a los dedos II a V. Cerca de la base de la falange proximal de cada dedo, el tendón del flexor superficial de los dedos se separa en dos partes que se dirigen dorsalmente, rodeando a cada lado el tendón del flexor profundo de los dedos, y al final se insertan en los bordes de la falange media (Figura 7.25). [2]

Figura 7.25: Músculos del plano intermedio del antebrazo. [2]

7.5.3 MÚSCULOS DEL PLANO PROFUNDO DEL COMPARTIMENTO ANTERIOR DEL ANTEBRAZO

En el compartimento anterior del antebrazo hay tres músculos profundos: el flexor profundo de los dedos, el flexor largo del pulgar y el pronador cuadrado (Figura 7.26).

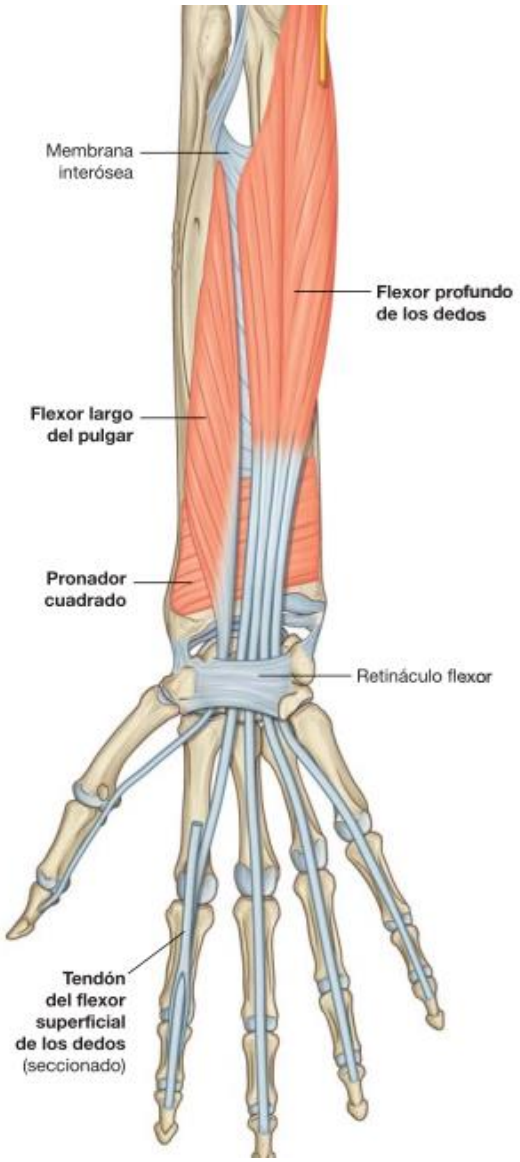

Figura 7.26: Músculos del plano profundo del antebrazo. [2]

7.5.3.1 Flexor profundo de los dedos

El músculo flexor profundo de los dedos se origina en las zonas anterior y medial del cúbito (Figura 7.26), y flexiona las articulaciones metacarpofalángicas e interfalángicas proximal y distal de los cuatro dedos. Origina cuatro tendones, que cruzan la muñeca (también puede flexionar dicha articulación); y pasan por el túnel del carpo dirigiéndose hacia los cuatro dedos mediales. [2]

7.5.3.2 Flexor largo del pulgar

El músculo flexor largo del pulgar se origina en la superficie anterior del radio y en la mitad adyacente de la superficie anterior de la membrana interósea (Figura 7.26), y flexiona el pulgar. El único tendón alargado de este músculo pasa por el túnel del carpo, lateral a los tendones del flexor superficial de los dedos y del flexor profundo de los dedos, y llega al pulgar, donde se inserta en la base de la falange distal. [2]

7.5.3.3 Pronador cuadrado

El pronador cuadrado es un músculo plano, de forma cuadrada, que se sitúa en la zona distal del antebrazo (Figura 7.26), el cual tira del extremo distal del radio para hacerlo desplazarse sobre el cúbito durante la pronación. Se origina en la superficie anterior del extremo inferior del cúbito y se dirige lateralmente para insertarse en la superficie anterior del radio. Se ubica en profundidad a los músculos flexor profundo de los dedos y flexor largo del pulgar, cuyos tendones le cruzan. [2]

7.5.4 PLANO SUPERFICIAL DEL COMPARTIMENTO POSTERIOR DEL ANTEBRAZO

En el plano superficial se hallan siete músculos: braquiorradial, extensor radial largo del carpo, extensor radial corto del carpo, extensor de los dedos, extensor del dedo meñique, extensor cubital del carpo y ancóneo (Figura 7.27). Todos presentan un origen común en la zona lateral del húmero. A excepción del braquiorradial y del ancóneo, todos alcanzan la mano en forma de tendones. [2]

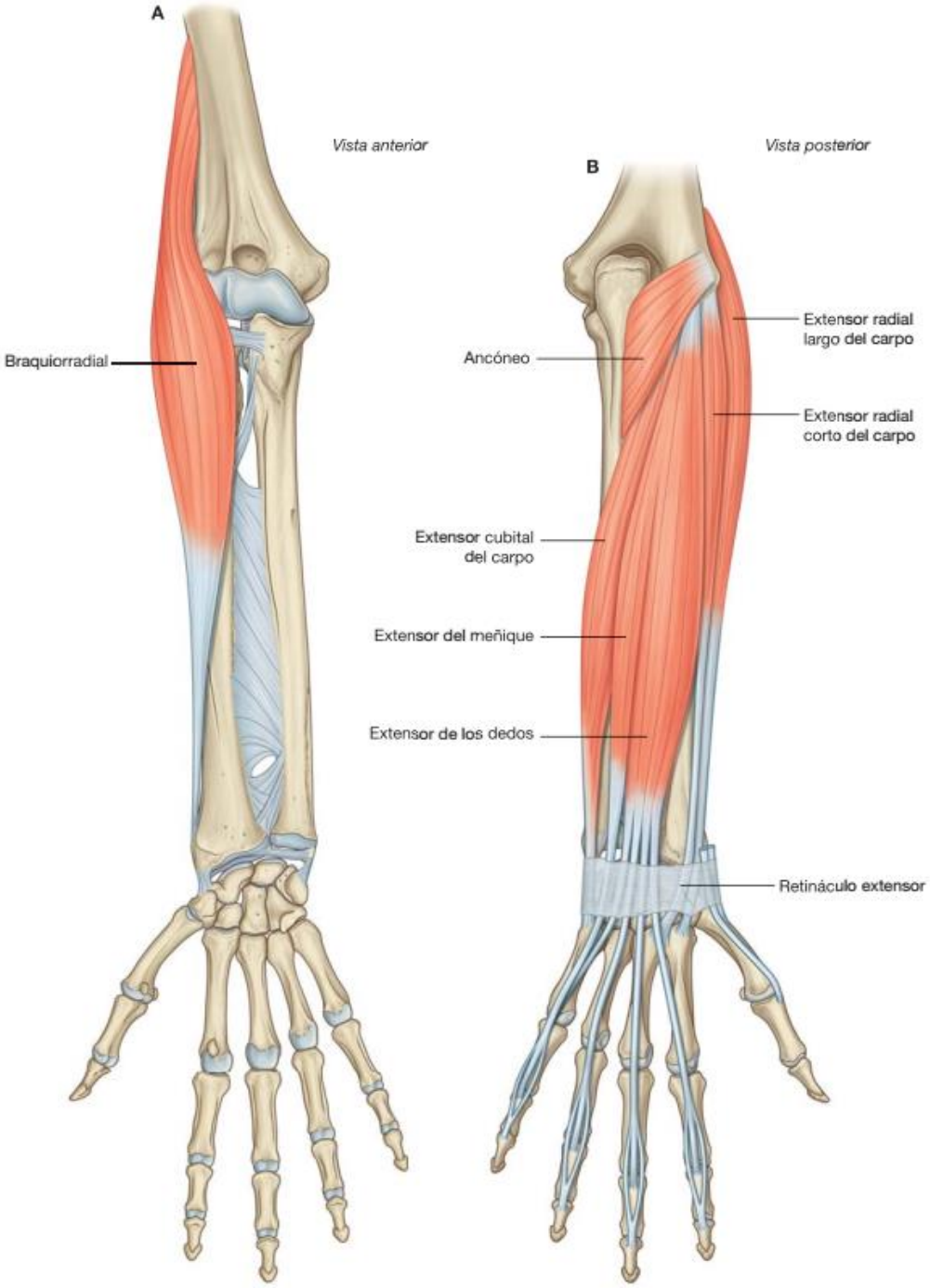

Figura 7.27: Músculos del plano superficial del compartimento posterior del antebrazo. A. Músculos superficiales (vista posterior) B. Músculo braquiorradial (vista anterior). [2]

7.5.4.1 Braquiorradial

El músculo braquiorradial discurre por el antebrazo para insertarse en la zona lateral del extremo distal del radio, inmediatamente proximal a la apófisis estiloides del radio (Figura 7.27). El músculo braquiorradial se sitúa anterior a la articulación del codo, por lo que actúa como un flexor accesorio de esta articulación, aunque se encuentre en el compartimento posterior del antebrazo. Su función es más eficaz cuando el antebrazo está en pronación media. [2]

7.5.4.2 Extensor radial largo del carpo

El músculo extensor radial largo del carpo se inserta en la superficie dorsal de la base del II metacarpiano (Figura 7.27). El extensor radial largo del carpo extiende y abduce la muñeca. [2]

7.5.4.3 Extensor radial corto del carpo

El tendón del músculo extensor radial corto del carpo se inserta en las superficies dorsales de las bases de los II y III metacarpianos (Figura 7.27). Se ubica profundo al extensor radial largo del carpo (en gran parte de su recorrido). El músculo extensor radial corto del carpo extiende y abduce la muñeca. [2]

7.5.4.4 Extensor de los dedos

El músculo extensor de los dedos es el principal extensor de los cuatro dedos mediales (índice, medio, anular y meñique). Se origina en la zona lateral del húmero y forma cuatro tendones, cada uno de los cuales se dirige a un dedo (Figura 7.27). En la superficie dorsal de la mano, los tendones adyacentes del extensor de los dedos se encuentran interconectados. En los dedos, cada tendón se inserta en la base de las

superficies dorsales de las falanges media y distal, mediante los capuchones extensores. [2]

7.5.4.5 Extensor del dedo meñique

El músculo extensor del dedo meñique es un extensor accesorio de dicho dedo; se sitúa medial al extensor de los dedos en el antebrazo (Figura 7.27). Tiene su origen en la zona lateral del húmero y se inserta, junto con el tendón del extensor de los dedos, en la sección dorsal del dedo meñique. [2]

7.5.4.6 Extensor cubital del carpo

El músculo extensor cubital del carpo se sitúa medial al extensor del dedo meñique (Figura 7.27). Su tendón se inserta en la cara medial de la base de V metacarpiano. El extensor cubital del carpo extiende y aduce la muñeca. [2] [6]

7.5.4.7 Ancóneo

El músculo ancóneo es el más medial de los extensores del plano superficial (Figura 7.27). Tiene forma triangular. Se origina en la parte lateral del húmero. Este músculo abduce el cúbito durante la pronación para mantener el centro de la palma en el mismo punto cuando se gira la mano. También se considera un extensor accesorio de la articulación del codo. [2]

7.5.5 PLANO PROFUNDO DEL COMPARTIMENTO POSTERIOR DEL ANTEBRAZO

El plano profundo del compartimento posterior del antebrazo está formado por cinco músculos: supinador, abductor largo del pulgar, extensor corto del pulgar, extensor largo del pulgar y extensor del índice (Figura 7.28). Con excepción del músculo supinador, todos estos músculos del plano profundo se originan en las superficies posteriores del radio, el cúbito y la membrana interósea, y se dirigen al pulgar y a los dedos:

- Tres de estos músculos (abductor largo, extensor corto y extensor largo del pulgar) salen entre los tendones del extensor de los dedos y del extensor radial corto del carpo, del plano superficial, para dirigirse al pulgar.
- Dos de los tres músculos que salen del plano más profundo (abductor largo del pulgar y extensor corto del pulgar) forman una masa muscular bien definida en la superficie posterior-lateral del antebrazo. [2]

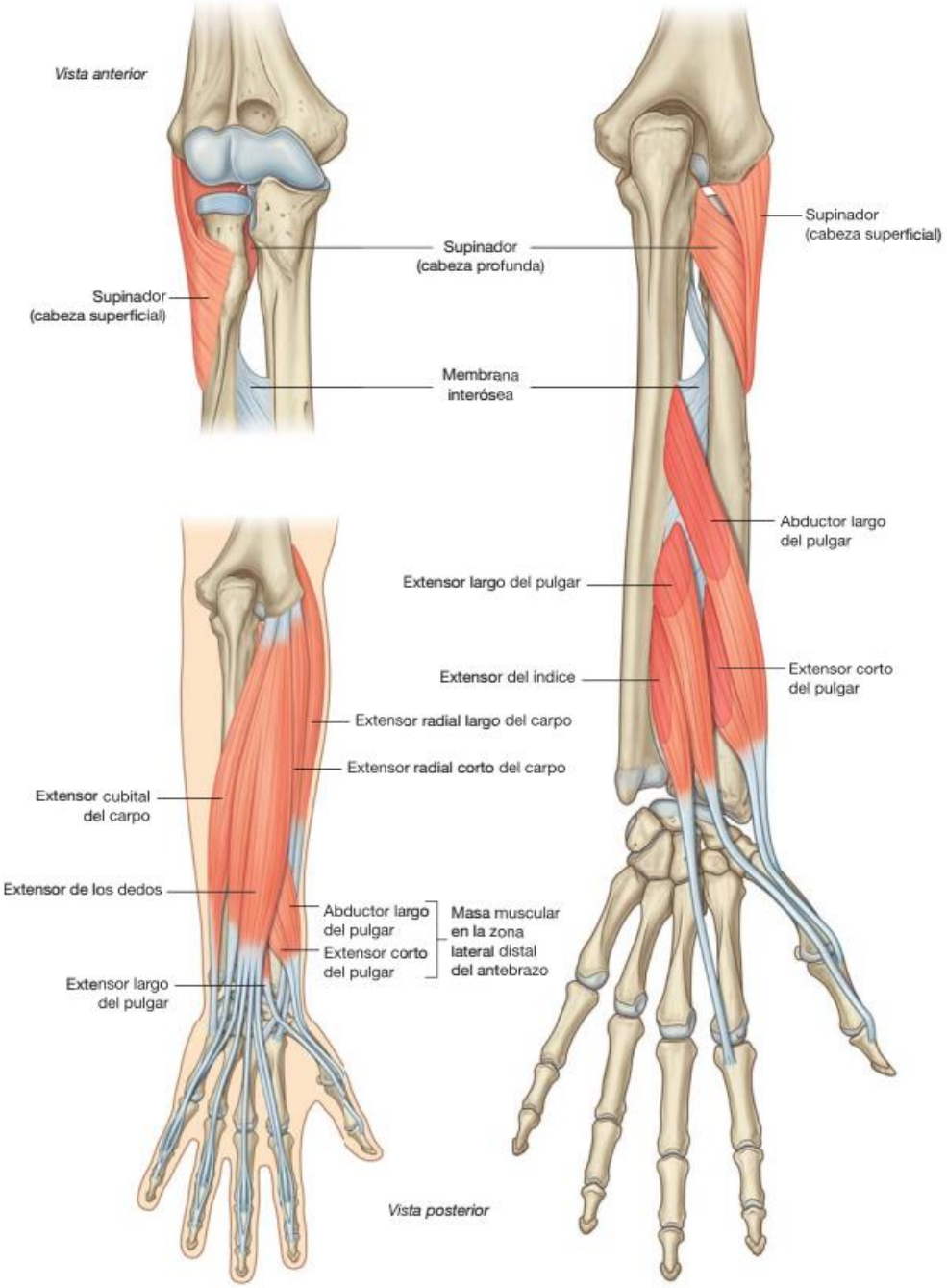

Figura 7.28: Músculos del plano profundo del compartimento posterior del antebrazo. [2]

7.5.5.1 Supinador

Desde su origen, envuelve el cuerpo del radio, para insertarse en la superficie lateral de este hueso (Figura 7.28). El músculo supinador supina el antebrazo y la mano. [2]

7.5.5.2 Abductor largo del pulgar

El músculo abductor largo del pulgar se origina en la superficie posterior de la zona proximal del radio y del cúbito (Figura 7.28). El tendón de este músculo se dirige al pulgar y se inserta en la cara lateral de la base del I metacarpiano. La función principal del abductor largo del pulgar es abducir el pulgar en la articulación entre el I metacarpiano y el hueso trapecio. [2]

7.5.5.3 Extensor corto del pulgar

El músculo extensor corto del pulgar se origina distal al origen del abductor largo del pulgar, en la superficie posterior del radio (Figura 7.28). Junto con el abductor largo del pulgar, sale entre los músculos extensor de los dedos y extensor radial corto del carpo. El tendón del extensor corto del pulgar se dirige al pulgar y se inserta en la superficie dorsal de la base de la falange proximal. El extensor corto del pulgar extiende las articulaciones metacarpofalángica y carpometacarpiana del pulgar. [2]

7.5.5.4 Extensor largo del pulgar

El músculo extensor largo del pulgar se origina en la superficie posterior del cúbito y se inserta en la superficie dorsal de la falange distal del pulgar, a través de un tendón largo (Figura 7.28). Al igual que el abductor largo del pulgar y el extensor corto del pulgar, el tendón de este músculo aparece entre los músculos extensor de los dedos y

extensor radial corto del carpo. El extensor largo del pulgar extiende todas las articulaciones del pulgar. [2]

7.5.5.5 Extensor del índice

El músculo extensor del índice es un extensor accesorio del dedo índice. Se origina en la superficie posterior del cúbito, distal al origen del extensor largo del pulgar (Figura 7.28). El tendón se dirige a la mano y se inserta en el capuchón extensor del dedo índice junto al tendón del extensor de los dedos. [2]

7.6 DESARROLLOS DE MANOS ARTIFICIALES

Las manos que se desarrollan con el propósito de imitar los movimientos de la mano humana suelen ser denominadas a través del inglés como “dextrous hands” o “dexterous hands”; y pueden incluir el término “robotic”.

El problema de la definición directa del inglés de la palabra “dexterity” (si “dextrous” corresponde al adjetivo, usado como “hábil” o “diestro”; “dexterity” sería el sustantivo, utilizado como destreza o habilidad), es su identificación con la capacidad de manipular un objeto; o simplemente, tratar a un objeto antropomórfico, con un sistema de dedos individualmente articulados, incluso si no ha sido capaz de realizar alguna actividad identificada como “dexterous task”. [10]

En el caso de la traducción directa del inglés al español de “dexterous”, se utilizan los términos diestro o hábil. De esta manera, en esta memoria, se preferirá identificar “dexterous hand” (o “dextrous hand”) con el término: “Mano artificial hábil”[1], para cualquier mano que haya sido fabricada, construida o sea accionada por un medio artificial, que se asemeje a una mano humana, tanto en forma como en movimiento.

Como las manos que se presentan a continuación, solo corresponden a manos que se identifican como “artificiales” según lo indicado en el párrafo anterior, simplemente serán llamadas “manos hábiles” en plural, y “mano hábil” en singular”.

---

[1] Para una desambiguación más detallada de los términos utilizados, y la preferencia por el término “Mano hábil”, el lector puede revisar el Anexo A.

7.6.1 SERIE GIFU HAND [11]

Gifu Hand III (Figura 7.29) es la versión modificada de Gifu Hand II, que apunta a ser utilizado como plataforma de manos robóticas para investigación.

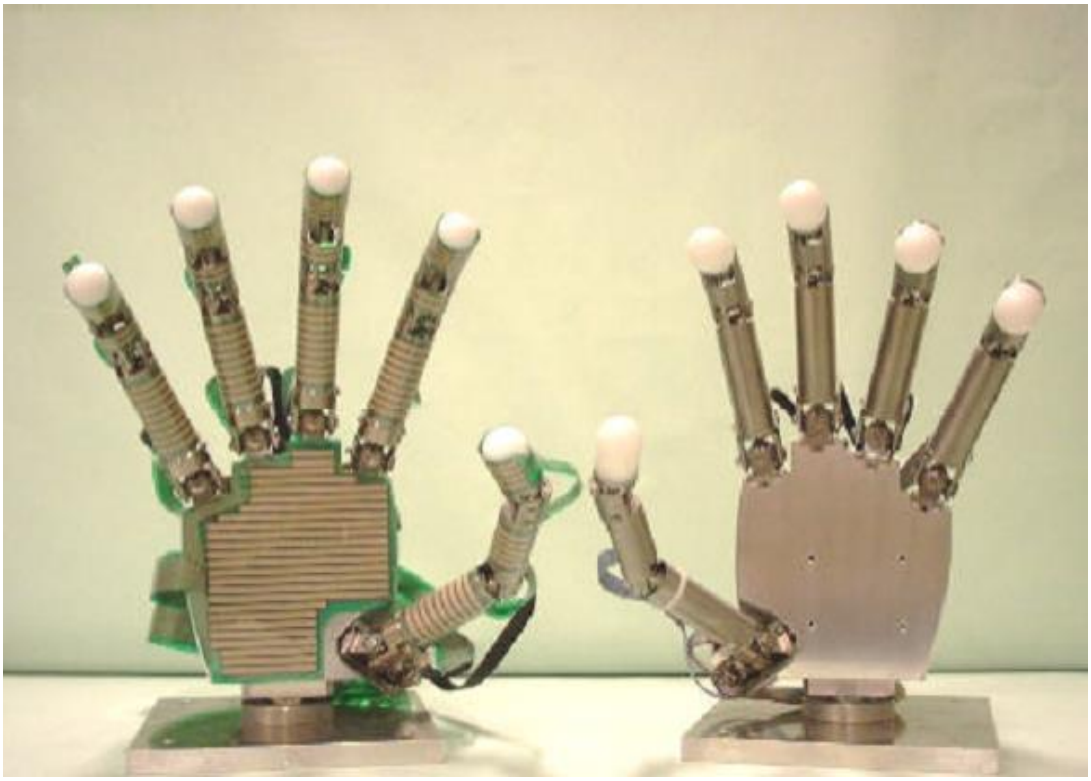

Figura 7.29: Mano hábil “Gifu Hand III”, desarrollo de manos izquierda y derecha por parte de Gifu University, en Japón. [11]

La mano posee motores en su interior (tanto en las falanges, como en la palma), presentando tres falanges para los dedos y dos falanges para el pulgar, además del metacarpo del pulgar. En la zona de la palma se incorporan los motores para los movimientos de abducción-aducción y flexión-extensión para los cinco dedos. El movimiento de los dedos se realiza mediante un sistema de transmisión de tornillo, que permite que los dedos se muevan de manera perpendicular al eje de giro del motor. (Figura 7.30).

La mano posee cinco dedos (pulgar incluido). Los dedos poseen cuatro articulaciones, con cuatro grados de libertad en el pulgar, y tres grados en los demás dedos. La primera articulación permite los movimientos de abducción y aducción; mientras que las demás articulaciones permiten la flexión y extensión de las falanges. La diferencia principal del pulgar es que la cuarta articulación (articulación interfalángica distal) funciona de manera independiente, mientras que la falange distal de los demás dedos es accionada por el tercer servomotor (servomotor ubicado en la falange medial) a través de un mecanismo de cuatro barras (Figura 7.30). Así, la mano Gifu Hand III posee 20 articulaciones con 16 grados de libertad.

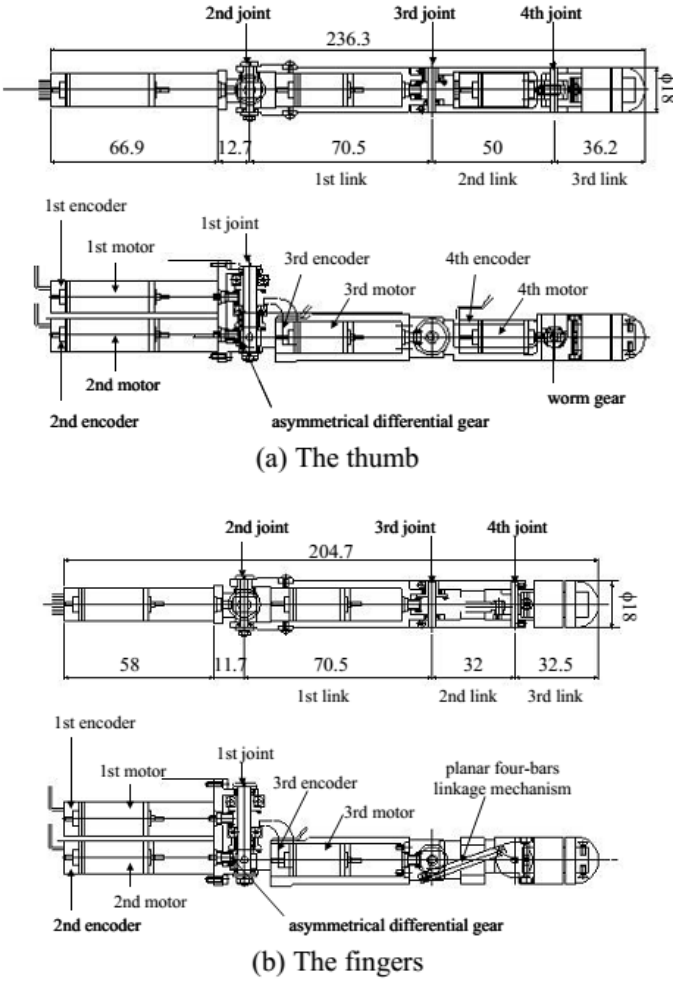

Figura 7.30: Mecanismos del pulgar y el resto de los dedos. [11]

Los ángulos de operación de las articulaciones se muestran en la Tabla 7.1:

Tabla 7.1: Posiciones angulares mínimas y máximas de las articulaciones de Gifu Hand III, con referencia a los dedos extendidos (posición anatómica).

Designación de Articulación	**Movimiento**	**Ángulo mínimo [°]**	**Ángulo máximo [°]**
1ª articulación (pulgar)	**Abducción-Aducción**	-28	28
1ª articulación (dedos)	**Abducción-Aducción**	-20	20
2ª articulación	**Flexión-Extensión**	-10	90
3ª articulación	**Flexión-Extensión**	-10	90
4ª articulación (solo en pulgar)	**Flexión-Extensión**	-10	90

En general, posee una longitud de 250 milímetros, un ancho palmar de 95 milímetros y una profundidad de unos 41 milímetros. El peso del pulgar es de 0,25 kilogramos-fuerza y 0,20 kilogramos-fuerza para el resto de los dedos; con esto, el peso total es de 1,4 kilogramos-fuerza (Figura 7.31).

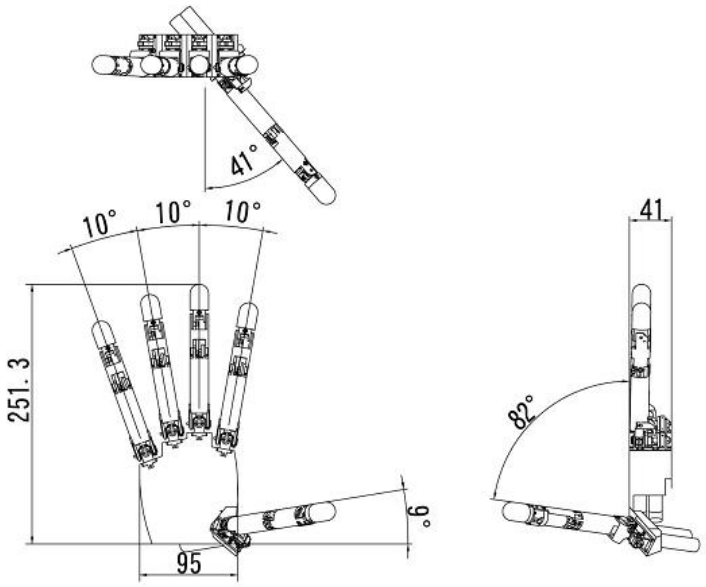

Figura 7.31: Estructura general de Gifu Hand III.

7.6.2 UTAH/M.I.T. DEXTROUS HAND [12]

El centro de ingeniería de diseño de la universidad de Utah (“Center for Engineering Design”) y el laboratorio de inteligencia artificial (“Artificial Intelligence Laboratory”) en el “Massachusetts Institute of Technology” han desarrollado un efector robótico destinado para funcionar como una herramienta de investigación de propósitos generales en los estudios de precisión en maquinaria.

El proyecto comenzó en 1982, con el desarrollo inicial de la mano mostrada en la Figura 7.32.

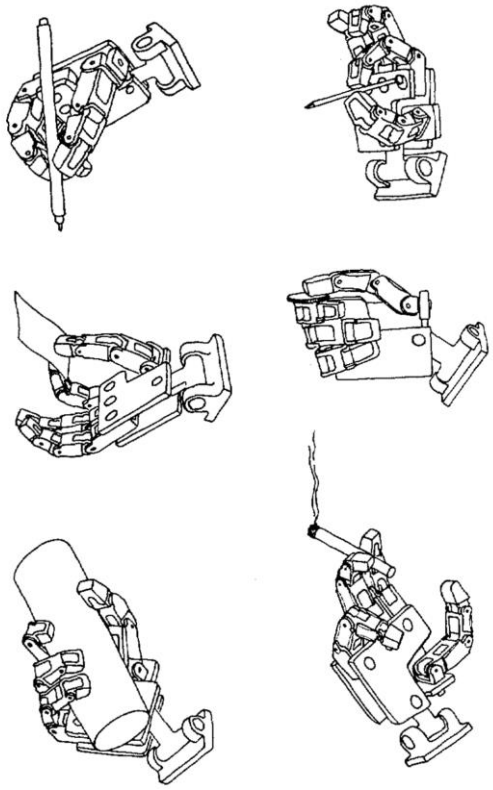

Figura 7.32: Configuración original, propuesta para la mano hábil: “Utah/M.I.T. Hand”. [12]

Desde ese tiempo, se ha logrado desarrollar una versión III, como el mostrado en las Figura 7.33.

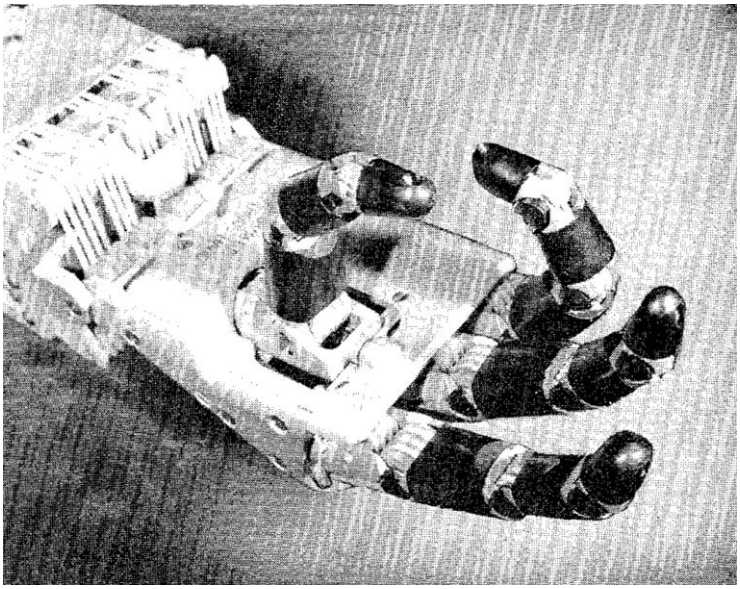

Figura 7.33: Fotografía de la versión III de la “Dextrous Hand”. [12]

7.6.3 MANO HÁBIL POR SHADOW ROBOTICS PARA CLAWAR [13]

El sistema de esta mano hábil fue provisto para entregar un rango de movimiento completo de la mano humana, con movimientos y precisión cercanos a lo humano.

El sistema puede ser visto de variadas formas, describiéndose a continuación la arquitectura como es percibida en Shadow Robot Company.

Los “músculos de aire” son utilizados para proveer una actuación compatible con el sistema, de manera compacta y ligera (Figura 7.34). Estos son empacados en el antebrazo. Esta estrategia reduce el trabajo de diseño necesario con el montaje de los actuadores, y permiten su reemplazo. Sistemas que han utilizado otros actuadores

parecen haber tenido problemas empacándolos en la estructura de los robots, o han utilizado un número reducido de actuadores. El uso de los músculos permite un gran número de actuadores a utilizar, sin embargo, requiere el uso de válvulas distribuidoras.

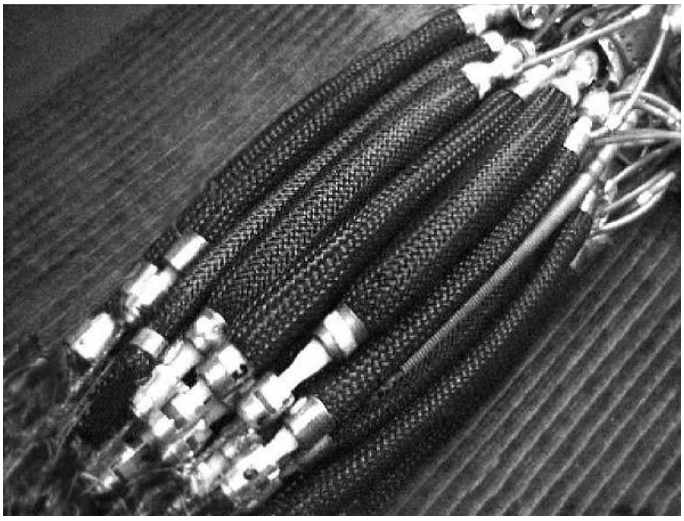

Figura 7.34: “Músculos de aire”, se ubican dentro del antebrazo en las manos diseñadas por Shadow Robot Company, en aquellas que utilizan este sistema. [13]

7.6.3.1 Mano A

El desarrollo original de la mano (“Hand A”) fue realizada principalmente en madera de arce. Posee una estructura esquelética similar a la de una mano, con huesos largos provenientes desde la muñeca, hacia la punta de los dedos; no obstante, esto hizo que la propagación de los movimientos fuera disímil a la forma humana.

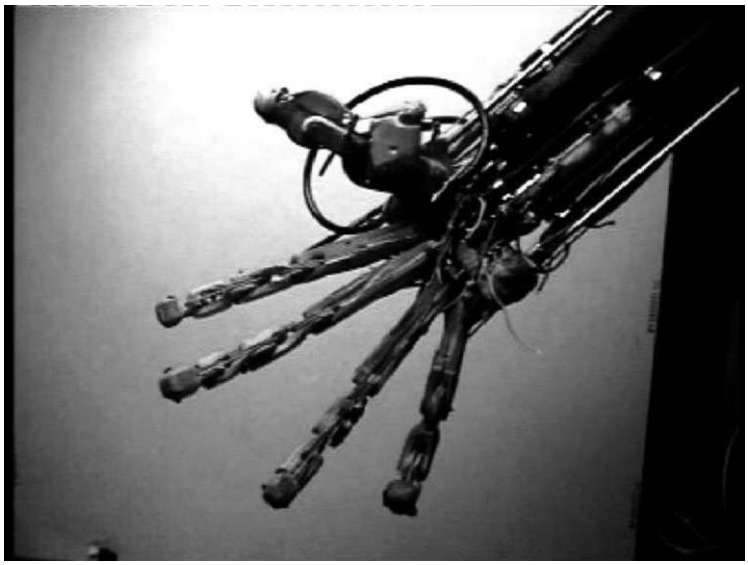

Figura 7.35: Estructura extendida de Mano A (Hand A) desarrollada por Shadow Robot Company. [13]

Se mostró que una palma en forma de caja, con un montaje separado para el dedo meñique (para otorgar un grado de libertad extra a este dedo), era más sencillo para trabajar, con una mejor precisión en el manejo de los movimientos. La decisión del sistema era de tener una mano con una palma divisible en tres partes, permitiendo cierto grado de cierre alrededor de los objetos a ser manipulados sin tener grandes complejidades mecánicas.

En esta versión, los actuadores están montados en el antebrazo.

7.6.3.2 Mano B

Con un desarrollo más extenso que su predecesora, Mano B (“Hand B”) (Figura 7.36) utiliza un diseño de placas plásticas paralelas para los dedos. El espaciamiento fue utilizado para anclar los tendones y montar resortes de devolución. Algunos tendones fueron dirigidos a través de los bordes de las placas en canales específicamente diseñados para modificar el efecto de la curva de contracción del músculo.

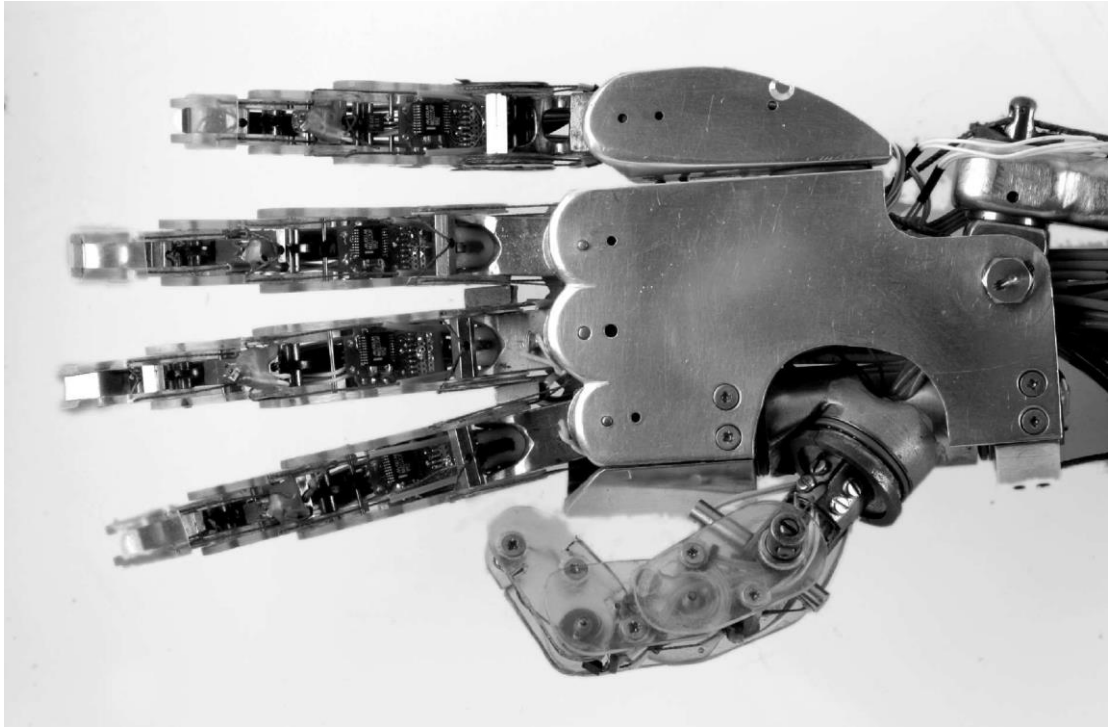

Figura 7.36: Diseño final de mano B (“Hand B”) desarrollado por Shadow Robot Company. [13]

La palma de la Mano B fue en forma de caja (Figura 7.37); un recuadro permitió la construcción de un pulgar de seis articulaciones.

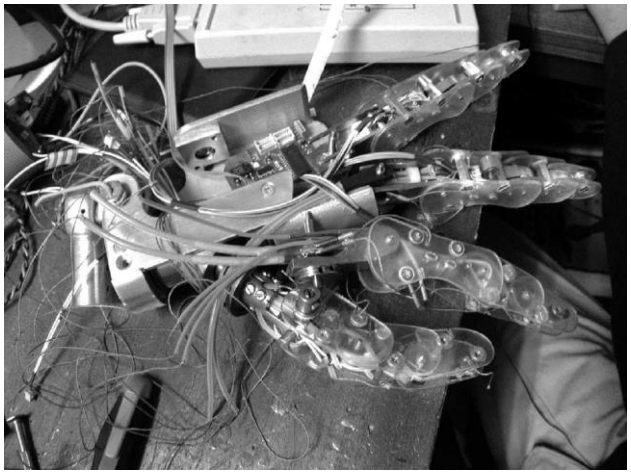

Figura 7.37: Estructura en forma de caja para la palma de la Mano B. [13]

Se utilizó una muñeca de dos articulaciones. La articulación misma fue ensamblada alrededor de un canal para los tendones, donde todos los tendones de la mano fueron guiados a través de este canal hacia sus respectivos dedos.

El canal, y varias otras guías, permitieron mantener el acople de movimientos entre dos articulaciones al mínimo, a costa de un aumento en la fricción de las articulaciones.

7.6.4 MANO HÁBIL "SHADOW" [14]

Del inglés "Shadow Dexterous Hand", de la Shadow Robot Company, es un sistema de mano humanoide robótica que provee de 24 pares de movimientos para reproducir la cinemática y precisión de la mano humana. Ha sido diseñada para proveer de fuerza y movimientos precisos, comparables con una mano real (Figura 7.38).

Figura 7.38: Mano hábil “Shadow” Serie E1, de Shadow Robot Company. [14]

Actualmente, la Shadow Dexterous Hand ha sido utilizada para investigación en agarre, manipulación, control neuronal, interfaz cerebro-computador, control industrial de calidad, y manejo de materiales peligrosos.

El diseño de la serie E1 de Shadow Dexterous Hand contempla dos accionamientos “motor inteligente” (Figura 7.38) o “músculo de aire” (Figura 7.39).

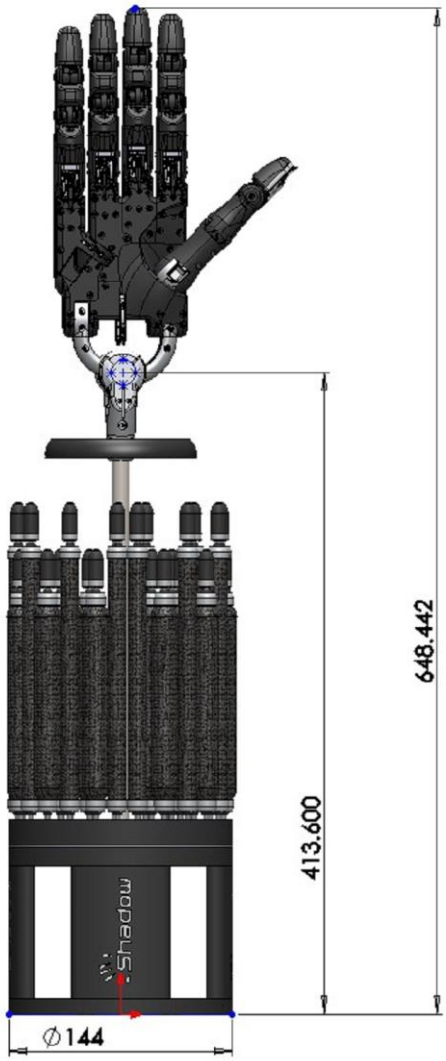

Figura 7.39: Dexterous Shadow Hand con sistemas de músculos de aire (“Air muscles”). [14]

La mano ha sido diseñada para ser similar en forma y tamaño a una mano masculina (Figura 7.40). Los dedos, índice, medio, anular y meñique poseen el mismo tamaño, con los nudillos escalonados para dar una posición de las puntas de los dedos comparable con la mano humana.

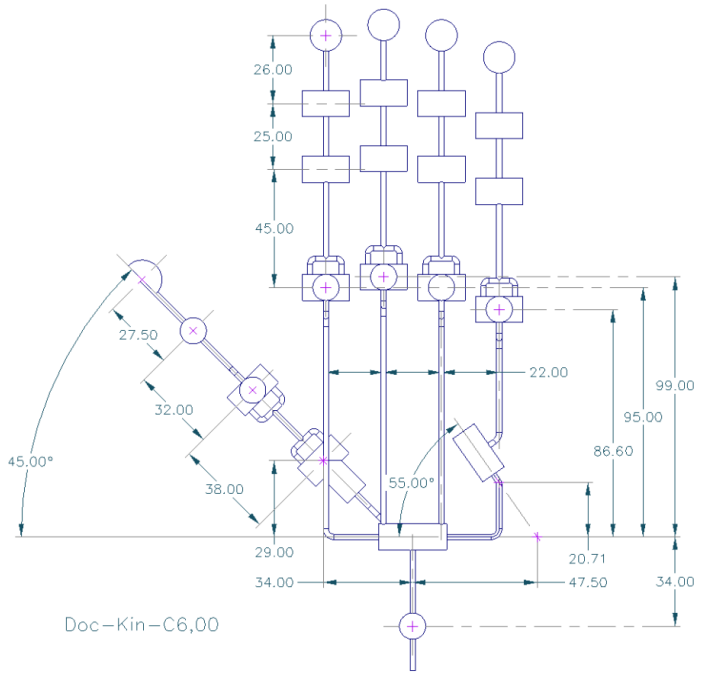

Figura 7.40: Estructura cinemática de la mano hábil “Shadow”. Las falanges dedos son del mismo tamaño. Las longitudes de los huesos metacarpianos son de diferentes tamaños para producir el escalonamiento de los nudillos (unidades en milímetros). [14]

El largo, no obstante, es diferente para los dedos y el pulgar (de 105 milímetros de largo), siendo la falange proximal del pulgar la de mayor longitud que en el resto de los dedos, así mismo cuenta con un hueso metacarpiano más corto. Además, consideran una superficie exterior que puede ser aproximada a un cilindro de 26 milímetros de diámetro para el pulgar, y de 20 milímetros para el resto de los dedos (Figura 7.41).

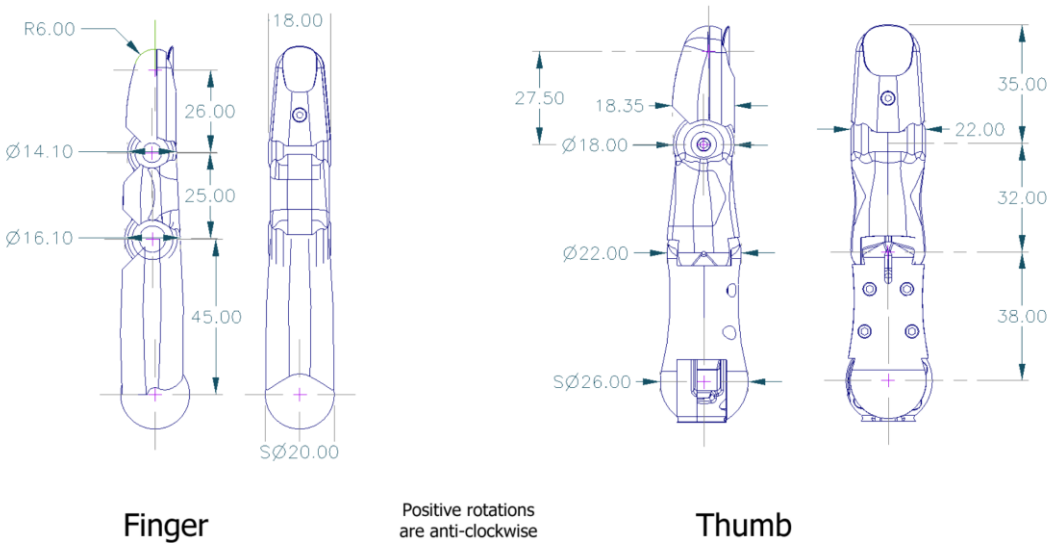

Figura 7.41: Tamaño de los dedos, a la izquierda; y pulgar, a la derecha (dimensiones en milímetros). [14]

Los movimientos de la mano se pueden resumir en el diagrama cinemático presentado en la Figura 7.42, en conjunto con la Tabla 7.2.

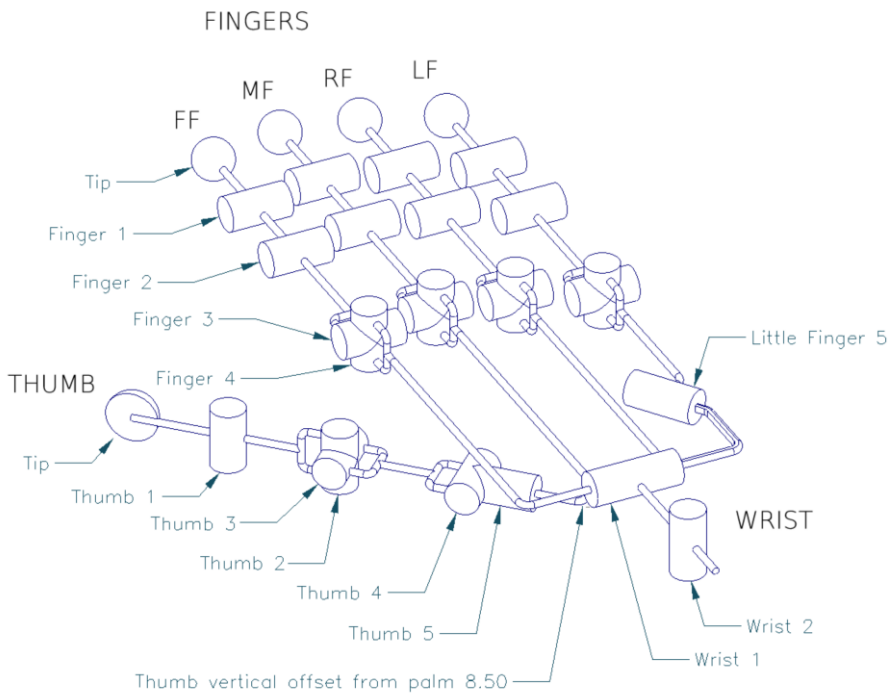

Figura 7.42: Diagrama cinemático de la Dexterous Shadow Hand. Los rodillos (o cilindros) representan el grado de libertad (en rotación), según su eje longitudinal, para cada articulación. [14]

Tabla 7.2: Posiciones angulares máximas y mínimas en relación al esquema cinemático mostrado en la Figura 7.42, las siglas FF, MF, RF y LF hacen referencia a los dedos índice, medio, anular y meñique, mientras que TH se refiere al pulgar.

Designación de Articulación	**Ángulo mínimo [°]**	**Ángulo máximo [°]**
FF1, MF1, RF1, LF1	0	90
FF2, MF2, RF2, LF2	0	90
FF3, MF3, RF3, LF3	0	90
FF4, MF4, RF4, LF4	-20	20
LF5	0	45
TH1	0	90
TH2	-25	25
TH3	-12	12
TH4	0	70
TH5	-55	55
WR1	-45	30
WR2	-28	8

El pulgar posee cinco grados de libertad y cinco articulaciones. Cada dedo posee tres grados de libertad y cuatro articulaciones.

Las articulaciones distales de los dedos son ensambladas de manera similar a un dedo humano, de tal manera que el ángulo de la articulación media es siempre mayor o igual al ángulo de la articulación distal. Esto permite que la falange media se flexione mientras la falange distal se mantiene extendida.

El dedo meñique posee una articulación extra en la palma que permite la oposición al pulgar.

Todas las articulaciones excepto las articulaciones distales de los dedos son controlables con una precisión de hasta un grado, en el recorrido de movimiento.

El peso total de la mano, incluido el del antebrazo, es de 4,2 kilogramos.

El sistema está construido con una combinación de metales y plásticos, incluyendo aluminio, bronce, acetal, policarbonato y poliuretano a modo de estructura muscular. La mano con "músculos de aire" incluye, además, goma, nailon y corcho.

El funcionamiento de la mano se puede dividir mediante los motores inteligentes y los "músculos de aire" (válvulas conductoras), como los indicados en la sección anterior (Figura 7.34):

- En el sistema con motores, se utilizan motores Maxon, utilizando una modulación por ancho de pulsos ("Pulse-width modulation" o PWM). Estos motores pueden ser utilizados para controlar la fuerza en los tendones posicionados al final de los motores, o control de posición en las articulaciones.

- En el sistema con válvulas conductoras (de músculos de aire), se válvulas conductoras de aire que conducen los “músculos de aire” mediante los movimientos de compresión y extensión de los músculos.

7.6.5 “ANATOMICALLY CORRECT TESTBED (ACT) HAND” [15]

Con el propósito de comprender la biomecánica intrínseca y características de control en la mano humana, fue construida la mano hábil denominada “Anatomically Correct Testbed Hand” (“ACT Hand”), mostrado en la Figura 7.43. En esta mano, los elementos mecánicos fueron diseñados para imitar las características biomecánicas de la mano, incluyendo estructuras de huesos y arreglo de tendones. No obstante, solo considera el funcionamiento de los dedos: índice, medio y pulgar.

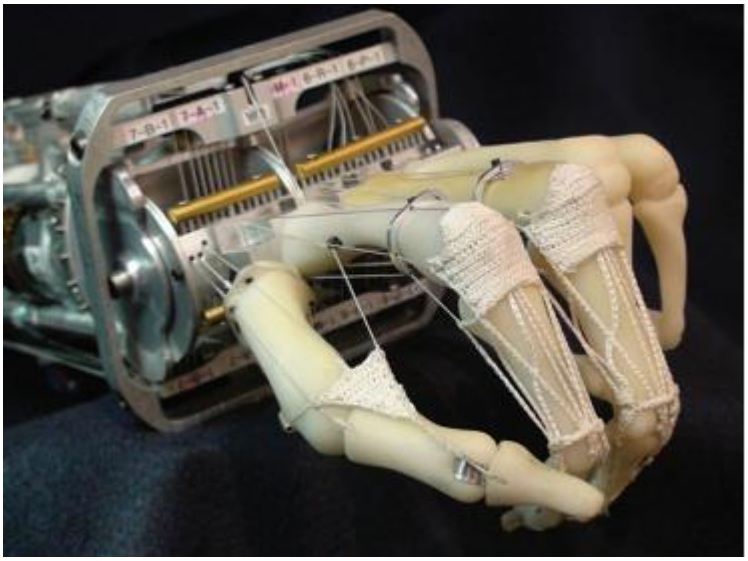

Figura 7.43: “Anatomically Correct Testbed Hand” (se podría traducir como: Mano de pruebas anatómicamente correcta). [15]

En la realización de los huesos de los dedos, se buscó igualar el tamaño, forma y masa de los huesos humanos, que fue determinado mediante un escaneo láser de los huesos de una mano izquierda en formato STL, de Stratasys Corporation, creando un modelo sólido de cada hueso. Los largos de cada falange se pueden apreciar en la Tabla 7.3.

Tabla 7.3: Longitudes de las falanges considerados en la estructura de los dedos móviles de ACT Hand.

Dedo	**Falange**	**Longitud [mm]**
Índice	**Proximal**	51,0
	Medial	26,9
	Distal	15,5
Medio	**Proximal**	53,8
	Medial	35,8
	Distal	18,0
Pulgar	**Metacarpo**	43,1
	Proximal	36,5
	Distal	20,0

Una versión inicial de los dedos fue de aluminio fundido, y aluminio 7075, que ofrecían fuerza moderada, especialmente en sostener los sujetadores para la inserción de los tendones. Actualmente se utiliza un diseño de dos componentes separados; el núcleo de los huesos son tubos de acero, y sobre ellos, se encuentra un cascarón de plástico creado a partir de métodos de impresión 3D.

Los dedos presentan 4 grados de libertad, mientras que el pulgar presenta cinco grados de libertad. Así mismo, la base de los dedos; meñique y anular, presentan un único grado de libertad.

El pulgar, el índice y el dedo medio son accionados por tendones guiados de forma semejante a la anatómica, mediante el uso de sistemas equivalentes a los músculos. Los dedos pueden ser hiperextendidos.

La muñeca presenta 2 grados de libertad, y debido a la manera en la que se guían los tendones, el movimiento de la muñeca tiene influencia en el movimiento de los dedos.

En la primera versión, se imita el encapsulado de las articulaciones en los humanos, mostrando una buena imitación de movimientos, pero de un bajo rango y con alta fricción.

El diseño actual presenta articulaciones mecanizadas como ejes de diámetro reducido (semejante al espesor de un alfiler). En algunos casos, se considera que las articulaciones de tipo esferoidal pueden ser mejor representadas con dos articulaciones de eje, alineadas apropiadamente. Las Figura 7.44 y Figura 7.45 muestran el modelo de los dedos asistido por computador (CAD) del dedo índice y pulgar, respectivamente.

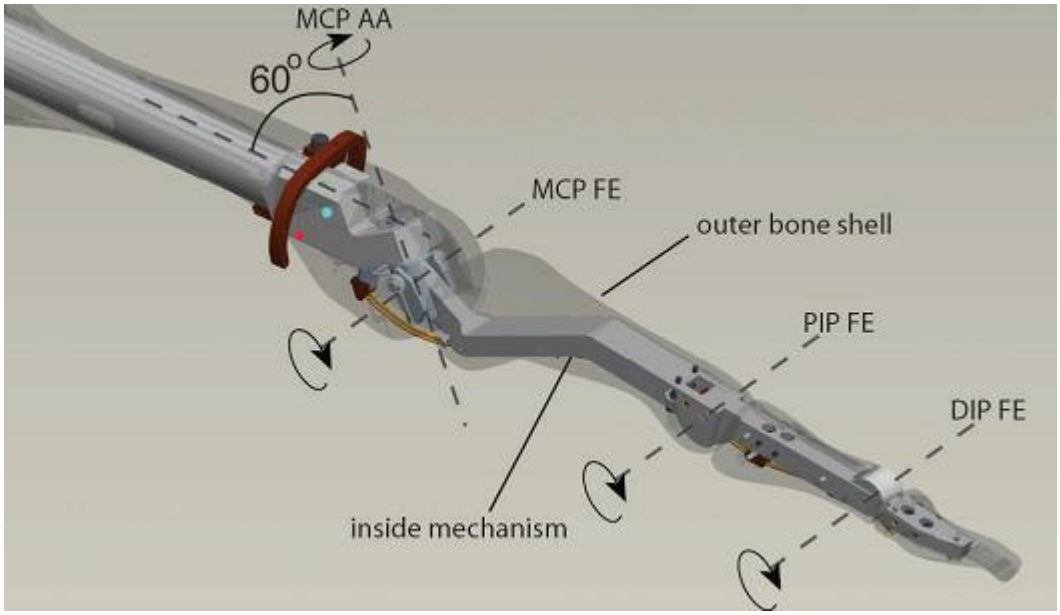

Figura 7.44: Dedo índice de ACT Hand, hecho de dos materiales: el cascarón externo está hecho de plástico, mientras que el eje interior es de acero. Presenta cuatro grados de libertad, con dos en la base. [15]

La articulación de la base del dedo índice (articulación metacarpofalángica) está diseñada en base a un mecanismo de suspensión de cardán. Para igualar la propiedad anatómica de la articulación del dedo índice, el eje de abducción-aducción está orientado en 60° respecto al metacarpo.

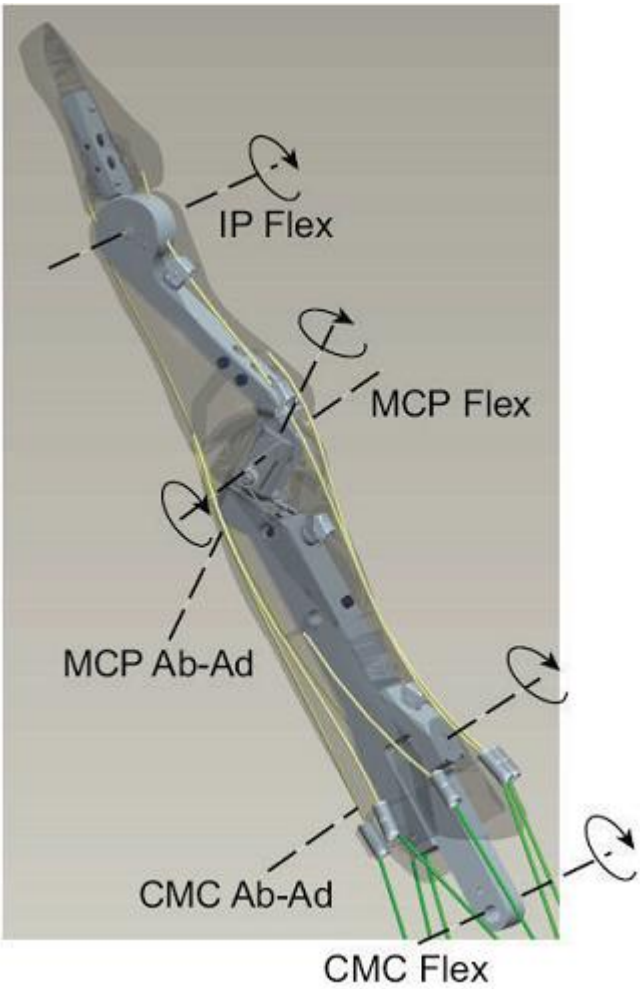

Figura 7.45: Dedo pulgar de ACT Hand, posee cinco grados de libertad, y tres articulaciones: carpometacarpiana, metacarpofalángica e interfalángica. [15]

Las tres articulaciones del pulgar, según lo mostrado en la Figura 7.45, son la articulación carpometacarpiana (CMC), metacarpofalángica (MCP), y las articulaciones interfalángicas (IP). Las articulaciones interfalángicas poseen un grado de libertad rotacional en la dirección de la flexión-extensión. Los dos grados de libertad en la articulación carpometacarpiana son producidos por dos articulaciones de pasador, no perpendiculares, mientras que los dos grados de libertad de la articulación metacarpofalángica son realizados por un mecanismo de cardán.

El mecanismo de cardán rota alrededor del eje de abducción-aducción (AA), estando este unido mediante un par de rodamiento de bola en la articulación metacarpofalángica, que se une en el hueso metacarpiano.

Una pequeña articulación de pasador en la pieza del cardán representa el eje de flexión extensión (FE) de la articulación metacarpofalángica, la que está fijada a la falange proximal a través de un brazo.

La extensión de la cavidad articular restringe el movimiento del montaje del cardán, para permitir un movimiento apropiado de la articulación metacarpofalángica.

La articulación carpometacarpiana involucra dos articulaciones de pasador al final de un único brazo de enlace para permitir los grados de libertad de abducción-aducción y flexión-extensión.

Aunque las articulaciones, carpometacarpiana del pulgar y metacarpofalángica de los dedos son conceptualmente similares (poseen movimientos de abducción-aducción y flexión-extensión); un diseño de cardán no es apropiado para la articulación carpometacarpiana, debido a que se producen en dos huesos separados. Una articulación de pasador coincide con el eje de abducción-aducción de la articulación carpometacarpiana, en el final proximal del metacarpo, mientras que el otro pasador representa el eje de flexión-extensión de la articulación carpometacarpiana, que intersecta el hueso trapecio, del carpo. El rango de movimiento para cada uno de los dos ejes está restringido por una delgada abertura en los huesos del metacarpo y el trapecio.

El diseño de las articulaciones interfalángicas consiste en un único pasador que representa el grado de libertad de flexión-extensión entre dos huesos de las falanges.

Un enlace dispuesto en la falange distal rota el eje de flexión-extensión, coincidente con la articulación interfalángica, en la falange proximal.

Los límites para las articulaciones de flexión fueron impuestos al crear rayos internos que interfieren con el movimiento. Los rangos de movimientos fueron escogidos (Tabla 7.4) para igualar aquellos de los dedos humanos. Como las articulaciones de cardán en las articulaciones metacarpofalángicas son libres de rotar en un rango de ±180°, la cubierta de los huesos fue diseñada para limitar el rango de movimiento a través de superficies de contacto, en los límites de movimiento de las articulaciones.

Tabla 7.4: Límites de movimiento para las articulaciones de los dedos de "ACT Hand", a partir de la posición anatómica.

Dedo	**Articulación**	**Mínimo**	**Máximo**
Índice	**Metacarpofalángica**	30° Extensión 35° Abducción	90° Flexión 35° Aducción
	Interfalángica Proximal	0° Extensión	110° Flexión
	Interfalángica Distal	0° Extensión	70° Flexión
Medio	**Metacarpofalángica**	30° Extensión 35° Abducción	90° Flexión 35° Aducción
	Interfalángica Proximal	0° Extensión	110° Flexión
	Interfalángica Distal	0° Extensión	70° Flexión
Pulgar	**Carpometacarpiana**	40° Extensión 40° Abducción	40° Flexión 40° Aducción
	Metacarpofalángica	60° Extensión 15° Abducción	60° Flexión 15° Aducción
	Interfalángica	20° Extensión	80° Flexión

7.6.6 MANO ANTROPOMÓRFICA, IMPRESA EN 3D CON 20 GRADOS DE LIBERTAD. [16]

Pensada para aceptar futuras modificaciones, se desarrolló una mano con pulgar oponible; donde cada uno de los segmentos de los dedos fueron fabricados mediante impresión 3D, utilizando plástico ABS. (Figura 7.46)

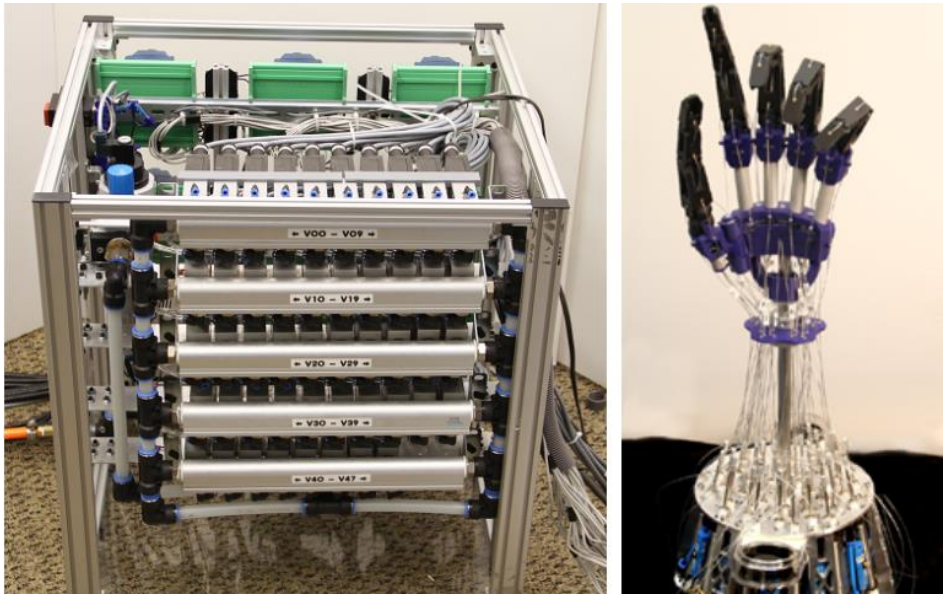

Figura 7.46: A la izquierda, unidad de control neumático. A la derecha, mano hábil ensamblada. [16]

La estructura de la mano se asemeja a un juego LEGO, en la cual cada segmento se interrelaciona con el otro, permitiendo modularidad y adaptabilidad del sistema. El mecanismo que entrelaza los segmentos de los dedos; es un eje de acero que se presiona en una cavidad, asegurándose mecánicamente.

El sistema que reemplaza a los tendones; es un sistema de control antagónico, hecho de cables Spectra® de 0,46 milímetros, capaz de soportar hasta 200N antes de romperse, con una alta rigidez y flexibilidad.

El sistema de actuación consiste en una unidad de control neumático y la unidad robótica de actuación (la mano). La unidad neumática contiene 36 cilindros de aire, de doble efecto, M9 Airpel (Airpot Corp.), que hacen de los tendones de los dedos, y cuatro tendones para la muñeca tipo M16 Airpel (Figura 7.46).

8 DESARROLLO DEL PROTOTIPO DE MANO ROBÓTICA

El objetivo principal de esta memoria es la construcción de un prototipo mecánico que se asemeje a la mano humana, y cuente con la capacidad de moverse como lo haría una mano real, pudiendo ser utilizada como una herramienta cinemática; es decir, que el prototipo pueda realizar los movimientos solicitados por un usuario. El desarrollo de este prototipo utiliza la mano "Shadow Dexterous Hand" (Sección 7.6.4) como sistema de referencia.

8.1 NECESIDADES

Si bien, existe libertad en la creación del prototipo (como al escoger si se realiza una mano izquierda, o derecha); en su desarrollo se busca cumplir con los siguientes objetivos, restricciones y funciones:

Funciones

- La mano debe mover sus partes a las posiciones determinadas por el usuario.
- La mano debe mantener su posición cuando no esté en movimiento.

Objetivos

- El prototipo tenga forma de mano humana.

- Mantener las relaciones de tamaño con las partes de la mano humana.
- Los rangos de los movimientos de las partes del prototipo y de la mano sean semejantes.

Restricciones

- Debe utilizar servomotores para su accionamiento.
- Los servomotores deben poseer engranajes metálicos.

8.2 CATEGORIZACIÓN DE OBJETIVOS

Los objetivos que se desean alcanzar en el diseño y construcción del prototipo se identifican principalmente como objetivos de desempeño (funcionalidad esperada), y como objetivos geométricos (forma y dimensiones), como se muestra en la Tabla 8.1.

Tabla 8.1: Categorización de los objetivos de diseño para el prototipo de la mano.

Geométricos	Desempeño
El prototipo tenga forma de mano humana. Mantener las relaciones de tamaño con las partes de la mano humana.	Los rangos de los movimientos de las partes del prototipo y de la mano sean semejantes.

Los objetivos geométricos indicados, buscan que el prototipo posea una semejanza física con la mano humana; mientras que los objetivos de desempeño buscan poder imitar los movimientos que haría una persona con sus cinco dedos, según lo planteado en la sección 6.

La cuantificación de estos objetivos se desarrolla en la sección 8.5, Especificaciones técnicas de ingeniería.

8.3 ANÁLISIS DE RESTRICCIONES

Las restricciones en el desarrollo del prototipo son: que utilice servomotores para el sistema de accionamiento; y que estos, cuenten con engranajes metálicos; los cuales reducen el accionamiento de la mano a: entender el funcionamiento de los servomotores, y establecer un método que permita su utilización.

De manera simplificada, los servomotores son actuadores eléctricos compuestos por un motor, un sensor de posición, y un amplificador electrónico. Pudiendo ser operados según posición (el servomotor gira a una posición predefinida), por velocidad (el servomotor gira a una velocidad deseada), o por torque (el servomotor gira debido a la acción de un torque). [17]

Como los motores poseen la desventaja de no generar un gran torque, se acopla un sistema de engranajes, el que permite aumentarlo, pero reduce la velocidad de salida. Este sistema de engranajes; genera un roce mecánico entre sus dientes, convirtiéndose en energía térmica, que calienta el servomotor. [17]

En el caso de un servomotor de torque, existen dos zonas de saturación, que se provocan en ambos sentidos de la rotación, donde solo es posible generar el par máximo del servomotor, y una zona lineal entre ellas (Figura 8.1). Esta zona lineal es la zona recomendada para el trabajo del servomotor. [17]

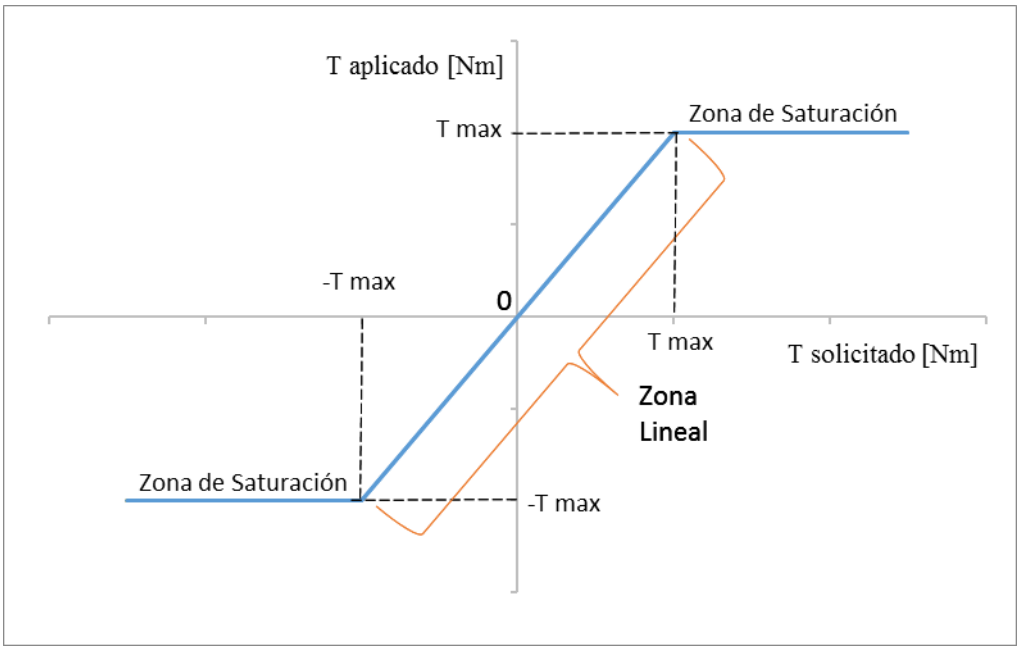

Figura 8.1: Representación del torque (T) aplicado por el servomotor. Cuando el torque solicitado es mayor que el torque máximo del servomotor, este último entra en zona de saturación, y solo puede entregar hasta el torque máximo. La parte positiva y negativa hacen referencia a los sentidos de giro del motor.[17]

Más detalles de los servomotores, principalmente aquellos utilizados en procesos "Hazlo tú mismo" (del inglés, "do it yourself", o DIY), pueden ser revisados en el Anexo B.

8.4 ANÁLISIS FUNCIONAL

En un principio, el sistema puede ser visto como una caja negra; pero debido a las restricciones impuestas por el uso de servomotores, se requiere de una fuente de energía eléctrica para su accionamiento, así como la presencia de una señal de entrada. De esta misma manera, se espera disipación térmica durante su funcionamiento, provenientes del roce mecánico, así como de los componentes eléctricos/electrónicos; además de la generación de ruido, como se muestra en la Figura 8.2.

Figura 8.2: Caja negra del prototipo.

Después, y siguiendo la idea de la caja negra, se reconoce que el movimiento deberá realizarse utilizando varios servomotores, y este movimiento debe transmitirse a los elementos de la mano. Por lo tanto, será necesario seleccionar el servomotor, e indicarle la posición a la que se desea llegar en cada movimiento. Como este proceso requiere de una señal PWM, será necesario aportar energía eléctrica a los sistemas que emitan las señales, y a los servomotores, como se puede mostrar en la caja transparente de la Figura 8.3.

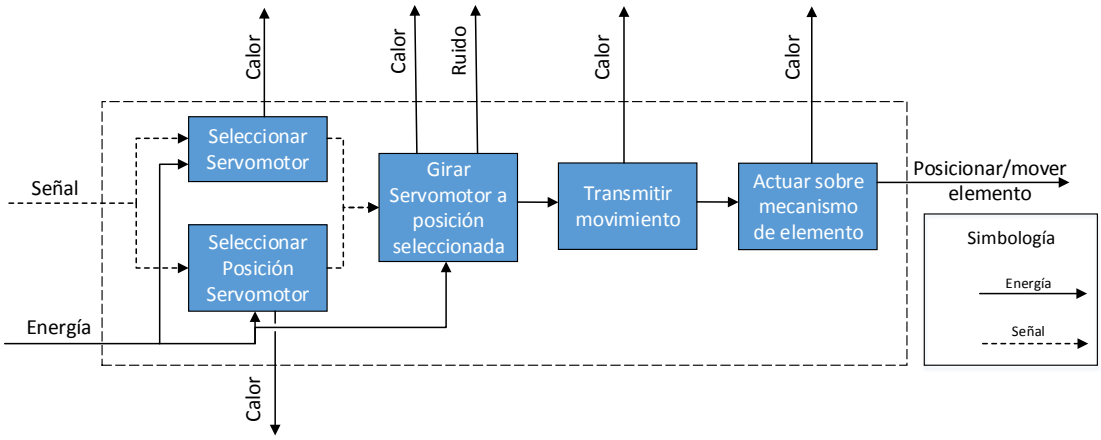

Figura 8.3: Caja transparente.

8.5 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE INGENIERÍA

En primer lugar, el funcionamiento del prototipo debe permitir que el usuario escoja el movimiento (o conjunto de movimientos) de la mano. Esta condición tendrá que respetar, o al menos parecerse, a lo referido en las secciones 8.5.1 y 8.5.2 (a continuación).

Para esto, el usuario tendrá que entregar la información que permita seleccionar el elemento de la mano a mover, e indicar la magnitud del movimiento deseado, por lo que será necesario rotar un servomotor en particular, a una posición determinada. Así, el mecanismo para mover la mano, en conjunto con la posición del servomotor escogido, provocará el movimiento del elemento seleccionado.

8.5.1 ESPECIFICACIONES GEOMÉTRICAS

La redundancia que se presenta al plantear los objetivos de forma y tamaño con relación a la mano humana, tienen como objetivo la desambiguación del término “mano” con respecto a sus diferentes definiciones, indicadas en [1].

Después de establecer la forma general, es necesario definir las dimensiones que se utilizarán para el diseño del prototipo. Para esto, se usará un documento publicado el 2012, que cuenta con las dimensiones generales de la mano para la población de la VII región de Chile (región del Maule) [18], y se establecerán las dimensiones que se desean alcanzar en la Tabla 8.2.

Tabla 8.2:Longitudes establecidas para las falanges de la mano (en milímetros). [18]

Dedo	**Falange Proximal**	**Falange Medial**	**Falange distal**
Meñique	37	23	20
Anular	45	31	23
Medio	56	37	27
Índice	50	31	25
Pulgar	40	-	30

Es necesario recordar que el pulgar posee solo dos falanges, definidas como falange proximal y falange medial. Es por esto que la falange medial del pulgar se encuentra omitida en la Tabla 8.2.

En el caso de la palma, se usará un ancho entre los 84 y 98 milímetros, mientras que puede poseer una longitud de entre 98 y 109 milímetros. [18]

Después de tener las dimensiones generales, todavía existen dimensiones faltantes, y que no incluye la referencia [18]:

1) No existe una dimensión para el metacarpo del pulgar.
2) No se determinaron las posiciones geométricas en las que se ubican los diferentes elementos en la mano (como las articulaciones).
3) No están ubicados los ejes articulares de la muñeca, o el metacarpo del pulgar.
4) No están determinados los anchos o espesores de las falanges ni el espesor de la palma.

No obstante, esta información se puede resolver:

En el caso del metacarpo del pulgar; se reconoce que el extremo distal del pulgar solo alcanza la parte media de la falange proximal del dedo índice [3], tal como se indica en

la sección 7.4.6; por lo que puede diseñarse al final, una vez se tengan la palma y el dedo índice.

Para los dedos, las bases de las falanges proximales quedan sobre las cabezas de los metacarpos respectivos, y estos últimos se aprecian como los nudillos al flexionar los dedos, según se plantea en la sección 7.1.

Los ejes articulares de la muñeca, son los ejes por los cuales se realizan los movimientos de flexión y extensión, siendo ubicados en la articulación radiocarpiana y mediocarpiana, mientras que los movimientos de abducción y aducción de la muñeca tienen un eje que pasa por la cabeza del hueso grande, perpendicular a la palma, como se muestra en 7.3.1.

En el caso de los anchos y las profundidades (dimensión perpendicular a la longitud y el ancho de los elementos revisados) de la palma y las falanges, se pueden obtener de forma aproximada al escalar imágenes tridimensionales de los huesos de la mano, luego de establecer un ancho y largo aproximado de la mano (85 y 115 milímetros aproximadamente), esto fue realizado en base a las imágenes obtenidas de [19] [20], utilizando el programa CAD Autodesk Inventor 2015; como se muestra en las figuras Figura 8.4 y Figura 8.5:

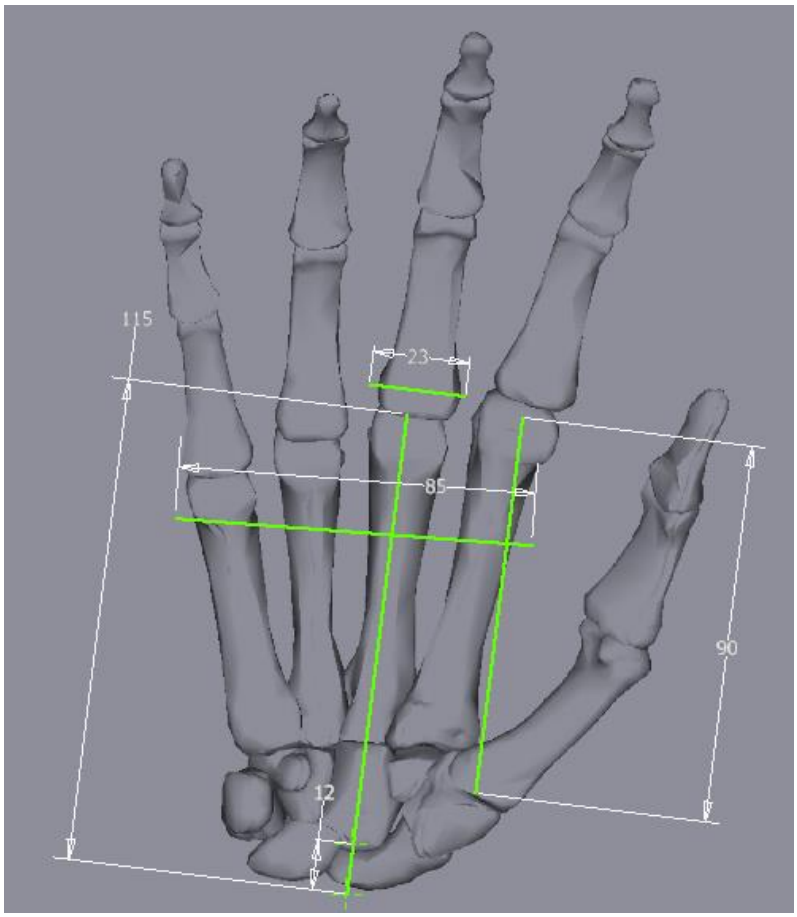

Figura 8.4: Vista anterior de la mano (vista palmar). Figura escalada para coincidir las dimensiones de ancho y alto de la palma, según las dimensiones indicadas anteriormente. [20]

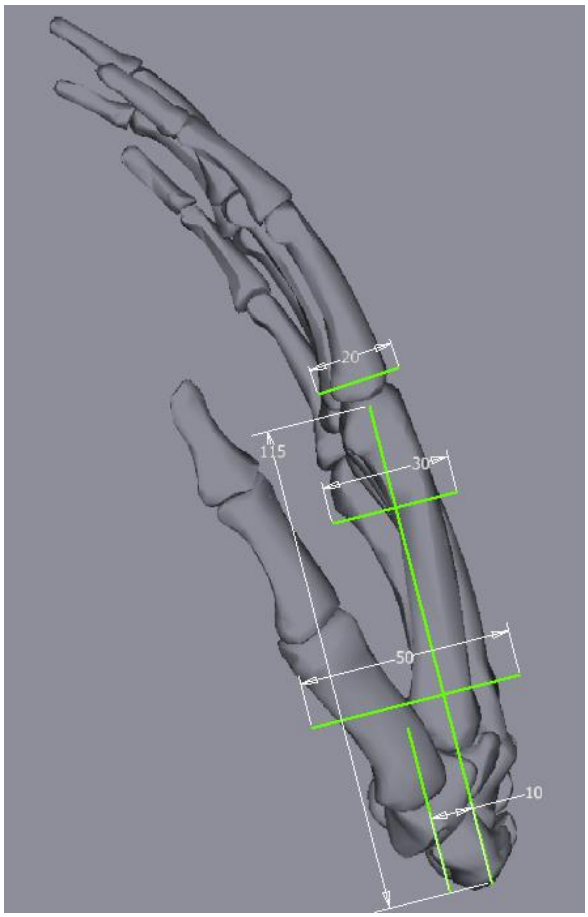

Figura 8.5: Vista lateral de la mano. Incluye las dimensiones aproximadas de: profundidad de la palma en la zona de los metacarpos, profundidad (con respecto a los dedos) y posición de la articulación trapeciometacarpiana, profundidad aproximada de los dedos y largo aproximado de la palma.[19]

En base a la Figura 8.4 y Figura 8.5, se tiene un ancho de los dedos aproximado de 23 milímetros, y un espesor de unos 20 milímetros. En el caso de la palma, se tiene un espesor de unos 30 milímetros en la zona de los metacarpos, y unos 50 milímetros en la zona del carpo. Así mismo, el eje central del pulgar se puede ubicar 10 milímetros frente al eje de los dedos. No obstante, solo pueden considerarse como referenciales, antes que un objetivo geométrico a alcanzar, debido a las aproximaciones realizadas.

8.5.2 ESPECIFICACIONES DE DESEMPEÑO

Las especificaciones de desempeño, involucran todos los movimientos deseados a realizar por esta mano hábil, que se identificarán con ángulos, en unidades de grados, en la Tabla 8.3 En el caso del pulgar, los movimientos están determinados por ejes no ortogonales [8], indicado en la sección 7.4.6, y se preferirá indicar la extensión de sus movimientos, en base a la proyección medial y lateral, así como la proyección anterior (así, la oposición del pulgar se obtiene en base a las proyecciones lateral y anterior).

Tabla 8.3: Magnitud de los movimientos de los diferentes elementos de la mano, indicados en grados, a partir de la posición anatómica.

Elemento a mover	**Tipo de Movimiento**	**Magnitud [°]**
Muñeca	**Abducción Radial**	15
	Abducción Cubital	45
	Flexión	85
	Extensión	85
Articulación metacarpofalángica de los dedos	**Abducción**	45
	Flexión	90
Articulación interfalángica proximal de los dedos	**Flexión**	130
Articulación interfalángica distal de los dedos	**Flexión**	90
Articulación metacarpofalángica del pulgar	**Flexión**	90
Articulación carpometacarpiana del pulgar	**Proyección Medial**	40
	Proyección Lateral	60
	Proyección Anterior	70

En la Tabla 8.3 se omiten los movimientos de restitución, es decir, aquellos que devuelven los elementos de la mano a la posición en la que se encontraban antes de haber efectuado el movimiento, así como los movimientos de hiperextensión.

8.6 BÚSQUEDA DE TECNOLOGÍAS

Al querer establecer los diferentes métodos de funcionamiento para el prototipo, se han observado diversas “manos hábiles”. No obstante, se muestran aquellas manos que han demostrado un funcionamiento real; es decir, existen físicamente, y han logrado exponer sus movimientos.

Por lo tanto, a continuación, se muestra un resumen de las funciones de cada mano revisada:

Tabla 8.4: Comparación general de forma y funcionamiento de manos mecánicas (“A.” siempre se referirá a “articulación”).

Mano:	**“Shadow Dexterous Hand” [14]**	**Mano antropomórfica con 20 grados de libertad [16]**
Cantidad de dedos	5, con pulgar.	5 dedos.
Movimientos de Abducción-Aducción	AA. metacarpofalángica en los cinco dedos.	A. Carpometacarpiana AA. metacarpofalángicas, excepto en el pulgar.
Movimientos de Flexión-Extensión	A. Carpometacarpiana (proyección del pulgar alejándolo de la palma) AA. metacarpofalángicas, en los cinco dedos. AA. interfalángicas, en los cinco dedos.	A. Carpometacarpiana AA. metacarpofalángicas, en los cinco dedos. AA. interfalángicas, en los cinco dedos.
Movimiento de Muñeca	Flexión-Extensión y Abducción radial y cubital. El eje de flexión-extensión se encuentra sobre el eje de abducción. (Figura 7.40)	No incluye la muñeca.
Otros movimientos	Logra la oposición del pulgar mediante un eje de rotación longitudinal al metacarpo. Incluye un movimiento en el metacarpo del dedo meñique.	Realiza el movimiento de oposición, mediante un tercer eje en el pulgar, bajo los ejes de flexión-extensión y abducción-aducción y ubicado bajo el dedo índice.
Método de Accionamiento	Cada articulación posee un sistema de tendones correspondientes que actúan de forma antagónica **[21]**, y son tensados mediante músculos de aire, o motores.	Utiliza un sistema de tendones, que son tensados mediante cilindros neumáticos. **[23]**
Otras observaciones	-	-

Tabla 8.5: Comparación general de forma y funcionamiento de manos mecánicas. Continuación de Tabla 8.4.

Mano:	**ACT [15]**	**Gifu Hand III [11]**
Cantidad de dedos	5. Solo los dedos: pulgar, índice y medio, son móviles.	5 dedos, todos semejantes
Movimientos de Abducción-Aducción	A. Carpometacarpiana AA. metacarpofalángicas, en los tres dedos.	AA. metacarpofalángica en los dedos, exceptuando el índice. A. Carpometacarpiana
Movimientos de Flexión-Extensión	A. Carpometacarpiana AA. metacarpofalángicas, en los tres dedos. AA. interfalángicas, en los tres dedos.	A. Carpometacarpiana AA. metacarpofalángicas, en los cinco dedos. AA. interfalángicas, en los cinco dedos.
Movimiento de Muñeca	Flexión-Extensión y Abducción radial y cubital	No incluye muñeca.
Otros movimientos	-	-
Método de Accionamiento	Utilizan sistemas de tendones actuados con motores localizados en el antebrazo. Con los tendones de esta mano, se busca replicar los tendones del cuerpo humano, además de usar un conjunto de capuchones extensores (sección 7.4.5). [24]	Usa un sistema de transmisión por tornillo entre los motores y los dedos. La A. interfalángica distal se acciona en conjunto con la A. medial de los dedos es accionada mediante mecanismo de cuatro barras. La falange distal del pulgar es independiente.
Otras observaciones	Como indican en [15], los movimientos de la muñeca afectan a los movimientos de los dedos, debido a la ruta que siguen los tendones por ella. A diferencia del músculo aductor del pulgar, que proviene del metacarpo del dedo medio, el tendón que corresponde en la mano ACT, proviene del metacarpo del dedo índice.	La yema del pulgar se encuentra naturalmente opuesta a la yema del dedo meñique. El pulgar tiene una posición inicial que sigue la posición de la muñeca, y no puede contactar con el borde medial de la palma. **[25]**

Tabla 8.6: Comparación general de forma y funcionamiento de manos mecánicas. Continuación de la Tabla 8.4 y

Tabla 8.5.

Mano:	**“Highly Biomimetic Anthropomorphic Robotic Hand” [26]**
Cantidad de dedos	5.
Movimientos de Abducción-Aducción	Solo en articulación carpometacarpiana (base del pulgar).
Movimientos de Flexión-Extensión	Los cinco dedos, y articulación carpometacarpiana.
Movimiento de Muñeca	Físicamente existe, pero no es móvil.
Otros movimientos	Debido a la tensión en los dedos meñique y anular, existe un movimiento en el metacarpo del dedo meñique.
Método de Accionamiento	Funciona con 10 servomotores, que pueden accionar varios movimientos al tensar diferentes conjuntos de movimientos. [27]
Otras observaciones	Utiliza capuchones extensores. La sujeción entre los huesos de los dedos se realiza con un material elástico, que simula los ligamentos de la mano.

Se considera que el funcionamiento general de las diferentes manos encontradas (que se asemejan a la mano humana) queda representado en las tablas anteriores; no obstante, el lector puede encontrar la fuente de la información en [28]-[30].

8.7 GENERACIÓN DE CONCEPTOS

El sistema (o subsistema) de interés funcional del prototipo es la mano, incluso por sobre las restricciones (si la mano pudiera moverse por sí misma, entonces la restricción de los servomotores sería innecesaria). Al requerir la utilización de servomotores, es necesario establecer un sistema de accionamiento para transmitir los movimientos, y una estructura que pueda soportar y sujetar los servomotores mientras funcionan. Además, se requiere energizar los servomotores y enviar las señales para que estos funcionen.

8.7.1 CONCEPTO: LA MANO

Como ya se mencionó en la sección 8.5, se busca imitar la forma de la mano lo más posible, con el fin de utilizar la mano como una herramienta cinemática, queriendo mantener un tamaño cercano al de la mano humana, lo que ya fue cuantificado en la sección 8.5.1, y debe permitir que los movimientos indicados en la 8.5.2 sean realizados; prefiriendo que cada elemento tenga la cualidad de ser manejados individualmente.

De esta manera, la idea de establecer una mano como la “Gifu Hand III” (Tabla 8.4 y sección 7.6.1), tiene el inconveniente de incorporar los motores en la misma mano, ocupando espacio.

El caso de una sujeción elástica tampoco es deseable, porque al carecer de un sistema de control coordinado, se prefiere tener una relación conocida entre el movimiento de los servomotores y las diferentes partes de la mano. Por este mismo motivo, se considera apropiado que los elementos de la mano sean rígidos.

Si bien construcción de la mano “ACT” (sección 7.6.5 y

Tabla 8.5) puede imitar los movimientos siguiendo un fundamento biológico casi en su totalidad, no se requiere esto en el prototipo, mientras pueda replicar los movimientos de la mano.

El diseño de la “Mano antropomórfica con 20 grados de libertad” (sección 0 y

Tabla 8.5) goza de mayor facilidad en el método de construcción (impresión 3D), sobre la mano “Shadow Dexterous Hand” (sección 7.6.3 y Tabla 8.4), por lo que se prefiere este sistema para construir el prototipo de “mano hábil” que se desea en esta memoria. Por lo tanto, se intentará utilizar un proceso de impresión 3D, sabiendo que este proceso puede entregar resultados satisfactorios.

Si bien, sería interesante lograr que la masa de toda la mano sea semejante al de la mano humana, esto no es una restricción en la realización del prototipo, y como se muestra en la sección siguiente (8.7.2), es preferible que la masa de toda la mano sea lo menor posible.

Como fue posible obtener las medidas de la mano para las consideraciones del prototipo, mediante el proceso de escalar las imágenes de una mano y agregarla en la zona de trabajo de Autodesk Inventor, obteniendo así la Figura 8.4 y la Figura 8.5 en la sección 8.5.1. Se puede considerar este mismo método para realizar los diseños de la mano, trabajando directamente en Autodesk Inventor, en vez de trabajar con las dimensiones que fueron obtenidas por este mismo proceso.

En el funcionamiento de la mano humana, la estructura (compuesta principalmente por los huesos y los ligamentos) funciona como el limitante de los movimientos, es decir, mantienen la posición de contacto entre los huesos, limitan el efecto de la acción muscular. Por lo tanto, se considera que la mano del prototipo, o más bien, la palma, sea la zona de sujeción para las demás partes, limitando sus movimientos, según lo establecido en la sección 8.5.2 (Especificaciones de Desempeño).

En el caso de las articulaciones, que son las que permiten el movimiento de los dedos y de la palma:

1) Las articulaciones interfalángicas de los dedos solo necesitan el permitir los movimientos de flexión-extensión, por lo que se puede utilizar un único eje rotacional en estas articulaciones.

2) Las articulaciones metacarpofalángicas deben permitir los movimientos de flexión-extensión, además de abducción-aducción (en el caso del dedo medio, ambos movimientos son de abducción), por lo que requieren, dos ejes rotacionales perpendiculares.

3) A diferencia de lo planteado en [22], donde se reconoce el movimiento de abducción-aducción de la articulación metacarpofalángica del pulgar, el resto de la bibliografía no lo indica, y se prefiere no incluir este movimiento.

4) La articulación trapeciometacarpiana (o articulación carpometacarpiana del pulgar) también debe realizar los movimientos de abducción-aducción y flexión-extensión, por lo que requiere dos ejes de movimiento. Pero, el pulgar tendría que realizar el movimiento de oposición, que es automático en el ser humano, así que se requiere un sistema con tres ejes de movimiento.

5) El dedo meñique también incluye un movimiento de oposición, que se logra mediante el músculo Oponente del meñique (indicado en la sección 7.4.2, Músculos de la eminencia hipotenar). Este movimiento orienta la yema del meñique, hacia la yema del pulgar, mientras que produce el levantamiento de la eminencia hipotenar, y mueve el hueso metacarpiano del meñique, debido a la mayor libertad que otorgan el ligamento palmar y el ligamento metacarpiano transverso en este dedo (Figura 7.13). De esta forma y como los movimientos de oposición del meñique, y de su hueso metacarpiano correspondiente están asociados, es preferible simplificar el diseño del meñique a uno cercano a los demás dedos, e incluir una “oposición falsa” de este dedo,

utilizando un hueso metacarpiano con movimiento independiente. Este movimiento sería semejante al de la mano “Shadow”.

6) Ya que el movimiento de flexión-extensión de la muñeca se realiza en dos articulaciones (articulación mediocarpiana y radiocarpiana), pero visualmente se mueven en conjunto, se utilizará una única articulación para este movimiento, que se hará en la articulación radiocarpiana, en la zona de contacto del carpo, con el radio.

7) Como el movimiento de abducción de la mano se origina en la cabeza del hueso grande, el carpo, que está entre la articulación radiocarpiana y mediocarpiana; en base al punto anterior, se ubicará este eje de rotación sobre el eje de flexión-extensión.

Además, como se busca reducir la masa de la mano, es posible utilizar piezas vaciadas en su interior, y en un caso más drástico, eliminar cualquier parte de la mano que no posea una característica funcional, como lo realizado en las falanges de la “Mano antropomórfica con 20 grados de libertad”, al separar los metacarpos [23].

Cabe destacar, que no se incluirá el movimiento de rotación de la muñeca (pronación y supinación), ya que se provoca en el antebrazo, y no posee un efecto directo en la mano, además de su orientación espacial

8.7.2 CONCEPTO: EL ACCIONAMIENTO

Si la estructura ósea de la mano sujeta y limita sus movimientos, entonces los tendones son el medio que realiza el movimiento.

Si el lector prestó atención a la composición muscular de la mano y el antebrazo (más notorio en este último), puede que haya percibido que la ubicación y la dirección de los

tendones tienen directa relación con el tipo de movimiento, en la medida que se reconozcan las restricciones articulares.

En el caso del pulgar, el músculo Aductor del pulgar, mostrado en la Figura 7.23, es un músculo de forma triangular, con su base en el hueso metacarpiano del dedo medio, y su extremo (que forma un tendón), se inserta en la cara medial de la base de la falange proximal del pulgar, por lo que podría mover ligeramente la falange proximal; pero como está ubicado en el capuchón extensor de este dedo, se lleva consigo, al mismo tiempo, al metacarpo del pulgar. Así, cuando el músculo se contrae, tira del tendón, que tira del capuchón, y permite mover el pulgar, proyectándolo sobre la palma sin necesidad de flexionar las falanges de este dedo.

Si el lector todavía necesitara de otro ejemplo, puede observar la ubicación de los tendones pertenecientes a los músculos: Flexor radial del carpo, y el Flexor cubital del carpo, mostrados en la Figura 7.24. Podrá notar que ambos músculos se encuentran en la zona palmar de la mano, a cada lado del hueso grande del carpo (por donde pasa el eje de abducción de la mano), así, en conjunto, ambos músculos provocan la flexión de la muñeca, pero por separado, realizan los movimientos de abducción radial, y abducción cubital. Esto último explica que los movimientos naturales de la muñeca son movimientos de flexión/aducción y extensión/abducción [6] (también podrían realizarse los movimientos de flexión/abducción y extensión/aducción).

Pero, no solo importa la ubicación de donde se insertan los tendones en la mano, si no también, por donde pasan, este puede ser el caso del tendón proveniente del músculo Flexor profundo de los dedos, mostrado en la Figura 7.26. En este caso, el tendón se divide en cuatro, y es capaz de flexionar todas las articulaciones de los cuatro dedos, pero estos tendones pasan por la muñeca, a través del túnel del carpo. Así, al flexionar la muñeca, la tensión de este tendón se reduce, mientras aumenta la tensión de los tendones provenientes del músculo Extensor de los dedos, entonces, con la mano

relajada, al flexionar la muñeca, los dedos se extienden (esto no implica que son los únicos músculos y tendones participando en el movimiento). El caso contrario pasa cuando la mano se extiende, y los dedos se flexionan naturalmente.

De esta manera, es comprensible que en la mano "ACT" los movimientos de la muñeca afecten a los dedos [15], y se esperaría que la relación sea recíproca.

Entonces, al querer imitar los movimientos de la mano, se pretende utilizar un conjunto de tendones, ubicados de manera semejante a los de la mano humana. Para hacer esto, es necesario hacer converger los tendones a la palma del prototipo, y que sea posible tirar cada falange de forma independiente, para realizar los movimientos de flexión-extensión, abducción-aducción, y oposición (según lo indicado en las Especificaciones de Desempeño). En este caso, también está el deseo de posicionar los tendones que realizan los movimientos de flexión-extensión y abducción-aducción del metacarpo del pulgar de tal manera que los ejes de movimiento sean no ortogonales.

Luego de definir la utilización de tendones, falta ver el método para transferir el movimiento desde los servomotores, es decir, transferir un movimiento rotacional del servomotor, a un movimiento rotacional en las articulaciones de los dedos.

Esto, se puede hacer imitando el sistema de las manos: "Shadow Hand" y la "Highly Biomimetic Anthropomorphic Robotic Hand", en donde la rotación del servomotor tira del tendón, y esta tensión es la que permite el movimiento de las partes de la mano. En este caso, será utilizar poleas, en donde enrollar los tendones, debiendo determinar sus diámetros para permitir el movimiento.

Como ya se mencionó, es probable que el movimiento de la muñeca afecte al sistema de los tendones, por lo que, utilizar un solo servomotor para cada par de movimientos,

puede ser un impedimento para la realización completa de estos, prefiriendo utilizar un servomotor por movimiento.

Por lo tanto, se requieren de 47 servomotores: 2 para cada par flexión-extensión de las articulaciones interfalángicas (con un total de 9 articulaciones), las articulaciones metacarpofalángicas de los cinco dedos (5 en total), la articulación carpometacarpiana del pulgar y la articulación de la muñeca; 2 para cada par abducción-aducción en las articulaciones metacarpofalángicas, sin contar el dedo pulgar (4 articulaciones), la articulación de la muñeca, y la articulación carpometacarpiana del pulgar. Por último, dos servomotores para el movimiento de "oposición falsa" del meñique, y un servomotor que realice la función del músculo aductor del pulgar.

No obstante, falta el movimiento de oposición del pulgar; pero como el movimiento de oposición es un movimiento automático, se puede mezclar con el movimiento de flexión de la articulación metacarpofalángica.

Como los tendones son móviles, y se efectúa una tensión en ellos, pueden llegar a romperse, así que se verá la posibilidad de establecer una cadena con dos tipos de tendones, uno más resistente que el otro.

8.7.3 CONCEPTO: LA ESTRUCTURA

Como el prototipo no está pensado para ser utilizado sobre una persona, no existe una restricción particular en su forma, tamaño o peso; pero debe sostener a los servomotores durante la realización de todos los movimientos, así como la de sujetar la mano. Además de esto, se utilizará como medio de canalización de los tendones desde los servomotores hasta la mano, y tendrá que permitir que se realicen las conexiones eléctricas y electrónicas de los servomotores.

Como las conexiones eléctricas y electrónicas dependen de la utilización de cables eléctricos, es posible posicionar el sistema el sistema eléctrico y electrónico fuera de la estructura. También, debe permitir que los tendones y los servomotores sean reemplazados en caso de falla.

En el caso de la conexión electrónica, es preferible que queden alejadas de las personas, para evitar cualquier desconexión accidental, por lo que se considera apropiado dejar los tendones y los servomotores en una posición externa en la estructura, mientras que los cables eléctricos, se encuentren en una posición interna.

Por último, y como no se realiza un análisis de esfuerzos en la estructura, esta debería fabricarse, con la consideración de permitir modificaciones que aumenten su resistencia, en caso de ser necesario.

8.7.4 CONCEPTO: ELÉCTRICA

Como los servomotores funcionan mediante corriente continua, y con tensiones bajo los 10 voltios, será necesario transformar la corriente domiciliaria (de alterna a continua) y realizar una reducción de la tensión. No obstante, es necesario entregar la corriente solicitada por el sistema.

Como los motores no han sido seleccionados hasta esta sección no es posible indicar la potencia requerida, pero es posible utilizar cables eléctricos suficientemente largos como para ubicar la fuente de energía fuera de la estructura, como se indicó en la sección anterior, por lo que será revisado en la selección de componentes.

Así mismo, y por recomendación, se preferirá utilizar cables eléctricos semejantes a los que incluyen los servomotores, evitando los cálculos de potencia máxima de estos medios de transmisión.

8.7.5 CONCEPTO: EL CONTROL

Para la utilización del prototipo, se considera que se utilizará un computador que funcione como intermediario en entre el usuario y el prototipo, pero todavía es necesario un sistema entre el computador y los servomotores, que sean capaces de enviar una señal PWM.

Así, y como se planteó en los conceptos anteriores, se prefiere tener el sistema emisor de señales, cercano a la fuente, así que puede ubicarse alejado de la estructura.

8.7.6 BOCETOS

A continuación, se muestran los bocetos con las ideas utilizadas en la creación del prototipo. Los bocetos iniciales se pueden encontrar en el Anexo C, ordenados según como se fueron desarrollando en el proceso de esta memoria.

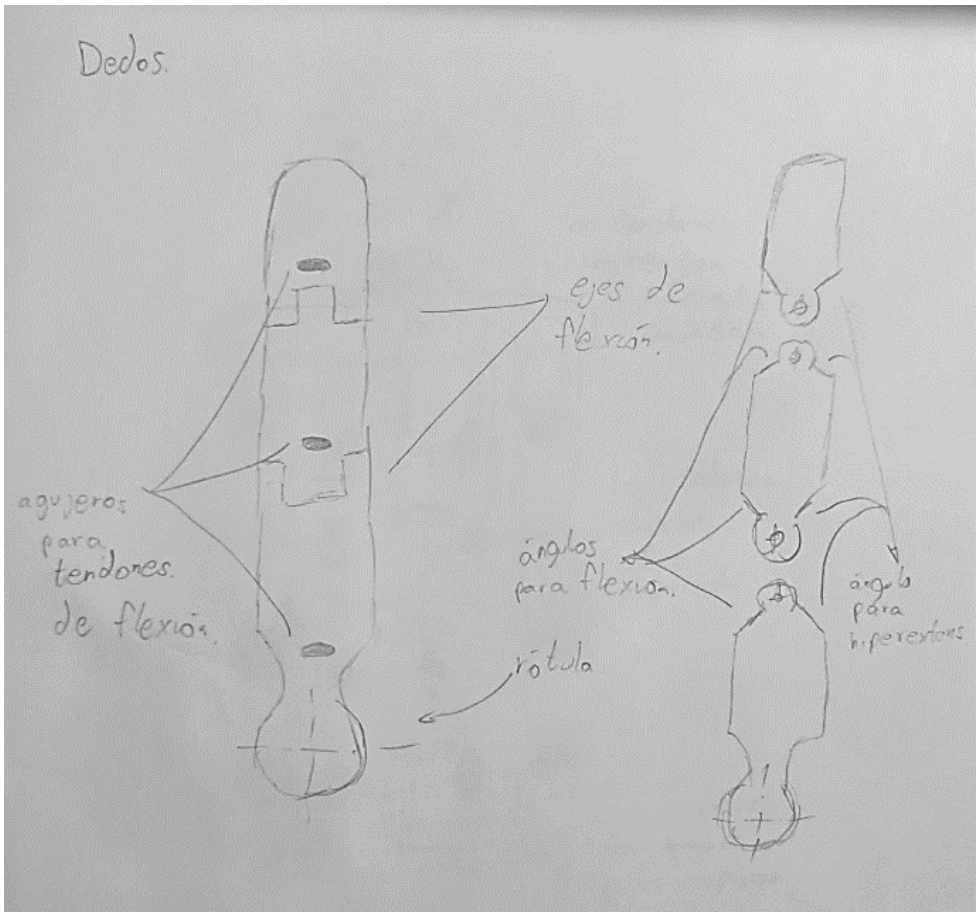

Figura 8.6: Forma esperada de los dedos, en la izquierda estaría la vista palmar, y en la derecha, la vista del plano lateral. Se plantea limitar los movimientos mediante la misma estructura de los dedos, y permitir cierto grado de hiperextensión.

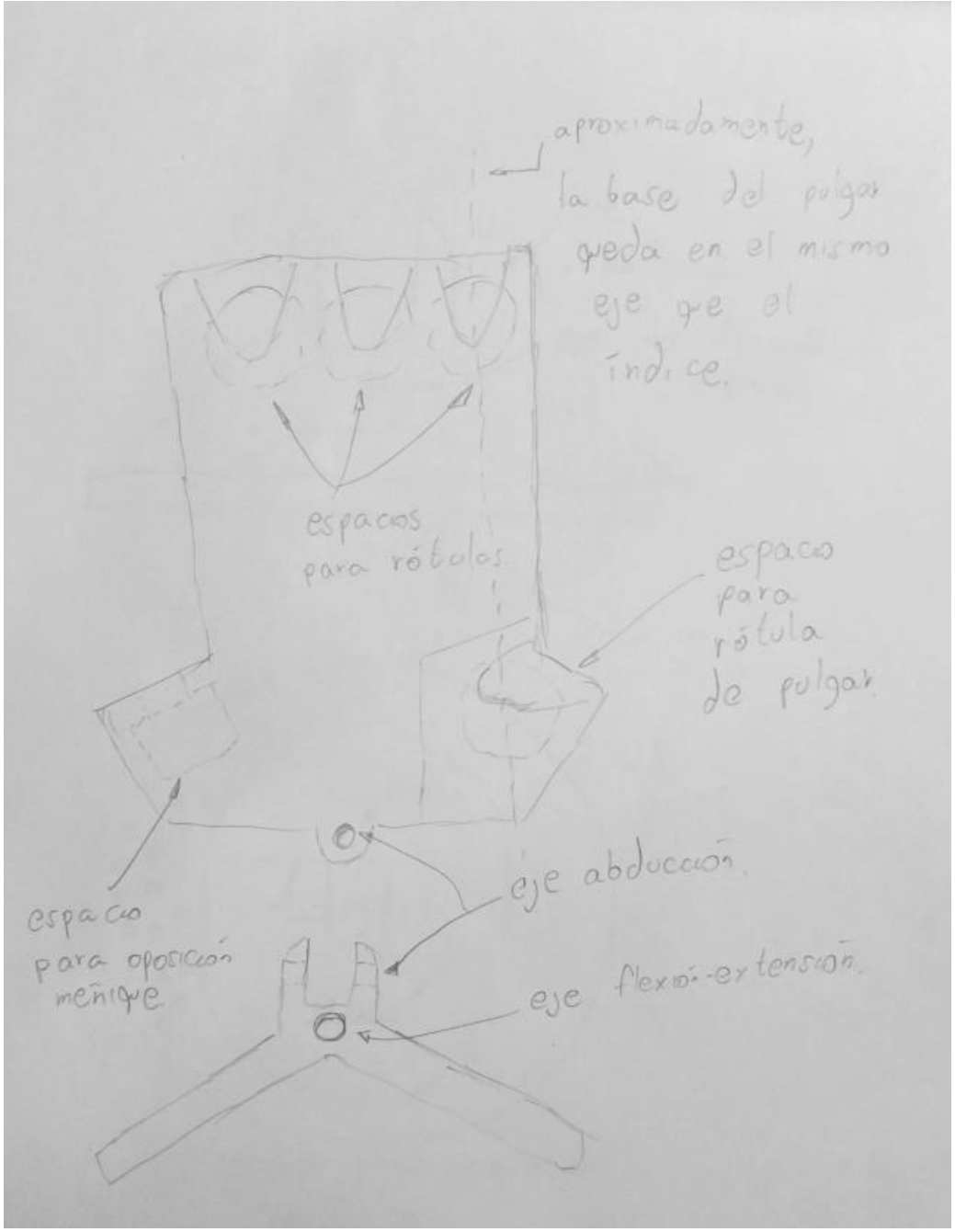

Figura 8.7: Planteamiento de la forma de la palma. Se elimina la zona de la muñeca, para permitir el movimiento de abducción, y agregar la flexión-extensión mediante una barra que pueda ser tirada por los tendones. Se busca posicionar la base del pulgar frente al eje del dedo índice, y utilizar una articulación de tipo rodillo en el metacarpo del meñique.

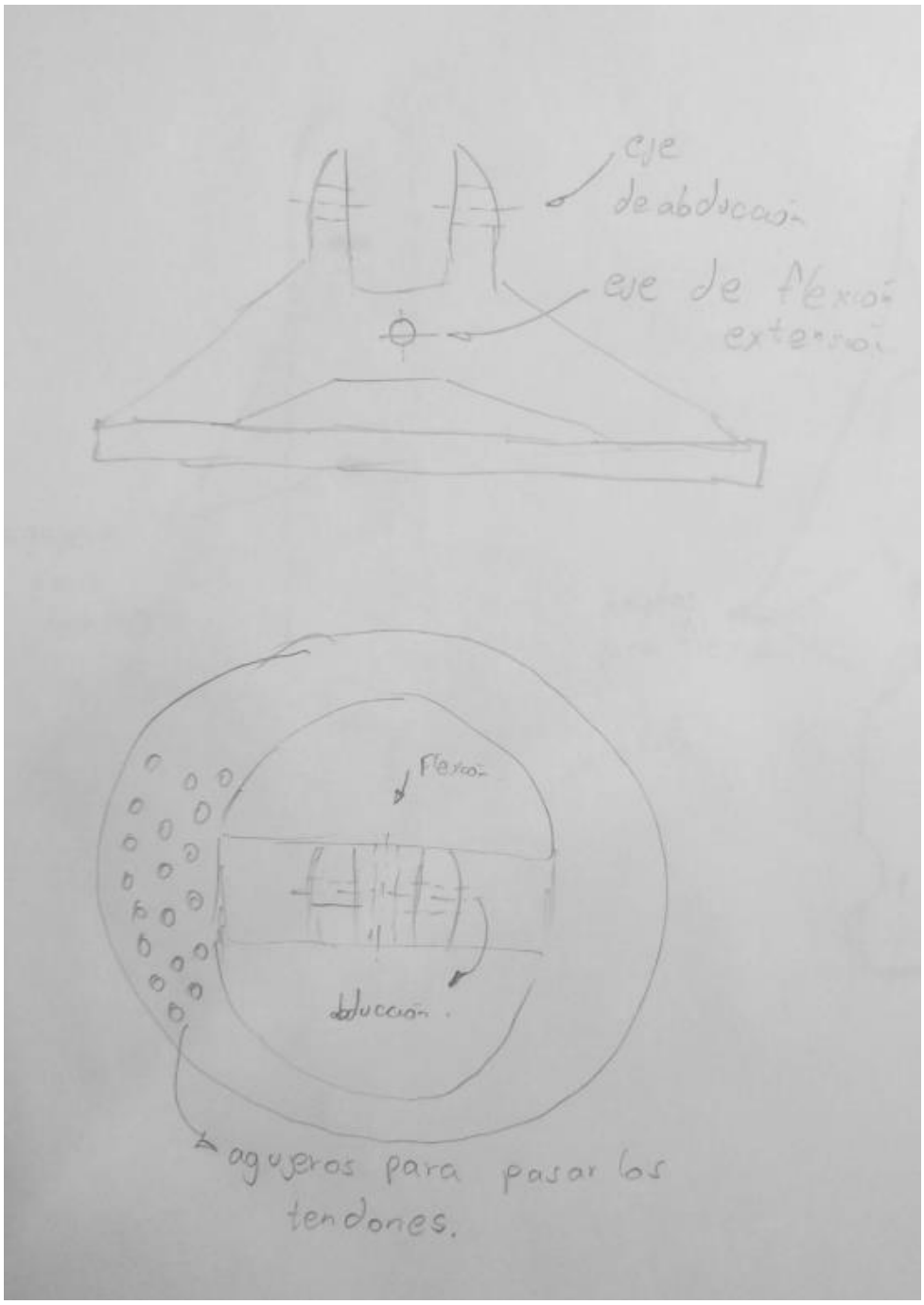

Figura 8.8: Siguiente iteración de la barra que permite el movimiento de flexión, según lo mostrado en la Figura 8.7. Debido a que una barra puede interferir con los tendones, se canalizarían los tendones por un sistema de agujeros que buscan emular el túnel del carpo.

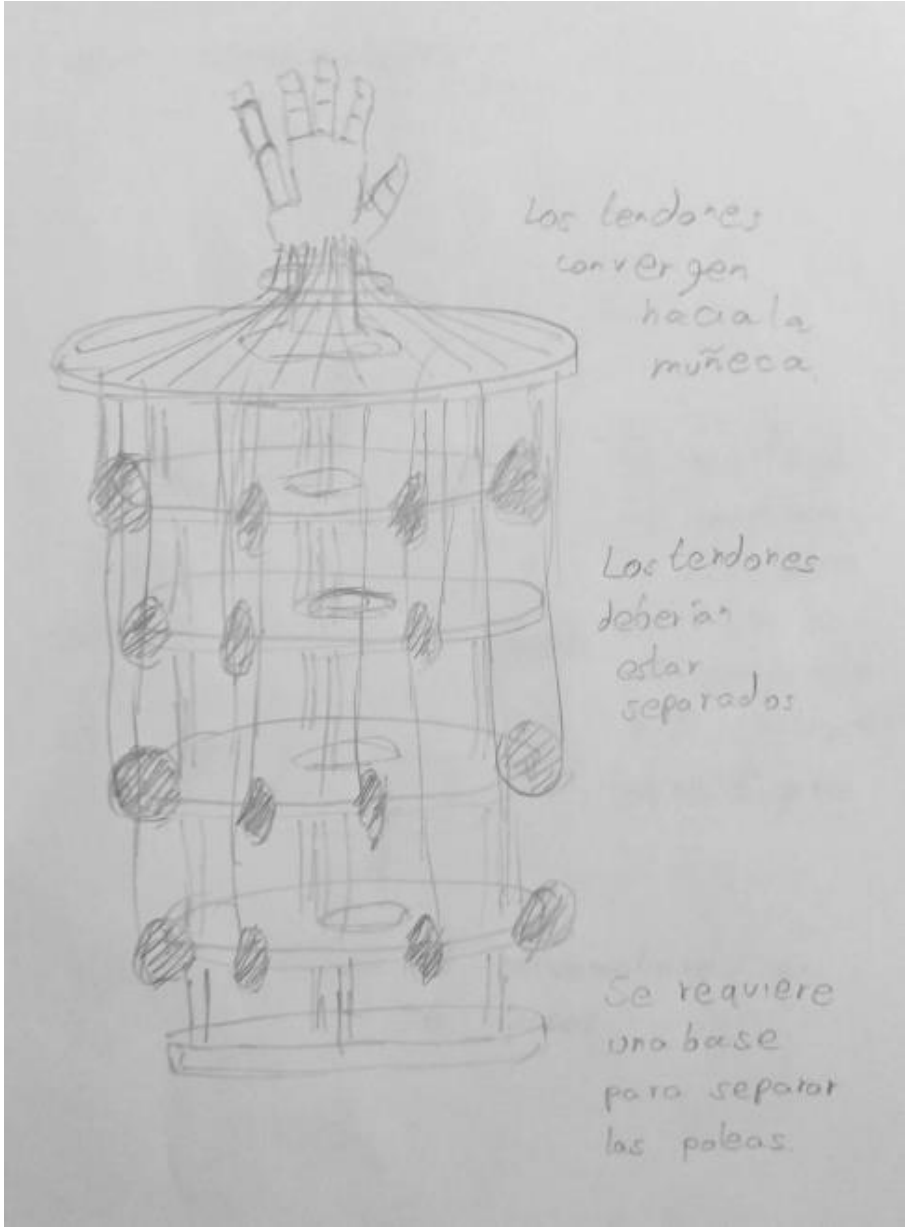

Figura 8.9: Idea de la estructura. Los tendones convergen a la mano a través de la muñeca, y se pueden utilizar barras para separar los niveles.

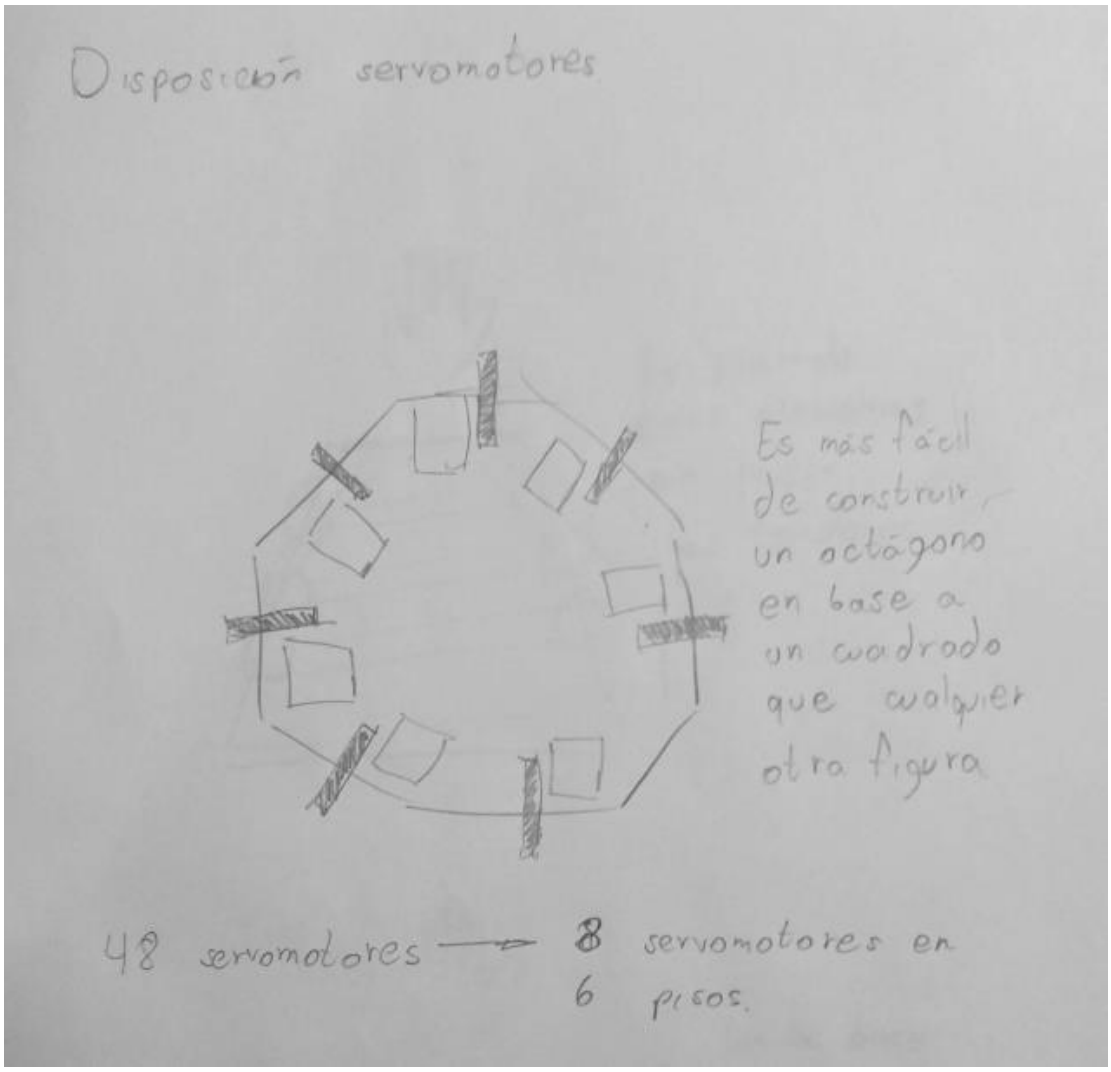

Figura 8.10: Boceto de la forma que se usarían en los pisos para ubicar los servomotores. En base a un cuadrado, es posible cortar rápidamente las esquinas, para tener una base octagonal.

En el caso de la estructura, y como se desea evitar que los tendones se contacten entre sí, se planea rotar los diferentes niveles en 7,5 grados, con respecto al eje longitudinal de la estructura. Esta consideración se hace basándose en 48 servomotores, utilizando 6 niveles. Esta organización se muestra en la Figura 8.12.

8.8 DISEÑO BÁSICO

A continuación, se muestran las funciones básicas a realizar por el prototipo; así como la organización de los componentes, de manera inicial.

8.8.1 ARQUITECTURA BASADA EN FUNCIONES

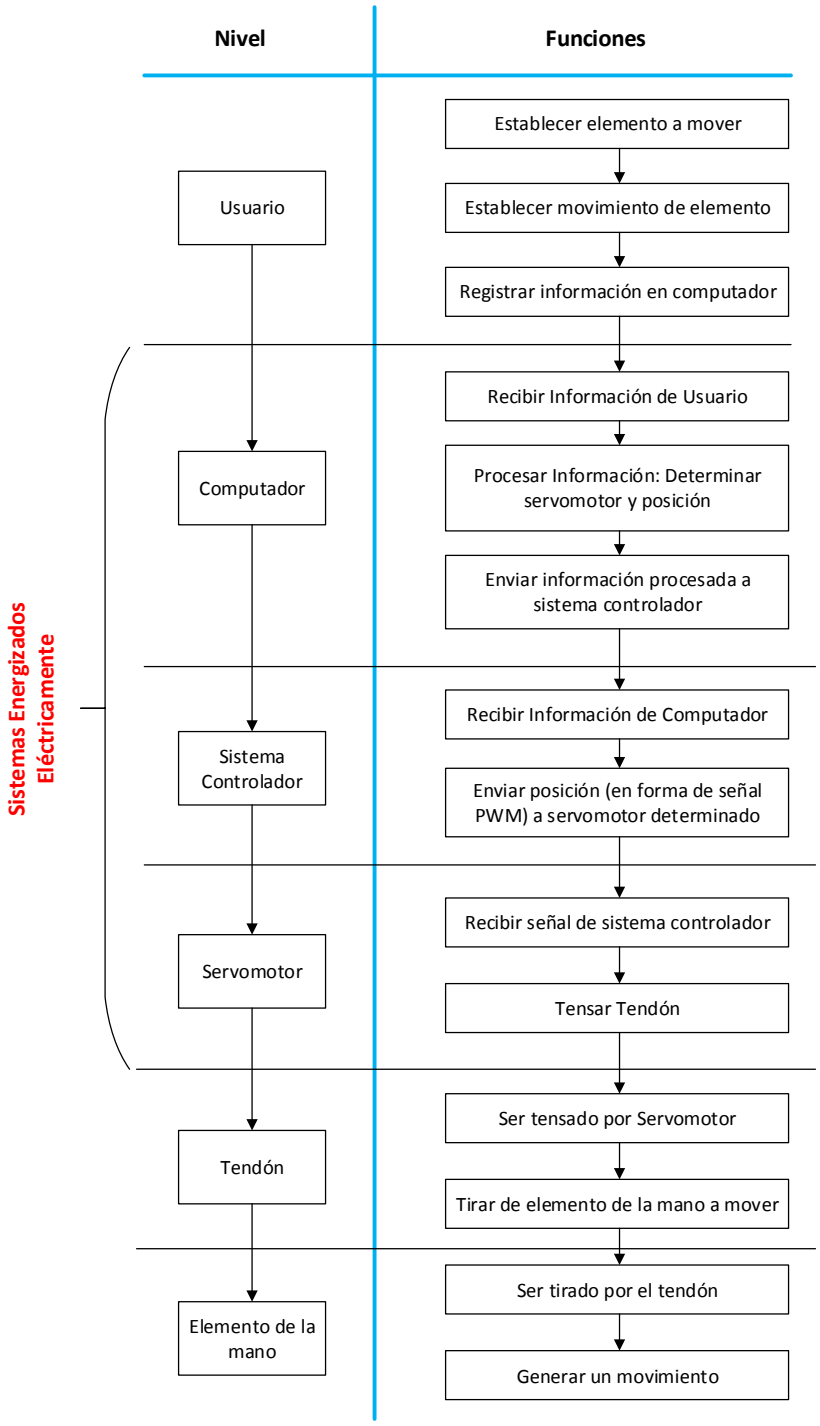

Figura 8.11: Mapa de partes y funciones del prototipo.

En la figura anterior, se nota que el proceso de funcionamiento del prototipo va desde el usuario, hasta que el movimiento es generado. En este caso, el computador, el sistema en el que se identifica el servomotor a mover, así como su posición requerida. Después, pasaría al sistema controlador el generar las señales, que serán enviadas a los servomotores. De esta forma, el computador, el sistema controlador y los servomotores requieren de una fuente eléctrica.

Así mismo, se establecen las interfaces en cada cambio de nivel, por ejemplo, la interfaz usuario-computador.

8.8.2 ORGANIZACIÓN DE COMPONENTES

Al querer ubicar los servomotores en una estructura, se notó (durante la realización de los bocetos) que su construcción sería más sencilla al utilizar diferentes niveles, cada uno con forma de octágonos. El problema con colocar varios niveles sería que los tendones se contacten, pudiendo complicar los movimientos de la mano, o incluso, romper los tendones. De esta forma, se plantea una estructura con 8 servomotores por nivel, además de una base, que permita el giro de las poleas, y un nivel superior, donde apoyar la mano; y cada nivel estará rotado con respecto al nivel inferior (o superior).

Así, la organización de componentes queda ilustrada en la Figura 8.12.

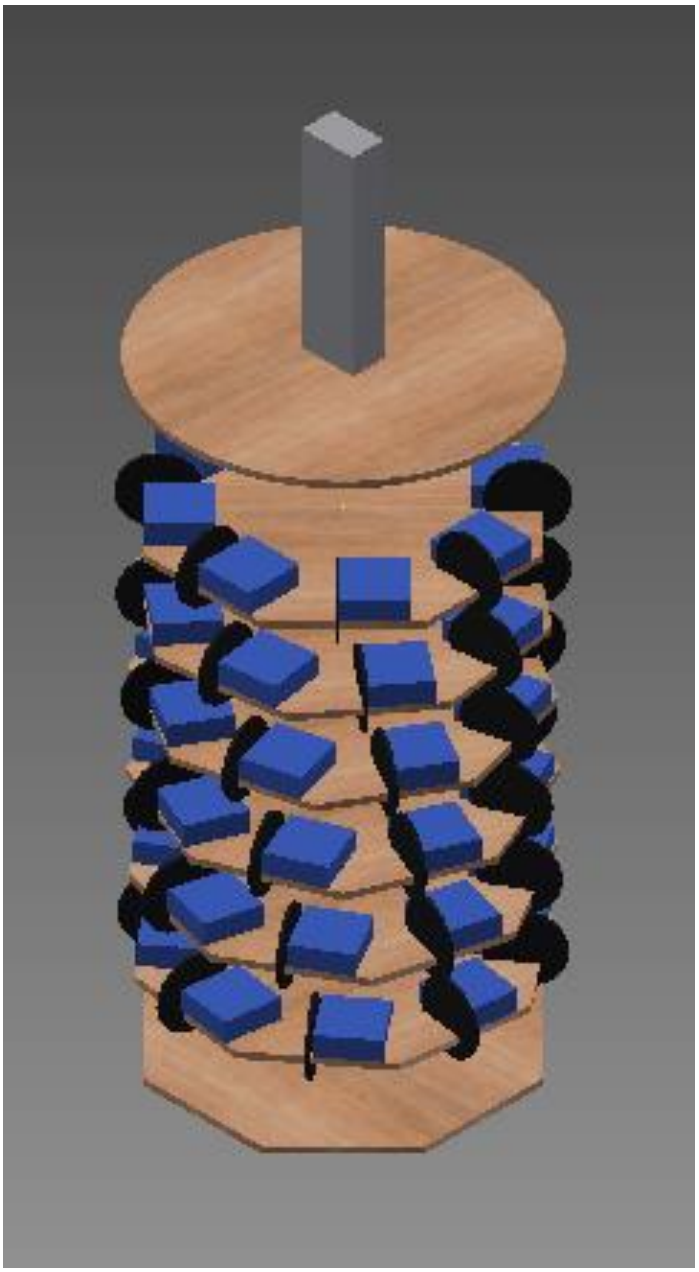

Figura 8.12: Organización de la estructura (en café), los servomotores (en azul), con las poleas (en negro), y la mano (en gris), ubicada en la cima de la estructura. No se muestran los elementos que sostienen la estructura.

Como la estructura está pensada para 48 servomotores, entonces, es posible separar los servomotores adyacentes en 7,5 grados, con centro de rotación en el eje longitudinal de la estructura; realizando así, la rotación de cada nivel.

8.9 SELECCIÓN DE COMPONENTES

8.9.1 MATERIAL DE IMPRESIÓN

Como se prefiere un material rígido para fabricar las partes de la mano, se utilizará filamento PLA (ácido poliláctico). Se prefiere este material sobre el filamento ABS (acrilonitrilo butadieno estireno), debido a que, durante el proceso de impresión, el PLA requiere de menos control de la temperatura ambiental para lograr la forma final de las piezas. El filamento ABS requiere de una estructura cerrada para controlar la temperatura de enfriamiento de la pieza, y evitar la deformación.

Las características físicas de estos materiales se muestran en el Anexo D.

8.9.2 SERVOMOTORES

Para realizar la selección de los servomotores, es necesario relacionar los momentos que actúan en las diferentes partes de la mano, por lo tanto, es necesario considerar una masa y geometría inicial de la mano, además de relacionar los rangos de rotación entre el servomotor y los movimientos de la mano, así como el torque requerido del servomotor, respecto de un diámetro de polea escogido.

Las formulaciones indicadas en el párrafo anterior pueden ser encontrados en el Anexo E.

Así, se utilizarán dos tipos de servomotores, un tipo para accionar los dedos, y otro para accionar la muñeca.

El servomotor que moverá los dedos será un motor Tower Pro Mg996R, que cuenta con torque de unos 11 kilogramos fuerza por unidad de centímetro, y posee una rotación de 180 grados. [31]

En el caso de los movimientos de la muñeca, se utilizarán servomotores CYS S8218, que cuenta con un torque de unos 38 kilogramos fuerza por unidad de centímetro, y también puede rotar en 180 grados. [32]

Si bien, el servomotor de Tower Pro, funciona entre los 4,8 y los 6,6 voltios, el servomotor CYS, funciona sobre los 6 voltios. No obstante, se disponía con una unidad de este último, probando que puede funcionar a 5 voltios.

La selección de los servomotores debe ir acompañada por el diámetro (o radio) de la polea a utilizar para tirar de los tendones; escogiendo un diámetro de 100 milímetros para ambos servomotores.

Así, se utilizarán 43 servomotores Tower Pro, y 4 servomotores CYS.

8.9.3 CABLES ELÉCTRICOS

En el caso de la transmisión eléctrica y electrónica hacia los servomotores, simplemente se utilizarán cables con dimensiones semejantes a las que incluyen los propios servomotores, esto evita la realización de cálculos de potencia máxima que deberían resistir los cables si se conectaran varios servomotores a un mismo nodo.

Este cable será un tipo AWG 24, en colores rojo, naranjo y negro, buscando asemejarse a los colores de los cables de los servomotores utilizados (rojo, naranjo y café), en donde se conectan los cables de igual color, y el cable negro con el café.

8.9.4 TENDONES

Para realizar la función de los tendones, se utiliza sedal de pescar, debido la facilidad de manejo, así como la clara indicación de resistencia al momento de su adquisición. Además de esto, es posible encontrar sedales tan delgados como 3 décimas de milímetro, por lo que permite que disminuir los agujeros por los cuales se canalizan los tendones.

Como la canalización por la mano puede llegar a ser más complicada que llevar el tendón a la polea en los servomotores, se prefiere utilizar una separación en los tendones. Esto se hace con un sedal más grueso en la sección de la mano, mientras que se usa un sedal más delgado en la zona del servomotor.

Para seleccionar el tendón más resistente, se usa la fuerza máxima que podría ejercer el tendón mediante la acción de los servomotores:

Dado que las poleas tendrían 5 centímetros de radio, y el servomotor CYS puede ejercer 38 kilogramos fuerza por centímetro, mientras que los Tower Pro ejercen hasta 11 kilogramos fuerza por centímetro, entonces la aproximación diría que la máxima fuerza posible en los tendones serían de 7,6 kilogramos fuerza para aquellos conectados a los servomotores CYS, y 2.2 kilogramos fuerza para los servomotores Tower Pro.

Así se busca un sedal de nylon, utilizado en la pesca que tenga una resistencia bajo los 2,2 kilogramos fuerza, y otro sobre esta misma resistencia. Como no se encontró uno con estas características, se utiliza uno con una resistencia cercana, de 2,4 kilogramos, de marca Ekilon, con un diámetro de 0,20 milímetros [33]. En el caso del tendón más resistente, también se utiliza Ekilon, pero de 0,30 kilogramos de resistencia, con un diámetro de 0,30 milímetros [34].

En el caso de los tendones conectados a los servomotores CYS, se utilizan los mismos sedales, esto debido a la dificultad de conseguirlos en el mercado, en comparación a los Tower Pro. Lo que permitiría proteger los servomotores en caso de algún accidente. Esto también, debido a que sería más sencillo reemplazar los tendones de la muñeca que sus contrapartes en la mano.

Así mismo, los tendones se unirán mecánicamente (pudiendo realizarse un nudo, o establecer otro método de unión), quedando el sedal más resistente en la zona de la mano, mientras que el sedal más débil, estará cerca de los servomotores, donde podrá ser reemplazado en caso de rotura.

No obstante, esto requiere de una regulación por parte de los sedales, para ajustar su posición con respecto a la mano y los servomotores.

8.9.5 FUENTE ELÉCTRICA

Los servomotores CYS, pueden llegar a utilizar 8,6 amperes [35], mientras que los de Tower Pro, pueden utilizar hasta 2,5 amperes [36], cada uno. De esta manera, el total de corriente del sistema sería de unos 141,9 amperes. No obstante, esta corriente solo se consume cuando los servomotores no pueden moverse debido al efecto de una carga.

En el caso de que sean utilizados en la zona lineal indicada en la sección 8.3 (Análisis de Restricciones), es decir, es servomotor todavía tenga la posibilidad de aumentar el torque, la corriente será menor a lo indicado en el párrafo anterior. Así mismo, en esta memoria, se plantea que el movimiento de los servomotores será realizado individualmente, por lo que es posible conocer la cantidad de servomotores que se encuentran trabajando activamente.

De esta forma, se utilizarán dos fuentes conmutadas, de 5 voltios, y 60 amperes, conectando la mitad de los servomotores en cada fuente. Así solo se conectarán dos servomotores CYS en una misma fuente.

8.9.6 SUJECIÓN DE PARTES DE LA MANO

En la mano, se utilizan tornillos M2 y M3, con sus respectivas tuercas. Los tornillos M2 tienen largos de 12 milímetros, y se utilizan tanto para ensamblar los dedos, como en las articulaciones, y como método para presionar las articulaciones tipo rótula de los dedos, en la palma.

Los tornillos M3, son de 12, 16 y 20 milímetros de largo. Los de 16 milímetros, se utilizan en el armado de la palma; un único tornillo de 12 milímetros de largo se utiliza en el eje de abducción; y los más largos, se utilizan en el eje de flexión, así como en la sujeción de la base del pulgar, y los elementos que sostienen a la mano.

8.9.7 SUJECIÓN DE LA ESTRUCTURA

Para sujetar la estructura, se utilizarán barras hiladas. Estas barras tienen la ventaja de poder ser cortadas a las dimensiones requeridas, y permiten ajustar la posición de los elementos que se sujetan entre ellos.

En este caso, se utilizan dos dimensiones de barras hiladas; en mayor cantidad se utilizan barras de 1/4 de pulgada, que se utilizan para sostener los niveles en la zona más externa, ubicándolas cerca de los servomotores, para ayudar a sostenerlos. Además, se utiliza una especie de columna central con barras de 3/8 de pulgada, que sostienen toda la estructura; y en conjunto con las barras de 1/4 de pulgada, estabilizan todo el sistema, para evitar cualquier movimiento de rotación de los niveles.

Así, las barras de 1/4 son seccionadas en largos de unos 11 centímetros, y se sujetan mediante tuercas, ubicando ocho segmentos de barra por nivel, conectadas con el nivel inferior. En el caso de las barras de 3/8 de pulgada, estas se cortan en largos de unos 70 centímetros, y pasan por el centro de la estructura, además de sostener el nivel superior. Se utilizan cuatro segmentos, sujetados por tuercas, lo que también permite ajustar la altura del nivel superior (donde se ubicará la mano)

8.9.8 ELEMENTOS PARA EL CONTROL

Para controlar servomotores, existe una placa de control que cuenta con 16 canales, con la capacidad de brindar tanto energía eléctrica como la señal PWM, que puede funcionar conectado a un microcontrolador Arduino, siempre y cuando se comparta la tierra (GND), y se tengan dos puertos análogos disponibles (sistema I2C). Esta es una placa PCA 9685, la que puede ser conectada en serie con otras placas, manteniendo únicamente dos conexiones análogas, además de compartir la tierra (GND), con la placa Arduino.

Así, se utilizan 3 placas PCA 9685, y un Arduino UNO.

8.10 DISEÑO GENERAL

Como ya se indicó, las partes de la mano que no son funcionales se pueden modificar, o simplemente eliminar, permitiendo la reducción de la masa del sistema. En el caso de este prototipo, se prefirió eliminar la zona de la muñeca, además de la sección inferior al dedo índice, como se muestra en la Figura 8.13.

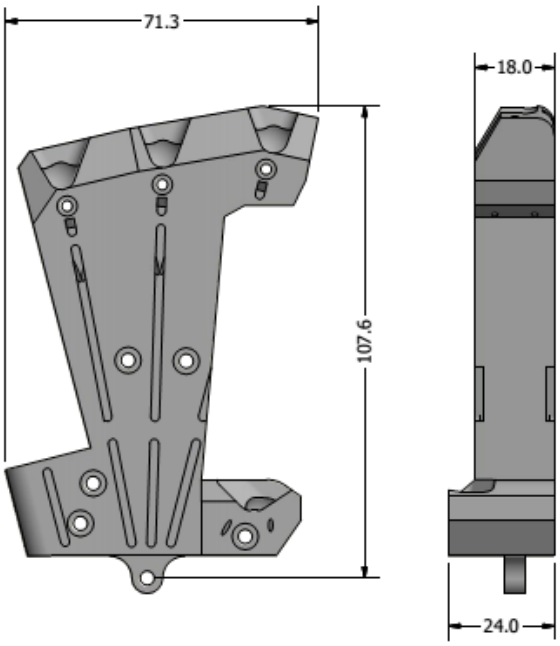

Figura 8.13: Dimensiones generales de la palma.

En la figura anterior, queda un espacio en donde se ubica un elemento relacionado con el metacarpo del dedo meñique, lo que permitiría realizar el movimiento de oposición (u oposición falsa como ha sido indicado anteriormente), que utiliza una articulación de rodillo, que en realidad generan un movimiento de levantamiento del metacarpo. (Figura 8.14)

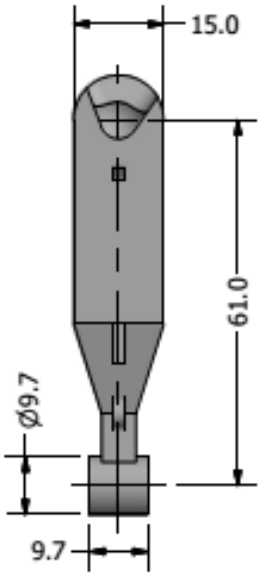

Figura 8.14: Dimensiones generales del metacarpo del meñique.

En el caso de los dedos, se prefiere que sean diseñados y construidos de la misma manera. Entonces, también es posible diseñar el pulgar como si se tratara de cualquier otro dedo, considerando que el hueso metacarpiano, la falange proximal y la falange distal del pulgar se pueden aproximar a las falanges: proximal, medial y distal, respectivamente, de los otros dedos. Así, la Figura 8.15 muestra la forma general de los dedos, y la Tabla 8.7 las dimensiones de sus partes.

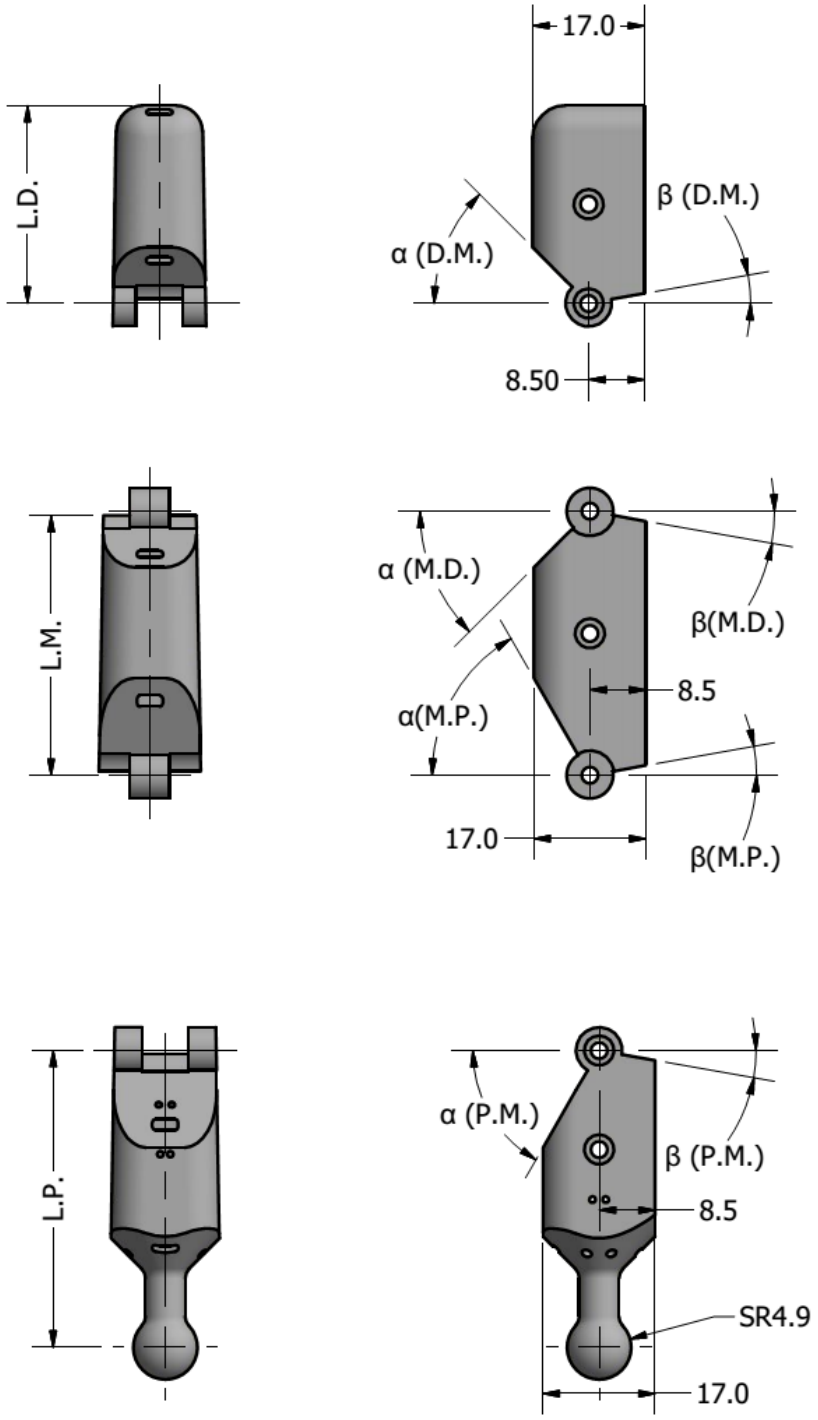

Figura 8.15: Dimensiones generales de las falanges. Arriba, falange distal. En medio, falange medial. A bajo, falange proximal, o metacarpo del pulgar.

Tabla 8.7: Dimensiones de las diferentes partes de los dedos, como se muestra en la Figura 8.15. Las siglas utilizadas son: L., para longitud, D., para distal, M., para medial, y P., para proximal, siguiendo las dimensiones de la tabla anterior. Las longitudes se indican en milímetros, mientras que los ángulos α y β están indicados en grados.

	Dedo				
Dimensión	**Pulgar**	**Índice**	**Medio**	**Anular**	**Meñique**
L.D. [mm]	30	25	27	23	20
α (D.M.) [°]	45				42,5
β (D.M.) [°]	10				
L.M. [mm]	40	31	37	31	23
α (M.D.) [°]	45				42,5
β (M.D.) [°]	10				
α (M.P.) [°]	30	60			57,5
β (M.P.) [°]	10				
L.P. [mm]	45	50	56	45	37
α (P.M.) [°]	30	60			57,5
β (P.M.) [°]	10				

El conjunto de las partes de la mano se muestra en la Figura 8.16, pero carece de los elementos de sujeción. Se muestra que el pulgar tiene una posición rotada con respecto al resto de los dedos, pero mantiene la misma forma de diseño, lo que se permite debido a la articulación de rótula.

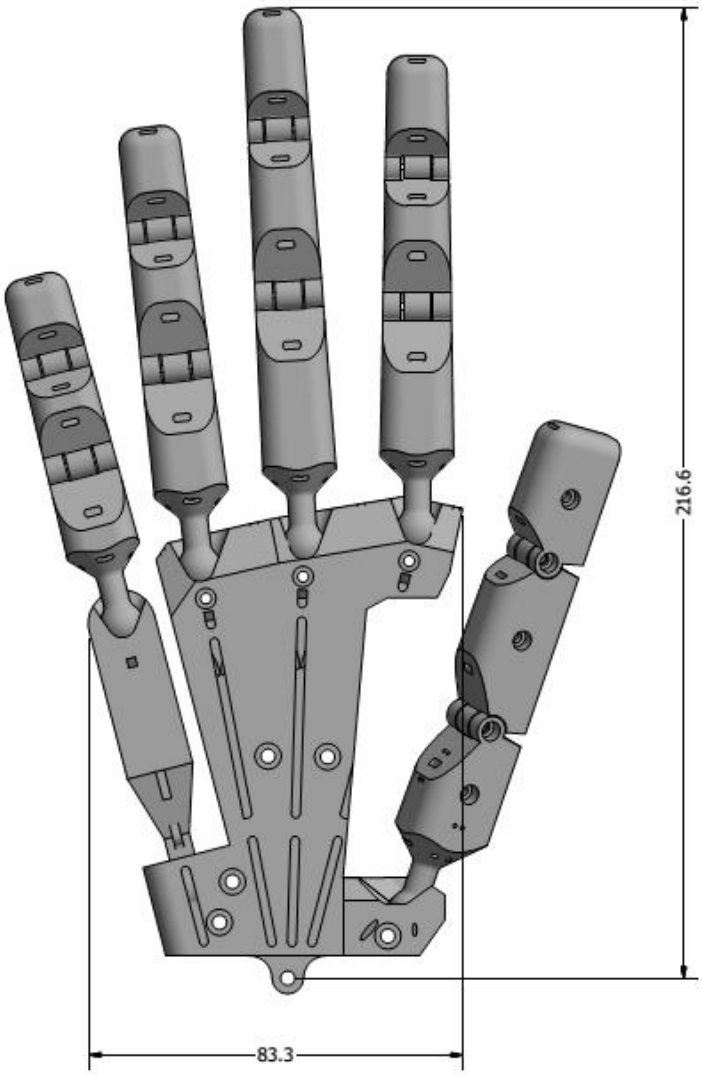

Figura 8.16: Dimensiones generales de la palma ensamblada, con sus dedos.

Finalmente, se muestra la mano, con la estructura de la muñeca en la Figura 8.17.

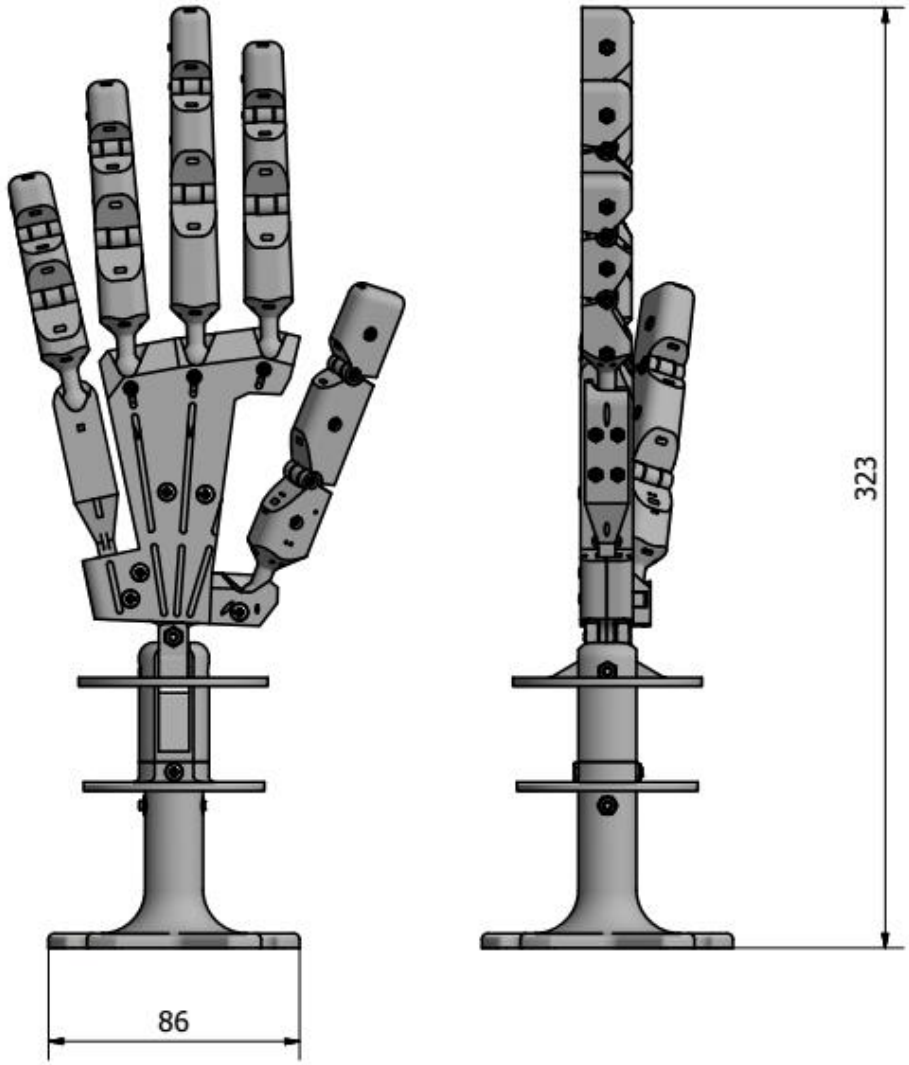

Figura 8.17: Forma general de la mano, y el sistema de la muñeca.

En esta última figura, se muestra que la estructura que sostiene la mano llega hasta el eje de abducción de la muñeca.

Para ubicar los ejes articulares de la muñeca, se utiliza un disco que tiene la capacidad de flexionarse en conjunto con el resto de la mano. Este disco (disco superior), mostrado en la Figura 8.18, cuenta con agujeros, por donde pasar los tendones hacia la

palma y los dedos. Así mismo, el disco inferior permite guiar los tendones desde la estructura hasta el disco superior, con la cualidad de ser fijado en el soporte de la mano.

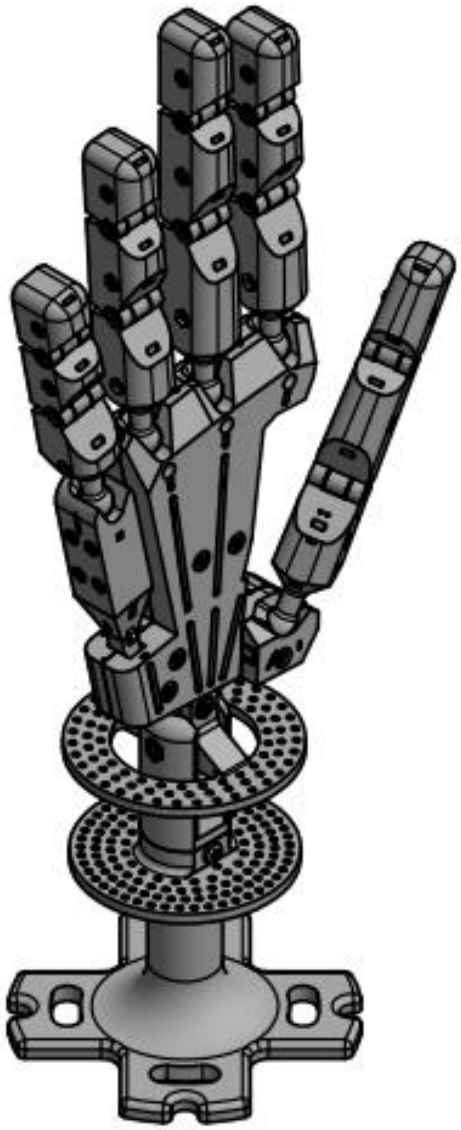

Figura 8.18: Vista isométrica de la mano. Cuenta con dos discos para guiar los tendones. El disco superior se mueve en conjunto con la flexión de la mano.

8.11 CONEXIÓN ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

Como se mencionó anteriormente, los servomotores deben compartir una tierra eléctrica con el resto de los elementos utilizados (la placa PCA9685, la placa Arduino, y la fuente conmutada), y esto se mantiene para todo el resto de los servomotores.

La placa PCA9685 puede ser energizada directamente con la placa Arduino, y la única función de las fuentes conmutadas es dar energía a los servomotores, como se muestra en la Figura 8.19.

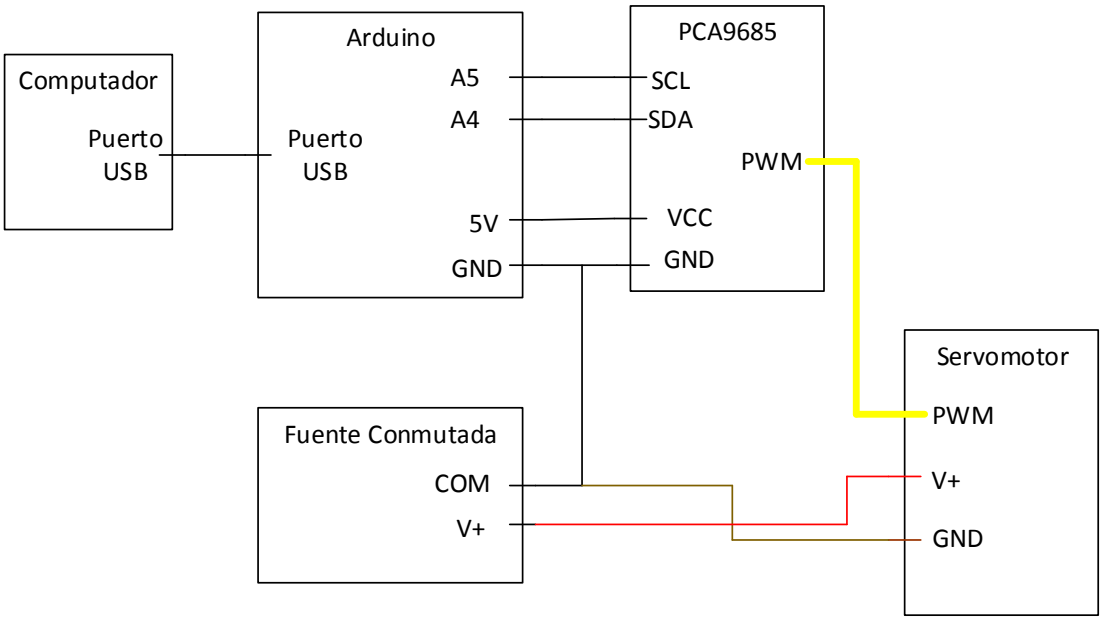

Figura 8.19: Esquema de conexiones entre el computador, la placa Arduino Uno, la placa PCA9685, la fuente conmutada y el servomotor. Notar que, en el servomotor, los colores vienen identificados como marrón (GND), rojo (V+) y naranjo (PWM).

Para conectar varias placas PCA9685, se realiza una conexión en cascada, como se muestra en la Figura 8.20, donde la primera placa es conectada directamente al Arduino, según la figura anterior.

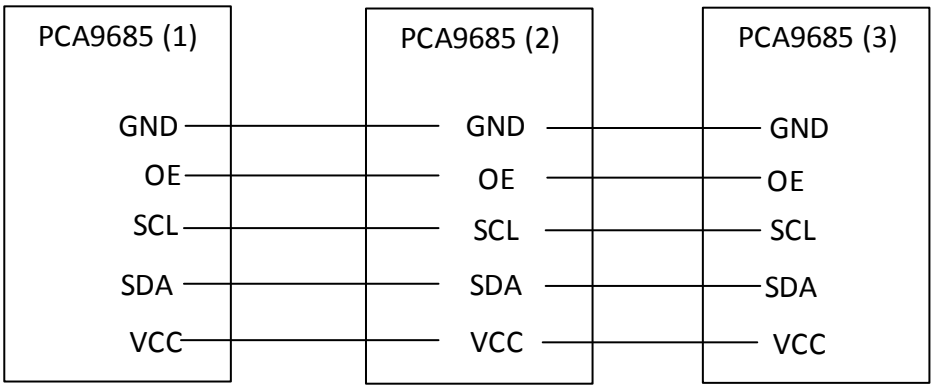

Figura 8.20: Método de conexión de las placas controladoras PCA9685.

8.12 PROPUESTA DE CONTROL

Ya que es necesario demostrar la capacidad de funcionamiento de esta mano, se construyó un programa que pueda manipular los servomotores mediante la utilización de un microcontrolador Arduino y tres placas de control de servomotores con función PWM, del tipo PCA9685, de 16 canales cada uno.

El código del programa puede ser revisado en el Anexo F, pudiendo ser copiado directamente en la función de la placa Arduino.

Este programa está considerado para limitar el recorrido de los motores, evitando su deterioro; y permite indicar el servomotor a mover, y la posición requerida. Esta información se escribe en el monitor serial de manera numérica, con la forma XXYYY, siendo:

XX la selección del servo que se desea mover, entre 01 y 48. La placa PCA9685 será seleccionada automáticamente para enviar la información al servomotor correspondiente.

YYY un valor numérico, normalmente entre 150 y 550 para una rotación de 180 grados, se podrían considerar como la cantidad de pulsos en un intervalo de tiempo en particular para enviar la señal PWM al servomotor. Por seguridad, el recorrido se encuentra limitado entre 200 y 500 pulsos.

No obstante, este programa solo permite mover cada servomotor de manera individual, y no significa que la mano realice el movimiento tal como es exigido.

8.13 MAPA DE SERVOMOTORES

Si bien, el sistema utilizado para mover la mano permite cambiar la posición de los servomotores, y el elemento correspondiente a mover cada elemento de la mano; se prefirió ordenar los servomotores y los tendones de manera aleatoria, esto pensado en que, si sucediera un accidente en el ingreso de la información de movimiento, genere cierta dificultad al realizar dos movimientos antagónicos, que puedan dañar los servomotores, debido a la realización de fuerzas contrarias en la mano.

La siguiente tabla incluye la posición física de los servomotores, con respecto a la estructura, en donde fueron etiquetados los servomotores en el prototipo para respetar esta información. La forma de representar su posición espacial es mediante dos números, el primero, es el nivel, a partir del piso superior, utilizando números del 1 al 6. El segundo número sería semejante a la columna, ordenados del 1 al 8, de forma horaria, cuando el prototipo es observado desde arriba, comenzando con uno de los cuatro servomotores de la muñeca.

También, se menciona la posición de control en el programa de accionamiento. Como se utilizan tres placas PCA9685, la primera se lleva las posiciones entre 1 y 16, la segunda entre 17 y 32; y la tercera, entre 33 y 48. Notar que cada placa PCA9685 posee una dirección electrónica que indica su correspondencia a ser la primera, segunda o

tercera placa, siendo marcadas para tal caso, y las posiciones de la placa son dadas entre 0 y 15, por lo que ser servomotor 33, será conectado en el número 15 de la segunda placa.

Tabla 8.8: Mapa de posiciones de los servomotores. La posición en programa hace referencia al número XX ingresado en el programa, según lo indicado en la Propuesta de control.

Parte	**Movimiento**	**Posición en programa**	**Posición Física**
Palma	**Extensión**	01	1-1
	Flexión	02	1-5
	Abducción Cubital (hacia el lado del meñique)	05	1-3
	Abducción Radial (hacia el lado del pulgar)	06	1-7
Índice	**Flexión Proximal**	18	3-5
	Extensión Proximal	30	4-7
	Flexión Medial	26	4-5
	Extensión Medial	38	5-7
	Flexión Distal	34	5-5
	Extensión Distal	8	1-8
	Abducción	22	3-7
	Aducción	16	2-8
Medio	**Flexión Proximal**	23	3-4
	Extensión Proximal	32	4-8
	Flexión Medial	31	4-4
	Extensión Medial	40	5-8
	Flexión Distal	47	6-4
	Extensión Distal	48	6-8
	Abducción Medial (hacia el anular)	24	3-8
	Abducción Lateral (hacia el índice)	10	2-5

Tabla 8.9: Mapa de posiciones de los servomotores. La posición en programa hace referencia al número XX ingresado en el programa, según lo indicado en la Propuesta de control. Continuación de Tabla 8.8.

Parte	Movimiento	Posición en programa	Posición Física
Anular	**Flexión Proximal**	7	1-4
	Extensión Proximal	17	3-1
	Flexión Medial	37	5-3
	Extensión Medial	25	4-1
	Flexión Distal	45	6-3
	Extensión Distal	33	5-1
	Abducción	9	2-1
	Aducción	15	2-4
Meñique	**Flexión Proximal**	43	6-2
	Extensión Proximal	11	2-2
	Flexión Medial	21	3-3
	Extensión Medial	27	4-2
	Flexión Distal	29	4-3
	Extensión Distal	46	5-2
	Abducción	19	3-2
	Aducción	41	6-1
	Flexión Metacarpo	13	2-3
	Extensión Metacarpo	3	1-2
Pulgar	**Oposición Metacarpo**	12	2-6
	Extensión Metacarpo	14	2-7
	Flexión Proximal	42	6-5
	Extensión Proximal	36	5-6
	Flexión Distal	4	1-6
	Extensión Distal	28	4-6
	Abducción	44	6-6
	Aducción	39	5-4
	Aducción secundaria	20	3-6

8.14 PROTOTIPO

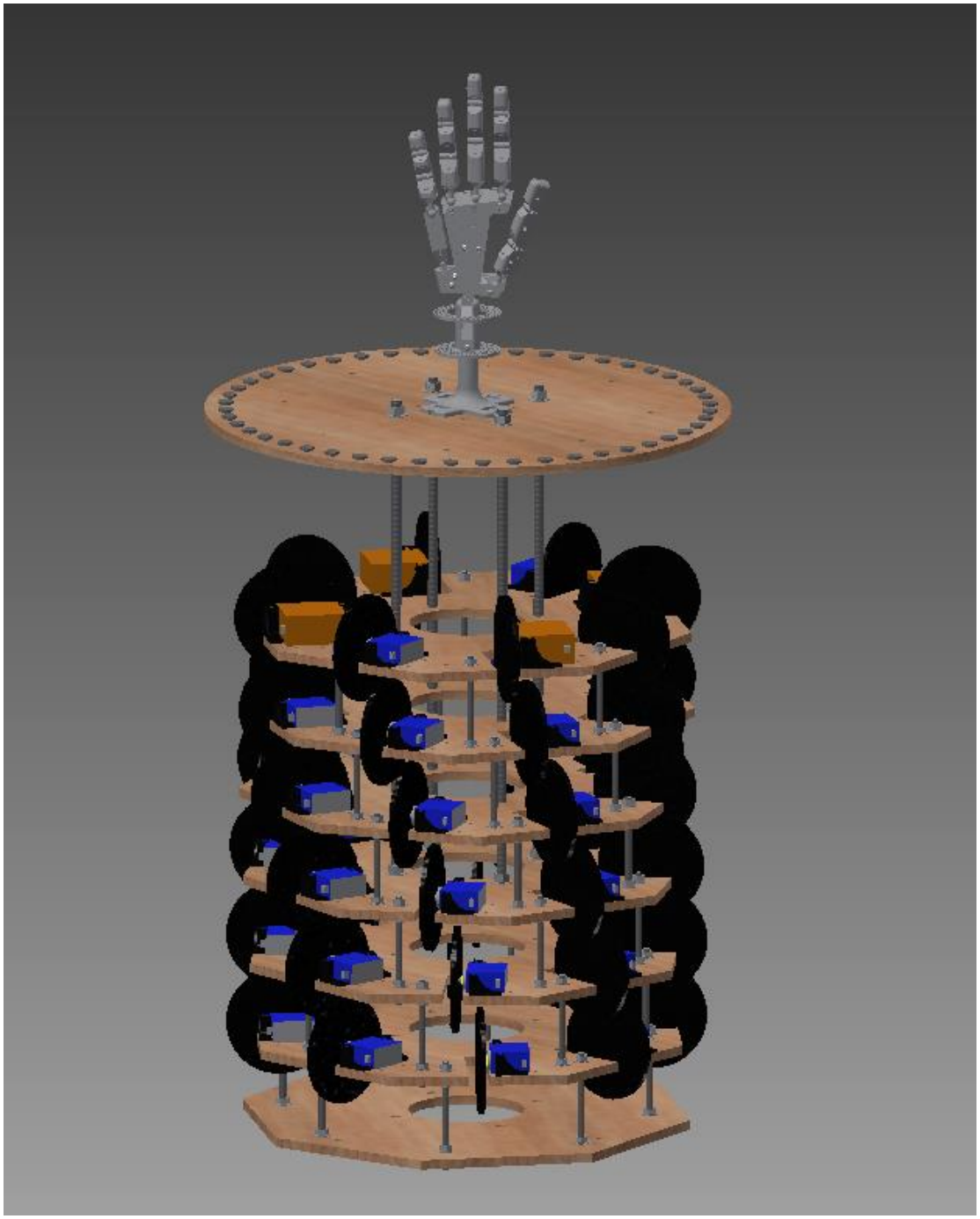

Figura 8.21: Prototipo de la mano, mostrado en Autodesk Inventor.

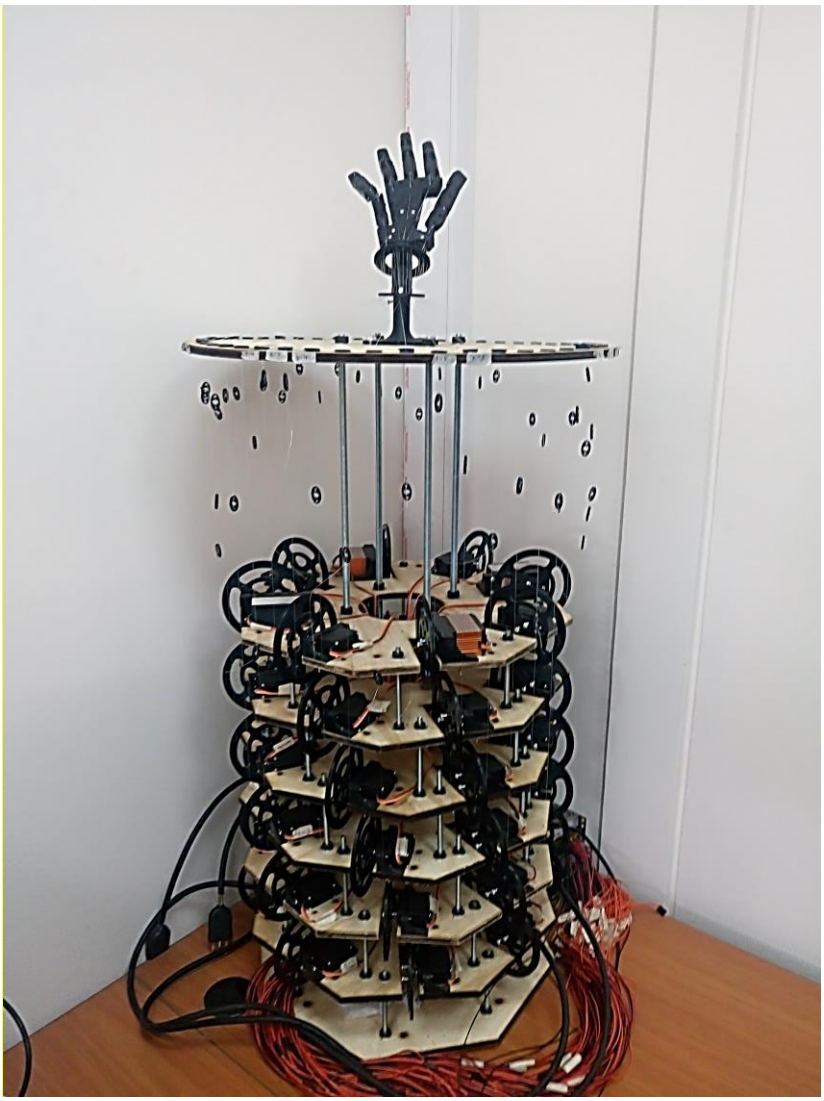

Figura 8.22: Prototipo de la mano.

El prototipo presenta la capacidad de realizar todos los movimientos establecidos en el proceso de diseño.

El rango de flexión-extensión de la articulación metacarpofalángica es mayor a lo planteado en el objetivo, pero no se considera negativo, siendo que es posible utilizarla en posiciones intermedias.

Debido a la articulación de rótula en las articulaciones metacarpofalángica de los cuatro dedos, existe un movimiento pasivo de rotación en torno al eje longitudinal de las falanges proximales de los dedos; y en la articulación carpometacarpiana del pulgar, es la que permite el giro según el eje longitudinal del metacarpo, permitiendo el movimiento de oposición.

Así mismo, la propuesta de control funciona, pero solo es posible enviar la señal a un único servomotor cada vez.

Finalmente, y al igual que la mano ACT, los movimientos de la muñeca afectan a los movimientos de los dedos.

9 CONCLUSIONES

La mano humana, se considera como el elemento del cuerpo humano utilizado como herramienta prensil, ubicada distalmente en relación con el antebrazo. La definición habitual considera que las estructuras de la muñeca y de los dedos, pertenecen a la mano; contando con 5 dedos en total, en donde aparece un pulgar con la capacidad de oponerse.

En la mano del ser humano, se reconocen 24 pares de movimientos activos (que son generados a voluntad por el ser humano), que incluyen la flexión-extensión y abducción-aducción, incluyendo los movimientos de la muñeca. Así mismo, la mano presenta 2 movimientos de oposición; en el pulgar y el dedo meñique.

Si bien, las únicas articulaciones que realizan los movimientos de abducción-aducción, son las articulaciones metacarpofalángicas de los dedos, también lo hace la articulación trapeciometacarpiana (o articulación carpometacarpiana del pulgar), cerca de la muñeca. Aunque, en contrariedad; no siempre se indica el movimiento de abducción y aducción de la articulación metacarpofalángica del pulgar, quedando en 23 pares de movimientos activos.

En el caso de la muñeca, se realizan dos movimientos de flexión-extensión en las articulaciones radiocarpianas y mediocarpianas que, en conjunto, realizan la flexión y extensión total de la muñeca, pero el efecto visual, es como si se realizara un único par flexión-extensión.

Los movimientos de la mano humana tienen dos componentes principales, que fueron estudiados: el esqueleto óseo, que mantiene la estructura general de la mano, así como su forma, mientras que limita la realización de los movimientos, en base a deslizamientos de los huesos en las zonas articulares; y los músculos que, al contraerse,

tiran de los tendones, que se insertan en los diferentes huesos de la mano, permitiendo el movimiento de la mano, tanto en la muñeca, y los dedos, en función de la inserción, con respecto a la articulación que mueven. De esta forma, los movimientos de la mano se realizan en base a tensiones de los tendones, produciéndose en base a las limitaciones articulares.

Este mismo método es el acostumbrado a realizar en la construcción de las “dexterous hands”, que fue definido al español como “manos hábiles”; lo que permite mantener la forma general, y las dimensiones, de los sistemas mecánicos, respecto con la mano biológica. No obstante, estas estructuras derivan los sistemas de actuación a una base que sujeta la mano, que muchas veces, no incluye la muñeca; debido a que su movimiento particular influye en los movimientos del resto de los dedos; y el sistema de tendones permite mover la mano en función de donde se ubiquen en la mano, tal como funciona una mano real. Así mismo, es posible cambiar la organización de los tendones artificiales para generar sistemas de movimientos coordinados, pero perdiendo la capacidad de mover individualmente cada elemento de la mano hábil.

Finalmente, fue creado un prototipo de mano hábil, que tiene la capacidad de mover individualmente cada una de sus partes, utilizando la idea de una estructura, donde se ubican los elementos de actuación, que estaban restringidos a ser servomotores y utilizaban un mecanismo de poleas, que tiraban de un conjunto de tendones insertados en la mano. La mano es situada en la cima de la estructura, y los tendones convergen a ella mediante un soporte que simula la muñeca del ser humano, esto, produce que el movimiento de la muñeca afecte finalmente los movimientos de los dedos, también sucediendo el caso contrario (el movimiento de los dedos afecta en la muñeca).

La mano, finalmente consta de dedos semejantes, incluso el pulgar, que constarían de tres falanges, en donde la articulación metacarpofalángica funciona a través de un sistema de rótula, mientras que las articulaciones interfalángicas funcionan como una

articulación simple, con ejes rotacionales, los que permiten la flexión y extensión. Como los dedos son semejantes, el hueso del metacarpo, del pulgar, es parecido en diseño a las falanges proximales del resto de los dedos; y la misma rótula permite el movimiento de oposición de este dedo.

Para la fabricación de las partes, se utilizó un proceso de impresión tridimensional, utilizando filamento de ácido poliláctico, en base a que posee una baja deformación cuando las piezas se enfrían, o se encuentran en proceso de impresión (con respecto a otros materiales como el acrilonitrilo butadieno estireno. Por lo tanto, se privilegió la forma final de las piezas.

Además, para que la mano sea capaz de realizar los movimientos, necesita de un sistema de control, que permita mover individualmente los servomotores. Para esto simplemente se escogió utilizar una placa de control Arduino UNO, y tres placas controladoras de servomotores PCA9685; de esta forma solo se hizo un programa para el sistema Arduino, en donde se pudiera escoger el servomotor a mover, y así, mover la parte de la mano requerida, requiriendo el ingreso de la información de forma manual por parte del usuario.

10 TRABAJOS FUTUROS

La mano hábil desarrollada en esta memoria carece de un sistema de control coordinado que permita dar naturalidad a sus movimientos, con relación a la mano del ser humano. Por lo tanto, sería interesante observar la conjunción de este prototipo, con un sistema de control.

El contexto en el cual se basó la realización de este prototipo es para observar los movimientos que pueden ser utilizados en las diferentes acciones del ser humano, en que su mano es utilizada como una herramienta. Por lo tanto, después de la incorporación del sistema de control, faltaría determinar estos movimientos, y la manera de hacerlos, incluso si se llega a la conclusión que el sistema de movimiento de este prototipo está errado.

Por último, y en conjunto con los desarrollos de los párrafos anteriores, todavía faltaría someter los sistemas creados en la realización de prótesis y/o sistemas robóticos que apoyen las tareas de los seres humanos, y así, esta memoria, y este prototipo puedan seguir siendo utilizados como herramientas en la creación de otros sistemas, con mejores prestaciones y capacidades.

11 REFERENCIAS

[1] Diccionario de la Lengua Española, Real Academia de la Lengua Española. Definición Mano [en línea] <http://dle.rae.es/?id=OF9CzGo|OFAJXYy> [consulta: 17 abril 2017].

[2] DRAKE, Richard L., VOGL, A. Wayne, Mitchell, Adam W. M. GRAY. Extremidad superior. En su: GRAY ANATOMÍA PARA ESTUDIANTES. 3ª ed. España, Elsevier España, 2015, pp. 683-834.

[3] KAPANDJI, A. I. Capítulo 5. LA MANO. En su: Fisiología Articular. TOMO 1. 6ª ed. España, Editorial Médica Panamericana, S.A., 2006, pp. 198-341.

[4] KAPANDJI, A. I. Capítulo 3. LA PRONOSUPINACIÓN. En su: Fisiología Articular. TOMO 1. 6ª ed. España, Editorial Médica Panamericana, S.A., 2006, pp. 104-145.

[5] ROUVIÈRE, Henry y DELMAS, André. ANATOMÍA HUMANA. DESCRIPTIVA, TOPOGRÁFICA Y FUNCIONAL. 11ª ed. España. Masson, 2005. 3 v.

[6] KAPANDJI, A. I. Capítulo 4. LA MUÑECA. En su: Fisiología Articular. TOMO 1. 6ª ed. España, Editorial Médica Panamericana, S.A., 2006, pp. 146-197.

[7] DRAKE, Richard L., VOGL, A. Wayne, Mitchell, Adam W. M. GRAY. El cuerpo. En su: GRAY ANATOMÍA PARA ESTUDIANTES. 3ª ed. España, Elsevier España, 2015, pp. 1-50.

[8] Anne Hollister, William L. Buford, Loyd M. Myers, David J. Giurintano, Andrew Novick. The Axes of Rotation of the Thumb Carpometacarpal Joint. Journal of Orthopedic Research, 10 (3): 454-460. Mayo, 1992.

[9] R.C. Miralles, M. Granados, X. Balcells. Capítulo 10 Mano. En: R.C. Miralles. Biomecánica clínica del aparato locomotor. Barcelona, España. Masson 1998, pp. 147-169.

[10] Raymond R. Ma, Aaron M. Dollar. On Dexterity and Dexterous Manipulation. The 15th International Conference on Advanced Robotics (15°, 2011, Estonia) Tallin Tallinn University of Technology, 2011, pp 1-7.

[11] CCAS 2002: International Conference on Control, Automation and Systems (2°, 2002, Corea). Anthropomorphic Robot Hand: Gifu Hand III. Gifu, Japón. Gifu University. 2002. pp 1288-1293

[12] JACOBSEN, S.C., IVERSEN, E.K., KNUTTI D.F., JOHNSON R.T., BIGGERS, K.B. DESIGN OF THE UTAH/M.I.T. DEXTROUS HAND [en línea] <people.csail.mit.edu/edsinger/raw/jacobsen_design_utah_hand.pdf> [consulta: 21 mayo 2016]

[13] Shadow Robot Company. Design of a Dextrous Hand for advanced CLAWAR applications [en línea] <http://www.shadowrobot.com/downloads/dextrous_hand_final.pdf> [consulta: 21 mayo 2016]

[14] Shadow Robot Company. Shadow Dexterous Hand Technical Specification. Shadow Dexterous Hand E1 Series (E1M3R, E1M3L, E1P1R, E1P1L). Technical Specification. <http://www.shadowrobot.com/wp-

content/uploads/shadow_dexterous_hand_technical_specification_E1_20130101.pdf > [consulta: 21 mayo 2016]

[15] DESHPANDE, Ashish D., XU, Zhe, VANDE WEGHE, Michael J., BROWN, Benjamin H., KO, Jonathan, CHANG, Lillian Y., WILKINSON, David D., BIDIC, Sean M. y MATSUOKA, Yoky. Mechanisms of the Anatomically Correct Testbed (ACT) Hand [en línea] <neurobotics.cs.washington.edu/papers/ACT_Mechanism_ToM.pdf> [consulta: 10 abril 2016]

[16] Zhe Xu, Vikash Kumar, Emanuel Todorov. A low-cost and Modular, 20-DOF Anthropomorphic Robotic Hand: Design, Actuation and Modeling [en línea] <https://homes.cs.washington.edu/~todorov/papers/XuHumanoids13.pdf> [consulta: 21 junio 2016]

[17] Fernando Reyes Cortés. Servomotores y Sensores Capítulo. En su: Control de robots manipuladores. Primera edición. México. Alfaomega grupo editor, 2011, pp. 45-96.

[18] BINVIGNAT, O., ALMAGIÀ, A., LIZANA, P., OLAVE, E. Aspectos Biométricos de la Mano de Individuos Chilenos. [en línea] International Journal of Morphology (Temuco, Chile). 2012. 30(2). <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-95022012000200040 > [consulta: 29 julio 2016]

[19] BodyParts3D/Anatomography. Huesos de la mano, vista lateral [en línea] http://lifesciencedb.jp/bp3d/print.html?shorten=SrOHzurK11HDTzmKT5S515ze [consulta: 27 octubre 2016]

[20] BodyParts3D/Anatomography. Huesos de la mano, vista palmar [en línea] http://lifesciencedb.jp/bp3d/print.html?shorten=0jOHTfrGrm0TqWja4XXbKHDS [consulta: 27 octubre 2016]

[21] YouTube. Anthropomorphic robot hands using maxon motors [en línea] https://www.youtube.com/watch?v=omyJ2fbjJro [consulta: 26 junio 2016]

[22] Anne Hollister, David J. Giurintano, William L. Buford, Loyd M. Myers, Andrew Novick. The Axes of Rotation of the Thumb Interphalangeal and Metacarpophalangeal Joints. CLINICAL ORTHOPAEDICS AND RELATED RESEARCH, pp 454-460. 1995.

[23] YouTube. A Low-cost and Modular, 20-DOF Anthropomorphic Robotic Hand: Design, Actuation and Modeling [en línea] https://www.youtube.com/watch?v=KB_vMtydk30 [consulta: 29 junio 2016]

[24] YouTube. Gifu ACT Hand experiment with crocheted extensor hood [en línea] https://www.youtube.com/watch?v=445eSQo_4ok [consulta: 29 junio 2016]

[25] YouTube. Gifu Robot Hand Project [en línea] https://www.youtube.com/watch?v=GCF4G1EbT2w [consulta: 29 junio 2016]

[26] Zhe Xu, Emanuel Todorov. Design of a Highly Biomimetic Anthropomorphic Robotic Hand towards Artificial Limb Regeneration [en línea] <https://homes.cs.washington.edu/~todorov/papers/XuICRA16.pdf> [consulta: 25 junio 2016]

[27] Vimeo. The Highly Biomimetic Anthropomorphic Robotic Hand [en línea] https://vimeo.com/154571244 [consulta: 29 junio 2016]

[28] Android World. Android Hands [en línea] http://www.androidworld.com/prod76.htm [consulta: 29 junio 2016]

[29] Mindtrans. The best five antrhopomorphic robotic hands/arms [en línea] http://mindtrans.narod.ru/hands/hands.htm [consulta: 29 junio 2016]

[30] Robotnik. Robotic hands[en línea] http://www.robotnik.eu/robotic-hands/ [consulta: 3 julio 2016]

[31] Tower Pro. MG996R [en línea] http://www.towerpro.com.tw/product/mg995-robot-servo-180-rotation/ [consulta: 5 noviembre 2016]

[32] CYS. CYS-S8218 [en línea] http://www.cysmodel.com/showproducty.asp?c=20&a=107 [consulta: 5 noviembre 2016]

[33] Equipesca. Ekilon 0.20 mm. [en línea] https://equipesca.cl/index.php?id_product=613&controller=product [consulta: 25 junio 2016]

[34] Equipesca. Ekilon 0.30 mm. [en línea] https://equipesca.cl/index.php?id_product=615&controller=product [consulta: 25 junio 2016]

[35] CYS Model. Particular Especification. [en línea] http://www.cysmodel.com/UploadFiles/2014916152940170.pdf [consulta:25 junio 2016]

[36] Electronicos Caldas. MG996R. [en línea] http://www.electronicoscaldas.com/datasheet/MG996R_Tower-Pro.pdf [consulta: 25 junio 2016]

[37] Cambridge Dictionary. Dexterous. [en línea] http://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/dexterity?q=dexterous [consulta: 10 noviembre 2016]

[38] Collins Dictionary. Dexterous. [en línea] https://www.collinsdictionary.com/dictionary/english/dexterous [consulta: 10 noviembre 2016]]

[39] Oxford Dictionary. Dexterous. [en línea] https://en.oxforddictionaries.com/definition/dexterous [consulta: 10 noviembre 2016]]

[40] Cambridge Dictionary. Skill. [en línea] http://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/skill [consulta: 10 noviembre 2016]]

[41] Collins Dictionary. Skill. [en línea] https://www.collinsdictionary.com/dictionary/english/skill [consulta: 10 noviembre 2016]]

[42] Oxford Dictionary. Skill. [en línea] https://en.oxforddictionaries.com/definition/skill [consulta: 10 noviembre 2016]]

[43] Cambridge Dictionary. Dexterous. [en línea] http://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/ability [consulta: 10 noviembre 2016]]

[44] Collins Dictionary. Dexterous. [en línea] https://www.collinsdictionary.com/dictionary/english/ability_1 [consulta: 10 noviembre 2016]

[45] Oxford Dictionary. Dexterous. [en línea] https://en.oxforddictionaries.com/definition/ability [consulta: 10 noviembre 2016]]

[46] Cambridge Dictionary. Dexterous. [en línea] http://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/well [consulta: 10 noviembre 2016]]

[47] Collins Dictionary. Dexterous. [en línea] https://www.collinsdictionary.com/dictionary/english/well [consulta: 10 noviembre 2016]]

[48] Oxford Dictionary. Dexterous. [en línea] https://en.oxforddictionaries.com/definition/well [consulta: 10 noviembre 2016]]

[49] Cambridge Dictionary English-Spanish. Dexterous. [en línea] http://dictionary.cambridge.org/dictionary/english-spanish/dexterous [consulta: 10 noviembre 2016]]

[50] Collins Dictionary English-Spanish. Dexterous. [en línea] https://www.collinsdictionary.com/dictionary/english-spanish/dexterous [consulta: 10 noviembre 2016]]

[51] Diccionario de la lengua española. Diestro. [en línea] http://dle.rae.es/?id=DiPpTTa [consulta: 10 noviembre 2016]]

[52] Diccionario de la lengua española. Hábil. [en línea] http://dle.rae.es/?id=JvDFknz [consulta: 10 noviembre 2016]]

[53] Sparkfun. Hobby Servo Tutorial. [en línea] https://learn.sparkfun.com/tutorials/hobby-servo-tutorial [consulta: 4 agosto 2016]

[54] Darren Sawicz. Fundamentals [en línea] https://www.princeton.edu/~mae412/TEXT/NTRAK2002/292-302.pdf [consulta: 4 agosto 2016]

[55] Ultimaker. Technical data sheet PLA. [en línea] <https://ultimaker.com/file/download/product/TDS%20PLA%20v3.006.pdf/58f607db42b1e.pdf> [consulta: 5 marzo 2017]

[56] Ultimaker. Technical data sheet ABS. [en línea] <https://ultimaker.com/file/download/product/TDS%20ABS%20v3.006.pdf/58f607f7565d8.pdf> [consulta: 5 marzo 2017]

[57] Jordi Ferrer. ABS vs PLA: ¿Qué diferencia existe entre estos dos filamentos para impresora 3D? [en línea] <https://makershopbcn.com/abs-vs-pla-que-diferencia-existe-entre-estos-dos-filamentos-para-impresora-3d> [consulta: 5 marzo 2017]

12 ANEXOS

12.1 ANEXO A

DESAMBIGÜACIÓN “DEXTROUS HAND”

Como ya se introdujo en la sección 7.6, el término “dextrous hand” (o “dexterous hand”), no presenta una clara definición en el inglés, pudiendo explicarse como la capacidad de manipular un objeto, o simplemente, una relación de similitud con la mano del ser humano.

En los diccionarios Cambridge, Oxford y Collins, identifican la palabra como el acto de tener una habilidad (“skill”), o ser hábil (“skilfull”) al realizar una acción; y las tres definiciones suelen incluir el uso de las manos. [43][38][39]

Por lo tanto, se busca el término “skill”, que siempre se muestra como una habilidad “ability”, quizás con características especiales”, para realizar bien (“well”) una tarea. Pudiendo provenir de una práctica anterior. [40][41][42]

El problema de la definición de “ability” es que siempre se acostumbra a definir a través de la palabra “skill”. Pero también se indica como la posesión de los medios o las cualidades con las que se puede realizar algo. [43][44][45]

En el caso del término “bien” (del inglés “well”), no existen definiciones absolutas, identificando criterios de estándares de calidad, y en algunos casos hace referencia a que algo es completado, o se termina. [46][47][48]

Por lo tanto, se mantiene la ambigüedad en las definiciones en inglés para los términos “dextrous” o “dexterous”. Pero se puede indicar que trata de una cualidad positiva en la realización de una acción.

Ahora, en el caso de las definiciones en el español, los diccionarios Oxford y Cambridge, utilizan los términos “diestro” y “hábil”. [49][50]

Así, la Real Academia de la Lengua Española define el término “diestro” en base al término “hábil”. Este último término se define como: “capaz de realizar con éxito una tarea manual” [52]. Esta definición simplemente referencia la capacidad de hacer algo, y no identifica las características de cómo se realiza. De esta manera, si se puede identificar que el objeto del que se habla es una mano (“hand”), se utilizará el término “mano hábil” para un sistema que posea semejanza física, y tenga la capacidad de realizar tareas como la de una mano.

Es necesario notar que la descripción realizada en el párrafo anterior de “mano hábil” no identifica la cualidad de hacer bien o mal una tarea, si no, la capacidad de parecerse a una mano, tanto en forma como en comportamiento. No obstante, cualquier mano podría ser una mano hábil, simplemente con ser una mano humana que tenga la capacidad de realizar diferentes acciones. Para efectos de esta memoria, se prefiere el término utilizar el término “mano artificial hábil”, para un sistema mecánico fabricado, construido o accionado por medios artificiales, que se asemeje a una mano humana; tanto en acciones (prensiles o de movimiento) como en aspecto físico.

12.2 ANEXO B

SERVOMOTORES

Los servomotores utilizados normalmente en los grupos de “Hazlo tú mismo” son controlados a través de un sistema de pulsos de voltajes eléctricos, con diferentes duraciones de tiempo, lo que se conoce como modulación por ancho de pulso (del inglés “pulse width modulation”, o PWM).

Típicamente, el recorrido del servomotor (su giro) es un múltiplo de 45 grados.

Los servomotores poseen una salida mecánica, con forma de estrella, en la que se puede acoplar un elemento a ser rotado. Además, el sistema eléctrico cuenta con tres cables, que se indicarán como: tierra (GND), positivo (V+) y señal (PWM).

De manera general, el voltaje que se permite entre el cable tierra (GND) y el cable positivo (V+) se mueve entre los 4 V y los 7,2 V. Y el cable de señal, recibe una corriente modulada por ancho de pulso; en este último caso, la duración de las pulsaciones o pulsos en un tiempo determinado permite orientar la posición de la estrella del servomotor. Es necesario notar que, para hacer funcionar varios servomotores a través de una misma fuente, todos ellos deben compartir los cables de tierra deben aterrizarse en un mismo punto (compartir la tierra, eléctricamente hablando).

Más información relevante puede ser encontrada en foros en línea de aficionados al aeromodelismo y a tiendas electrónicas, como la indicada en [53] y [54].

12.3 ANEXO C

BOCETOS

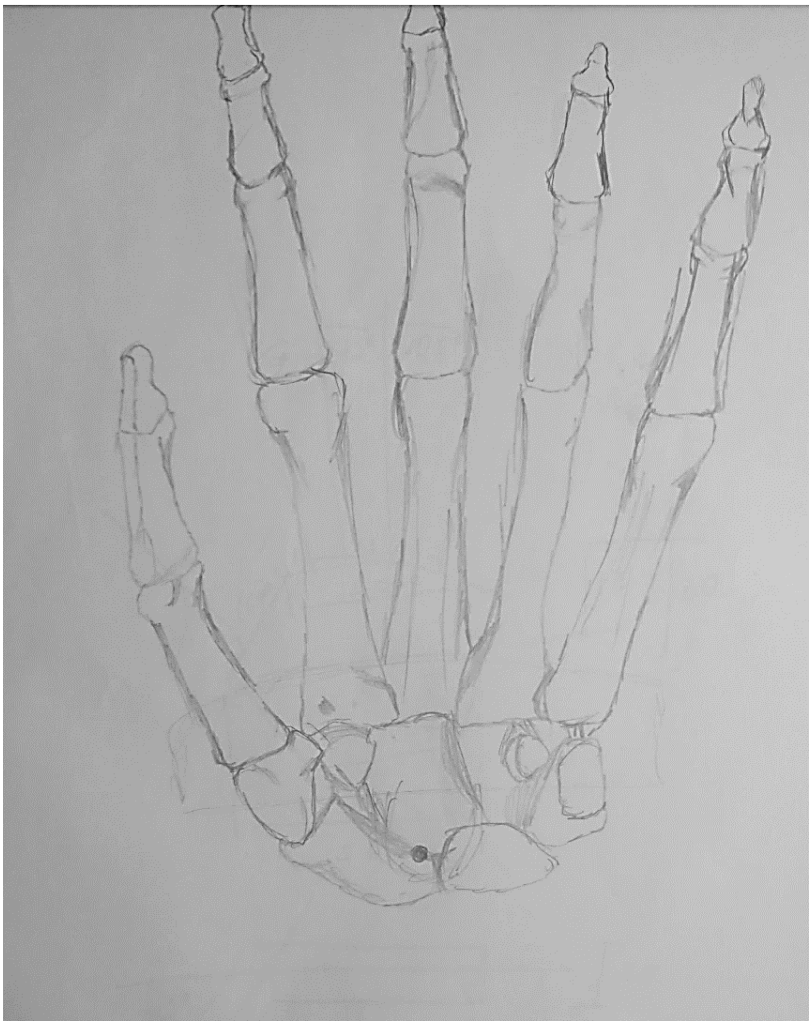

Figura 12.1: Revisión de los huesos de la mano. El punto negro en los huesos del carpo representa el eje de abducción de la muñeca.

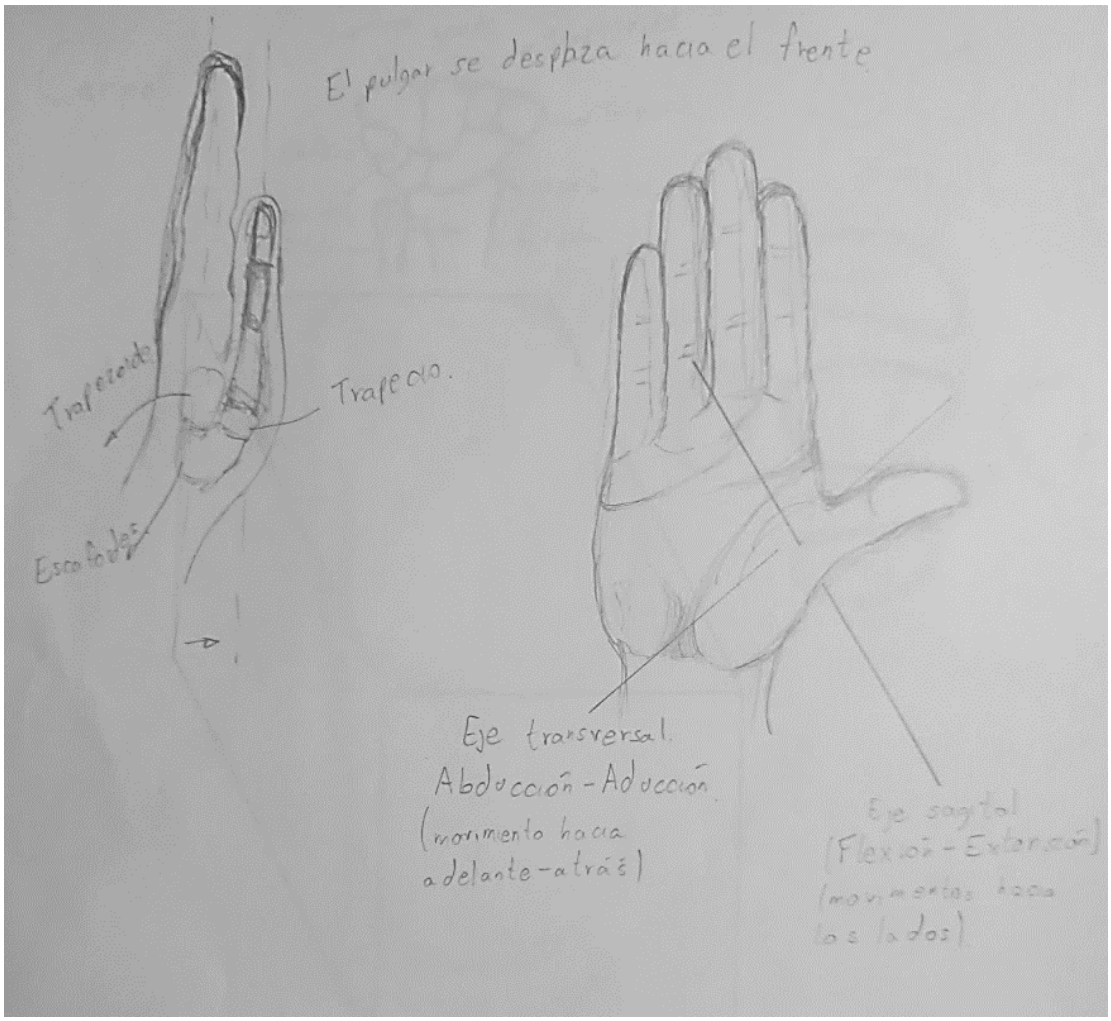

Figura 12.2: Revisión del esqueleto del pulgar y los movimientos de la articulación trapeciometacarpiana.

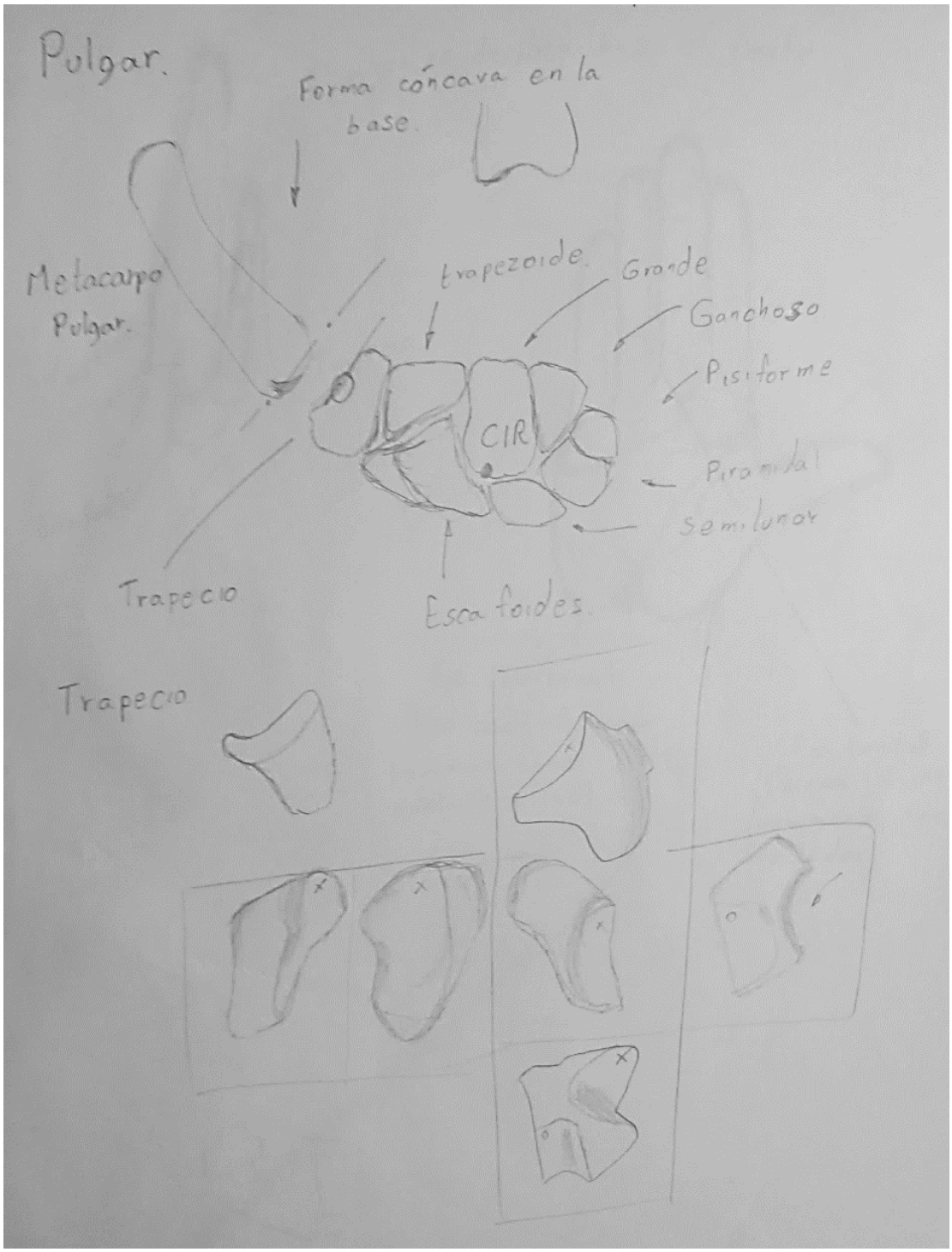

Figura 12.3: Arriba, revisión de los huesos del carpo y el metacarpo del pulgar. Abajo, revisión del trapecio.

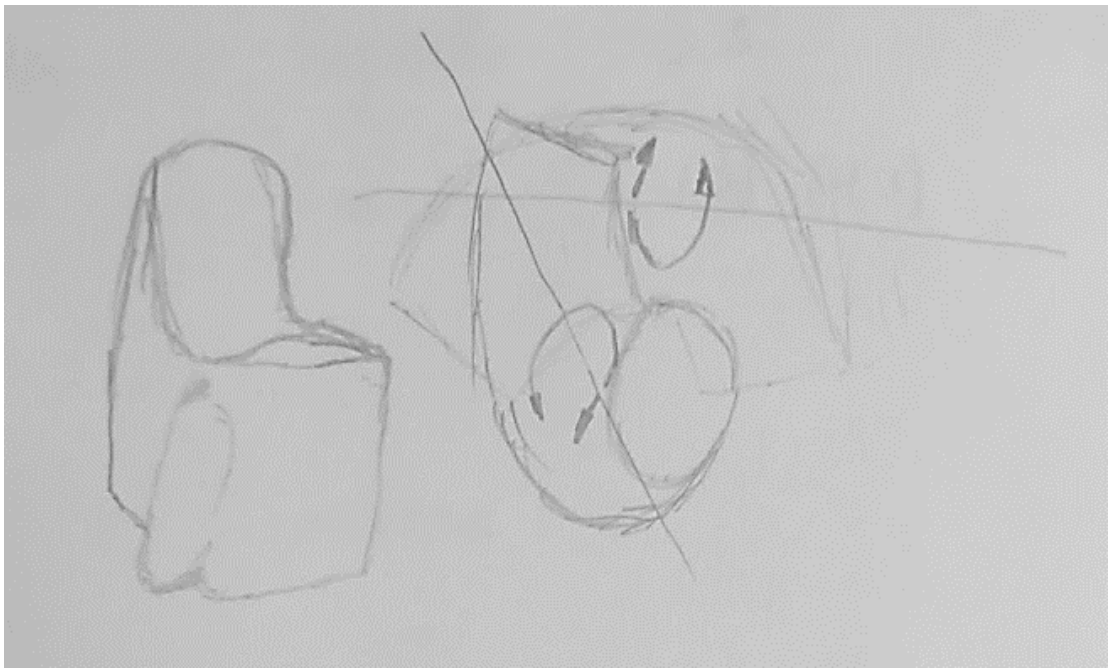

Figura 12.4: Revisión de los movimientos sobre el trapecio, en la articulación tipo silla de montar.

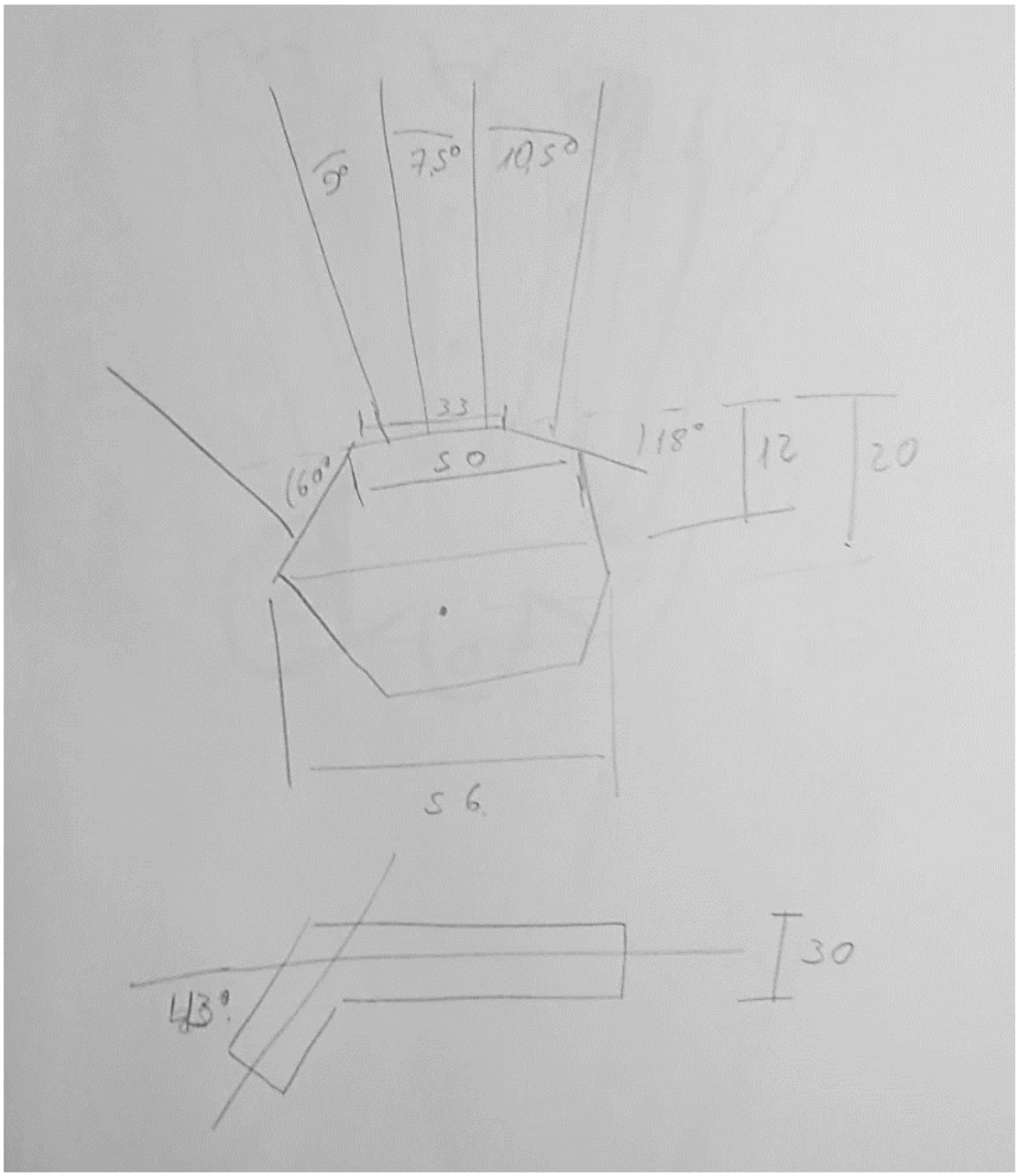

Figura 12.5: Revisión inicial de la forma y dimensiones de la mano.

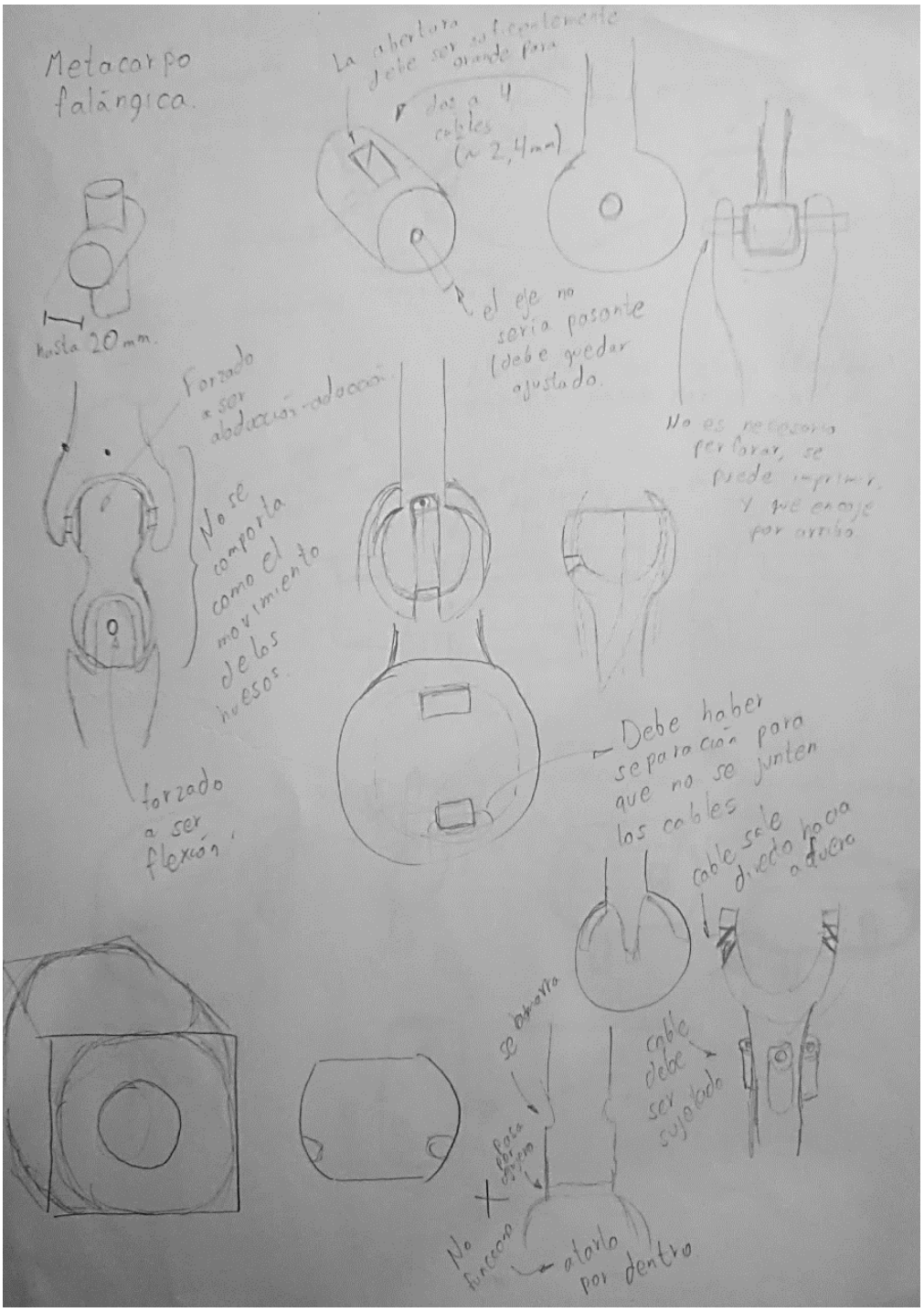

Figura 12.6: Bocetos iniciales de articulaciones metacarpofalángicas.

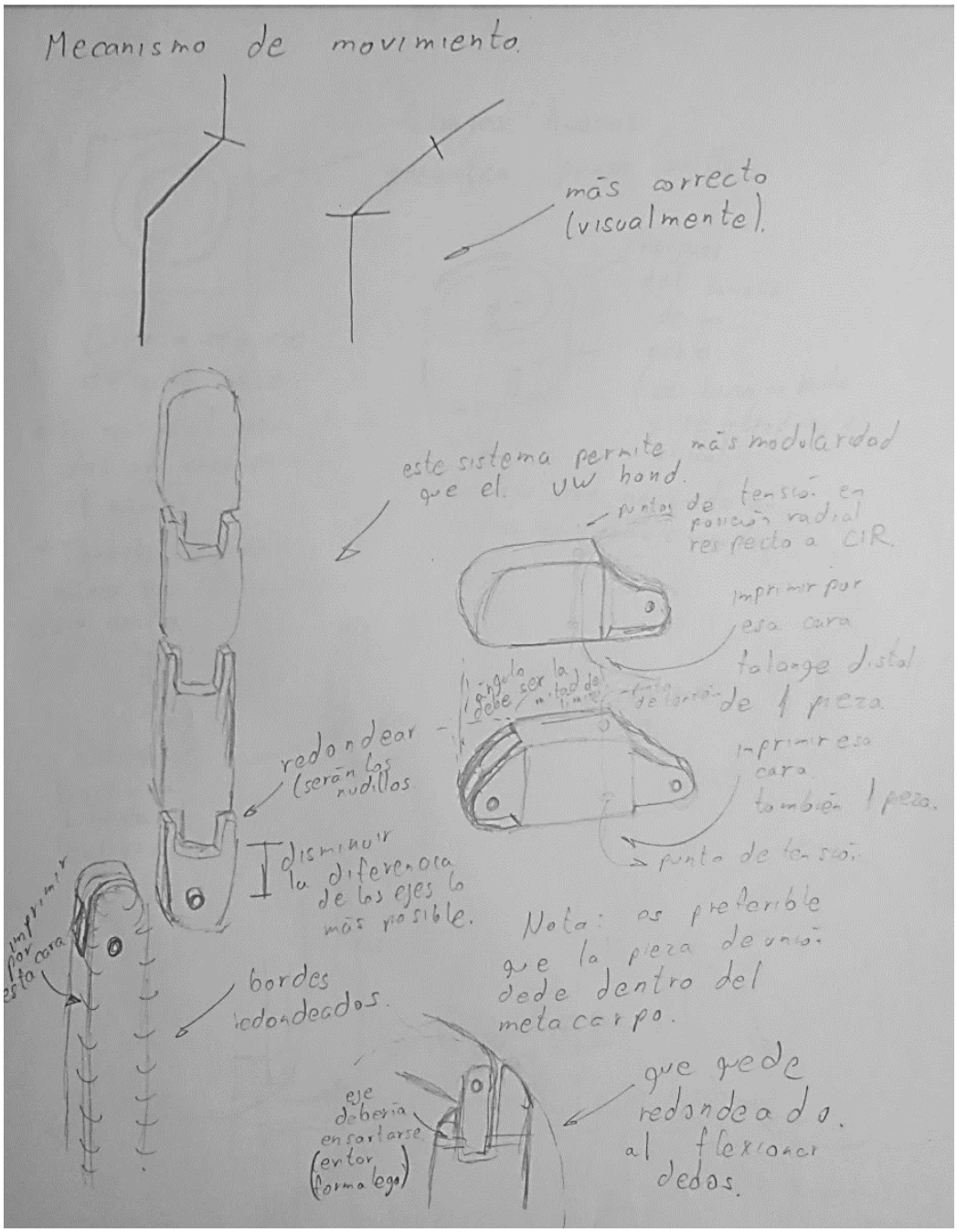

Figura 12.7: Bocetos iniciales de sistema articular en los dedos.

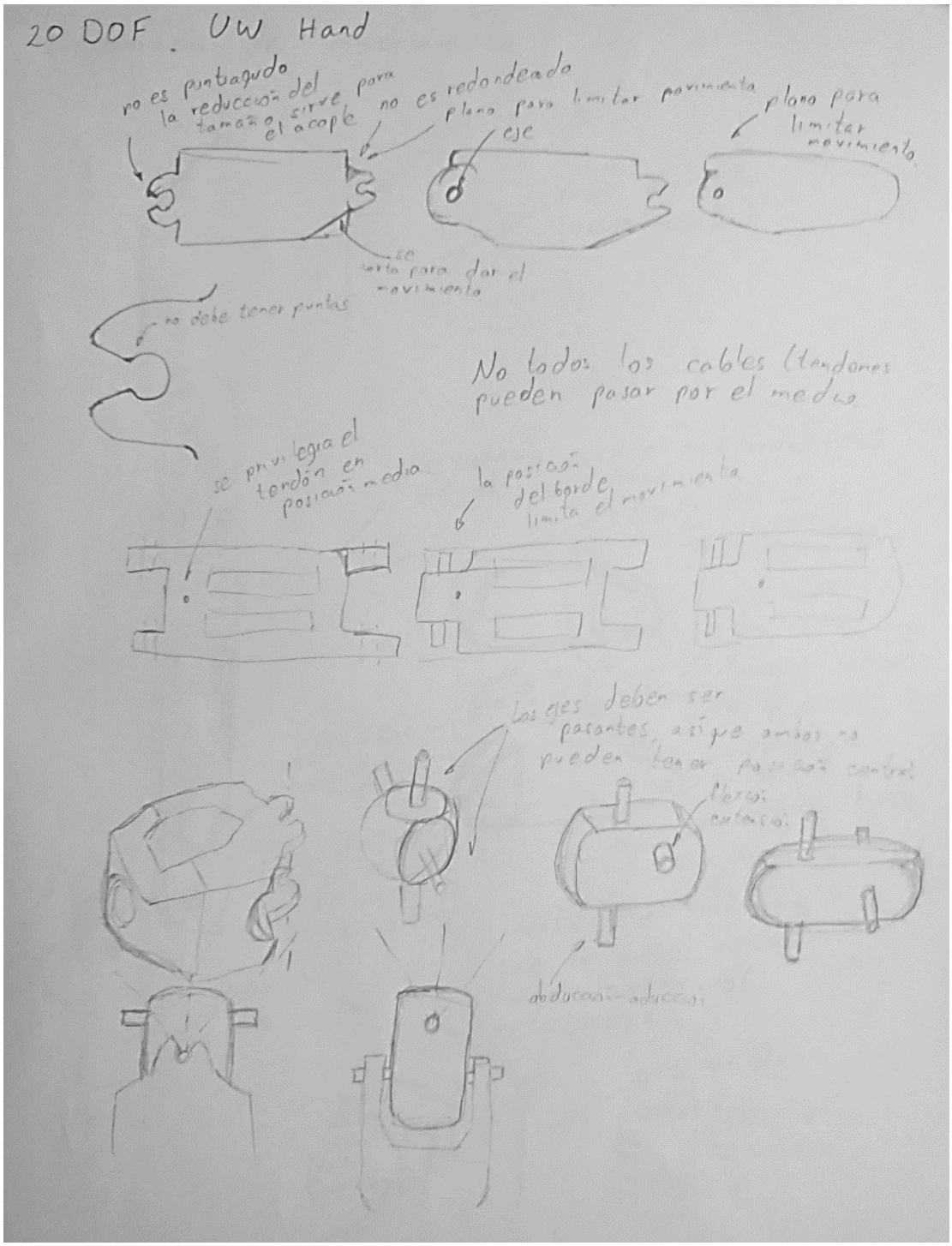

FIGURA 12.8: BOCETOS DE ARTICULACIONES METACARPOFALÁNGICAS, BASADOS EN LA

Mano antropomórfica, impresa en 3D con 20 grados de libertad. [16]

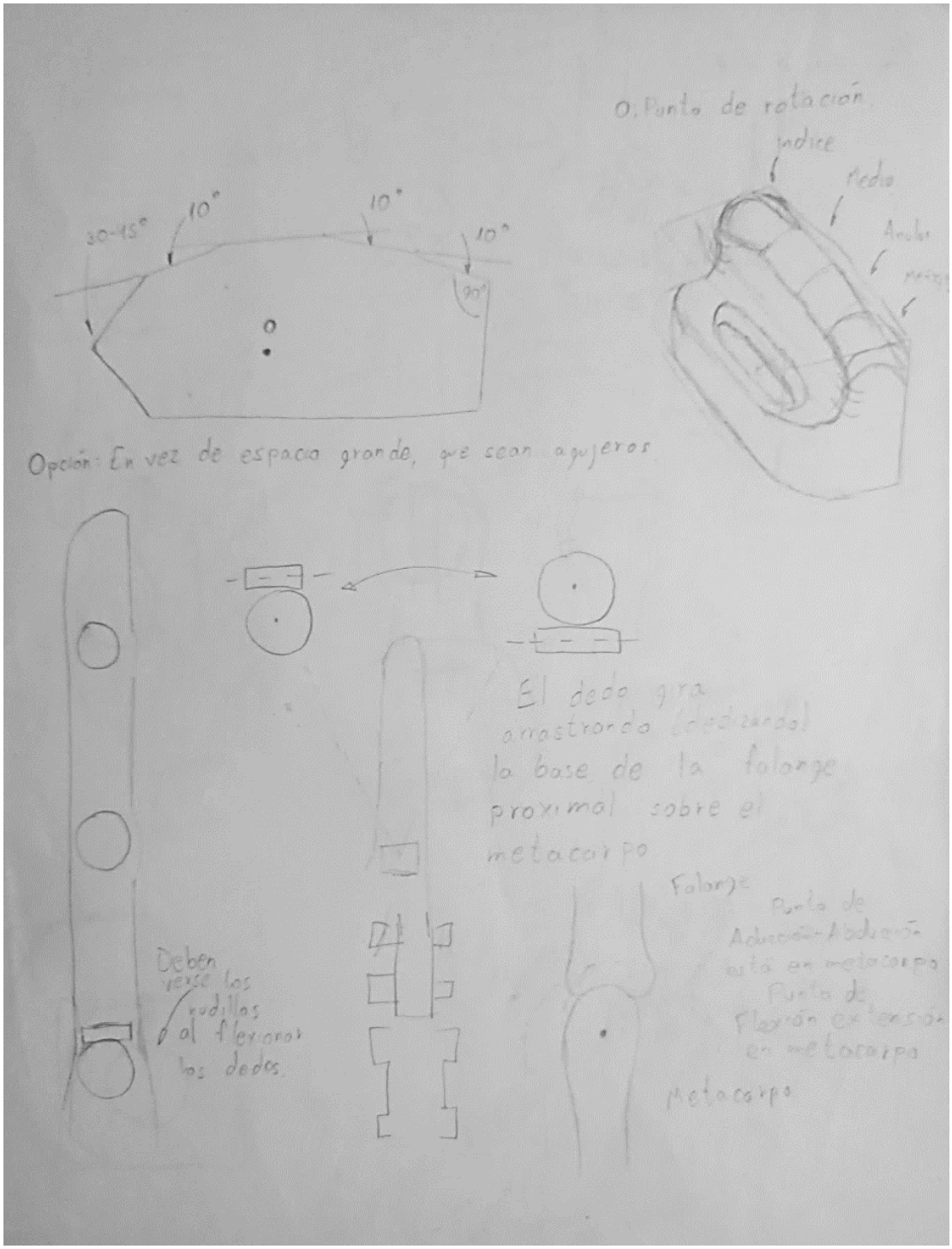

Figura 12.9: Arriba, idea de la forma del carpo. Abajo, idea de articulación de un dedo.

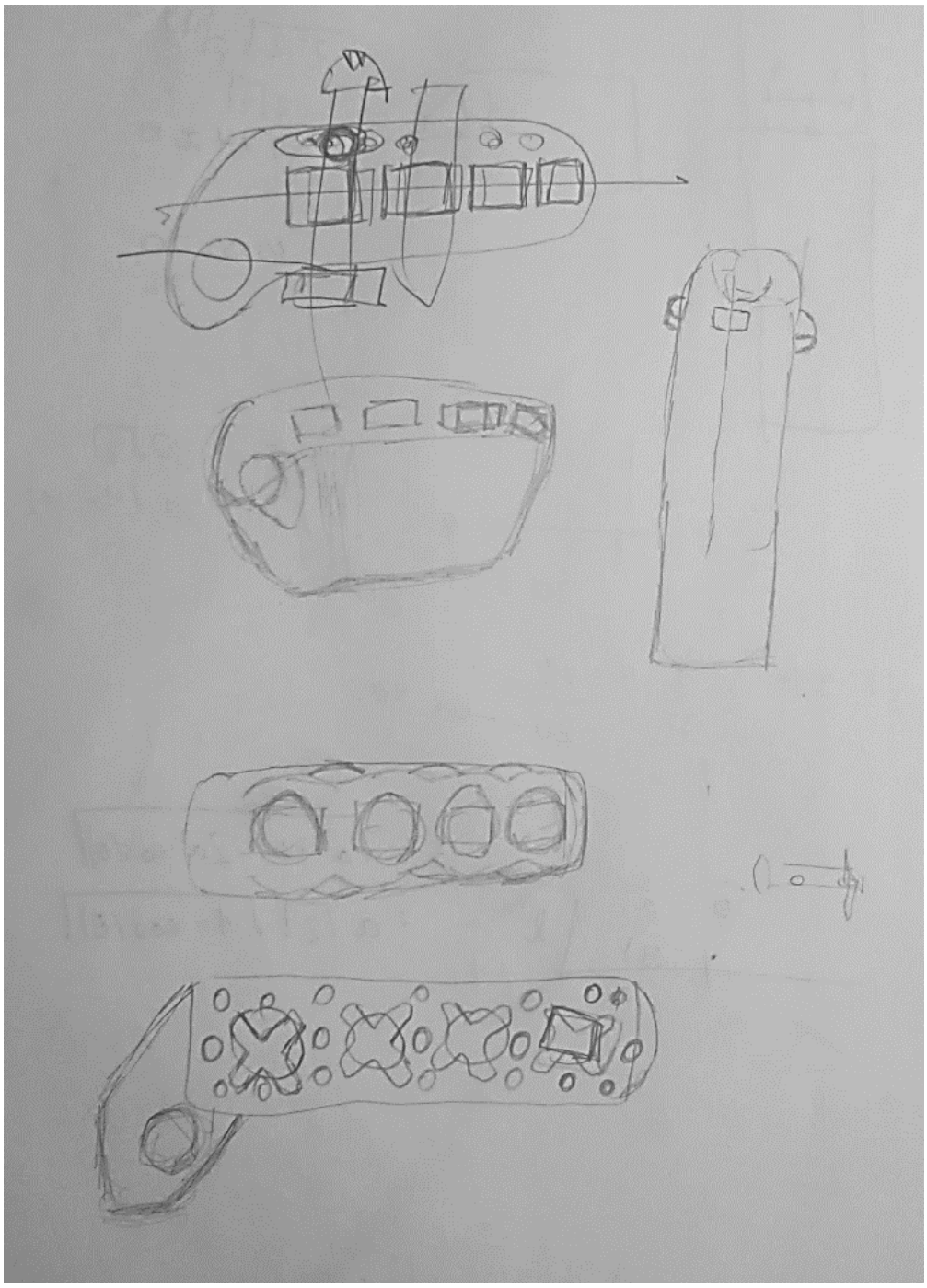

Figura 12.10: Idea de un carpo, independiente de los metacarpos de los dedos, se pensaba revisar como sujetar los metacarpos. En la parte de arriba, la idea era usar tornillos perpendiculares a la palma.

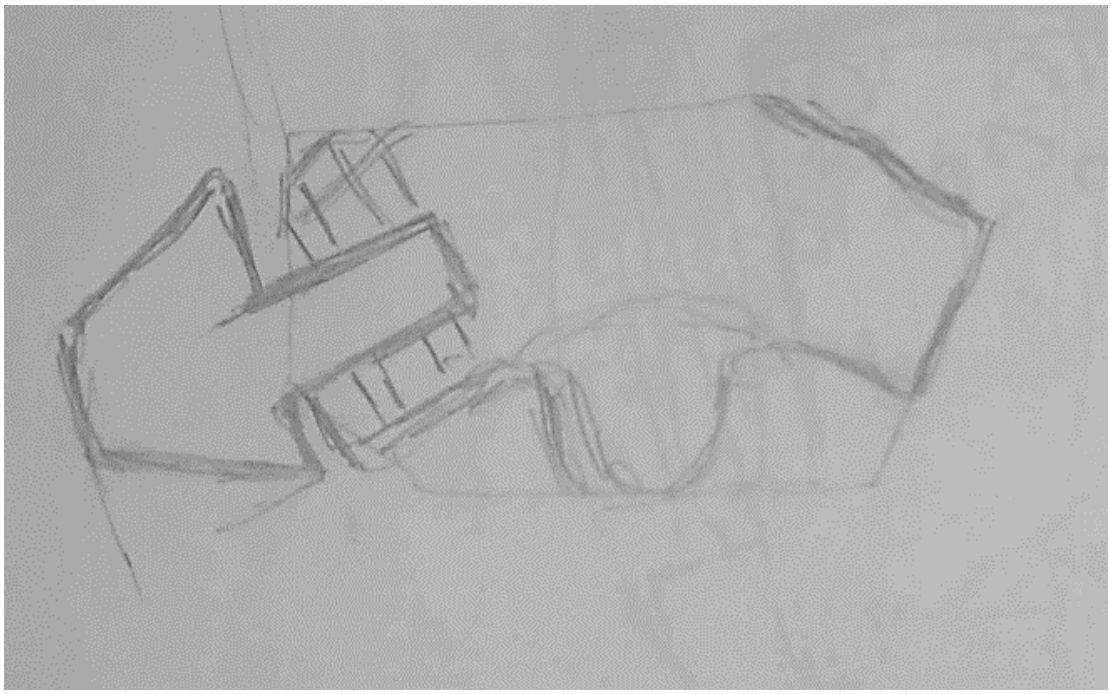

Figura 12.11: Idea de un sistema para oposición del pulgar y el carpo, la sección redondeada inferior sería el eje de abducción de la mano.

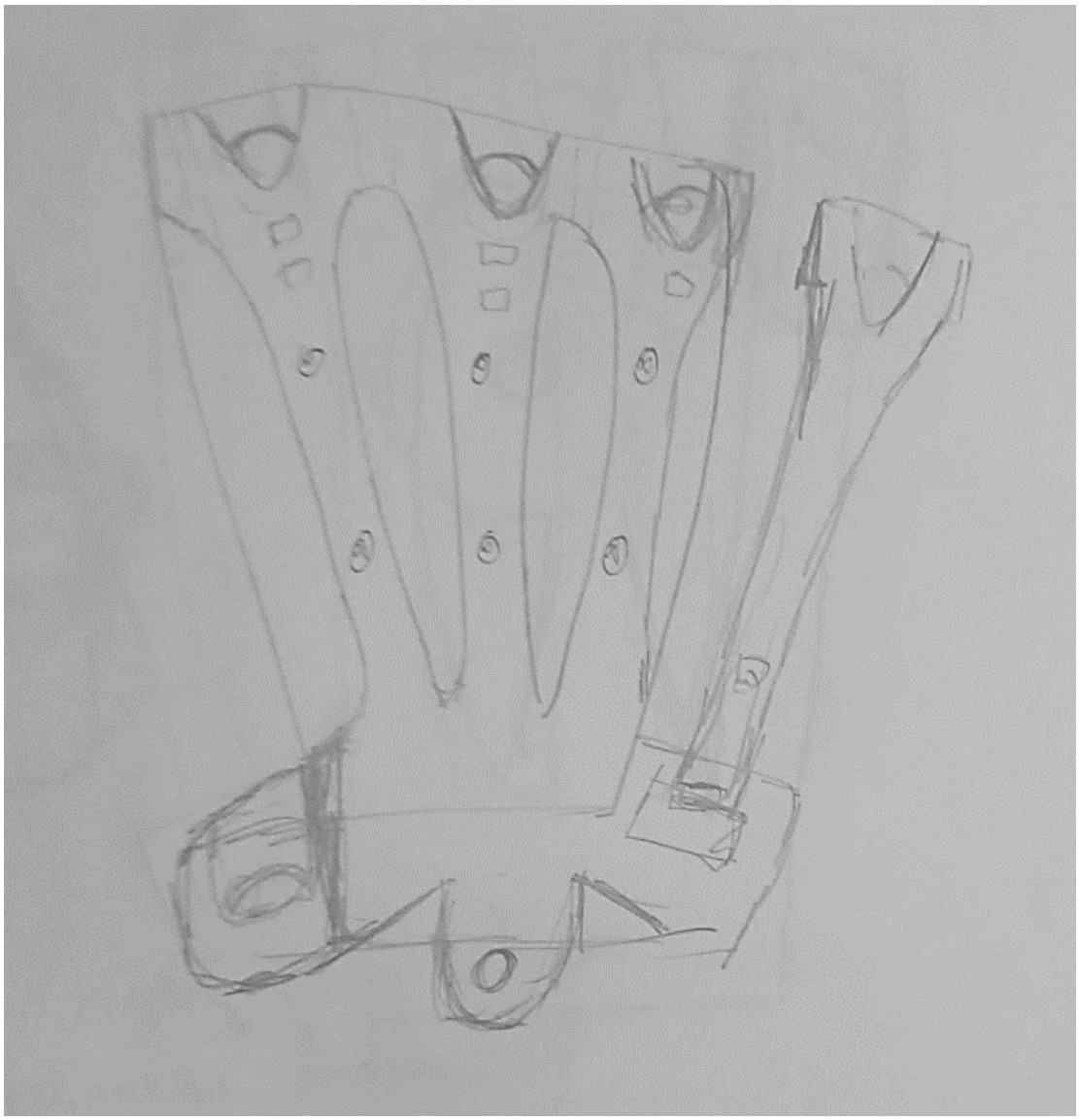

Figura 12.12: Idea de una palma, con meñique independiente. A la izquierda se comienza a ver una idea de articulación de rótula para el pulgar. Se buscaba reducir el material desperdiciado en realizar una palma completa, separando los metacarpos. En la base del metacarpo del meñique se muestra una idea de articulación de rodillo, para un movimiento de oposición.

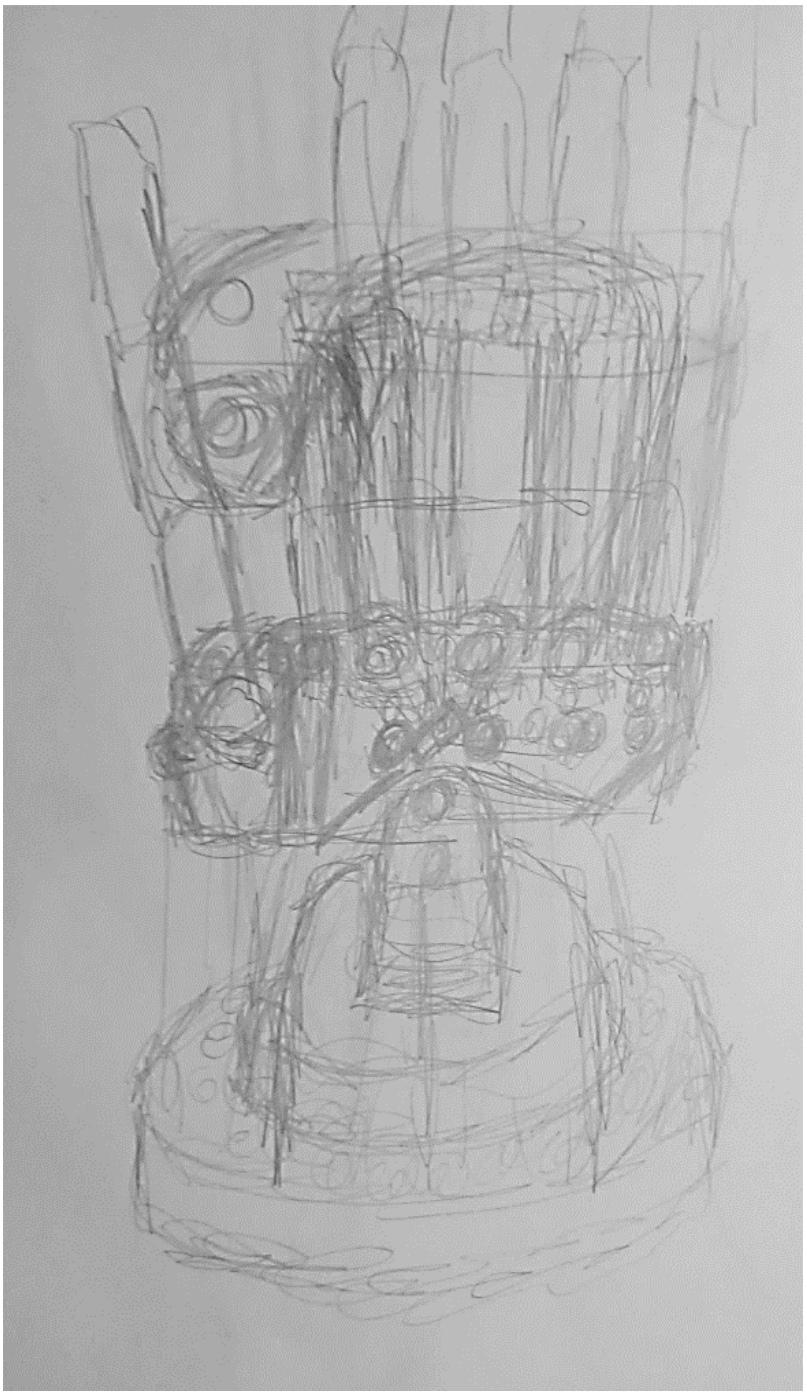

Figura 12.13: Idea del prototipo de la mano. El exceso de trazos es debido a que se hacían las correcciones en el mismo boceto. En la zona inferior se muestra un disco, con ideas de agujeros para hacer pasar los tendones a la mano.

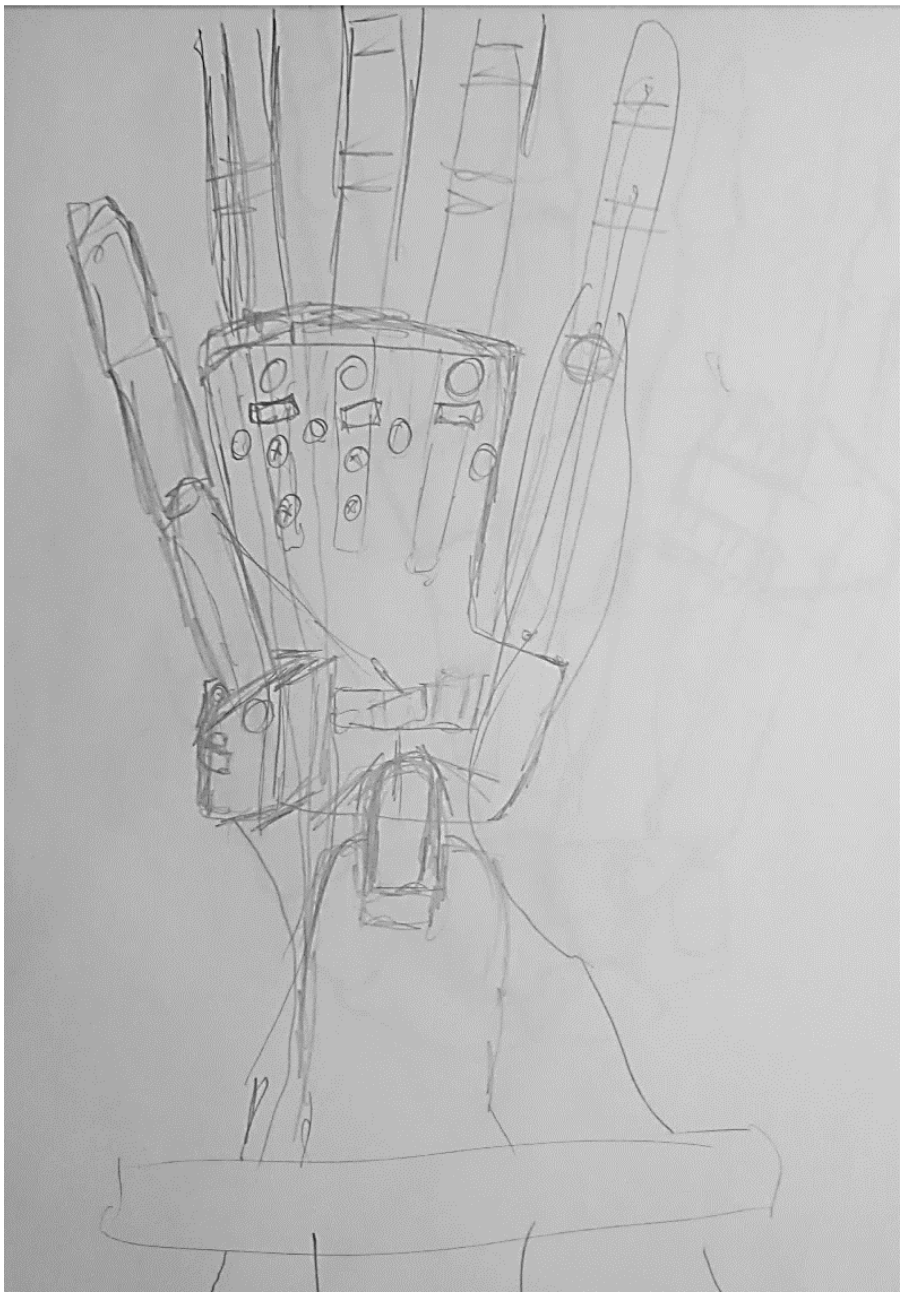

Figura 12.14: Idea de prototipo de la mano, basado en la Figura 12.13. Se empieza a revisar la posibilidad de hacer una articulación metacarpofalángica de tipo rótula. Se incluye un tendón que sale de la palma hacia el pulgar, buscando imitar el músculo aductor de este dedo. Bajo los metacarpos de los dedos se ubicarían tornillos para presionar la articulación de rótula.

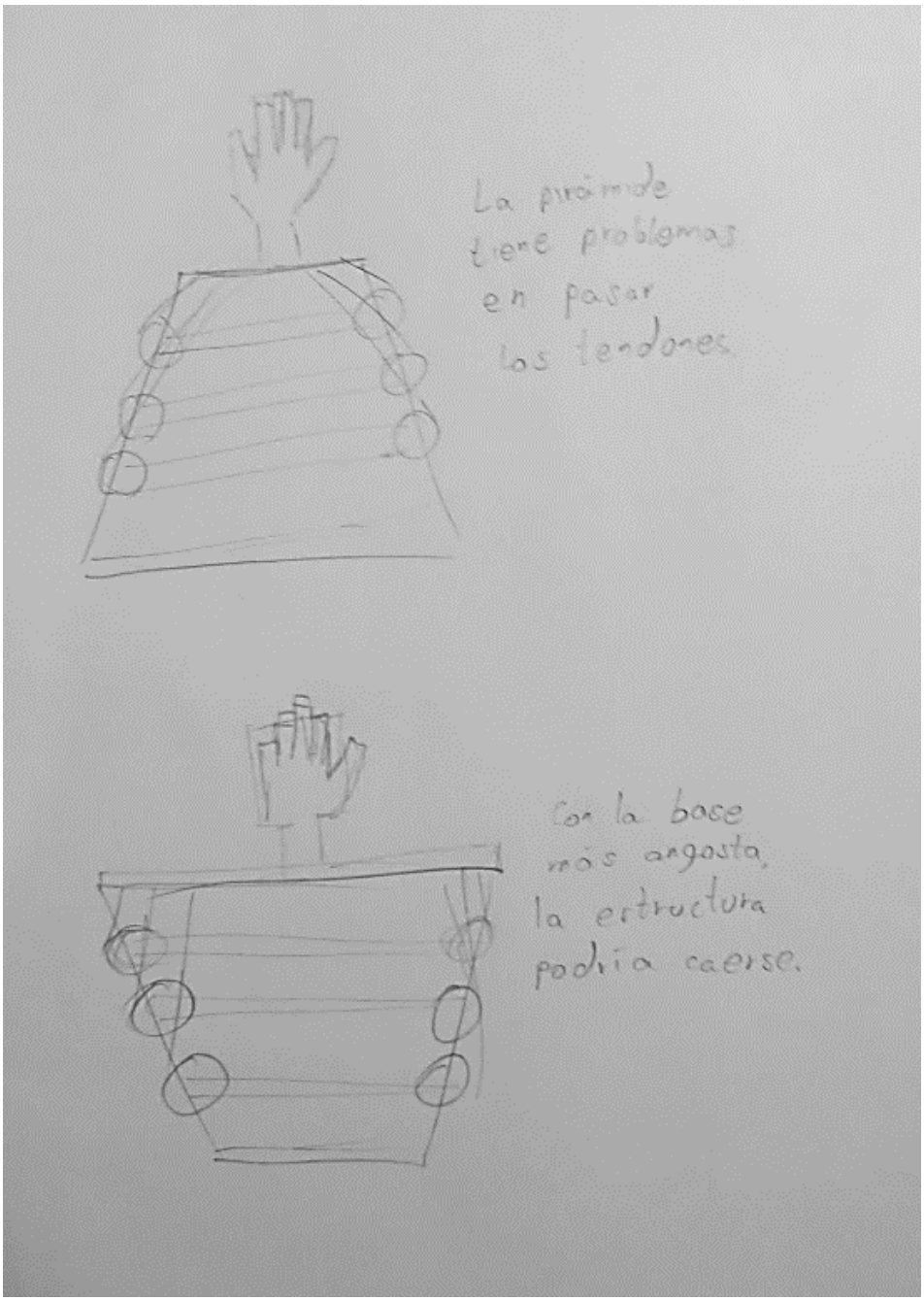

Figura 12.15: Revisión de la estructura, con forma de pirámide, para ubicar los tendones. A primera vista, la estructura funciona mejor cuando el nivel superior es mayor a los inferiores.

12.4 ANEXO D

MATERIALES DE IMPRESIÓN 3D

Para el desarrollo en impresión (impresión en tres dimensiones) de los prototipos, se dispone de una máquina Ultimaker 2, y una Ultimaker 2 Extended, las que disponían de filamentos de ácido poliláctico (PLA, del inglés "polylactic acid") y acrilonitrilo butadieno estireno (ABS, del inglés acrylonitrile butadiene styrene), al momento de iniciar las pruebas de impresión. Ambos filamentos poseen las siguientes características:

Tabla 12.1: Resumen de características técnicas de filamentos PLA y ABS.

Característica	**PLA [55]**	**ABS [56]**
Punto de Fusión [°C]	145-160	225-245
Densidad [g/cm^3]	1,24	1,1
Temperatura de Extrusión [°C]	180-220	220-250
Temperatura base caliente [°C]	30-50	>80
Módulo de Esfuerzo [MPa]	2364,5	1681,5
Esfuerzo de Fluencia [MPa]	49,5	39,0
Esfuerzo máximo [MPa]	45,6	33,9

A diferencia del PLA, el plástico ABS es más sensible a los efectos de la temperatura y debe ser extruido a una temperatura superior, y requiere de un enfriamiento lento en un ambiente controlado, o podría deformarse durante y después de la impresión. Además, el plástico PLA soporta mayor esfuerzo antes de romperse en comparación al ABS, siendo este último más flexible. [55] [56] [57]

12.5 ANEXO E

CÁLCULO PARA SELECCIÓN DE SERVOMOTORES

Para definir el torque necesario de los servomotores, se utilizará una aproximación general de la geometría de la mano, como si cada parte pudiera ser representada por un paralelepípedo sólido, con densidad constante y dimensiones conocidas (longitud, ancho y profundidad), basados en: la forma de la mano y la densidad del material escogido, identificados en la sección 8.5.1.

De esta forma, la representación de las fuerzas en cada elemento se puede aproximar según el siguiente esquema:

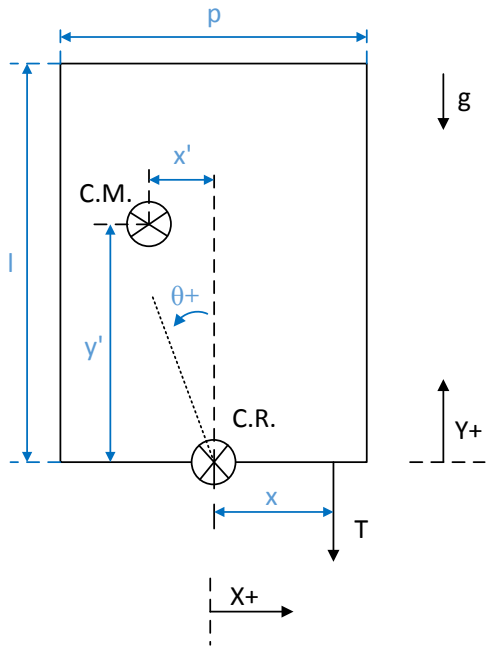

Figura 12.16: Diagrama de cuerpo libre (vista lateral o medial), con la forma general para cada parte de la mano, donde C.R. y C.M. son el centro de rotación y centro de masa, respectivamente. Las dimensiones se muestran en azul.

Las diferentes dimensiones de la Figura 12.16 se definen:

X+: eje de referencia horizontal, con respecto a C.R.

Y+: eje de referencia vertical, con respecto a C.R.

θ+: rotación positiva del eje longitudinal de la pieza, con respecto a C.R, en el sentido de la flexión.

T: fuerza aplicada en la pieza para lograr su rotación respecto a C.R. Como aproximación, se considera siempre paralela al eje longitudinal de la pieza.

x: posición de la fuerza T, respecto a C.R.

x' e y': posición de C.M. respecto a C.R.

g: aceleración de gravedad.

a (no mostrada): ancho de la pieza, se mide perpendicularmente respecto a X+ e Y+ (vista anterior).

l: largo de la pieza, según la referencia de la pieza.

p: profundidad de la pieza (vista lateral o medial).

De esta forma, la ecuación que relaciona las fuerzas del sistema representado en la Figura 12.16 (cuando no se estudian los efectos de otros elementos participantes) es:

$$I \cdot \alpha = T \cdot x - m \cdot g \cdot (x' \cdot \cos(\theta) + y' \cdot \sin(\theta)) \qquad (12.1)$$

Donde:

I: Inercia rotacional

α: Aceleración angular.

m: la masa de la parte.

Como no existe requerimiento de tiempo necesario para ejecutar un movimiento; según la ecuación anterior, simplemente se tiene que cumplir la condición:

$$I \cdot \alpha > 0 \qquad (12.2)$$

O lo que es igual:

$$T \cdot x > m \cdot g \cdot (x' \cdot \cos(\theta) + y' \cdot \sin(\theta)) \qquad (12.3)$$

Al utilizar una polea conectada al servomotor para tensar el cable, se tiene que:

$$T = M/r \qquad (12.4)$$

Donde M es el torque necesario a aplicar por el servomotor, y r es el radio de la polea que tensa el cable. Por lo tanto, la ecuación (2 ecuaciones anteriores), se puede describir como:

$$M > \frac{m \cdot g \cdot r}{x} \cdot (x' \cdot \cos(\theta) + y' \cdot \sin(\theta)) \tag{12.5}$$

Por último, conociendo las características de geometría (a, l y p), así como la densidad del material (ρ), igual a 1,24 [g/cm^3] (de la sección 12.4), es posible describir la masa (m) como:

$$m = a \cdot l \cdot p \cdot \rho \tag{12.6}$$

Así, con la ecuación (12.6) se puede aproximar la masa de las partes de la mano como:

Tabla 12.2: Dimensiones geométrica (en milímetros), y masa (en gramos) de las falanges del dedo medio, y la palma, para aproximación de torque requerido por servomotores. Se utiliza una densidad de 1,24 [g/cm^3], equivalente a 0,00124 [kg/cm^3]. Para efectos de la aproximación, se considera que el pulgar pertenece a la palma.

Parte	**a [mm]**	**p [mm]**	**l [mm]**	**masa [kg]**
Falange Distal (Dedo medio)	21,25	20	27	0,016
Falange Medial (Dedo medio)	21,25	20	37	0,021
Falange Proximal (Dedo medio)	21,25	20	56	0,032
Palma	50	85	115	0,61

Además, si se considera como aproximación; que el centro de masa pasa por el eje longitudinal de la pieza, y se tiene que obtener el torque (M) mínimo del servomotor, se tiene:

$$M_{min} > \frac{m \cdot g \cdot r \cdot y'}{x} \tag{12.7}$$

Donde M_{min} es el torque mínimo que debe realizar el servomotor escogido.

Notar que y', puede ser aproximado a la mitad de longitud de las partes de la mano, debido a su aproximación como una forma regular.

De esta manera, la aproximación para obtener la masa a mover y el centro de gravedad aproximado (y') en cada movimiento, se hace asumiendo que el sistema a mover también incluye las partes distales conectadas a esta (Figura 12.17); es decir, si se desea mover la palma, también hay que mover los 4 dedos en conjunto (con las tres falanges de cada uno), y si se desea mover la falange medial de un dedo, también hay que mover la falange distal. Así, se obtendrá:

$$m_{sistema} = m_{pieza} + \sum m_{distal} \tag{12.8}$$

$$y'_{sistema} = \frac{y'_{pieza} \cdot m_{pieza} + \sum y'_{distal} \cdot m_{distal}}{m_{sistema}} \tag{12.9}$$

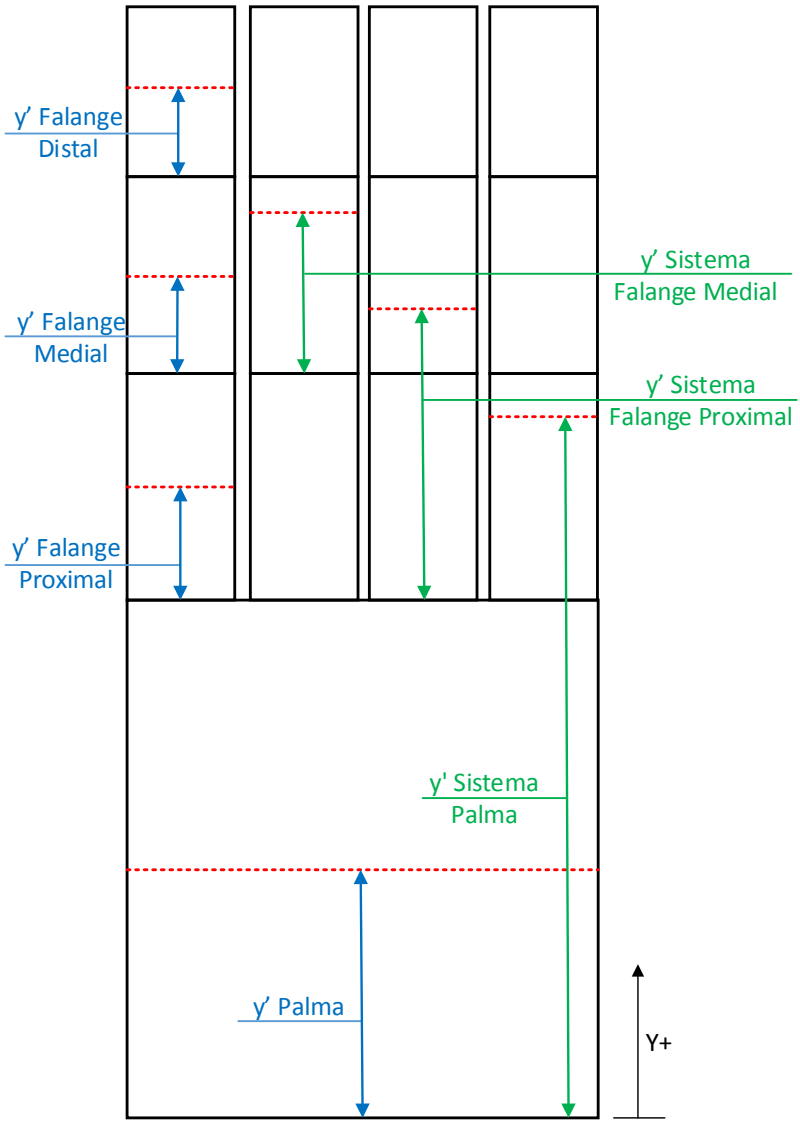

Figura 12.17: Representación esquemática (aproximada) de los centros de gravedad de las partes de la mano (flechas azules), y los sistemas a mover (flechas verdes). Ambos tipos de centros de gravedad se miden desde la zona inferior.

La aproximación mostrada en la Figura 12.17 se realiza como si la mano solo tuviera dedos medios (debido a su mayor tamaño, el dedo medio es el caso crítico para el

sistema), y se considera que los dedos centrados en la palma, con respecto a la vista lateral o medial (permitiendo aproximar x' a cero), representado en la siguiente tabla:

Tabla 12.3: Resultados de masa del sistema ($m_{sistema}$) a mover, y determinación del centro de gravedad de las partes y el sistema. Dimensiones con respecto al sistema a mover, según la Figura 12.17.

Sistema a mover	**Elementos a mover**	**Largo (l) [mm]**	**Masa (m) [kg]**	**y' [mm]**	**masa [Kg]**	**y' sistema [mm]**
Distal	**F. Distal**	27	0,016	13,5	0,016	13,5
Medial	**F. Distal**	27	0,016	50,5	0,037	32,3
	F. Medial	37	0,021	18,5		
Proximal	**F. Distal**	27	0,016	106,5	0,069	60,4
	F. Medial	37	0,021	74,5		
	F. Proximal	56	0,032	28,0		
Palma	**Dedos (x4)**	120	0,276	117,9	0,886	76,3
	Palma	115	0,61	57,5		

La mayoría de los torques de los servomotores vienen descritos en unidades de kilogramo fuerza por unidad de centímetro, entonces la relación anterior se puede expresar de la manera:

$$M_{min} > \frac{m_{sistema} \cdot r \cdot y'_{sistema}}{x} \tag{12.10}$$

Por último, existe la relación de giro máximo permitido por el servomotor, entregado en grados, que viene relacionado con el radio de la polea:

$$\phi_{min} = \frac{d}{r} \cdot \frac{360}{2\pi} \tag{12.11}$$

d: distancia que debe recorrer el tendón para permitir la rotación máxima de la pieza.

La distancia d, se puede aproximar como el valor entre la distancia lineal máxima entre el punto x (punto de acción de la fuerza T), y el arco producido por esta misma rotación, como se puede representar en la siguiente figura:

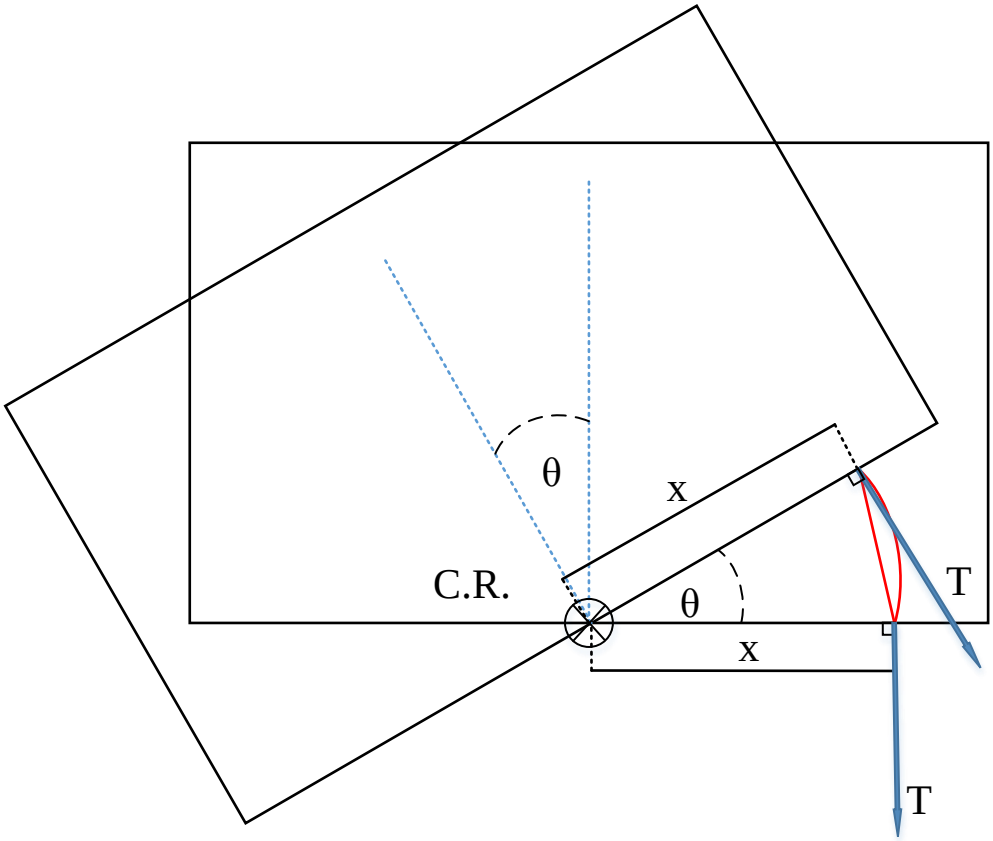

Figura 12.18: Esquema del cambio de posición del punto donde se ejecuta la fuerza T, en una rotación con ángulo igual a θ. Las líneas rojas representan el recorrido del tendón si la forma fuera recta; o si proyectara un arco con el centro de la circunferencia en C.R.

Así, la ecuación que representa el valor de d queda expresado como:

$$\max\left(x \cdot \sqrt{2 - 2 \cdot cos\left(\theta \frac{\pi}{180}\right)}\right) \leq d \leq \max\left(x \cdot \theta \cdot \frac{\pi}{180}\right) \tag{12.12}$$

En el lado izquierdo, se obtiene el máximo teórico cuando θ es igual a 180 grados. Pero el ángulo θ se encuentra restringido por los movimientos según lo mostrado en la sección 8.5.1. Así que la distancia que debe recorrer el tendón se logra cuando el ángulo es igual a la rotación máxima de cada elemento, y x es igual a la mitad de la profundidad del elemento:

$$d \leq \frac{p}{2} \cdot \Theta \cdot \frac{\pi}{180} \tag{12.13}$$

Donde Θ es la rotación máxima de los elementos de la mano (en grados).

De esta manera, se tienen las distancias necesarias que deben recorrer los tendones para mover completamente cada elemento de la mano en la siguiente tabla:

Tabla 12.4: Dimensiones de profundidad y rango de rotación de las partes de la mano.

Elemento	**Profundidad (p) [mm]**	**Rotación máxima Θ [°]**	**Distancias (d) [mm]**
Distal	21	90	16,9
Medial	21	130	24,4
Proximal	21	90	16,9
Palma	50	180	78,5

Con todo esto, y como los tendones de los elementos distales también deben moverse respecto a los elementos proximales; el desplazamiento total de los tendones se aproxima a la siguiente tabla:

Tabla 12.5: Distancia a mover para cada elemento de la mano. Al mover la falange distal, también es necesario considerar los posibles movimientos de las falanges: proximal y medial, además de la palma.

Sistema a mover	Elementos a mover	Distancias a mover (d) [mm]
Falange Distal	**Falange Distal**	136,7
	Falange Medial	
	Falange Proximal	
	Palma	
Falange Medial	**Falange Medial**	119,8
	Falange Proximal	
	Palma	
Falange Proximal	**Falange Proximal**	95,4
	Palma	
Palma	**Palma**	78,5

Por último, con las distancias necesarias para mover cada elemento (Tabla 12.5), además de la ecuación de torque(12.10) y rotación del servomotor (12.11), en conjunto con las condiciones aproximadas para los cálculos (Tabla 12.3), es posible establecer las condiciones requeridas para la elección de los servomotores.

Los siguientes gráficos muestran las condiciones que deben cumplir los servomotores. Para seleccionar el servomotor, primero se selecciona el elemento a mover (palma, proximal, medial, distal), entonces se relaciona el radio de la polea a utilizar con el radio mínimo de giro del servomotor. Mientras, se escoge el servomotor que tenga un torque superior al indicado en la curva del segundo gráfico, con respecto al radio de la polea, y el punto de tensión (x), con respecto al centro de giro del elemento.

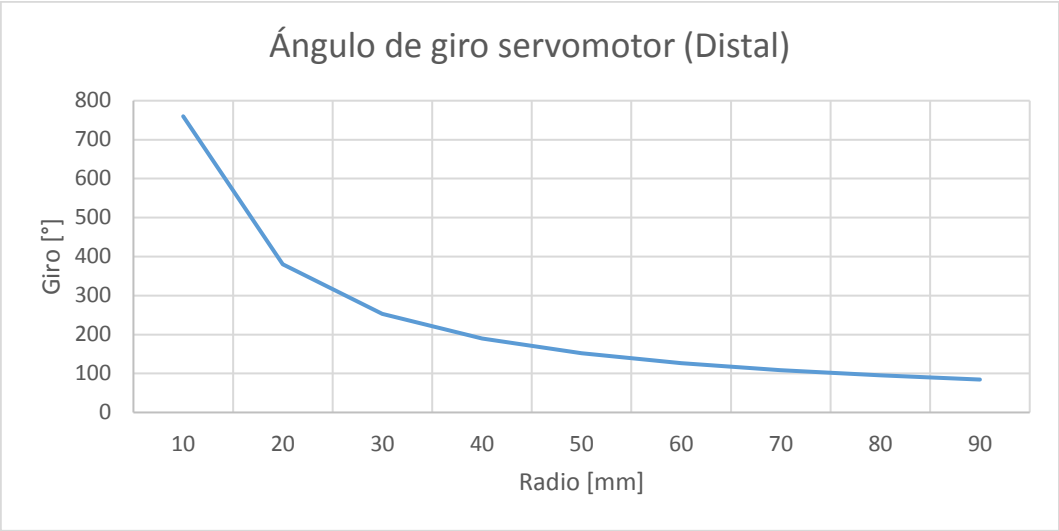

Figura 12.19: Ángulo de giro mínimo con respecto al radio utilizado en la polea, para movimiento de las falanges distales de los dedos.

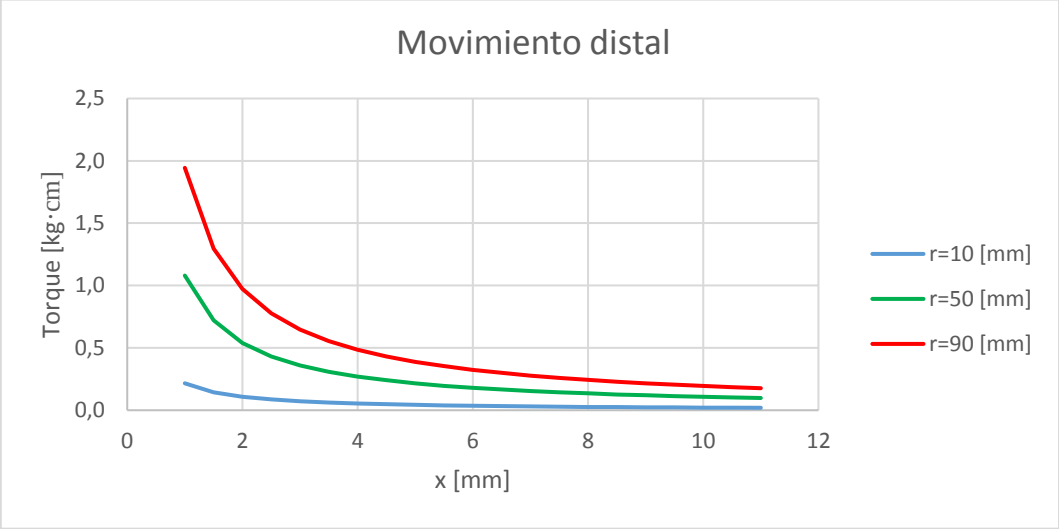

Figura 12.20: Torque mínimo necesario del servomotor, con respecto al radio de la polea utilizada, y el punto de tensión (x), para el movimiento de las falanges distales de los dedos.

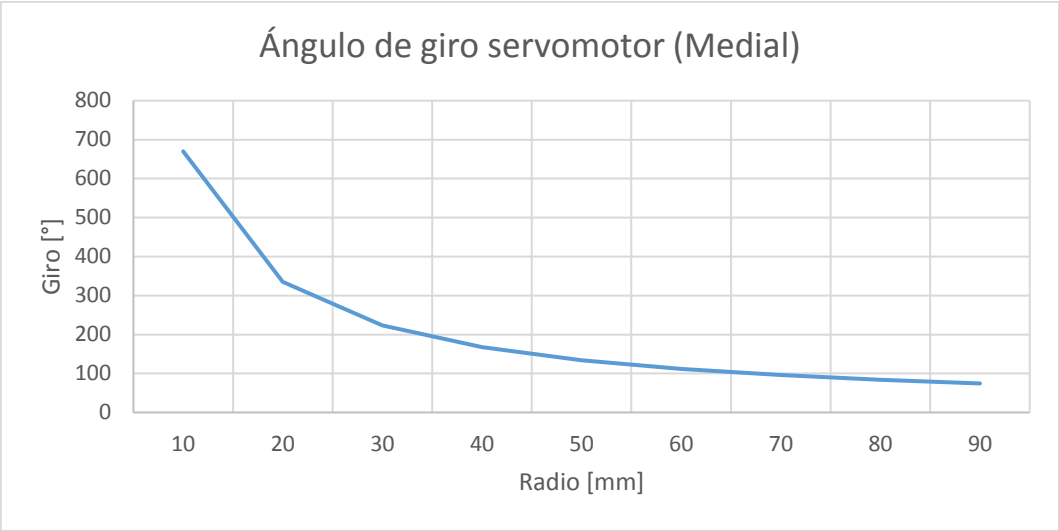

Figura 12.21: Ángulo de giro mínimo con respecto al radio utilizado en la polea, para movimiento de las falanges mediales de los dedos.

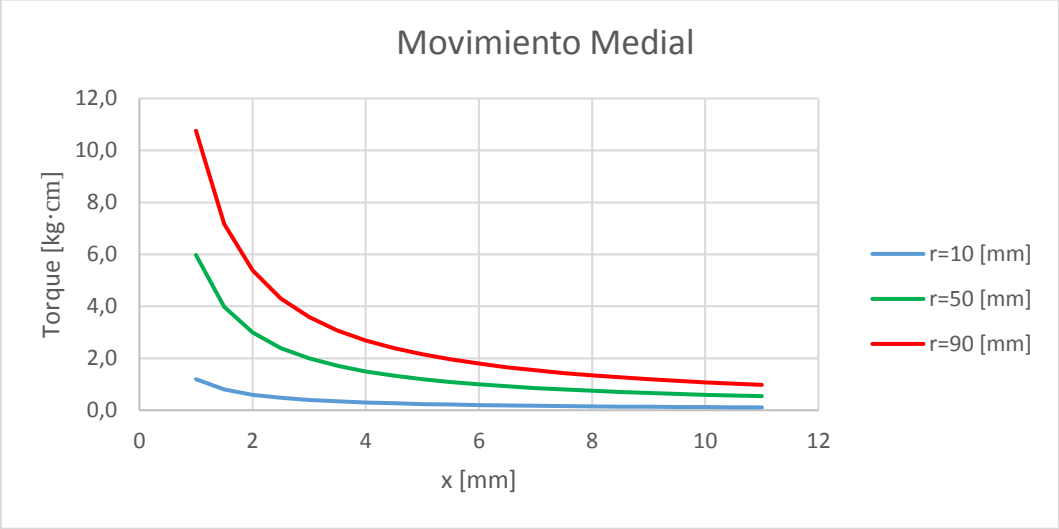

Figura 12.22: Torque mínimo necesario del servomotor, con respecto al radio de la polea utilizada, y el punto de tensión (x), para el movimiento de las falanges mediales de los dedos.

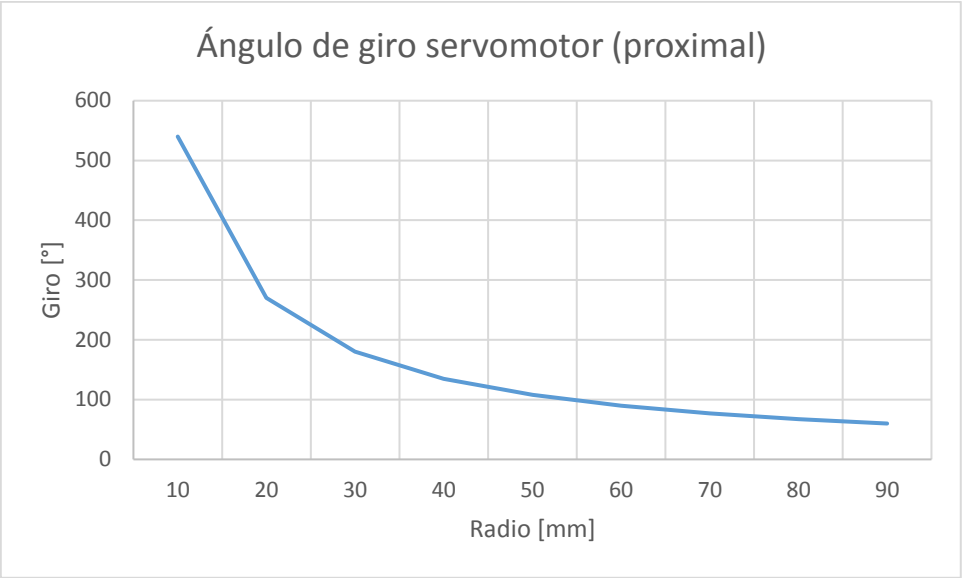

Figura 12.23: Ángulo de giro mínimo con respecto al radio utilizado en la polea, para movimiento de las falanges proximales de los dedos.

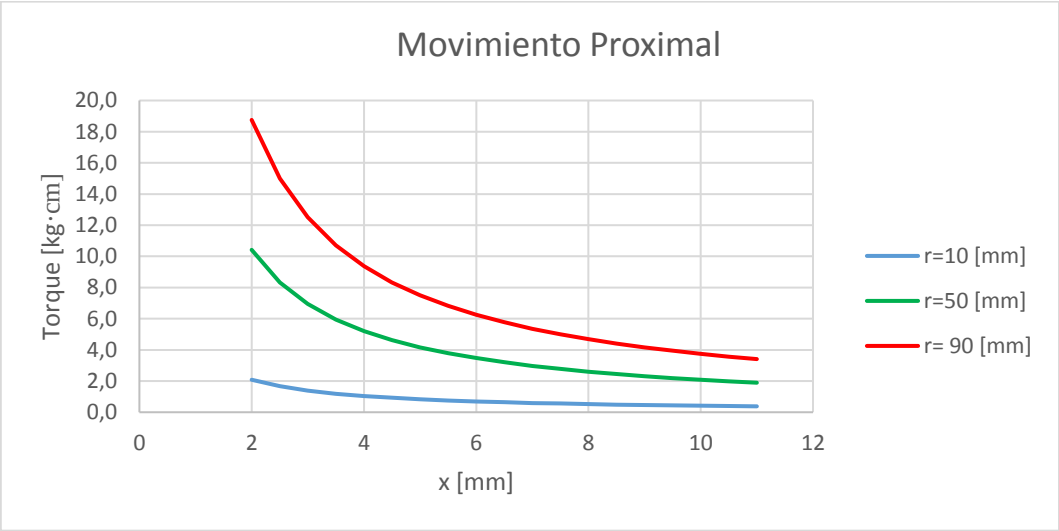

Figura 12.24: Torque mínimo necesario del servomotor, con respecto al radio de la polea utilizada, y el punto de tensión (x), para el movimiento de las falanges proximales de los dedos.

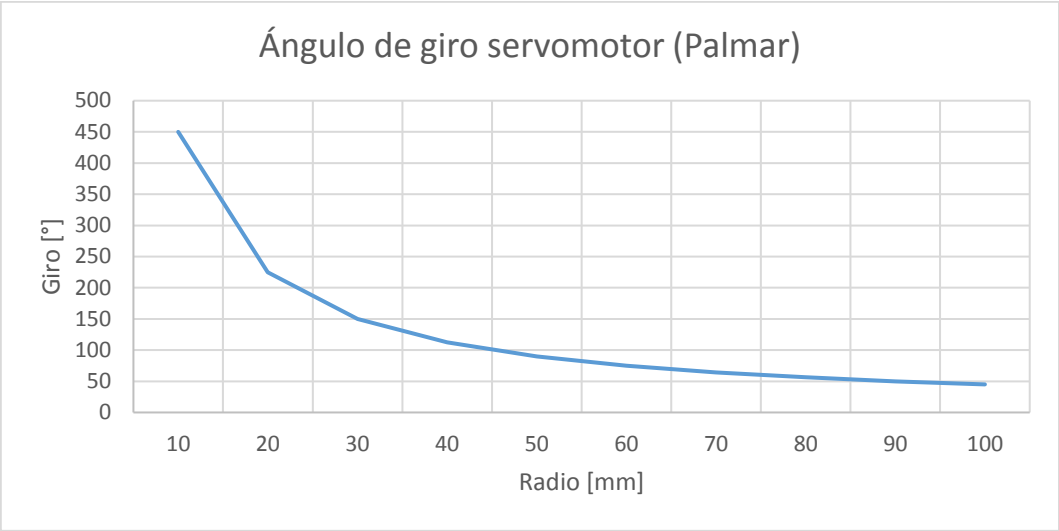

Figura 12.25: Ángulo de giro mínimo con respecto al radio utilizado en la polea, para movimiento de la palma.

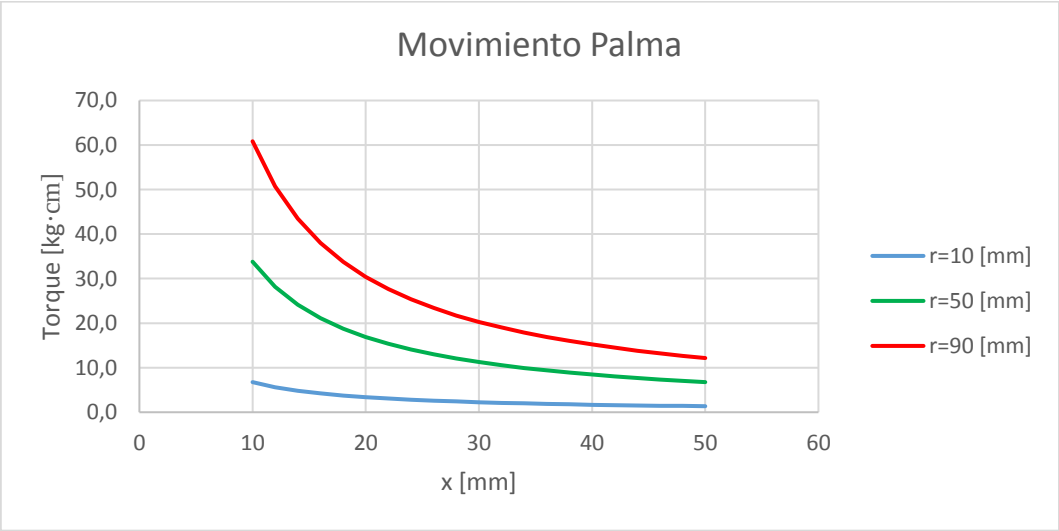

Figura 12.26: Torque mínimo necesario del servomotor, con respecto al radio de la polea utilizada, y el punto de tensión (x), para el movimiento de la palma.

12.6 ANEXO F

PROGRAMA DE CONTROL EN ARDUINO

```
//Paquete de control de servomotores
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_PWMServoDriver.h>

// Llamada de las placas PCA9685
Adafruit_PWMServoDriver pwm0 = Adafruit_PWMServoDriver(0x40);
Adafruit_PWMServoDriver pwm1 = Adafruit_PWMServoDriver(0x41);
Adafruit_PWMServoDriver pwm2 = Adafruit_PWMServoDriver(0x42);


//Parámetros de seguridad
uint16_t SERVOMIN = 200;
//mínimo conteo de pulsos
uint16_t SERVOMAX = 500;
//máximo conteo de pulsos

uint8_t servonum = 0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("16 channel Servo test!");

  pwm0.begin();
  pwm1.begin();
  pwm2.begin();

  pwm0.setPWMFreq(60);
  pwm1.setPWMFreq(60);
  pwm2.setPWMFreq(60);

//Reinicio inicial de servomotores, esto suelta los tendones
  int posicion_inicial = 500;
  for (int servo_inicio = 0; servo_inicio <= 16; servo_inicio = servo_inicio + 1) {
    pwm0.setPWM(servo_inicio, 0, posicion_inicial);
    pwm1.setPWM(servo_inicio, 0, posicion_inicial);
    pwm2.setPWM(servo_inicio, 0, posicion_inicial);
  }
```

```
  yield();
}

//Procesamiento de información de servomotor, y movimiento
void loop() {
  int servo;
  double posicion;
  unsigned int dato;
  while (Serial.available() > 0) {
    if (Serial.available() > 0) {
      dato = Serial.parseFloat();
      servo = dato / 1000;
      uint16_t posicion = dato % 1000;
      if (1 <= servo & servo <= 48) {
        if (SERVOMIN <= posicion & posicion <= SERVOMAX)
        {
          if (servo <= 16) {
            Serial.println("Placa 1");
            Serial.println(servo);
            servonum = servo - 1;
            Serial.println(posicion);
            return pwm0.setPWM(servonum, 0, posicion);
          }
          if (17 <= servo & servo <= 32) {
            Serial.println("Placa 2");
            Serial.println(servo);
            servonum = servo - 17;
            Serial.println(posicion);
            return pwm1.setPWM(servonum, 0, posicion);
          }
          if (33 <= servo & servo <= 48) {
            Serial.println("Placa 3");
            Serial.println(servo);
            servonum = servo - 33;
            Serial.println(posicion);
            return pwm2.setPWM(servonum, 0, posicion);
          }
        }
        else
        { Serial.println("Fuera de rango de posicion");
        }
      }
      else {
        Serial.println("Seleccion incorrecta de Servo");}}}}
```