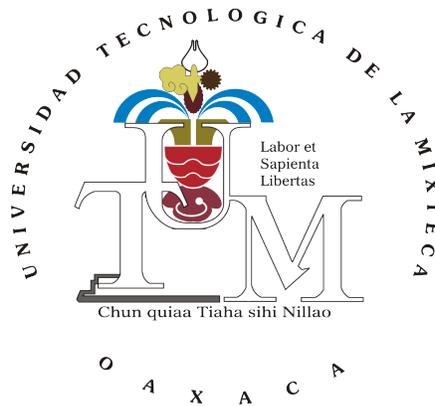


UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE MANO ROBÓTICA
UTILIZANDO MECANISMOS METAMÓRFICOS**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN ROBÓTICA

PRESENTA:

ING. FRANCISCO JAVIER ESPINOSA GARCÍA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. MANUEL ARIAS MONTIEL

CO-DIRECTORA DE TESIS:

DRA. ESTHER LUGO GONZÁLEZ

H. CIUDAD DE HUAJUAPAN DE LEÓN, OAXACA, MÉXICO, MARZO DE 2019

Tesis presentada en Marzo de 2019 ante los
sinodales:

Dr. Alvaro Jesús Mendoza Jasso
Profesor-investigador UTM

Dr. Mario García Murillo
Profesor-investigador de la Universidad
de Guanajuato

Dr. Alberto Antonio García
Profesor-investigador UTM

Dr. Ricardo Tapia Herrera
Cátedras CONACYT-UTM

Director de tesis:

Dr. Manuel Arias Montiel
Profesor-investigador UTM

Co-Directora de tesis:

Dra. Esther Lugo González
Profesor-investigador UTM

Agradecimientos

A la Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM), específicamente al área de posgrado, por la formación recibida durante dos años.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado durante mi formación como maestro, así mismo, agradezco el apoyo recibido para la realización de la estancia en la Universidad de Cassino y del Lazio Meridionale, Italia.

Al proyecto 621 titulado “Desarrollo de mecanismos robóticos para la rehabilitación física” del programa Cátedras-CONACYT, por el financiamiento del prototipo físico realizado en este trabajo.

A todos los sinodales por el apoyo en las revisiones.

A todos los profesores que formaron parte de mi formación como maestro.

Dedicatorias

Agradezco a Dios por las personas que ha puesto en mi camino ya que gracias a ello he podido superar todas las pruebas que la vida me ha puesto, así mismo, por permitirme culminar una etapa más en mi carrera profesional.

A mis abuelos Daniel García De la Rosa y Ana María Franco Amaro por todo el amor que me han dado, por tratarme como un hijo, por todas las enseñanzas, por los consejos, por estar conmigo en los momentos difíciles de mi vida, por todo eso y más gracias.

A mi madre Alejandra García Franco, por todo el amor y apoyo que me ha brindado a lo largo de mi vida, por enseñarme a ser humilde y a darle valor a vida, por inyectarme esa fuerza día a día para poder levantarme, por cuidarme en tiempos difíciles, por tus desvelos y por todos los sacrificios que has realizado para que yo pudiera llegar hasta este punto de mi vida, gracias madre.

A mi hermana Ingrid Alelí Espinosa García y a mi sobrina Daira Evangelista Espinosa por todo el amor y apoyo incondicional, por enseñarme a valorar la vida y por alegrar día a día mi vida.

A mis tíos y tías por brindarme su amor, cariño, consejos, enseñanzas y por su apoyo incondicional.

A las hermanas Sor Georgina Jacqueline Gutiérrez Maldonado, Sor María del Rosario Flores H. y Sor Irene Rangel González por todo el apoyo brindado durante mi estancia en Italia, por todo el amor que me brindaron, por las atenciones, por las paseos en la ciudad, por alimentarme, por darme un techo, por hacerme sentir como en familia, por la amistad, mil gracias de todo corazón.

A mi amiga Roció Núñez y a Sor Stefania por todo el apoyo brindado durante mi estancia, por todos los consejos, por todas las atenciones, por estar conmigo en momentos que sentía desfallecer, mil gracias por estar ahí.

A mi amigo Josimar Márquez García por ofrecerme un techo donde vivir, por la comida, por los consejos, por tu amistad, por permitirme entrar a tu casa y ser tratado como miembro de su familia, por los viajes, por los ánimos y por todas las aventuras que hemos pasado,

gracias de todo corazón.

A Roció Ambrosio Delgado por tu amistad, por estar conmigo en momentos difíciles, por apoyarme tanto económicamente como emocionalmente, por todas las lecciones que me has brindado, por hacerme ver mis errores y ayudarme a cambiar, porque a pesar de mis arranques de carácter siempre permaneciste a mi lado, gracias desde lo más profundo de mi ser.

A José Zugaide Cruz por darme consejos para llevar una vida más tranquila, por mostrarme el camino que vale la pena seguir, por las enseñanzas de humildad y por hacerme ver que no estoy solo, gracias por estar ahí para darme ánimos y por confiar en mí.

A Luz Antonia Pacheco Santiago por todo el amor que me ha dado, por ofrecerme un techo, comida y estar conmigo en todo momento, por las aventuras que hemos pasado, por las lecciones que me has brindado, por las risas, por todos los cuidados, por estar conmigo en momentos de enfermedad. Agradezco a Dios y a la vida por ponerte en mi camino.

A la Dra. Esther Lugo González por motivarme a estudiar la maestría, por el cariño y las atenciones que ha tenido para conmigo. Por estar ahí a pesar de las situaciones, por ayudarme en mi etapa de ansiedad, por los consejos, por hacerme ver la vida de otra manera, por darme ánimos para irme de estancias, por darme la idea de este trabajo de investigación, por confiar en mi aun cuando nadie ni yo mismo lo hacía, por darme la oportunidad de tener un lugar donde comer, por hacerme sentir como en familia, por las risas, por las aventuras, por el apoyo económico para poder realizar mis tramites finales, por enseñarme a compartir y ayudar a quien más lo necesita, por su amistad y apoyo incondicional, mil gracias de todo corazón, siempre estaré en deuda con usted.

Al Dr. Ricardo Tapia Herrera por su amistad, por ser uno de mis ejemplos a seguir en la cuestión de la investigación, admiro su capacidad de dar solución a las cosas y ese gran ingenio que lo caracteriza. Gracias por confiar en mí y ayudarme durante estos últimos meses en el desarrollo de la tesis. Agradezco que me prestara su computadora para el desarrollo de las piezas, por comprometerse con el trabajo, por los consejos que me ha brindado, por las veces que me ha invitado a comer, por la convivencia y por estar conmigo en todo momento, de verdad lo aprecio y estoy seguro que nunca podre pagarle todo lo que ha hecho por mí.

Al Dr. Manuel Arias Montiel por todo el apoyo brindado, por la invitación a estudiar la maestría, por los momentos compartidos, por abrirme las puertas de su casa y permitirme conocer a su familia, por apoyarme para irme de estancias, por el apoyo económico brindado, por la revisión de este trabajo de tesis, gracias.

Al profesor Marco Ceccarelli por todas las atenciones brindadas durante mi estancia en el laboratorio LARM, por el apoyo en el trabajo desarrollado en la Universidad de Cassino, por todos los momentos compartidos mil gracias.

Índice

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	2
1.1.1. Prótesis comerciales	2
1.1.2. Prótesis de investigación	4
1.1.3. Mano metamórfica con palma reconfigurable	6
1.2. Planteamiento del problema	8
1.3. Justificación	9
1.4. Objetivos	9
1.4.1. Objetivo general	9
1.4.2. Objetivos específicos	9
1.5. Estructura de la tesis	10
2. Marco teórico	11
2.1. Anatomía de la mano	11
2.2. Tipos de sujeción de la mano	12
2.3. Ergonomía	13
2.3.1. Medidas antropométricas de la población mexicana	14
2.4. Conceptos de mecanismos	14
2.5. Síntesis de mecanismos	18
2.5.1. Clasificación	18
2.6. Mecanismos metamórficos	19
2.6.1. Representación de las configuraciones de un mecanismo metamórfico	22
2.6.2. Construcción del mecanismo metamórfico original a partir de las matrices de representación	23
2.7. Criterio de Denavit-Hartenberg	24
2.8. Algoritmos genéticos	26
2.9. Metodología del diseño	29
2.9.1. QFD	29
2.9.2. PDS	31
3. Diseño preliminar	33
3.1. Descripción de la metodología de manos robóticas	33

3.2.	Implementación de la metodología de diseño	35
3.2.1.	Definición del problema	35
3.3.	Pruebas experimentales preliminares	44
3.3.1.	Pruebas de fuerza con LARM Hand IV	45
3.3.2.	Pruebas de fuerza con la mano humana	48
3.4.	Propuesta de diseño	51
4.	Diseño del mecanismo	65
4.1.	Trayectoria del dedo	65
4.2.	Síntesis del mecanismo para el dedo	68
4.3.	Diseño de la palma	74
4.3.1.	Estructura topológica del mecanismo metamórfico de la palma	77
4.3.2.	Cinemática de la palma	79
4.4.	Prototipo final	83
5.	Construcción del prototipo	89
5.1.	Procesos de manufactura	89
5.2.	Fabricación aditiva	90
5.3.	Manufactura del prototipo	91
5.4.	Instrumentación del prototipo	95
5.5.	Pruebas experimentales	98
5.5.1.	Consumo energético	99
5.6.	Análisis de resultados	100
6.	Conclusiones y trabajos futuros	103
	Referencias	107
A.	Programa para obtener la trayectoria del dedo	113
B.	Programa para síntesis de mecanismos con algoritmos genéticos	115
C.	Dibujos técnicos	119
D.	Publicaciones derivadas	145

Índice de figuras

1.1. Prótesis de mano comerciales hasta 2017.	2
1.2. Manos robóticas no comerciales.	4
1.3. Mano robótica antropomórfica [71].	6
1.4. Mano metamórfica [33].	7
1.5. Objetos manipulados utilizando la mano metamórfica [33].	8
2.1. Estructura ósea de la mano [43].	11
2.2. Agarre de fuerza (izquierda) y agarre de precisión (derecha)[16].	12
2.3. Clasificación propuesta por Cutkosky[37].	13
2.4. Medias antropométricas de la mano [17].	14
2.5. Tipos de eslabones [48].	15
2.6. a) Cadena cinemática cerrada , b) cadena cinemática abierta [13].	16
2.7. Configuraciones de mecanismos metamórficos [74].	20
2.8. Descomposición de una cadena cinemática [74].	21
2.9. Configuraciones de un mecanismo metamórfico [42].	22
2.10. Representación de parámetros D-H [4].	25
2.11. Representación de un cromosoma [31].	27
2.12. Cruzamiento para la reproducción [11].	28
2.13. Ejemplo de mutación [31].	28
2.14. Casa de la calidad [69].	31
3.1. Metodología para el desarrollo de manos robóticas [56].	34
3.2. A) LARM hand y B) Diagrama del dedo [12].	45
3.3. a) Esquema y b)Implementación.	45
3.4. Mano: a) Abierta y b)Cerrada.	46
3.5. Fuerza adquirida de: a)Dedo 1, b)Dedo 2, c)Dedo 3 y d)Palma.	47
3.6. Posición de los sensores.	48
3.7. Diagrama implementado para la obtención de las fuerzas.	49
3.8. Fases: a) Acercamiento, b) Sujeción y c) levantamiento.	49
3.9. Resultados del agarre de una tapadera, sensor: a) 1, b) 2, c) 3, d) 4, y e) 5.	50
3.10. Mecanismo propuesto: A) Diagrama cinemático, B) Diseño mecánico.	52

3.11. Mecanismo propuesto: Simulación para el agarre del mecanismo: a) Posición inicial, b) Movimiento de la palma y c) Posición final.	52
3.12. Gráficas de: a) rotación del resorte, b) rotación eslabón1, c) rotación eslabón 3, d) rotación eslabón 4, e) rotación eslabón 5 y f) torque del motor.	53
3.13. Propuesta 1 para el mecanismo del dedo.	54
3.14. Distal del mecanismo 1: a) Posición final y b) gráfica de posición.	54
3.15. Propuesta 2 para el mecanismo del dedo.	55
3.16. Distal del mecanismo 2: a) Posición final y b) gráfica de posición.	56
3.17. Propuesta 3 para el mecanismo del dedo.	56
3.18. Distal del mecanismo 3: a) Posición final y b) gráfica de posición	57
3.19. Mecanismo: a)Diagrama cinemático, b)CAD con palma abierta y c)CAD con palma cerrada.	58
3.20. Parámetros para la simulación.	59
3.21. Simulación con objeto cilíndrico: a) posición inicial y b) agarre.	59
3.22. Simulación de agarre de un objeto con forma irregular: a) posición inicial y b) agarre.	60
3.23. a) Posición angular del distal, b) posición angular de la palma y c) velocidad angular de la palma.	60
3.24. a) Posición angular del distal y b) posición angular del eslabón 6.	61
3.25. a) Posición angular del distal y b) posición angular del eslabón 6.	62
3.26. Prototipo experimental.	63
3.27. Agarre experimental de una botella de vidrio: a) posición inicial y b) sujeción.	64
3.28. Fuerza de agarre en: a) la punta del dedo y b) palma.	64
4.1. Medición de los ángulos de las articulaciones: a) dedo extendido y b) dedo flexionado.	66
4.2. Trayectoria del dedo.	68
4.3. Diagrama cinemático.	69
4.4. Mecanismo y trayectoria deseada vs obtenida.	73
4.5. Metodología para el diseño de la palma.	74
4.6. Movimientos del dedo pulgar: a)flexión, b)extensión, c)aducción, d)abducción.	75
4.7. Propuesta de mecanismo.	76
4.8. Movimientos del mecanismo.	76
4.9. Sistema de coordenadas D-H de la palma.	79
4.10. Espacio de trabajo.	82
4.11. Espacio de trabajo de la mano desarrollada por Dai et al [33].	82
4.12. Diseño de la mano.	83
4.13. Posición final de la mano.	83
4.14. Trayectoria de los dedos.	84
4.15. Movimiento del pulgar.	85
4.16. Desplazamiento del eslabón E1.	85
4.17. Desplazamiento del pulgar.	86

4.18. Simulación del agarre de un objeto cilíndrico.	86
4.19. Desplazamiento del dedo pulgar.	87
4.20. Desplazamiento de las falanges proximales.	87
4.21. Desplazamiento de la falange Di.	88
4.22. Desplazamiento de la falange Dm.	88
4.23. Desplazamiento de la falange Da.	88
5.1. Procesos de manufactura (clasificación) [32].	90
5.2. Procedimiento de manufactura para la obtención del prototipo final.	91
5.3. Elementos del diagrama de Ishikawa.	93
5.4. Descomposición del ensamblaje.	93
5.5. Subensamblaje dedo.	94
5.6. Subensamblaje palma.	94
5.7. Prototipo final.	95
5.8. Diagrama eléctrico para control de motores.	95
5.9. Diagrama eléctrico para lectura de fuerza.	96
5.10. TB6612FNG.	96
5.11. Sensor de fuerza.	97
5.12. Prototipo instrumentado.	97
5.13. Pruebas experimentales de agarre con el prototipo desarrollado.	98

Índice de Tablas

2.1. Rangos de movilidad de los dedos de la mano [43].	12
2.2. Medidas antropométricas de la población mexicana femenina.	15
2.3. Medidas antropométricas de la población mexicana masculina.	15
2.4. Pares inferiores [61].	16
2.5. Descripción a detalle del PDS [34].	32
3.1. Evaluación de los requisitos.	38
3.2. Requerimientos de ingeniería.	39
3.3. Descripción de los requerimientos no medibles.	40
3.4. Relación entre QUE's y COMO's.	41
3.5. Análisis de los COMO's.	43
3.6. Objetos utilizados en las pruebas.	46
3.7. Valores máximos y mínimos.	47
3.8. Resultados de las pruebas realizadas con varios objetos.	48
3.9. Objetos utilizados en las pruebas.	50
3.10. Valores máximos y mínimos del agarre con la mano.	51
3.11. Dimensiones de los eslabones del mecanismo.	58
3.12. Resultados de las simulaciones.	63
4.1. Ángulos de las falanges.	66
4.2. Relación porcentual de las falanges con respecto a la mano [54].	67
4.3. Resultados de la cinemática.	68
4.4. Valores deseados vs calculados	73
4.5. Parámetros D-H de la palma	80
5.1. Características de los elementos utilizados	91
5.2. Características de la impresora CR10-S	92
5.3. Tiempos de impresión y material requerido	92
5.4. Características del controlador	96
5.5. Características del sensor	97
5.6. Características del controlador arduino	97
5.7. Fuerzas ejercidas durante la sujeción	99
5.8. Consumo energético de la mano AMH	99

Capítulo 1

Introducción

El cuerpo humano puede considerarse una herramienta maravillosa la cual, a través de los años ha ido evolucionando y junto con ella la capacidad del hombre para hacer uso de ella. En particular la mano, es considerada como un componente altamente funcional, permite manipular e interactuar físicamente con el entorno. No obstante, la mano sirve como un medio de comunicación, se ha vuelto fundamental para el lenguaje no verbal. Por ello, la ausencia o pérdida de la mano representa un gran impacto individual, familiar, social y económico que implica que las personas se alejen de las actividades que solían desempeñar en su vida cotidiana debido a que se genera temor y desconfianza. Hoy en día, este problema se puede resolver con el uso de prótesis robóticas las cuales han alcanzado mayor eficiencia y funcionalidad por los avances científicos y tecnológicos como la creación de materiales más resistentes y ligeros o la fabricación de circuitos integrados cada vez más pequeños y potentes.

A pesar de lo mencionado anteriormente, la persona afectada debe someterse a un proceso para recuperar la funcionalidad perdida, este proceso no deja de ser lento y complejo [66]. Esta etapa va desde fortalecer músculos, hasta lograr que el afectado se acostumbre al uso de una prótesis, además se requiere de ayuda psicológica para que la persona pueda aceptar los cambios en la imagen corporal y finalmente reincorporarse a la vida diaria.

Aunque en la actualidad existen múltiples diseños de prótesis para mano, las personas abandonan su uso, los principales factores son: funcionalidad, durabilidad, apariencia de las prótesis y el costo [5]. En México existen instituciones como el INR (Instituto Nacional de Rehabilitación) o el DIF (Desarrollo Integral de la Familia), que se encargan de otorgar prótesis a las personas que carecen de alguna extremidad, aunque no se logran atender todas las carencias debido al bajo presupuesto. Las personas que logran adquirir una prótesis terminan abandonándola debido a la falta de información y personal que los oriente. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) [66], debe existir una persona con conocimientos en órtesis y prótesis por cada 500 personas con amputación. De acuerdo con cifras del INEGI, existe un mínimo de 2000 personas capacitadas en esta rama, lo cual representa un 15% de la demanda [66].

1.1. Antecedentes

Las prótesis de mano se clasifican con base en la función que realizan, los elementos empleados para realizar su función y la metodología utilizada para su control [45].

Otro tipo de clasificación en las prótesis de mano, es por el tipo de mecanismo utilizado: prótesis de cadena cinemática abierta y cerrada [8]. Las prótesis con mecanismos de cadena cinemática cerrada, tienen una mayor rigidez y fuerza de agarre en comparación con las de cadena cinemática abierta [15]. Para su estudio, también se dividen en comerciales y de investigación.

1.1.1. Prótesis comerciales

Belter et al. [6], realizan un estudio del estado del arte de las prótesis disponibles de manera comercial hasta el año 2013, y se hace una comparativa entre cada una de ellas, algunos de los aspectos que se consideraron fueron el número de juntas, grados de libertad, número y tipo de actuadores y los rangos de movilidad de cada una de las articulaciones de los dedos.

Con base en la bibliografía consultada, en el siguiente apartado se presenta una revisión de las prótesis de mano comerciales hasta el presente año, las cuales se muestran en la Figura 1.1

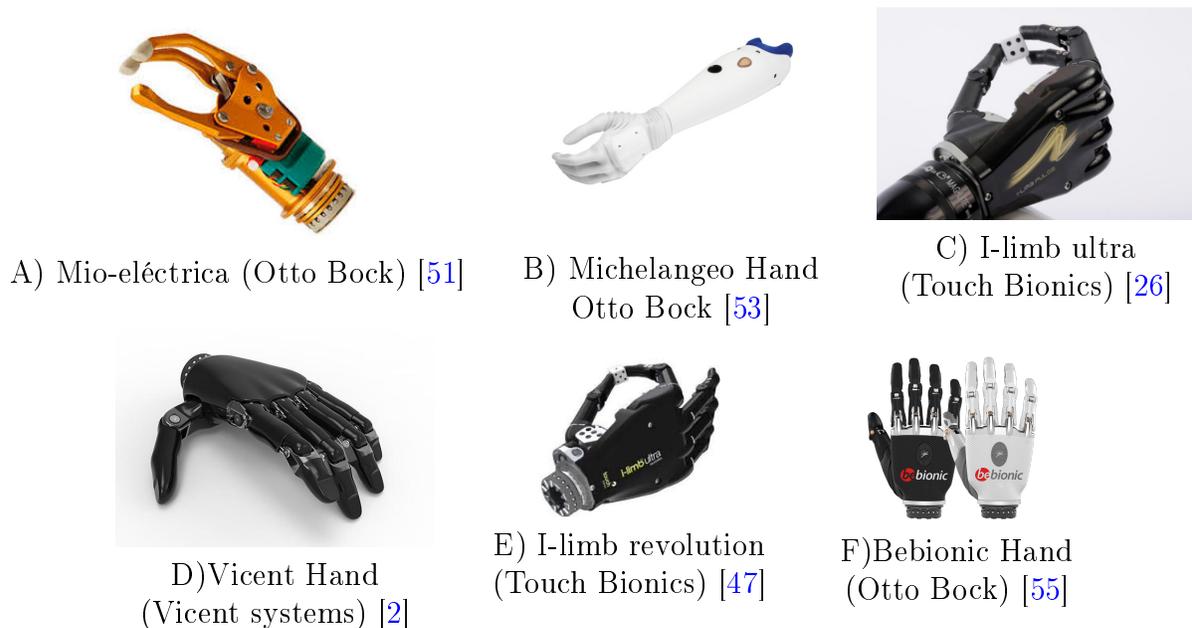


Figura 1.1: Prótesis de mano comerciales hasta 2017.

En la Figura 1.1 A) se muestra la prótesis Mio-eléctrica que tiene una fuerza de agarre de

100N y una velocidad de 300 mm/s, puede manipular objetos rápidamente y con precisión. Se pueden seleccionar un total de 6 programas diferentes con el MyoSelect 757T13 y ajustarlos a la indicación del usuario. Permite una adaptación óptima a las necesidades y capacidades del usuario de la prótesis. La supresión del sensor de los pulgares permite al usuario manipular de forma activa y consciente. Los objetos se fijan y se colocan mediante señales musculares, ya que el sistema electrónico de la MyoHand no reajusta automáticamente la fuerza de agarre. Esta prótesis se recomienda a pacientes activos con un nivel de amputación bajo [45].

Michelangeo Hand (Figura 1.1 B), fue diseñada por la empresa Otto Bock. Internamente está constituida de acero y de aluminio de alta resistencia, que reemplazan la estructura endoesquelética de los huesos y las articulaciones humanas. Externamente está recubierta por elastómero de silicona que reemplaza las estructuras blandas, así como otros plásticos de alta tecnología que sustituyen a los músculos y tendones. El pulgar y la muñeca disponen de dos ejes de movimiento que permiten distintas fuerzas y velocidades de agarre, producidas por sus dos motores independientes que otorgan al usuario "la máxima funcionalidad y naturalidad". Se caracteriza por seis grados de libertad, así como por una gran variedad de movimientos que permiten que la mano sea tan flexible como funcional [10].

La prótesis biónica i-LIMB ultra (Figura 1.1 C), está diseñada con chasis de aluminio y se encuentra disponible en cuatro versiones: extra pequeña, pequeña, mediana y grande. Cada uno de los dedos de las prótesis i-LIMB ultra, cuenta con un motor y posee un sistema de agarre que detiene su movimiento al detectar un objeto, de esta manera se evitan daños al momento de la manipulación de cualquier objeto. El dedo pulgar tiene una rotación manual que permite el agarre lateral y de oposición, con la finalidad de crear diferentes tipos de prensión. La versión extra pequeña puede levantar hasta 40 kg, mientras que las versiones pequeña, mediana y grande pueden levantar hasta 90kg. Cuenta con dos modos para el control, uno por medio de señales musculares y otro por medio de una app, la cual proporciona un acceso instantáneo a los patrones de agarre rápidos al tocar el ícono [63].

Vicent Evolution (Figura 1.1D), es una mano compacta y biomecánicamente optimizada y fabricada de una aleación de aluminio de alta resistencia. La prótesis permite una agilidad individual activa de los dedos y del pulgar. Combina 10 ejes bidireccionalmente motorizados con una innovadora estrategia de control que es única en el campo de las prótesis de mano. Los resortes entre las articulaciones proximal y distal también permiten una tensión adaptativa de acuerdo con los músculos y ligamentos de la mano humana. Por el movimiento lateral del pulgar oponible al dedo anular, esta mano es actualmente la prótesis más versátil del mercado, lo que la hace particularmente interesante en términos del desarrollo de nuevas estrategias de control [67].

La prótesis i-LIMB ultra revolution mostrada en la Figura 1.1 E), dispone de 24 funciones de sujeción, algunas de ellas son pinzado de: precisión estándar abierto, precisión estándar cerrado, presión con pulgar abierto, presión con pulgar cerrado, trípode estándar abierto, trípode estándar cerrado, sujeción lateral, apretón de manos, etc. El pulgar puede colocarse en la posición deseada de forma manual o automática. Por el diseño giratorio del pulgar se puede

colocar con precisión en la sujeción de pinzado o trípode, además, cuenta con un embrague de fricción que evita la sobrecarga del pulgar. La prótesis se encuentra disponible en dos tamaños, mediano y grande, ambos son capaces de soportar una carga máxima de 90kg [64].

Cada uno de los dedos de la prótesis Bebionic (Figura 1F), cuenta con un motor, permite mover la mano y el agarre de una forma natural y coordinada. Por la posición de los motores existe una buena distribución del peso, permitiendo que la mano se sienta más ligera. La mano Bebionic está diseñada para manejar casi cualquier cosa y realizar actividades que normalmente se hacen en un día promedio, por ejemplo, comer, abrir puertas, encender luces y escribir. Cuenta con 14 diferentes tipos de agarre, algunos son: de gancho, de ratón, de poder, sujeción tripod y sujeción para la llave [52].

1.1.2. Prótesis de investigación

Además de las prótesis comerciales, diversos laboratorios de universidades e institutos de investigación han generado propuestas para el desarrollo de prótesis robóticas. En la Figura 1.2 se muestran las más representativas del estudio del estado del arte realizado.

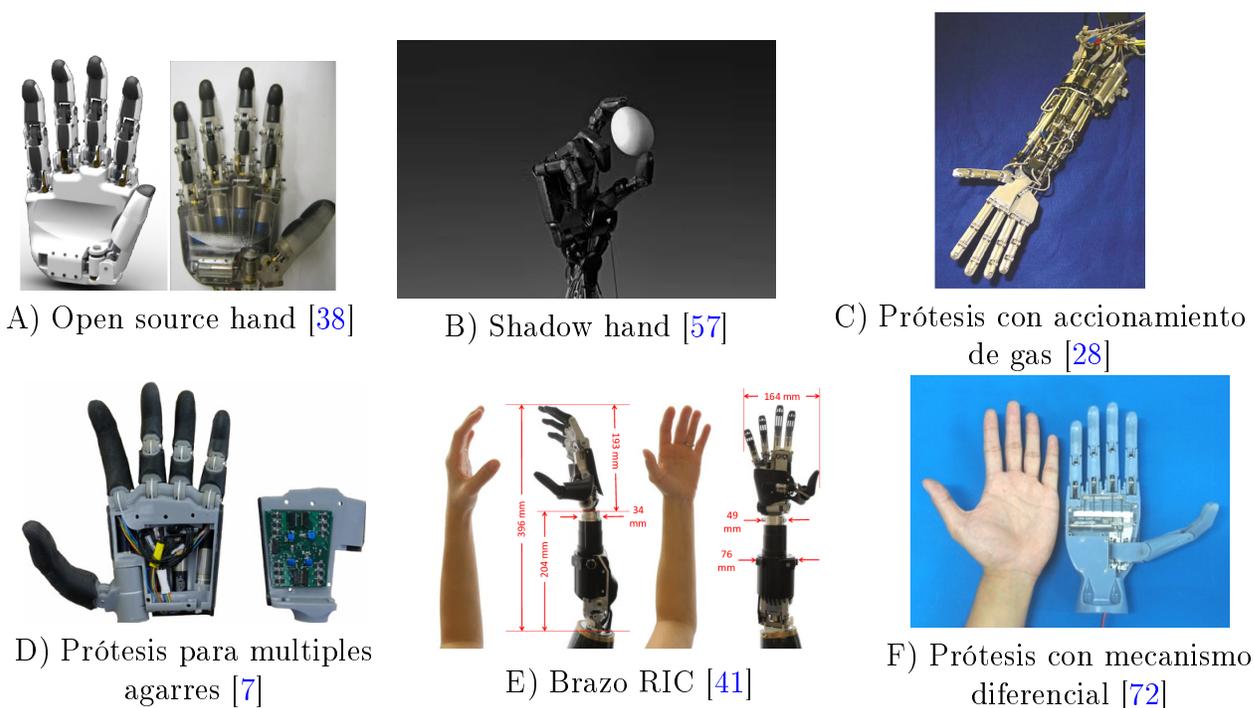


Figura 1.2: Manos robóticas no comerciales.

La Figura 1.2 A) muestra una prótesis de mano que fue diseñada y fabricada con el objetivo de que cualquier persona con conocimientos en el área pueda hacer pruebas con ella. La mano cuenta con seis motores, uno para los dedos índice, medio, anular y meñique

y dos motores para el dedo pulgar. Cada motor cuenta con un encoder con la finalidad de conocer la posición del motor, la mano también cuenta con diez articulaciones móviles. Puede realizar diferentes tipos de prensión tales como, palmar, de punta y lateral. Las yemas de los dedos están diseñadas de tal forma que puedan colocarse sensores de fuerza para así evitar causar daños a los objetos que se desee manipular. Como es un diseño abierto (open source), los planos y los archivos para su impresión en 3D pueden descargarse de la pagina www.opensourcehand.wordpress.com [38].

Shadow Hand (Figura 1.2 B), es una mano robótica que está hecha de una combinación de metales y plásticos tales como: aluminio, latón, acetyl, policarbonato, poliuretano, caucho y nylon. La mano y el antebrazo tienen un peso total de 4.2 kilogramos. El dedo pulgar cuenta con 5 grados de libertad y 5 juntas, los dedos restantes poseen 3 grados de libertad y 4 juntas cada uno; la mano es capaz de realizar 24 diferentes movimientos. Cuenta con 129 sensores, entre los que se encuentran: sensores de presión, fuerza, posición, tacto, temperatura y corriente (para los motores). Por su diseño es posible su integración en otros sistemas robóticos [60].

La prótesis con accionamiento de gas (Figura 1.2 C), utiliza el monopropelente peróxido de hidrógeno como generador de gas para alimentar nueve actuadores de tipo neumático [28]. El sistema cuenta con 21 grados de libertad y posee nueve actuadores independientes. De los nueve accionadores independientes, uno proporciona accionamiento directo del codo, tres la actuación de accionamiento directo para la muñeca y cinco accionan los 17 grados de libertad restantes. La presión con la que trabajan los actuadores es de 2.1MPa (300 psi).

La prótesis de mano para múltiples agarres, de la Figura 1.2 D), tiene un peso de aproximadamente 546 gramos, la parte más ancha de la palma presenta una medida de 8.9 cm y un largo de 20 cm que van desde la base de la palma hasta la punta del dedo medio. La mano presenta una configuración de cuatro actuadores, los cuales proporcionan sujeción de presión y que no requiere precisión. Los agarres que puede realizar son: punta, de paso lateral, trípode, de gancho, esféricos y cilíndricos. Los motores que utiliza son de corriente directa sin escobillas modelo Faulhaber 1226 y con un reductor planetario de 64:1. Posee un módulo integrado que se encarga de controlar todos los movimientos, así como de enviar la posición y la fuerza de cada articulación, su voltaje de operación es de 14 volts [7].

La prótesis de brazo RIC de la Figura 1.2 E), está diseñada para personas que presentan amputaciones transradiales, posee la cualidad de que una mano diferente pueda ser conectada, tiene cinco grados de libertad. La parte del codo utiliza un motor de rotor exterior, que para lograr el movimiento, el eje de salida del motor está conectado a una transmisión de engranaje planetario con una relación de 4:1. La muñeca y las articulaciones flexoras comparten el mismo actuador, que comprende un motor personalizado, un engranaje planetario de una sola etapa, un embrague no reversible y una transmisión cicloide. El motor del rotor exterior de la muñeca tiene un diseño similar al motor del codo. Los dedos se basan en un diseño de cuatro barras que proporcionan flexión de la metacarpofalángica (MCP) e interfalángicas proximales (PIP), lo que permite un agarre envolvente. Además, en los dos últimos y dos primeros, le fueron

incorporados elementos elásticos (resortes de tensión y elementos elásticos). Los agarres que puede realizar la mano son: agarres circulares, agarres cilíndricos y agarres abiertos [41].

La prótesis con mecanismo diferencial, Figura 1.2 F), es una mano subactuada que tiene once articulaciones, diez de ellas son articulaciones activas. Posee un mecanismo diferencial activo. La mano es capaz de sostener objetos de la vida cotidiana, en algunas pruebas realizadas se demostró que entre los objetos que puede manipular la mano se encuentran: sostener una pelota, una lata de refresco, un disco, una copa e inclusive una llave [72].

Mano robótica antropomórfica. Esta mano fue construida por investigadores de la universidad de Washington. La mano fue hecha con una impresora 3D. Cada articulación de los dedos está restringida por la longitud de ligamentos que se encuentran en ambos lados de cada uno de los dedos, la función de estos es estabilizar la articulación. Cuenta con 10 servomotores Dynamixel (nueve MX-12W y uno AX-12A). Por medio de una transmisión de polea diferencial, dos servos se utilizan para la flexión y extensión de los dedos meñique y anular. Los dedos índice y medio se mueven empleando dos pares de servomotores, además, comparten un motor para la articulación metacarpofalángica. Los últimos tres motores son utilizados para mover el dedo pulgar, uno para la extensión y abducción y los restantes para los movimientos de flexión y aducción. La mano puede realizar agarres prismáticos y circulares tanto de fuerza como de precisión [71]. En la Figura 1.3 se muestra la mano.

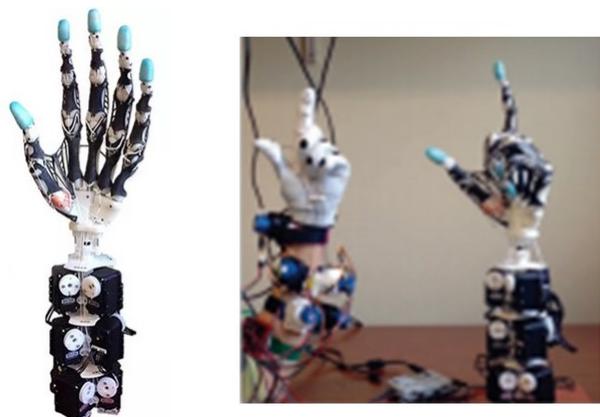


Figura 1.3: Mano robótica antropomórfica [71].

1.1.3. Mano metamórfica con palma reconfigurable

En 2009 en el trabajo realizado por Dai et al. [25], se presentó por primera vez una mano robótica de tres dedos con una palma reconfigurable. El diseño de la mano presentó gran destreza y versatilidad. La orientación y la postura de la mano dependían del movimiento de la palma. En 2011 Guowu et al. [33] presentaron una mano metamórfica de cinco dedos con una palma reconfigurable, la cual genera una topología variable, por ello la versatilidad y destreza de la mano aumentan. En la Figura 1.4 se muestran algunas imágenes de la mano.

En ese mismo año Cui et al. [22] analizaron una mano adaptable y reconfigurable con espacio de trabajo helicoidal. Se realizó un estudio para encontrar la relación del movimiento de los dedos con el movimiento de la palma. Se investigó la manipulabilidad de la mano y se exploró la de cada dedo. En 2012 Cui et al. [21] desarrollaron una nueva filosofía para la construcción y el estudio de manos metamórficas basándose en ecuaciones que restringieran el movimiento de los dedos. En 2015 Gao et al. [30], presentaron por primera vez el estudio de la cinemática inversa de una mano metamórfica de cuatro dedos. Éste se realizó basándose en métodos geométricos y en la ecuación de restricción.

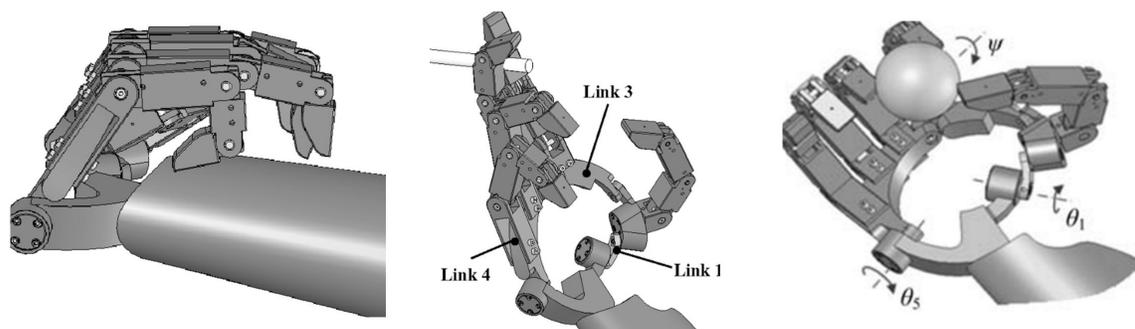


Figura 1.4: Mano metamórfica [33].

La mano metamórfica con palma reconfigurable (Figura 1.4), está hecha de aluminio, y para pruebas físicas se construyó un módulo que utiliza el método de accionamiento por tendón. Se utilizan cables de acero de 0.5mm de diámetro como tendones y el accionamiento de todo el sistema es manual. El sistema posee ocho motores Maxon de corriente directa con encoders y reductores. Se utiliza NI LabView como interfaz de usuario y una comunicación CANOpen con una velocidad de 1 Mbps.

La mano metamórfica puede realizar diferentes tipos de agarres (Figura 1.5), ya que sus mecanismos son capaces de modificar configuraciones topológicas de una forma a otra, resultando cambios en la movilidad de los mecanismos, además puede manipular múltiples objetos e inclusive es capaz de sujetar herramientas. Como se observa, la mano presenta una gran versatilidad y posee una estructura más sencilla en comparación con las manos presentadas anteriormente.

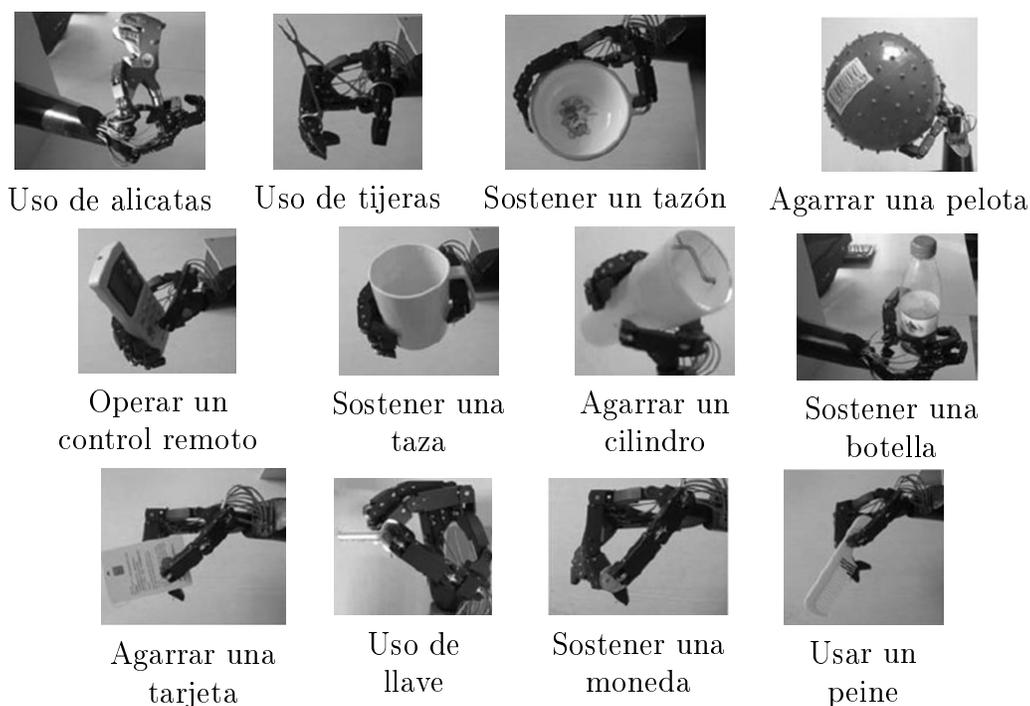


Figura 1.5: Objetos manipulados utilizando la mano metamórfica [33].

1.2. Planteamiento del problema

De las manos mostradas en el estado del arte, se observa que en su mayoría el diseño de los dedos presenta tres juntas paralelas y usualmente operan en un sólo plano, ya que la palma es rígida y limita el espacio de trabajo, la destreza y el ajuste postural. También utilizan uno o más motores para cada dedo, incrementando su volumen, el peso y el consumo energético en la mano o en la prótesis.

Por otro lado, el desarrollo de la palma de la mano robótica basada en mecanismos metamórficos, presenta un espacio de trabajo aumentado de los dedos, incrementando la flexibilidad y la versatilidad de la mano, además de permitir diferentes tipos de agarres con un menor número de actuadores. El espacio de trabajo es de tipo esférico y la configuración de la palma hace que los dedos trabajen en un área de forma triangular y/o pentagonal, dependiendo del número de dedos.

Con base en la problemática expuesta se plantea realizar modificaciones al diseño de la mano metamórfica presentada por Dai et al [21, 22, 25, 30, 33], para aumentar el espacio de trabajo y la destreza. Estos incrementos se validarán mediante el análisis cinemático correspondiente y simulaciones numéricas en paquetes computacionales especializados. Finalmente, se propone la construcción de un prototipo físico para realizar estudios experimentales que permitan la evaluación de las fuerzas de agarre que la mano es capaz de desarrollar, así como

de su consumo energético.

1.3. Justificación

Los mecanismos metamórficos han sido utilizados en aplicaciones como en el análisis topológico y la evolución de la configuración de un carro de carga eléctrico [29], análisis de los grados de libertad de una silla de auto-ayuda [35], síntesis estructural de una clase de mecanismos metamórficos paralelos con movilidad variable [68], prótesis de rodilla [58] y en el análisis de un robot para masaje [39], mostrando ventajas significativas con respecto a las aplicaciones con mecanismos clásicos. Sin embargo, estas ventajas no han sido lo suficientemente exploradas en el desarrollo de manos robóticas. En este contexto, en la literatura consultada únicamente los trabajos reportados por Dai et al. [22, 21, 25, 30, 33] usan mecanismos metamórficos para reconfigurar la palma de una mano robótica, enfocándose en el estudio cinemático, espacio de trabajo y manipulabilidad. El espacio de trabajo de las manos es de tipo esférico y la configuración de la palma presenta un área triangular, que es la base para medir la manipulabilidad.

Con base en las investigaciones de Dai et al. [22, 21, 25, 30, 33] y la evaluación de las ventajas y desventajas de las manos robóticas consultadas en el estado del arte, los alcances del proyecto de investigación que se presenta, incluyen el aumento en el espacio de trabajo, el análisis cinemático y un estudio experimental de las fuerzas de agarre ejercidas por la mano robótica, para comprobar que implementando una nueva configuración se puede mejorar el espacio de trabajo, así como la destreza, la manipulabilidad y la evaluación del consumo energético.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Desarrollar un prototipo de mano robótica utilizando mecanismos metamórficos tomando como base el diseño presentado por Dai et al. [22, 21, 25, 30, 33], con la finalidad de mejorar el espacio de trabajo, la destreza, la manipulabilidad y de evaluar el consumo energético, manteniendo la capacidad de realizar diferentes tipos de agarre tanto de presión como de precisión.

1.4.2. Objetivos específicos

Para el logro del objetivo general se formulan los siguientes objetivos específicos:

- ✓ Analizar la biomecánica de la mano.
- ✓ Analizar la cinemática de los mecanismos usados en la mano metamórfica así como su área de trabajo y su manipulabilidad.

- ✓ Proponer modificaciones a los mecanismos usados en la mano metamórfica para aumentar su espacio de trabajo y su manipulabilidad.
- ✓ Realizar el análisis cinemático del mecanismo modificado.
- ✓ Desarrollar el prototipo virtual en SolidWorks® del mecanismo modificado para validar el incremento del espacio de trabajo.
- ✓ Construir el prototipo, hacer las pruebas de funcionalidad y evaluar las fuerzas de agarre y el consumo energético.

1.5. Estructura de la tesis

El presente trabajo de tesis está organizado de la siguiente manera: en el Capítulo 1 se presentan la introducción y los antecedentes del tema de investigación, se establecen el planteamiento y la justificación del problema, así mismo se especifican los objetivos del trabajo. En el Capítulo 2 se establecen las bases teóricas necesarias para el desarrollo de la mano. En el Capítulo 3 la metodología para el diseño es implementada. Se muestra una serie de pruebas de agarre y adaptabilidad utilizando una mano robótica y una mano humana. Se propone una primera versión de la mano y el dedo, se presentan simulaciones y pruebas experimentales para determinar fuerzas de sujeción y adaptabilidad. En el Capítulo 4 se analiza el movimiento del dedo y la palma, se realiza la síntesis para la obtención de los mecanismos. Se presenta la versión final de la mano y algunas simulaciones del comportamiento del prototipo. En el Capítulo 5 se describen los procesos de manufactura empleados para la obtención del prototipo físico, además se muestra la secuencia para el ensamblaje de las piezas. Se instrumenta el prototipo y se realizan pruebas experimentales de agarre. Finalmente, en el Capítulo 6 se presentan las conclusiones y se proponen algunos puntos para posibles trabajos futuros.

Capítulo 2

Marco teórico

En este capítulo se presentan la descripción anatómica de la mano y los fundamentos teóricos empleados para el diseño y análisis de mecanismos metamórficos, con el objetivo de determinar una relación entre el sistema humano y un dispositivo robótico para implementar un prototipo funcional que pueda realizar diferentes agarres.

2.1. Anatomía de la mano

La mano se compone de 27 huesos, los cuales se dividen en tres grupos: las falanges, el carpo y los metacarpios. La mano se conecta con la muñeca a través de la palma y posee veinte GDL (grados de libertad), los cuales son accionados por cerca de cuarenta músculos [43]. En la Figura 2.1 se observa la estructura ósea de la mano.

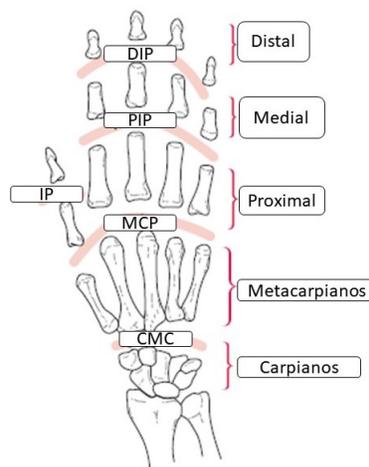


Figura 2.1: Estructura ósea de la mano [43].

Se observa que los dedos índice, medio, anular y meñique se componen por tres falanges (distal, medial y proximal), por otra parte el dedo pulgar solo cuenta con 2 falanges (distal y proximal).

Los dedos cuentan con tres articulaciones: la metacarpofalángica (MCP) que es aquella que une la falange metacarpica y la proximal de un dedo; la interfalángica proximal (PIP), la cual se encuentra ubicada entre las falanges media y proximal del dedo; la interfalángica distal (DIP), la cual se puede localizar entre las falanges media y distal del dedo [43].

En la Tabla 2.1 se muestran los rangos de movilidad de los dedos de la mano, así como los grados de libertad de cada articulación.

Tabla 2.1: Rangos de movilidad de los dedos de la mano [43].

Dedos	Articulación	Grados de libertad	Flexión Extensión	Abducción aducción
Índice, medio anular y meñique	DIP	1	60°	-
	PIP	1	100°	-
	MCP	2	90°	60°
Pulgar	IP	1	85°	-
	MCP	1	50°	30°
	CMC	2	120°	45°

2.2. Tipos de sujeción de la mano

Napier (1956) [37] clasificó los tipos de agarre en dos: agarres de fuerza y de precisión. De acuerdo con [46] los agarres de fuerza son aquellos en los cuales los dedos están flexionados en las tres articulaciones, el objeto se encuentra entre los dedos y la palma, el pulgar se aduce y queda posicionado sobre la cara palmar, mientras que, los de precisión son utilizados para la manipulación de pequeños objetos entre el pulgar y las caras flexoras de los dedos, la muñeca se posiciona en dorsiflexión, los dedos permanecen semiflexionados y el pulgar se aduce y se opone. En la Figura 2.2 se muestran ambos tipos de agarre.

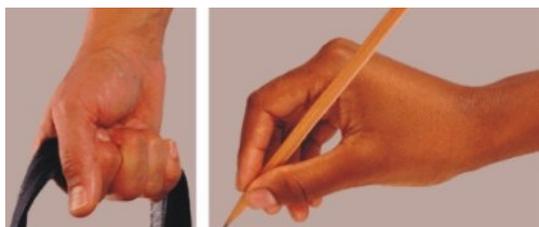


Figura 2.2: Agarre de fuerza (izquierda) y agarre de precisión (derecha)[16].

En otra clasificación realizada por Cutkosky (1989), los agarres se dividen en: de contacto y de no contacto [37], como se muestra en la Figura 2.3.

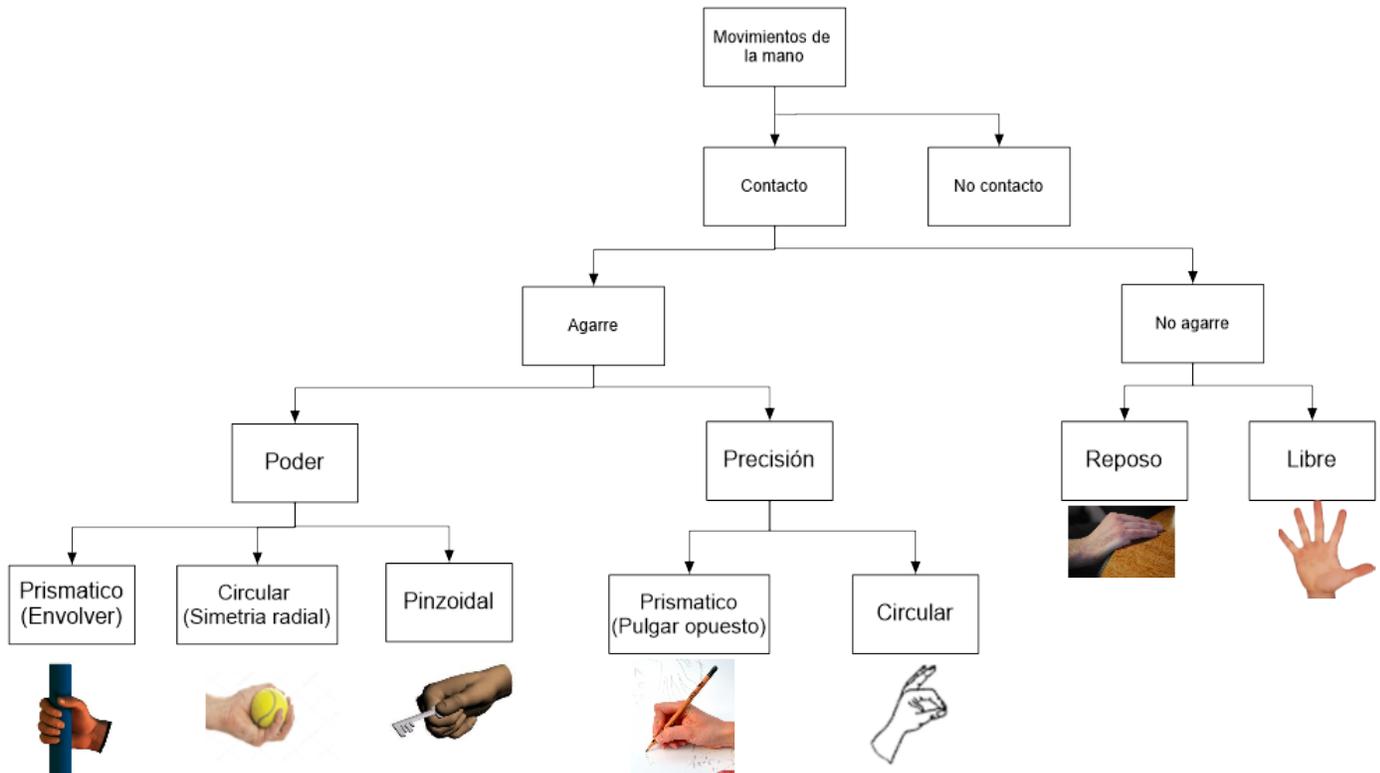


Figura 2.3: Clasificación propuesta por Cutkosky[37].

2.3. Ergonomía

Las medidas proporcionadas para el diseño de un sistema deben ser precisas para que el usuario pueda trabajar adecuadamente ya que, de lo contrario, se podrían suscitar fallas las cuales pueden arriesgar la eficiencia, la seguridad del trabajador y al propio sistema. Para evitar caer en este tipo de situaciones se utiliza la ergonomía. Ésta se encarga de proporcionar datos acerca de las dimensiones del cuerpo. Los datos antropométricos son confiables y los procedimientos técnicos de la ergonomía se convierten en poderosas herramientas disponibles para la adecuación dimensional óptima de los productos de diseño al hombre [17].

De acuerdo con [17], las dimensiones del cuerpo humano que influyen en el desempeño de las personas son de dos tipos esencialmente:

1. Dimensiones estructurales: Son las dimensiones de las distintas partes o elementos estructurales del cuerpo, por ejemplo: estatura, longitud del brazo, longitud de la mano, perímetro de la cabeza, altura de la rodilla.

2. Dimensiones funcionales: Son dimensiones que incluyen el movimiento y la acción de segmentos corporales en el espacio de trabajo, por ejemplo: zona de alcance funcional máximo de la mano, zona de alcance de comodidad, zona de alcance mínimo.

2.3.1. Medidas antropométricas de la población mexicana

En el estudio realizado por Chaurand [17] se obtuvieron las medidas antropométricas de una población compuesta por 8,228 personas en un rango de 2 a 85 años de edad, provenientes de los estados de Guadalajara, Ciudad de México, Guanajuato y la zona fronteriza México-EUA.

Tomando como base los resultados del estudio anterior, se utilizarán las medidas antropométricas de entre un percentil de 5 a 95 correspondientes a la población de entre 18 a 65 años, para el diseño de la mano robótica. En la Figura 2.4 se muestran las mediciones realizadas sobre la mano, mientras que en las Tablas 2.2 y 2.3, los valores correspondientes a las medidas de la mano para sexo masculino y sexo femenino son resaltadas. Cabe mencionar que los valores mostrados están dados en milímetros.

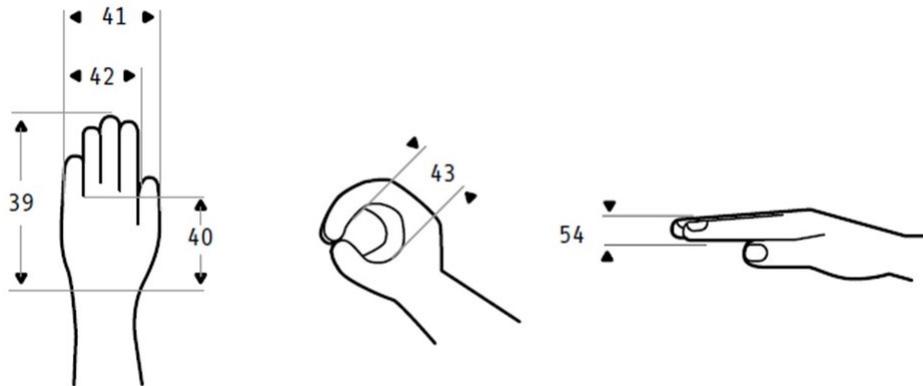


Figura 2.4: Medias antropométricas de la mano [17].

2.4. Conceptos de mecanismos

Para entender el concepto de mecanismos, es necesario considerar los siguientes términos:

Eslabones:

En [48] se describe que un eslabón se puede definir como un cuerpo rígido, que no necesariamente es recto. En la Figura 2.5 se observa que un eslabón binario tiene dos nodos, un

Tabla 2.2: Medidas antropométricas de la población mexicana femenina.

ID	Dimensiones	Mínimo	Máximo	Rango
39	Longitud mano	158	185	27
40	Longitud palma mano	90	105	15
41	Anchura mano	83	104	21
42	Anchura palma mano	71	82	11
54	Espesor mano	23	35	12
43	Diametro empuñada	40	50	10

Tabla 2.3: Medidas antropométricas de la población mexicana masculina.

ID	Dimensiones	Mínimo	Máximo	Rango
39	Longitud mano	158	185	27
40	Longitud palma mano	90	105	15
41	Anchura mano	83	103	20
42	Anchura palma mano	71	82	11
54	Espesor mano	24	35	11
43	Diametro empuñada	39	50	11

terciario presenta tres nodos y finalmente un cuaternario tiene cuatro nodos.

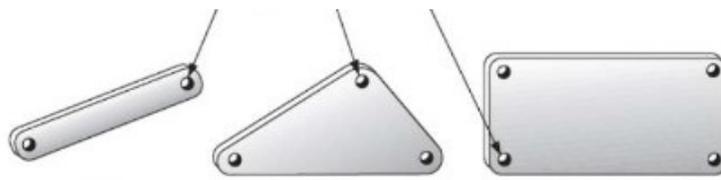


Figura 2.5: Tipos de eslabones [48].

Juntas:

Una junta o par se define como la unión de dos eslabones (en sus nodos), que permite un movimiento potencial entre los eslabones conectados. Norton [48] las clasifica de varias maneras:

1. Por el tipo de contacto entre los elementos, de línea, de punto o de superficie.
2. Por el número de grados de libertad permitidos por la junta.
3. Por el tipo de cierre físico de la junta: cerrada por fuerza o por forma.
4. Por el número de eslabones unidos (orden de la junta).

De acuerdo con [61], Reuleaux dividió los pares cinemáticos en inferiores y superiores: los primeros describen juntas con contacto superficial y los segundos describen juntas con contacto de punto o de línea (conexión entre una leva y un seguidor). Sin embargo, para el caso de un cojinete de agujas, este criterio es engañoso, por ello es preferible observar las características para distinguir el movimiento (o movimientos) que permita la articulación. En la Tabla 2.4 se muestran los pares inferiores.

Tabla 2.4: Pares inferiores [61].

Nombre	Símbolo	Contiene	Grados de libertad	Movimineto Relativo
Revoluta	R	R	1	Circular
Prismatica	P	P	1	Lineal
Tornillo	S	RP	1	Helicoidal
Cilindro	C	RP	2	Cilíndrico
Esfera	G	RRR	3	Esférico
Plano	F	RPP	3	Plano

Cadena cinemática:

Una cadena cinemática se define como un ensamble de eslabones y juntas que conectados producen un movimiento de salida controlado, como respuesta a un movimiento de entrada, una cadena cinemática es cerrada cuando cada uno de sus miembros está enlazado con dos miembros de la misma cadena. Una cadena abierta es aquella que no tiene ningún anillo [13]. En la Figura 2.6 se muestran las cadenas cinemáticas abiertas y cerradas de un mecanismo.

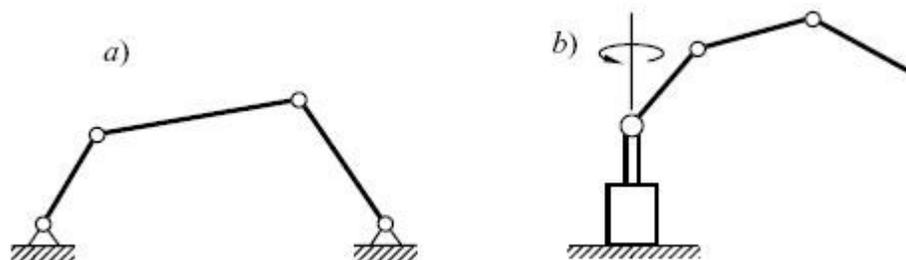


Figura 2.6: a) Cadena cinemática cerrada , b) cadena cinemática abierta [13].

Mecanismo:

Un mecanismo puede definirse como un conjunto de eslabones unidos por juntas que forman un dispositivo, el cual transforma el movimiento en una acción deseable. Otra definición, es que un mecanismo es una cadena cinemática en la que un eslabón es sujeto al sistema de

referencia (el cuál por sí mismo puede estar en movimiento) [48].

El estudio cinemático de los mecanismos involucra los siguientes análisis:

Análisis de posición: Dadas las longitudes de los eslabones y la ubicación de los pivotes, se determina la posición de los eslabones a partir del ángulo de entrada.

Análisis de velocidad: Este análisis se realizará en los elementos de un mecanismo y radica en comprender la relación vectorial que existe entre la velocidad de rotación en un eslabón y la velocidad tangencial en cada uno de sus nodos de articulación.

Análisis de aceleración: En el análisis debe encontrarse la derivada temporal de las velocidades generalizadas.

Ventaja mecánica:

De acuerdo con Shigley [61], es la razón del momento de torsión de salida ejercido por el eslabón impulsado, al momento de torsión de entrada que se necesita en el impulsor.

Grados de libertad de un mecanismo.

Los GDL hacen referencia al número de parámetros independientes requeridos para la configuración específica de un mecanismo en el espacio. Los GDL de un mecanismo son iguales a los grados de libertad de todos los eslabones disminuidos por los grados de las restricciones impuestas por las juntas. Si todos los eslabones son libres de las restricciones, los grados de libertad de un mecanismo de n -eslabones con un eslabón fijo a tierra son iguales a $\lambda(n-1)$. El número total de restricciones impuestas por las juntas está dado por $\sum_i c_i$ [65], los GDL netos de un mecanismo están dados por:

$$F = \lambda(n - 1) - \sum_{i=1}^j c_i \quad (1)$$

Las restricciones impuestas por una junta y los grados de libertad permiten que la junta pueda ser reescrita como:

$$c_i = \lambda - f_i \quad (2)$$

Sustituyendo la ecuación (2) en (1) se obtiene:

$$F = \lambda(n - j - 1) + \sum_{i=1}^j f_i \quad (3)$$

La ecuación (3) es conocida como el criterio de Gruebler-Kutzbach, el cual establece que las restricciones impuestas por las juntas son independientes unas de otras y que no introducen grados de libertad redundantes.

También es posible establecer una ecuación que relacione el número de lazos independientes del número de eslabones y del número de juntas en una cadena cinemática. Por ello se forman cadenas con lazos múltiples, que al sumar el número de juntas, éste es mayor al número de eslabones de un lazo [65]. Al extender la cadena cinemática de 1 a L lazos, la diferencia entre el número de juntas y el número de eslabones aumenta L-1:

$$L = j - n + 1 \quad (4)$$

La ecuación (4) es conocida como la ecuación de Euler, que al combinarse con la ecuación (3) se obtiene:

$$\sum_{i=1}^j f_i = F + \lambda L \quad (5)$$

La ecuación (5) es conocida como el criterio de movilidad de lazo, que sirve para determinar el número de grados de libertad en una cadena cinemática que posee un número dado de grados de libertad [65].

2.5. Síntesis de mecanismos

De acuerdo con [27] el proceso de síntesis puede definirse como: dadas unas exigencias de funcionamiento, se crea el mecanismo que resuelva o tienda a resolver dichos requisitos. Permite encontrar, por ejemplo, las dimensiones de un mecanismo para que la trayectoria descrita pase por determinados puntos, o para que la velocidad de un punto tenga un valor especificado. Por otro lado también puede definirse como un proceso sistemático, sin procedimiento de iteración, de seleccionar y organizar varios elementos de la manera apropiada, para generar las soluciones deseadas, halladas desde unas restricciones y requerimientos de funcionamiento [48, 61].

2.5.1. Clasificación

Con base en [27, 48, 61], los procesos utilizados para la síntesis de un mecanismo, pueden clasificarse como:

Síntesis cualitativa. En la mayoría de los problemas de diseño se desconocen muchas variables y se tienen pocas ecuaciones para describir el comportamiento del sistema, por ello

la síntesis cualitativa consiste en la creación de soluciones potenciales, a falta de un algoritmo que configure o pronostique una solución.

Síntesis de tipo. Se refiere a la clase de mecanismo seleccionado; puede ser un eslabonamiento, un sistema de engranes, bandas y poleas o un sistema de levas. Este tipo de síntesis comprende factores de diseño como procesos de manufactura, materiales, seguridad, confiabilidad, espacio y economía. El estudio de la cinemática pocas veces es utilizado.

Síntesis cuantitativa o síntesis analítica. Es la generación de una o más soluciones de un tipo particular que se considera adecuado para el problema, y aún más importante, para las que no existe un algoritmo de síntesis definido. Como el nombre sugiere, este tipo de solución se puede cuantificar, si existe un conjunto de ecuaciones que proporcionen una respuesta numérica. Para la elección de la solución, se requiere análisis e iteración para optimizar el diseño. Con frecuencia son menos las ecuaciones disponibles que el número de variables potenciales, en cuyo caso se deben suponer algunos valores razonables para un número suficiente de incógnitas y así reducir el conjunto de las incógnitas restantes al número de ecuaciones disponibles.

Síntesis dimensional. Es la determinación de las proporciones (longitudes) de los eslabones necesarios para lograr los movimientos deseados y puede ser una forma de síntesis cualitativa si se define un algoritmo del problema particular, pero también puede ser una forma de síntesis cualitativa si existen más variables que ecuaciones.

Síntesis de generación de funciones. Se define como la correlación de un movimiento de entrada con un movimiento de salida en un mecanismo. Un generador de función es conceptualmente una "*caja negra*" que entrega alguna salida predecible en respuesta a una entrada conocida.

Síntesis de generación de trayectorias. Se define como el control de un punto en el plano, de tal suerte que siga una trayectoria prescrita.

Síntesis de guiado de cuerpo rígido. Trata el problema de situar el acoplador de un mecanismo en un número especificado de posiciones.

2.6. Mecanismos metamórficos

El concepto inicial es creado a partir de la palabra metamorfosis [33]. Los mecanismos metamórficos son capaces de alterar configuraciones topológicas de una a otra con un cambio resultante en su movilidad. Al contrario de los mecanismos tradicionales, los metamórficos no solo están diseñados para realizar una tarea monótona sino que son sistemas integrados que pueden ser reconfigurados en varios tipos de submecanismos para llevar a cabo una variedad de tareas [33]. Un mecanismo metamórfico es la integración de un número de submecanismos en módulos combinados, cada uno de los cuales tiene una habilidad metamórfica para auto-

transferirse en otros tipos. Un cambio en la morfología de un mecanismo metamórfico resulta, de la construcción de un módulo el cual crece o se degenera [75].

La topología reconfigurable y la movilidad variable son características de los mecanismos metamórficos que ofrecen versatilidad, adaptabilidad y bajo costo para diferentes condiciones de operación [40]. El estudio de este tipo de mecanismos metamórficos comenzó a mediados de los 90's cuando Wohlman investigó en 1996 enlaces cinemotrópicos junto con la variación de posición de parámetros [70]. En 1998, Dai y Rens Jones, propusieron un mecanismo metamórfico con topología variable [24]. En el año 2004, Liu y Yang investigaron las características de los mecanismos metamórficos y propusieron tres configuraciones metamórficas cambiando la estructura topológica de un mecanismo [44]. En 2006, Yan y Kuo, presentan juntas metamórficas cinemáticas variables basados en representaciones topológicas [74].

Configuraciones Metamórficas. Un mecanismo metamórfico se denota con la letra M y las subfases de los mecanismos de trabajo se denotan con iM. Las configuraciones de un mecanismo metamórfico se componen de un mecanismo llamado *fuentes generador* y por *mecanismos de trabajo*. Los primeros son los encargados de que los mecanismos de trabajo cambien su configuración; mientras que los segundos presentan una topología fija como parte de una de sus subfases de trabajo [74]. En la Figura 2.6 se muestran algunos ejemplos de configuraciones de mecanismos metamórficos.

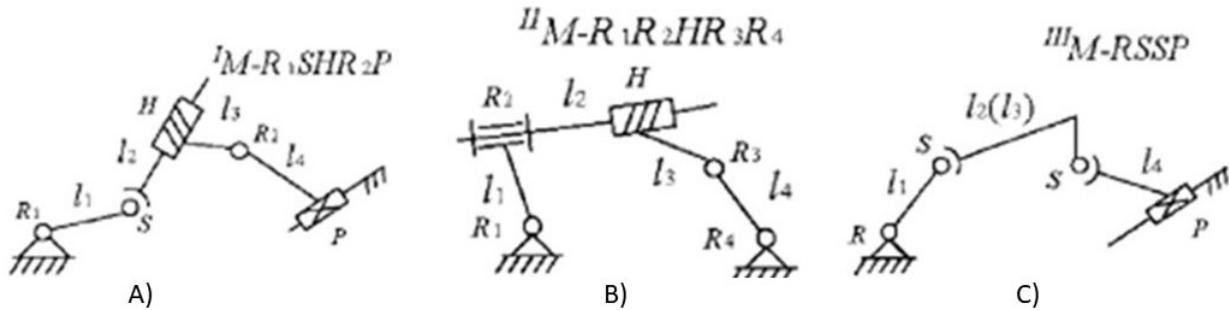


Figura 2.7: Configuraciones de mecanismos metamórficos [74].

La Figura 2.7 A) muestra un mecanismo de cinco barras con una configuración de tipo R_1SHR_2P sujeto a las condiciones geométricas $R_1 \parallel R_2 \parallel P$. En la Figura 2.7 B) se muestra un mecanismo de cinco barras con una configuración $R_1R_2HR_3R_4$ sujeto a la condición geométrica $R_1 \perp R_2$. Finalmente, en la Figura 2.7 C) se muestra un mecanismo de cuatro barras con una configuración de tipo RSSP sujeto a la condición geométrica $R \parallel P$.

Técnicas básicas para la reconfiguración metamórfica. Las restricciones de movilidad de un mecanismo de cadena cinemática cerrada con no singularidad, no depende del tamaño o la posición de los enlaces; solamente depende del tipo de enlaces, número de enlaces y las restricciones de orientación geométrica. Por ello, existen tres formas para descomponer una cadena cinemática. Las formas de descomposición mostradas en la Figura 2.8, son la base

de las técnicas metamórficas básicas, las cuales son: juntas metamórficas, enlaces metamórficos y restricciones de orientación geométrica [74].

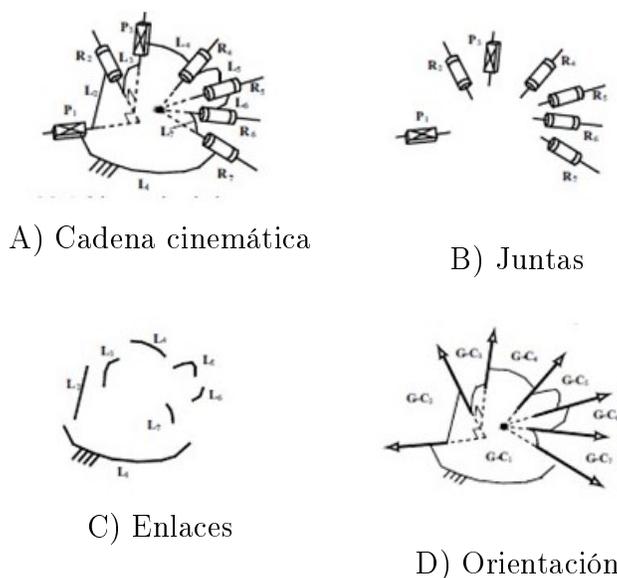


Figura 2.8: Descomposición de una cadena cinemática [74].

Juntas metamórficas. Se pueden clasificar en dos tipos: variación del número de juntas y variación del tipo de juntas. Las primeras pueden producir una reconfiguración y una movilidad variable; las segundas modifican los grados de libertad del mecanismo.

Enlaces metamórficos. Se dividen en dos grupos: variación de la secuencia de enlace y variación del número de enlaces. El primero menciona que si se cambia la secuencia de enlace en una cadena cinemática, se produce una nueva configuración; la segunda menciona que para cualquier cadena cinemática, los enlaces están conectados de tal manera que permiten el movimiento en cada junta pero, al cambiar el número de enlace, algunos pueden volverse un cuerpo rígido.

Restricciones geométricas de orientación. Las restricciones del movimiento relativo de las articulaciones, no dependen de las formas reales o la posición de los enlaces, estas se determinan por la relación de los enlaces y las direcciones de los ejes de dos juntas. Si las direcciones de las juntas se definen como vectores unitarios, las condiciones geométricas entre estas dos juntas contiguas tendrán las siguientes categorías :

1. Restricción coincidente (denotado por $'/'$) : Los dos ejes adyacentes son coaxiales.
2. Restricción paralela (denotado por $'//'$) : Indica que las direcciones son paralelas.
3. Restricción ortogonal (\perp) : Las direcciones son perpendiculares.

4. Restricciones de intersección (\angle) : Los ejes se cruzan pero no son ni paralelos ni perpendiculares.
5. Restricción aleatoria (-) : No existe relación.

2.6.1. Representación de las configuraciones de un mecanismo metamórfico

Para la representación de las estructuras topológicas de un mecanismo metamórfico (Figura 2.9), suele hacerse uso de una matriz adjunta. Esta matriz y sus operaciones elementales fueron presentadas en 2005 por Dai et al. [23], la idea era poder expresar las configuraciones de transformación de un mecanismo.

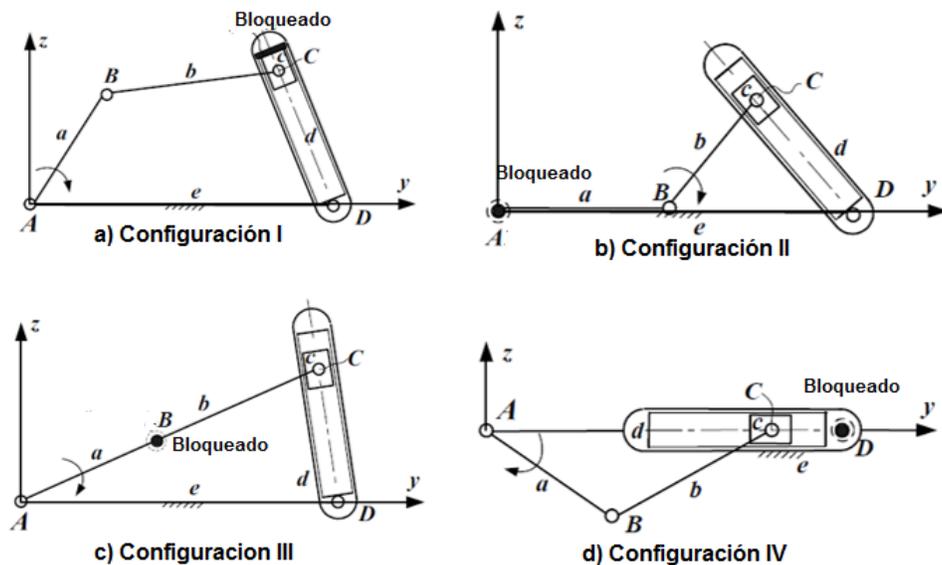


Figura 2.9: Configuraciones de un mecanismo metamórfico [42].

En 2010 Li y Dai [23, 42], introdujeron una matriz adjunta simbólica, la información que contiene está basada en la variación de los eslabones y la orientación de las juntas. Con ello, las variaciones y características de acoplamiento de un mecanismo metamórfico pueden determinarse aplicando operaciones de intersección correspondientes a las matrices simbólicas. De acuerdo con [76], este tipo de matrices no son de la misma dimensión, lo que representa un problema ya que deben normalizarse. Es por ello que para reducir la complejidad se propone una matriz simbólica para mecanismos de configuración m , ésta se expresa como:

$$A^m = \begin{bmatrix} L_1 & J_{1,2}^{(m)} & \cdots & J_{1,i}^{(m)} & \cdots & J_{1,k-1}^{(m)} & J_{1,k}^{(m)} \\ a_{2,1}^{(m)} & L_2 & \cdots & J_{2,i}^{(m)} & \cdots & J_{2,k-1}^{(m)} & J_{2,k}^{(m)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{i,1}^{(m)} & \cdots & \cdots & L_i & \cdots & \cdots & J_{i,k}^{(m)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ a_{k-1,1}^{(m)} & a_{k-1,2}^{(m)} & \cdots & a_{k-1,i}^{(m)} & \cdots & L_{k-1} & J_{k-1,k}^{(m)} \\ a_{k,1}^{(m)} & a_{k,2}^{(m)} & \cdots & a_{k,i}^{(m)} & \cdots & a_{k,k-1}^{(m)} & L_k \end{bmatrix} \quad (6)$$

La diagonal principal de la matriz (6) representa la secuencia de los eslabones en el mecanismo L_i , donde i es el número de eslabones. El número de columnas y renglones está representado por k , que también indica el número de eslabones en todas las configuraciones. La diagonal superior denotada por el elemento $J_{i,j}^{(m)}$, muestra la relación de conexión entre los eslabones, ésta puede representarse por un símbolo con subíndice, por un lado el símbolo denota el tipo de junta y el subíndice indica la relación de restricción geométrica (paralelismo, intersección, coincidente y perpendicular) de las juntas. Para indicar que una junta está bloqueada se utiliza -1. Por otro lado, para indicar que no existe una conexión entre eslabones se utiliza 0. La diagonal inferior representada por $a_{j,i}^{(1)}$ es el número de la secuencia de la configuración del mecanismo, es decir, si un elemento del mecanismo es cambiado en alguna de sus configuraciones m . Visto de otra manera, si existe una restricción de juntas entre eslabones, se coloca un 1, en caso contrario es 0. Para una matrix $A^{(m)}$, solo cuando la restricción de la junta entre eslabones es modificada en la configuración m , el valor de $a_{j,i}^{(m)}$ es m .

2.6.2. Construcción del mecanismo metamórfico original a partir de las matrices de representación

De acuerdo con W. Zhang et al. [76], la matriz para representar el mecanismo metamórfico original está dada por:

$$A^{(0)} = A^{(1)} \cup A^{(2)} \cup \cdots \cup A^{(m)} \cup \cdots \cup A^{(n)}$$

$$= \begin{bmatrix} L_1 & \cdots \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cdots & \cdots & L_i & \cdots & \prod_{m=1}^{n-1} J_{i,j}^{(m)} \cup J_{i,j}^{(m+1)} & \cdots & \cdots & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cdots & \cdots & \{a_{j,i}^{(1)}, \cdots, a_{j,i}^{(m)}, \cdots, a_{j,i}^{(n)}\} & \cdots & L_j & \cdots & \cdots & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \cdots & L_k \end{bmatrix} \quad (7)$$

Como se puede observar en la ecuación (7) el operador \cup representa la unión de los argumentos. El resultado de $A^{(0)}$, tiene la misma forma que la ecuación (6). Para llegar a la obtención de la matriz, se deben seguir estos principios:

1. Los elementos de la diagonal principal de $A^{(0)}$ son los mismos que se encuentran en $A^{(i)}$ ($i= 1, \dots, n$).

2. La operación que une los elementos inferiores diagonales y registra los números de secuencia de la configuración se realiza uniendo los elementos en estas matrices como un conjunto de resultados en $A^{(0)}$, que pueden expresarse como:

$$A^{(0)}(j, i) = \left\{ a_{j,i}^{(1)}, \dots, a_{j,i}^{(m)}, \dots, a_{j,i}^{(n)} \right\} (i \prec j \leq k) \quad (8)$$

donde el número 0 se ignora. Si los valores de los elementos adyacentes son iguales en este conjunto, solo uno de ellos deberá ser guardado. La información dada por este conjunto es muy útil para construir las matrices para una sola configuración del mecanismo.

3. El significado físico de unir los elementos de la diagonal superior de estas matrices es lograr la mayor variabilidad en las articulaciones cinemáticas. La operación se inicia desde los elementos que se encuentran en la diagonal superior en la primera matriz $A^{(0)}$; entonces el tipo de articulación y orientación se expanden con base en los elementos de la próxima matriz de configuración de adyacencia en la secuencia. Se expresa la operación como:

$$\begin{aligned} A^{(0)}(i, j) &= \prod_{m=1}^{k-1} A^{(m)}(i, j) \cup A^{(m+1)}(i, j) \\ &= \prod_{m=1}^{k-1} J_{i,j}^{(m)} \cup J_{i,j}^{(m+1)} (i \prec j \leq k) \end{aligned} \quad (9)$$

Básicamente, el operador unificador es equivalente a una extensión del tipo y orientación axial de una articulación cinemática. Si los elementos adyacentes son iguales, representa la correspondiente. La relación de conectividad entre los enlaces relacionados se mantiene sin cambios, así que estos mismos números en el resultado de la operación necesitan ser omitidos simplemente manteniendo uno.

2.7. Criterio de Denavit-Hartenberg

La representación de Denavit-Hartenberg es un método matricial que permite establecer de manera sistemática un sistema de coordenadas (Si) ligado a cada enlace i de una cadena articulada, determinando las ecuaciones cinemáticas de la cadena completa. Escogiendo adecuadamente los sistemas de coordenadas asociados para cada enlace, será posible pasar de uno al siguiente por medio de 4 transformaciones básicas que dependen exclusivamente de las características geométricas del enlace. Estas transformaciones básicas consisten en una sucesión de rotaciones y traslaciones que permitan relacionar el sistema de referencia del elemento i con el sistema del elemento $i-1$. Los parámetros de D-H se representan en la Figura 2.10.

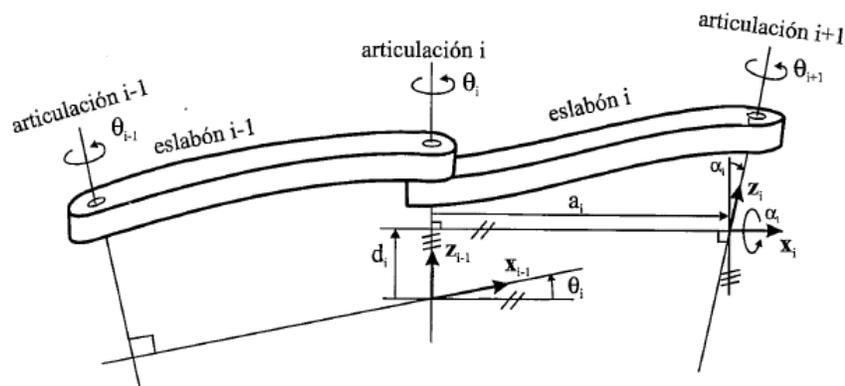


Figura 2.10: Representación de parámetros D-H [4].

θ_i Ángulo que forman los ejes x_{i-1} y x_i medido en un plano perpendicular al eje z_{i-1} .

d_i Distancia a lo largo del eje z_{i-1} desde el origen del sistema de coordenadas $i-1$ – *simo* hasta la intersección del eje z_{i-1} con el eje x_i .

a_i Distancia a lo largo del eje x_i que va desde la intersección del eje z_{i-1} con el eje x_i hasta el origen del sistema i -ésimo.

α_i Ángulo de separación del eje z_{i-1} y el eje z_i , medido desde un plano perpendicular al eje x_i .

Los pasos para obtener la representación de D-H, se pueden dividir en 16 [4]:

1. Numerar los eslabones comenzando con 1 (primer eslabón móvil de la cadena) y acabando con n (el último eslabón móvil). Se enumerará como eslabón cero a la base fija del robot.
2. Numerar cada articulación comenzando con 1.
3. Localizar el eje de cada articulación. Si es rotativa, su eje será su propio eje de giro. Si es prismática, será el eje a lo largo del cual se produce el desplazamiento.
4. Para i de 0 a $n-1$, situar el eje z_i , sobre el eje de la articulación $i+1$.
5. Situar el origen del sistema de la base (S_0) en cualquier punto del eje z_0 . Los ejes x_0 e y_0 se situarán de modo que formen un sistema dextrógiro con z_0 .
6. Para i de 1 a $n-1$, situar el sistema (S_i) (solidario al eslabón i) en la intersección del eje z_i con la línea normal común a z_{i-1} y z_i , si ambos ejes se cortasen se situaría (S_i) en el punto de corte. Si fuesen paralelos S_i se situaría en la articulación.
7. Situar x_i en la línea normal común a z_{i-1} y z_i .

8. Situar y_i de modo que forme un sistema dextrógiro con x_i y z_i .
9. Situar el sistema S_n en el extremo del robot de modo que z_n coincida con la dirección de z_{n-1} y x_n sea normal a z_{n-1} y z_n .
10. Obtener θ_i como el ángulo que hay que girar entorno a z_{i-1} para que x_{i-1} y x_i queden paralelos.
11. Obtener d_i como la distancia, medida a lo largo de z_{i-1} , que habría que desplazar ($SI-1$) para que x_{i-1} y x_i queden alineados.
12. Obtener a_i como la distancia medida a lo largo de x_i (que ahora coincidiría con x_{i-1}) que habría que desplazar el nuevo ($SI-1$) para que su origen coincida con SI .
13. Obtener a_i como el ángulo que habría que girar entorno a x_i (que ahora coincidirá con x_{i-1}), para que el nuevo $SI-1$ coincida totalmente con SI .
14. Obtener las matrices de transformación A_i^{i-1} .
15. Obtener la matriz de transformación que relaciona el sistema de la base con el extremo del robot $T = A_1^0, A_2^1, \dots, A_n^{n-1}$.
16. La matriz de transformación T define la orientación (submatriz de rotación) y posición (submatriz de traslación) del extremo referido a la base en función de las n coordenadas articulares.

2.8. Algoritmos genéticos

El término de algoritmo genético (AG) fue introducido por primera vez en 1975 por John Holland, posteriormente fue implementado por Goldberg en 1989. Se puede ver a los AG como métodos de optimización [20]. En general, los problemas de optimización se plantean de la siguiente manera [62]:

$x_0 \in X$ tal que f es un máximo en x_0 , donde $f : X \rightarrow \mathfrak{R}$, por lo tanto:

$$f(x_0) = \max_{x \in X} f(x) \quad (10)$$

De acuerdo con Cruz [20], un algoritmo genético se compone de una cadena de caracteres llamada genes. El valor y la posición en la cadena de un gen son llamados lugar geométrico y alele. Por otro lado, a cada solución de la cadena se le conoce como cromosoma, al código de las variables se les llama genotipo y a las variables mismas se les llama fenotipo. En la Figura 2.11 se ilustran los conceptos mencionados.

A continuación se muestra la estructura básica de un AG [20].

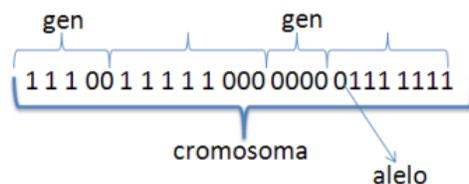


Figura 2.11: Representación de un cromosoma [31].

Algoritmo

$t=0$

Se comprueba la población inicial.

WHILE se detiene la condición que no se cumple DO

BEGIN

Se selecciona a los individuos para la reproducción;

Se crea a la descendencia cruzando a los individuos;

Eventualmente se mutan los individuos;

Se computa la nueva generación

END

De acuerdo con [11, 20, 31] los puntos mostrados en el algoritmo pueden describirse como:

Población inicial. Se crea aleatoriamente y es codificada dentro del cromosoma de un arreglo con longitud variable. La codificación puede hacerse en una representación binaria, con base al dominio de cada variable.

Selección. Los mecanismos de selección son los encargados de escoger a los individuos de la población de forma aleatoria para agruparlos en parejas y darles la oportunidad de reproducirse. Las técnicas empleados para la selección pueden ser:

- *Selección proporcional.* Seleccionado proporcionalmente a su valor de aptitud.
- *Selección de estado uniforme.* Algunos individuos menos aptos son reemplazados.
- *Universal estocástico.* Distribución de los individuos en función de sus valores esperados.
- *Escalamiento sigma.* Está en función de su aptitud, la media y la desviación estándar.
- *Selección por jerarquias.* Clasifica a los individuos con base en su rango.
- *Selección por torneo.* Probabilidad de ganar en una competencia por comparaciones de los individuos, ya sea en forma determinista o probabilística.
- *Selección de rango exponencial.* Ponderación exponencial de probabilidades en los individuos.

Cruzamiento. Es el intercambio de genes entre los cromosomas de dos individuos completamente adaptados, este proceso se realiza cortando dos cadenas en una posición elegida al azar e intercambiándolas en sus extremos (Figura 2.12).

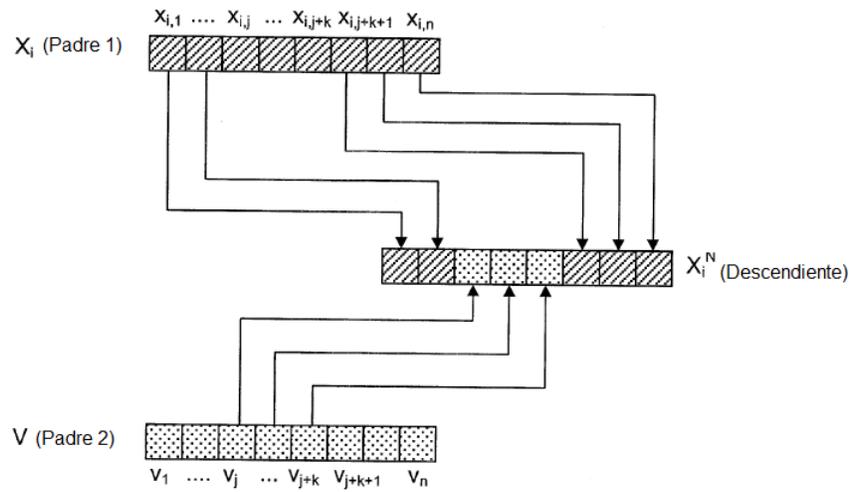


Figura 2.12: Cruzamiento para la reproducción [11].

Algunos de los cruzamientos más utilizados son [31]:

- *Cruzamiento de punto*. Se elige un punto de corte y se intercambian los segmentos análogos de las dos cadenas.
- *Cruzamiento de dos puntos*. Se eligen dos puntos de corte y se intercambian los segmentos medios de ambas cadenas.
- *Cruzamiento uniforme*. Para cada posición se decide al azar si se intercambian las posiciones.
- *Cruzamiento aleatorio*. Se escoge una permutación aleatoria que se aplicará a los progenitores, después se aplica un cruzamiento de $N - puntos$ aleatoriamente.

Mutación. Es un operador que consiste en elegir aleatoriamente un gen durante la reproducción o cruzamiento (Figura 2.13).

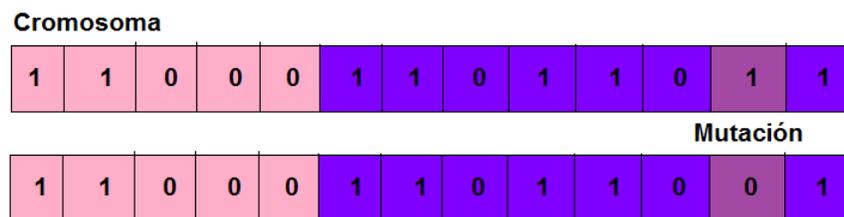


Figura 2.13: Ejemplo de mutación [31].

Las técnicas más empleadas para el proceso de mutación son:

- *Mutación por inserción*. Se selecciona el valor de un individuo en forma aleatoria y se le inserta en una posición arbitraria.

- *Mutación por desplazamiento.* Cambian de posición en la cadena varios valores a la vez.
- *Mutación por intercambio recíproco.* Se seleccionan dos puntos al azar y se intercambian estos valores de posición.
- *Mutación por factor múltiple.* Dentro de la mutación se incorpora un factor de perturbación, un valor porcentual de que número de alelos en un cromosoma serán afectados de manera aleatoria.

Se utilizan los algoritmos genéticos en este trabajo ya que, presentan ventajas sobre otros métodos de optimización en la evaluación de la función objetivo.

2.9. Metodología del diseño

La importancia de la calidad en el diseño de productos es de suma importancia ya que siempre se busca la mejor manera de hacer las cosas. La clave para que exista una mejora continua es la participación de los clientes en el proceso de desarrollo del producto. Para llevar a cabo esto se utilizan dos enfoques, QFD (traducido al español como despliegue de la función de calidad) y PDS (traducido al español como especificaciones del diseño del producto).

2.9.1. QFD

Odomirok [49] define al despliegue de la función de calidad como:

“Una herramienta matemática y de metodología estructurada que se utiliza para identificar y cuantificar los requisitos de los clientes y traducirlos en parámetros críticos clave. QFD también ayuda a priorizar acciones para mejorar el proceso o producto para cumplir con las expectativas de los clientes.”

Otra definición del QFD de acuerdo con [1] es: método para transformar las demandas cualitativas de los usuarios en parámetros cuantitativos, para implementar las funciones que forman la calidad y para implementar métodos para lograr la calidad del diseño en subsistemas y componentes, y en última instancia, en elementos específicos del proceso de fabricación.

La estructura del QFD está compuesta por los siguientes puntos [49, 1, 69]:

1. Recolectar información de clientes que especifique sus deseos y necesidades con respecto a un nuevo producto (o servicio) o la revisión de un producto existente.
2. Cómo satisfacer algunas especificaciones de diseño desde la perspectiva del cliente.
3. Crear requisitos de diseño que cumplan con los requisitos de los clientes

4. Estudio comparativo del producto con algunos similares.
5. Uso de los requerimientos para convertirlos en términos mensurables de ingeniería.
6. Vinculación inteligente de las necesidades de los clientes con las funciones de diseño, desarrollo, ingeniería, fabricación y servicio.

La información reunida a partir de los puntos mencionados anteriormente, se introduce en las habitaciones de la casa de la calidad (Figura 2.14) que es que un diagrama que sirve para entender mejor las prioridades de los clientes y buscar cómo responder de forma innovadora a dichas necesidades [49, 69].

- * **Paso 1** (Voz del cliente). Se obtienen los requerimientos del cliente y se hace una ponderación de los mismos, basandose en aquellos básicos y los que el cliente desearía obtener a través de su importancia relativa.
- * **Paso 2** (Voz del mercado). Con base en los requerimientos del cliente, se realiza un análisis comparativo con la finalidad de determinar cuáles son las necesidades que no han sido atendidas.
- * **Paso 3** (Requerimientos Técnicos). Características técnicas o de ingeniería del producto detectadas, las cuales contribuyen a satisfacer de algún modo las necesidades del cliente.
- * **Paso 4** (Relaciones). Se relacionan cuantitativamente las necesidades de los clientes con las características de la calidad.
- * **Paso 5** (Correlaciones). Identificación de las correlaciones existentes entre las características técnicas.
- * **Paso 6** (Objetivos). Se muestran las metas a alcanzar en cada característica técnica.

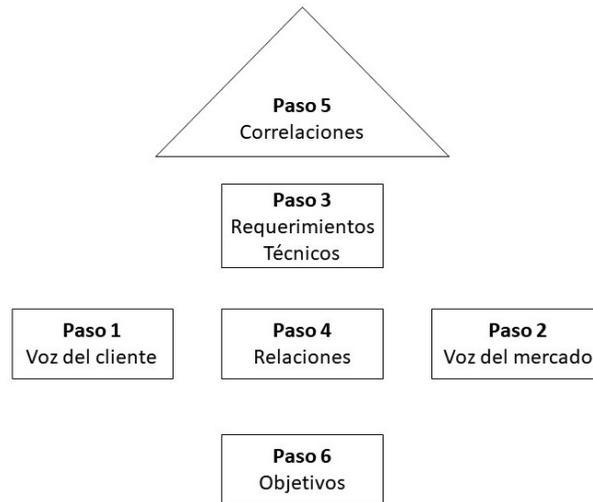


Figura 2.14: Casa de la calidad [69].

2.9.2. PDS

El PDS, es un documento creado en un tiempo muy temprano al proceso de diseño, dicho documento es desarrollado por el equipo del diseño del producto, después de realizar una investigación del mercado. El PDS detalla los requisitos que deben cumplirse para que el producto o proceso sea exitoso. El documento establece la base para todas las actividades de diseño de ingeniería y además, asegura que todos los factores relevantes sean explicados y así mismo, las áreas de interés sean bien conocidas [18, 59].

El objetivo principal del PDS es garantizar que el diseño o el posterior diseño y desarrollo de un producto satisfaga las necesidades (o requisitos) del usuario. Una característica importante del PDS es que es dinámico, debido a que puede ser modificado durante el proceso de diseño. Los elementos que conforman el PDS pueden agruparse en 5 categorías [18, 34]:

- Requerimientos-rendimiento
- Requerimientos-operación
- Disposiciones
- Normas/estándares
- Requerimientos de manufactura

En la Tabla 2.5 se muestra una descripción a detalle de las especificaciones de diseño del producto.

Tabla 2.5: Descripción a detalle del PDS [34].

GENERAL	PARTICULAR	DESCRIPCIÓN
	FUNCIÓN	Sintetizar la función del producto.
	APARIENCIA	En ocasiones no presenta gran importancia, pero en otras es importante la estética del producto para un buen posicionamiento en el mercado, considerando forma, color y texturas.
	FIABILIDAD	La vida del diseño, especificando el número de ciclos de operación del producto.
RENDIMIENTO	CONDICIONES AMBIENTALES	Los rangos de temperatura, humedad, presión, condiciones químicas y magnéticas a las que el producto estará expuesto.
	ERGONOMÍA	Si el producto es para el uso humano, considerar las características necesarias para el desempeño.
	CALIDAD	La calidad del producto debe cumplir los requerimientos del mercado en cada uno de sus componentes.
	PESO	En algunas aplicaciones, esta característica es importante.
	PROCESO	Determinar los procesos que se involucran en la manufactura del producto.
	MATERIALES	Características de los materiales para la fabricación y el empaque del producto, enfatizando en los criterios de la selección y restricciones del diseño. Algunas consideraciones como corrosión, clima, resistencia, densidad, durezas, color, reciclado, entre otras.
	ENSAMBLES	Las características de los ensambles; determinando si es manual, semiautomático o automático, incluyendo si son necesarias líneas de ensamble.
MANUFACTURA	EMPAQUE/ENVIO	Especificaciones del tamaño y pesos para el empaque y transporte del producto.
	PRODUCCIÓN	Determinar la cantidad de producción requerida para una correcta selección de los materiales y procesos de manufactura.
	TIEMPO DE ENTREGA	Es importante definir tiempos de entrega reales para cada etapa del proceso de diseño producción.
	PRUEBAS	Los métodos empleados para la verificación de la funcionalidad del producto, especificando los tiempos y pruebas necesarias.
	ESTANDARES	Los estándares involucrados a nivel nacional, internacional y corporativo.
NORMAS/ ESTÁNDARES	PATENTES	Determinar si el diseño no infringe alguna patente existente.
	ESTANDARES	Los estándares involucrados en las legislaciones a nivel nacional o internacional que se involucren en el diseño del producto, como la reutilización o el reciclaje de ciertos materiales y procesos limpios
	LEGISLACION	Cualquier legislación gubernamental que involucre una modificación o consideración importante en el diseño
DISPOSICIONES	RIESGO	Los riesgos potenciales existentes en el proceso de diseño, que involucren dificultades al final del ciclo de vida del producto.
	INSTALACION	Definir las características del lugar donde el producto se instalará.
	OPERACIÓN	Factores que influyen en la operación tanto personal mínimo requerido, la habilidad requerida para la operación, los costos generados y el consumo máximo tolerable de energía estimado
OPERACIÓN	MANTTO	Simplificaciones en los mantenimientos, re-ensambles, características y tiempos de los mantenimientos preventivos y correctivos.
	SEGURIDAD	Protecciones necesarias para realizar una operación lo mas segura posible.

Capítulo 3

Diseño preliminar

Para el desarrollo del proyecto se propone el uso de la metodología del diseño de manos robóticas propuesta por Puig et al. [56]. Esta metodología ha sido desarrollada en el Laboratorio de Robótica y Mecatrónica (LARM) de la universidad de Cassino en Italia. En ella se establece el proceso para el desarrollo de manos antropomórficas con múltiples dedos. Esta metodología está compuesta por cuatro fases que permiten el diseño de secuencias de prototipos de manos. Además, los bucles de optimización de la metodología garantizan un diseño adecuado para los parámetros y requisitos pre-establecidos.

3.1. Descripción de la metodología de manos robóticas

Fase 1: Definición del problema. Esta fase incluye la necesidad de diseño, la identificación de los usuarios, la delimitación del problema a tratar y el establecimiento de los requisitos funcionales.

Fase 2: Concepto de diseño y diseño preliminar. En esta fase se establece un conjunto de especificaciones y alternativas de diseño, para ser modeladas, analizadas y evaluadas. Las etapas pertenecientes a esta fase son: análisis de la mano humana, la selección de actuadores y transmisión mecánica, sistemas de control, selección, síntesis y análisis.

Fase 3: Diseño a detalle. La fase experimental pertenece a esta sección e implica realizar pruebas con un prototipo físico para determinar si los requerimientos se cumplen.

Fase 4: Comunicación del diseño. Consiste en la elaboración de un documento para reportar las características del diseño final.

En la Figura 3.1 se muestra el diagrama de flujo de la metodología descrita anteriormente.

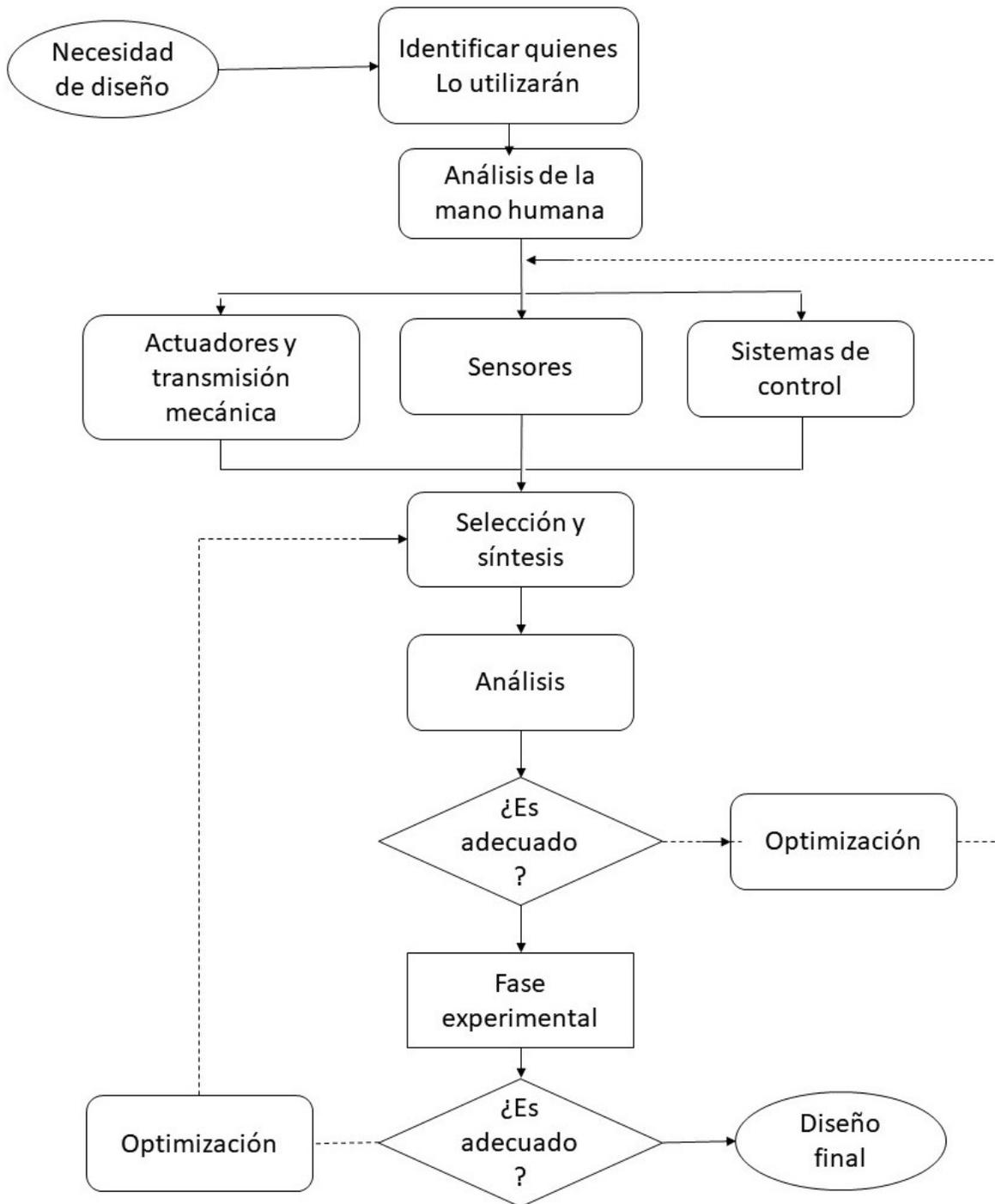


Figura 3.1: Metodología para el desarrollo de manos robóticas [56].

3.2. Implementación de la metodología de diseño

Se llevará a cabo el desarrollo de la mano robótica utilizando la metodología presentada en la sección anterior.

3.2.1. Definición del problema

En su mayoría, los prototipos de manos robóticas presentan palmas rígidas, lo cual genera que el espacio de trabajo sea limitado y que el diseño de los dedos se vuelva complejo. La mayoría de estos, presentan tres juntas paralelas y en algunos casos en cada junta se coloca un motor, esto genera un incremento en el volumen, peso y consumo energético del prototipo.

Para solucionar esta problemática se propone un mecanismo para los dedos el cual, sea capaz de moverse con un solo motor. Además, se plantea el diseño de una estructura para la palma, que permita su movimiento y en consecuencia, los dedos puedan moverse en más de un plano.

Requerimientos.

Los requerimientos se obtuvieron de diversas fuentes, algunas de ellos son con base en la opinión de personas enfocadas en el desarrollo de manos robóticas de la Universidad de Cassino y Lazio Meridionale, Italia. Por otro lado, personas que usan este tipo de dispositivos de entre 18 y 45 años. Además, algunos otros han sido considerados con base en artículos donde se expresan las principales deficiencias de los prototipos actuales, así como las características primordiales con las que las manos robóticas deben contar de acuerdo con los usuarios. Para una correcta selección de los requerimientos, se utilizará la metodología del QFD, la cual ya ha sido explicada en el Capítulo 2. Los requerimientos considerados para el diseño del prototipo se enlistan a continuación.

1. Evaluación de las fuerzas de agarre para determinar si son suficientes para una buena sujeción de objetos.
2. La mano debe tener tres dedos debido a que es el número mínimo para llevar a cabo la tarea de sujeción.
3. El mecanismo debe moverse con un mínimo número de actuadores para evitar un prototipo con peso excesivo.
4. Los dedos deben envolver correctamente al objeto para mantener una buena sujeción.
5. Los dedos deben trabajar en más de un plano para aumentar la movilidad.
6. La palma debe ser movable para aumentar el grado de agarre.

7. Debe realizar agarres cilíndricos, esféricos y pinzoidales debido a que son los más utilizados.
8. Debe tomar objetos sin deformarlos.
9. Hecha de un material resistente.
10. Debe ser ligera.
11. Fácil de transportar.
12. Debe tener sensores de fuerza para obtener los rangos máximos y mínimos durante el agarre.
13. Fácil de usar.
14. Fácil mantenimiento.
15. Un grado de libertad para la muñeca.
16. Evaluación del consumo energético.
17. Evaluación del área de trabajo

En la Tabla 3.1 se muestra la evaluación de los requerimientos mencionados anteriormente.

En la primera columna se muestra la importancia para el usuario, la cual será calificada de 1 a 5 donde 1 es no importante y 5 demasiado importante.

En la columna número dos se muestra la mano robótica AM-Hand, la cual será evaluada para determinar qué tanto cumple con los requerimientos de la tabla. Se evalúa entre 1 y 5, donde 1 significa que no tiene relación con el requerimiento y 5 cumple con esa especificación.

De la columna 3 a la 5 se evalúan tres prototipos de manos robóticas para determinar qué tanto cumplen con los requerimientos de la tabla. Las calificaciones, al igual que la columna 2 van de 1 a 5. Los prototipos que se evalúan son:

- Columna 3 limb revolution (Touch Bionics)
- Columna 4 Shadow Hand
- Columna 5 Metamorphic hand

Las columnas siguientes son parámetros del QFD:

- Columna 6 objetivo

- Columna 7 razón de mejora
- Columna 8 argumento de venta
- Columna 9 ponderación absoluta
- Columna A ponderación relativa (%)
- Columna B orden de importancia

Tabla 3.1: Evaluación de los requisitos.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B
Evaluación de las fuerzas de agarre	3	5	5	5	1	3	0.6	1.2	2.16	2.68	16
La mano debe tener tres dedos	1	5	5	5	5	5	1	1.2	1.2	1.49	18
El mecanismo debe moverse con un mínimo número de actuadores para evitar un prototipo con peso excesivo.	3	5	5	5	5	5	1	1.2	3.6	4.48	11
Los dedos deben adaptarse a la forma de los objetos	5	5	1	1	4	4	0.8	1.5	6	7.47	3
Los dedos deben trabajar en dos planos	5	5	1	1	5	4	0.8	1.5	6	7.47	4
La palma debe ser móvil para aumentar el grado de agarre.	3	5	1	1	5	5	1	1.5	4.5	5.60	10
Debe realizar agarres cilíndricos, esféricos y pinzoidales	5	5	5	5	5	5	1	1.5	7.5	9.33	1
Debe tomar objetos sin dañarlos	5	5	5	5	5	5	1	1.5	7.5	9.33	2
Hecha de un material resistente	4	5	5	5	5	3	0.6	1.5	3.6	4.48	13
Debe ser ligera	5	5	5	3	3	4	0.8	1.5	6	7.47	5
Facil de transportar	4	5	5	5	5	4	0.8	1.5	4.8	5.97	7
Debe tener sensores de fuerza	4	5	1	5	5	4	1	1.2	4.8	5.97	8
Facil de usar	4	5	4	4	4	5	1	1.5	6	7.47	6
Facil mantenimiento	2	5	4	3	4	3	0.6	1	1.2	1.49	19
Evaluación del consumo energético	3	5	5	5	1	4	0.8	1.2	2.88	3.58	14
Evaluación del área de trabajo	2	5	3	3	5	4	0.8	1	1.6	1.99	17
Un grado de libertad para la muñeca	3	5	5	5	3	4	0.8	1.2	2.88	3.58	15

De los requerimientos de la Tabla 3.1 se realiza la traducción en términos mensurables de ingeniería, los cuales se muestran en la Tabla 3.2. Por otro lado, aquellos requerimientos que no pueden ser asociados con una unidad se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.2: Requerimientos de ingeniería.

Requerimientos del cliente	Requerimiento de Ingeniería	Unidad
Evaluación de las fuerzas de agarre	Fuerza	N
La mano debe tener tres dedos	Cantidad	piezas
El mecanismo debe moverse con un mínimo número de actuadores para evitar un prototipo con peso excesivo.	Cantidad	piezas
Los dedos deben adaptarse a la forma de los objetos		
Los dedos deben trabajar en dos planos		
La palma debe tener al menos un grado de libertad (DOF)	Movilidad	DOF
Debe realizar agarres cilíndricos, esféricos y pinzoidales		
Debe tomar objetos sin dañarlos		
Hecha de un material resistente	Resistencia	kg/mm ²
Debe ser ligera	Peso	Kg
Fácil de transportar		
Debe tener sensores de fuerza		
Fácil de usar		
Fácil mantenimiento		
Evaluación del consumo energético	Consumo energético	Watts
Evaluación del área de trabajo	Volumen	mm ³
Un grado de libertad para la muñeca	Movilidad	DOF

Tabla 3.3: Descripción de los requerimientos no medibles.

Requisitos del cliente	Descripción
Los dedos deben adaptarse a la forma del objeto	La mayor parte del dedo debe rodear al objeto.
Los dedos deben trabajar en dos planos	Que el movimiento de la palma ayude al cambio de planos de los dedos.
Debe realizar agarres cilíndricos, esféricos y pinoidales	Implementación de mecanismos ajustables.
Debe tomar objetos sin dañarlos	Realizar un agarre seguro, eso es no dejar caer los objetos. Aplicar la fuerza suficiente para tomar los objetos sin dañarlos.
Fácil de transportar	Que pueda desplazarse de un lugar a otro sin problema
Debe tener sensores de fuerza	La instalación de dispositivos que sean capaces de obtener la medición de la fuerza ejercida por la mano. Para evitar causar daños a los objetos.
Fácil de usar	Que cuente con una interfaz para su uso. Cuenta con un sistema de control.
Fácil mantenimiento	Que solo se necesite apretar tornillos. Realizar una revisión de las conexiones.

En la Tabla 3.4 se muestra la relación entre los QUE's y los COMO's los cuales incluyen, los requisitos del cliente, requisitos críticos del cliente y la matriz de interrelación. Cabe mencionar que solo se tomarán 10 requisitos, los cuales fueron seleccionados a partir de su valor de ponderación en la Tabla 3.1. La relación entre los QUE's y los COMO's se calificará desde 0 al 9, donde 9 indica que existe una amplia relación.

Tabla 3.4: Relación entre QUE's y COMO's.

	Dimensiones de la mano (mm)	Peso de la mano (gr)	Peso de los objetos a sujetar (gr)	Fuerza ejercida por los dedos (N)	Duración de la batería (Horas)	Intervalos de mantenimiento (Meses)	Tensión de alimentación (Volts)	Corriente nominal (Amperes)
Debe realizar agarres cilíndricos, esféricos y pinzoidales	9	3	4	8	0	5	0	0
Debe tomar objetos sin dañarlos	7	0	0	9	0	0	0	0
Los dedos deben adaptarse a la forma de los objetos	9	3	8	8	0	0	0	0
Los dedos deben trabajar en dos planos	7	4	0	0	0	0	0	0
Debe ser ligera	8	9	2	0	0	0	0	0
Fácil de usar	0	0	0	0	0	6	5	5
Fácil de transportar	8	9	2	0	0	0	0	0
Debe tener sensores de fuerza	0	0	0	9	7	4	7	7
Palma metamórfica	3	4	0	0	0	0	0	0
La palma debe tener al menos un grado de libertad	3	0	0	0	0	0	0	0

Una vez realizada la relación entre los QUE's y los COMO's, se obtienen los objetivos específicos los cuales servirán para determinar las características técnicas con las que debe contar el prototipo. En la Tabla 3.5 se muestran los objetivos técnicos (Análisis de los COMO's). En la primera fila se muestra la orientación deseada, es decir, si los parámetros técnicos (Tabla 3.4) seleccionados son perjudiciales al diseño o lo benefician. Si los parámetros son favorables se coloca una flecha apuntando hacia arriba, en caso contrario la flecha apuntará hacia abajo. En el segundo renglón se colocaron los valores correspondientes a las ponderaciones absolutas de los parámetros seleccionados. La ponderación absoluta se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$\sum_{i=1}^{i=n} Pt_i * Prel_i \quad (7)$$

donde:

Pt: Parámetros técnicos de la Tabla 3.4.

Prel: Ponderación relativa Tabla 3.1.

Para la obtención de la ponderación real se utiliza la siguiente ecuación:

$$(Prel_i * 100) / \sum_{i=1}^{i=n} Pabs_i \quad (8)$$

donde:

Prel: Ponderación relativa.

Pabs: Ponderación absoluta.

En el renglón cuatro se considera el orden de importancia, tomando como base el valor más alto obtenido a partir de las ponderaciones reales. La valoración técnica es la unidad con la cual se medirán los parámetros técnicos. En los renglones del 6 al 9 se colocan las características de diferentes manos incluyendo el diseño propuesto, en algunas casillas se ha colocado un asterisco, lo que indica que no se tiene acceso a ese parámetro. Cabe resaltar que en el renglón 9 correspondiente a la mano metamórfica, todas las casillas tienen el asterisco, esto es debido a que actualmente solo se tiene el diseño mecánico y los estudios se han enfocado solo en la parte analítica. Sin embargo, se consideró debido a que es un buen punto de comparación ya que es la única mano de tipo antropomórfica-metamórfica registrada en la literatura. Finalmente, el objetivo técnico se obtiene de comparar los valores de cada parámetro correspondientes a cada mano y obtener un valor promedio.

Tabla 3.5: Análisis de los COMO's.

Orientación deseada	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Ponderación abs	409.92	218.09	123.96	272.1	41.79	115.35	79.14	79.14
Ponderación real	30.60	16.27	9.25	20.31	3.11	8.61	5.90	5.90
Orden de importancia	1	3	4	2	8	5	6	7
Valoración técnica	mm	gr	gr	N	Hrs.	Meses	Volts	Amperes
Nuestro producto AM-Hand	182.5 x 80.5	800	*	5	2	5	5	2
I-limb revolution (Touch Bionics)	182.5 x 80.5	611	*	35	2	*	7.4	5
Shadow hand	448 x 84	4200	*	*	*	*	48	2.5
Metamorphic hand	*	*	*	*	*	*	*	*
Objetivo técnico								

Con los requisitos obtenidos a partir del QFD se desarrolla el PDS considerando solo algunos de los puntos de la Tabla 2.5, ya que no todos son aplicables para este caso.

1. Rendimiento.

- Función: : Tomar objetos utilizando agarres cilíndricos, esféricos y pinzoidales sin dañarlos.
- Apariencia: Debe tener forma antropomórfica, presentar una textura lisa, contar con sensores de fuerza, tener tres dedos y una palma metamórfica.
- Fiabilidad: Analizando
- Condiciones ambientales: Debe estar en un lugar con una temperatura entre 8° - 35° C, además debe presentar resistencia a la corrosión.
- Calidad: Analizando
- Peso: No debe exceder los 3 kilogramos.

2. Manufactura.

- Procesos: Desarrollo del prototipo en *SolidWorks*[®] e impresión de las piezas en 3D.

- Analizando

3. Normas/Estándares.

- Pruebas: proceso

- Patentes:

- Robotic grasping apparatus hand, Sarcos Inc. (US005588688A)
- Robotic hand with extendable palm, Strider Labs. Inc. (US007370896B2)
- Robotic hand with palm section comprising several parts, King's College London (England) (US20120205933A1)
- Robot hand, Seiki Epson Corporation Tokyo, (EP 2474394B1)

4. Operación.

- Instalación: En un laboratorio.
- Operación: En proceso
- Mantenimiento: Persona con conocimientos mínimos en electrónica, programación y uso de herramientas. El tiempo para el mantenimiento será de 45 min tanto para preventivo como correctivo. Las actividades a realizar dentro del mantenimiento preventivo son:
 - Revisar conexiones
 - Revisar que los cables estén en buen estado
 - Revisar que los tornillos estén bien ajustados
 - Que realice los diferentes agarres para los que fue diseñada
 - Que los motores trabajen de acuerdo con la interfaz

3.3. Pruebas experimentales preliminares

En esta sección se presenta la propuesta de diseño para el mecanismo del dedo y la palma. Como primer paso, se realizó un estudio para determinar las fuerzas ejercidas en la sujeción de objetos con diferentes tamaños y formas. Para ello se utilizó la mano robótica LARM hand y la mano humana, con la finalidad de contrastar los resultados y tener una visión más amplia para el diseño de la mano robótica.

3.3.1. Pruebas de fuerza con LARM Hand IV

El prototipo ha sido diseñado y construido en LARM (Laboratorio de Robótica y Mecatrónica) en Cassino Italia. En la Figura 3.2 se muestra la LARM hand y el diagrama cinemático del dedo. La mano LARM hand es 1.2 veces más larga que la mano humana, su diseño se ha enfocado en un prototipo que sea de bajo costo y de fácil operación. Esta mano tiene tres dedos (1 GDL por dedo), los cuales al igual que la palma están hechos de aluminio, la palma también cuenta con un recubrimiento de plástico. El sistema de actuación consiste en tres motores de corriente directa los cuales son controlados por medio de un PLC [12, 14].

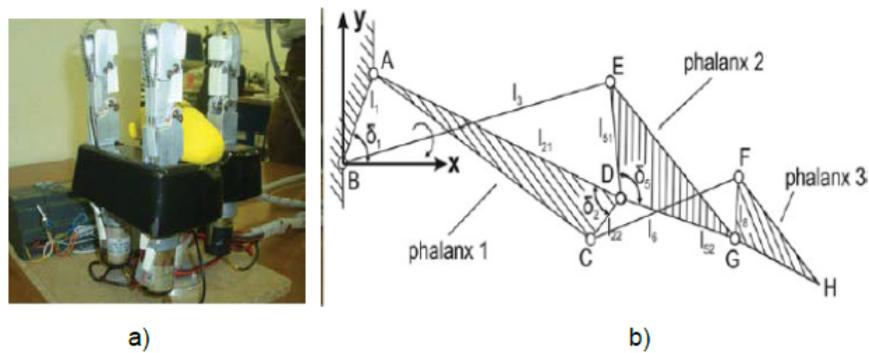


Figura 3.2: A) LARM hand y B) Diagrama del dedo [12].

Para las pruebas experimentales, se implementó el sistema mostrado en la Figura 3.3.

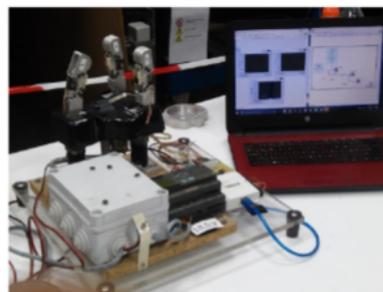
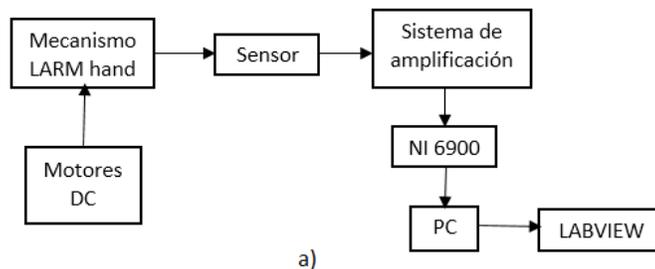


Figura 3.3: a) Esquema y b) Implementación.

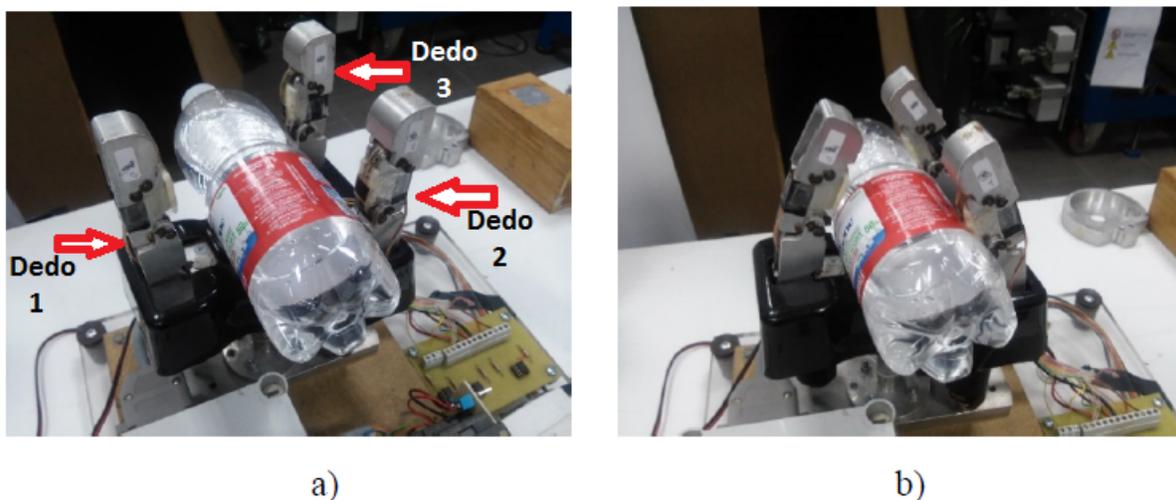
Del esquema de la Figura 3.3 se observa que los motores de corriente directa (DC) activan el mecanismo de los dedos de la mano robótica LARM hand para el agarre de un objeto, posteriormente los sensores (en este caso se utilizaron los FRS 400) colocados en las puntas de los dedos, al entrar en contacto con el objeto envían una señal a una tarjeta para ser amplificadas y enviadas a otra tarjeta (NI6009 de National Instruments). La NI6009 se encuentra conectada a la computadora para mostrar los resultados, los cuales son visualizados por medio de una interfaz desarrollada en el entorno de programación LABVIEW.

Los objetos utilizados para las pruebas de agarre se muestran en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6: Objetos utilizados en las pruebas.

No. Prueba	Nombre de la prueba	Objeto
1	Fuerza de agarre	Pedazo de latón
2	Fuerza de agarre	Botella de tomate
3	Fuerza de agarre	Lata de aceite
4	Fuerza de agarre	Pedazo de madera
5	Fuerza de agarre	Botella de vino
6	Fuerza de agarre	Botella de plástico

En la Figura 3.4 se muestra la prueba de agarre utilizando una botella de plástico, por otro lado, los resultados de fuerza se muestran en la Figura 3.5.



a) b)

Figura 3.4: Mano: a) Abierta y b) Cerrada.

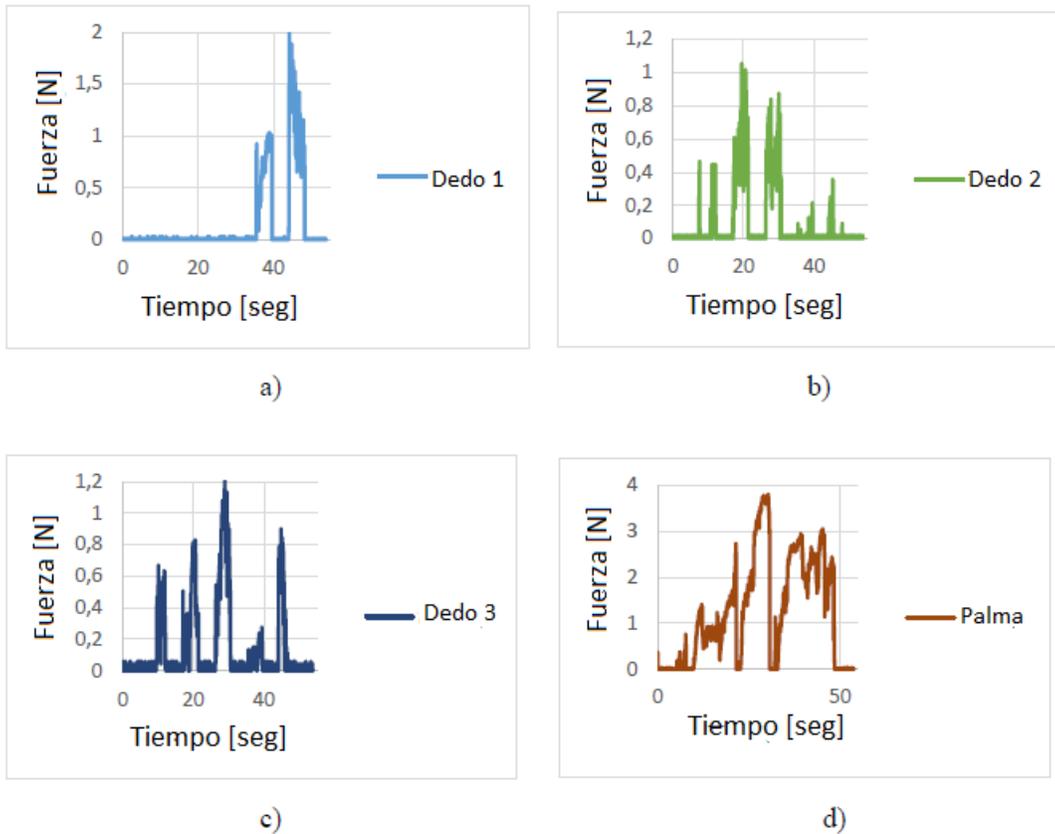


Figura 3.5: Fuerza adquirida de: a)Dedo 1, b)Dedo 2, c)Dedo 3 y d)Palma.

Con base en los resultados obtenidos de la Figura 3.5, en la Tabla 3.7 se muestran los valores máximos y mínimos de cada uno de los dedos y la palma.

Tabla 3.7: Valores máximos y mínimos.

Sensor	Fuerza mínima	Fuerza máxima
Dedo 1	0.9 N	2 N
Dedo 2	0.1 N	1.2 N
Dedo 3	0.1 N	1.2 N
Palma	0.5 N	4 N

De la Tabla 3.7 es posible concluir que, la fuerza mínima de agarre ejercida por los dedos es de 0.1 N mientras que la máxima es de 2 N, suficiente para sostener un objeto sin llegar a deformarlo. Por otro lado, la fuerza mínima registrada en la palma es de 0.5 N y una máxima de 4 N. Cabe aclarar que la fuerza en la palma es mayor debido a dos factores; el primero, la gravedad que por la posición de la palma permite que la mayor parte del peso del objeto se concentre sobre el sensor. El segundo, al ejercer los dedos presión sobre el objeto, lo empujan hacia la palma y en consecuencia la fuerza ejercida sobre el sensor aumenta. En la Tabla 3.8

se muestran todos los resultados de las pruebas.

Tabla 3.8: Resultados de las pruebas realizadas con varios objetos.

Objeto	Pedazo de latón	Botella de tomate	Lata de aceite	Pedazo de madera	Botella de vino
Sensor 1 (min-máx)	(0.5N - 4N)	(0.2N - 0.75N)	(0.5N - 2N)	(0.5N - 2N)	(0.5N - 6.8N)
Sensor 2 (min-máx)	(0.5N - 3.5N)	(0.1N - 0.8N)	(0.5N - 2.5N)	(0.6N - 2.5N)	(0.4N - 3.6N)
Sensor 3 (min-máx)	(0.2N - 5N)	(0.5N - 1N)	(1N - 9N)	(0N - 0.2N)	(0N - 0.2N)
Sensor 4 (min-máx)	(1N - 8.9N)	(0.5N - 5.5N)	(0.5N - 9N)	(0.5N - 9.8N)	(0.5N - 2N)

3.3.2. Pruebas de fuerza con la mano humana

Las pruebas de agarre con la mano humana se dividen en tres fases; en la primera la mano se encuentra completamente abierta y moviéndose hacia el objeto, en la segunda se realizó la sujeción del objeto y en la tercera el objeto es levantado del piso. Para la medición se colocaron cinco sensores en la punta de cada uno de los dedos (Figura 3.6). A diferencia de las pruebas con la LARM hand, con la mano se implementó un sistema diferente para la adquisición de las señales debido a que los sensores utilizados no necesitan de una etapa de amplificación, este se muestra en la Figura 3.7.

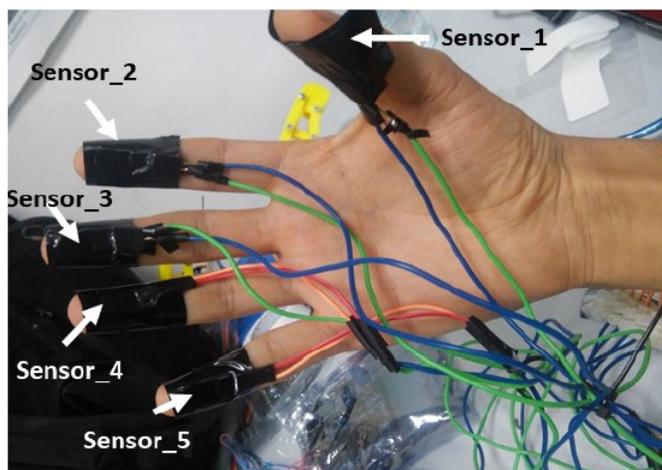


Figura 3.6: Posición de los sensores.

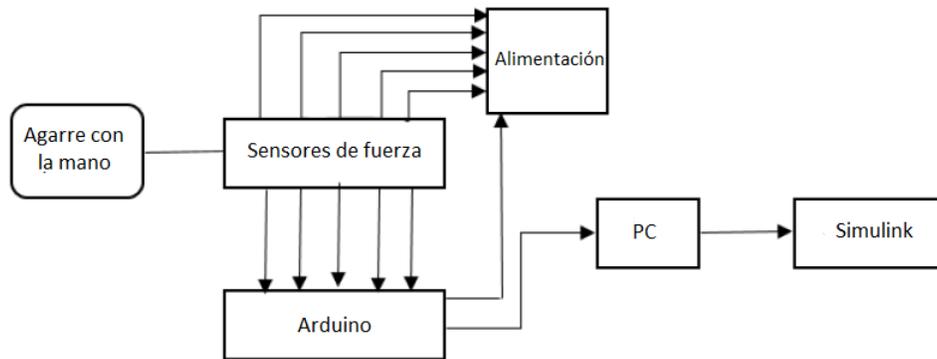


Figura 3.7: Diagrama implementado para la obtención de las fuerzas.

Del esquema de la Figura 3.7 se observa que durante el agarre, los sensores de fuerza envían una señal a la tarjeta arduino para la lectura de los datos. La tarjeta se encuentra conectada a la computadora para mostrar los resultados, los cuales son visualizados por medio de una interfaz desarrollada en el entorno de programación Simulink.

La prueba se dividió en tres fases (Figura 3.8) para una buena adquisición de los valores de fuerza, para las pruebas experimentales se utilizaron los objetos mostrados en la Tabla 3.9.

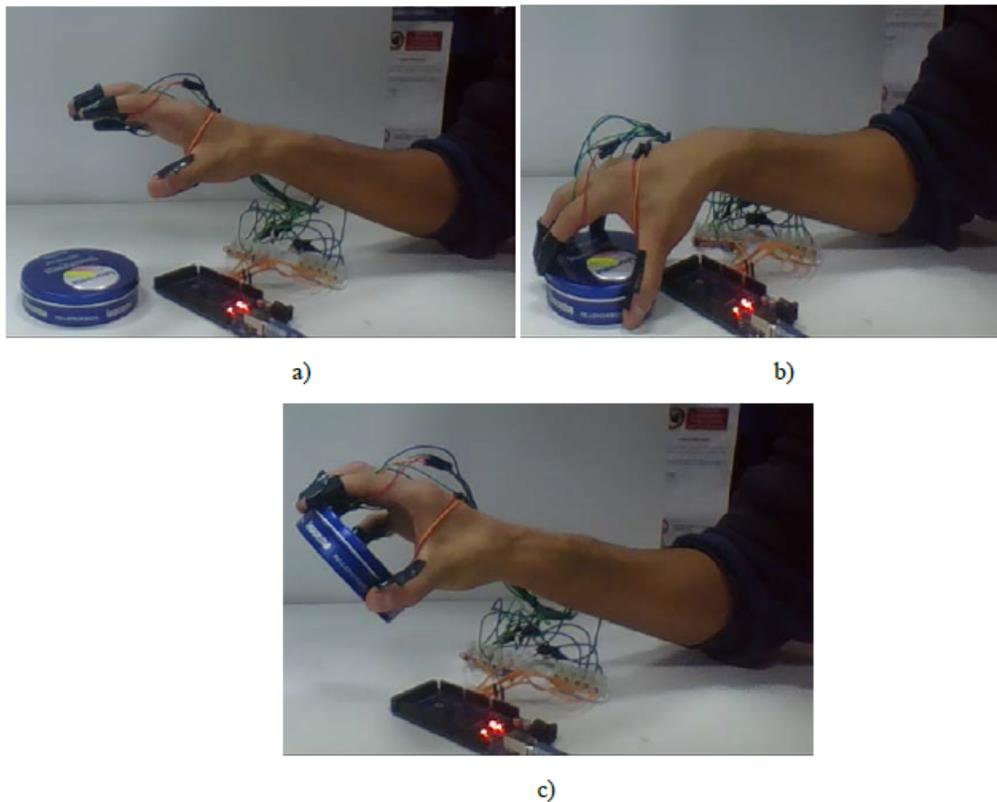


Figura 3.8: Fases: a) Acercamiento, b) Sujeción y c) levantamiento.

Tabla 3.9: Objetos utilizados en las pruebas.

No. Prueba	Nombre de la prueba	Objeto
1	Fuerza de agarre	Botella de agua
2	Fuerza de agarre	Tarjeta
3	Fuerza de agarre	Pieza de madera
4	Fuerza de agarre	Tapadera

De la prueba mostrada en la Figura 3.8, se obtuvieron los siguientes resultados (Figura 3.9).

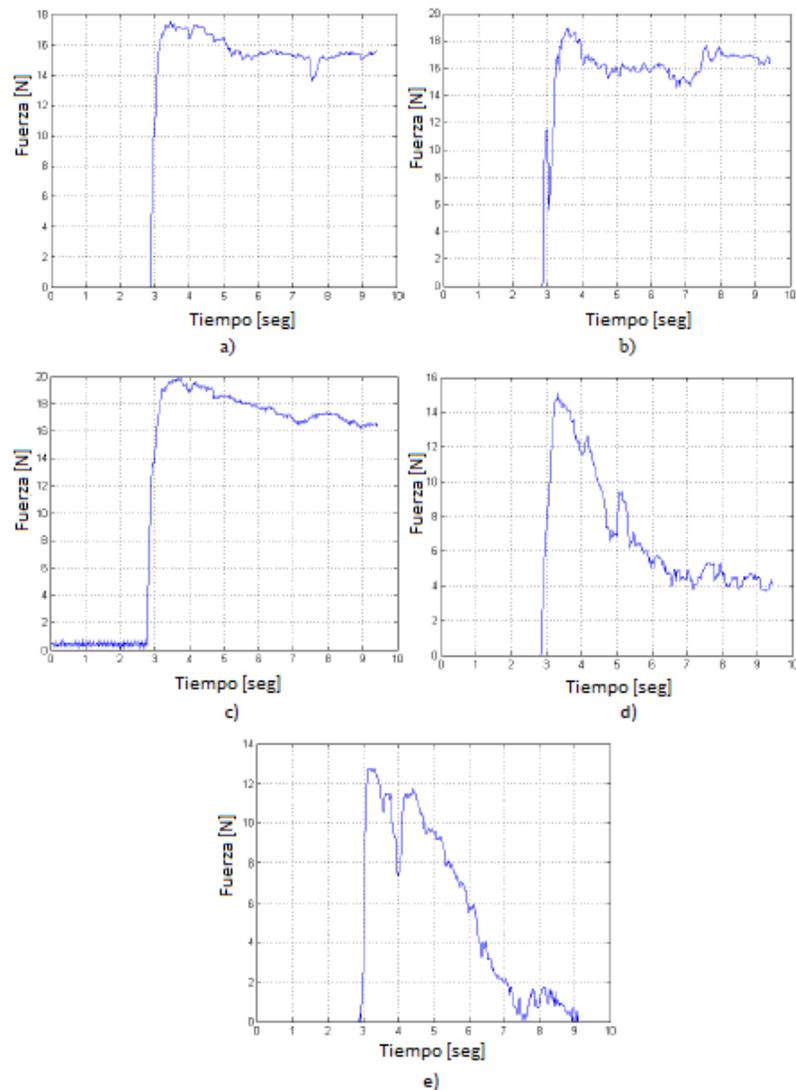


Figura 3.9: Resultados del agarre de una tapadera, sensor: a) 1, b) 2, c) 3, d) 4, y e) 5.

De las gráficas mostradas en la Figura 3.9, se puede observar que todos los sensores entraron en contacto con el objeto. La fuerza máxima está cerca de los 20 N registrados por el sensor 3, la fuerza mínima registrada es de 0.5 N obtenida por el sensor 5. Los resultados obtenidos de las pruebas mencionadas en la Tabla 3.9, se muestran en Tabla 3.10.

Tabla 3.10: Valores máximos y mínimos del agarre con la mano.

Objeto	Botella de agua	Pieza de madera	Tarjeta	Tapadera
Sensor 1 (min-máx)	1N - 18N	1N - 18N	2N - 17N	13.9N - 17.9N
Sensor 2 (min-máx)	2N - 15N	3N - 16.5N	11N - 21N	15N - 19N
Sensor 3 (min-máx)	0.5N - 14N	9N - 14.8N	SIN LECTURA	16.5N - 20N
Sensor 4 (min-máx)	10N - 17N	10N - 17N	SIN LECTURA	3.9N - 15N
Sensor 5 (min-máx)	2N - 14.5N	2N - 14.8N	SIN LECTURA	0.5N - 13N

Se observa que los valores obtenidos son superiores comparados con los obtenidos de la mano robótica LARM hand, aunque de los experimentos realizados fue posible observar que 2 N son suficientes para la sujeción de diferentes objetos. Por lo tanto la mano se realizará teniendo como principal característica de evaluación una fuerza mínima de 2N.

3.4. Propuesta de diseño

Basado en los requerimientos y resultados obtenidos de las pruebas experimentales de fuerza utilizando la LARM hand y la mano humana, se propone un primer diseño con palma movable con la finalidad de tener un agarre más completo de objetos. En la Figura 3.10 se muestra el diagrama cinemático y el modelo realizado en la plataforma de Working Model.

Para calcular los grados de libertad del mecanismo propuesto se utilizó la ecuación de Gruebler (Capítulo 2), al sustituir los valores se obtiene lo siguiente:

$$M = 3(7 - 1) - 2(8) \quad (9)$$

La movilidad resultante es de 2 GDL, los cuales son actuados por un motor (actuador activo) y el otro es actuado por medio de un resorte (actuador pasivo). El resorte es usado para mantener la posición en horizontal de la palma, tal como se muestra en la Figura 3.10. Por otro lado, el motor es utilizado para mover el dedo. Para comprobar el funcionamiento del

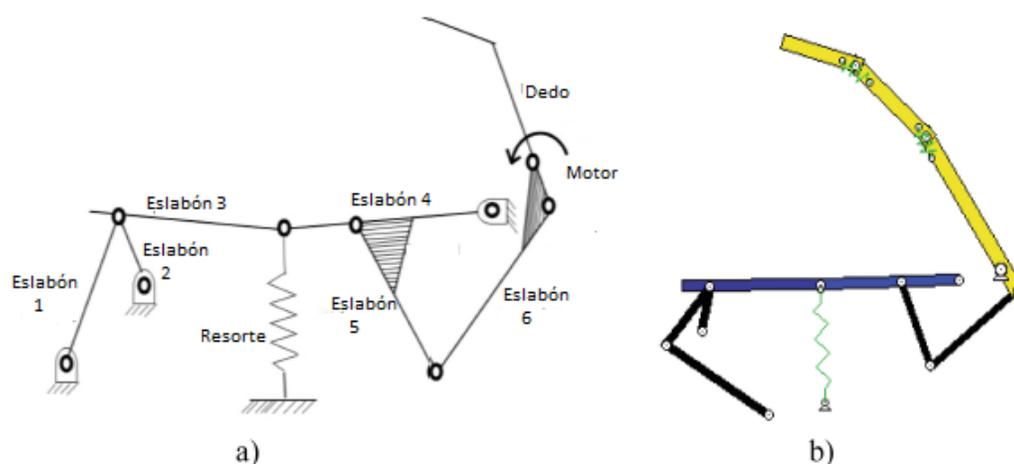


Figura 3.10: Mecanismo propuesto: A) Diagrama cinemático, B) Diseño mecánico.

mecanismo, se realizaron simulaciones para el agarre de objetos con forma regular e irregular. La Figura 3.11 muestra las fases del agarre. La Figura 3.11a) muestra la posición inicial de la palma y el dedo, la Figura 3.11b) muestra la palma ligeramente cerrada y al dedo agarrando al objeto con forma regular, esto es suficiente para mantener un agarre seguro, aunque el dedo aún no se ha adaptado a la forma del objeto. La Figura 3.11c) muestra como el dedo se adapta a la forma del objeto debido al movimiento de la palma.

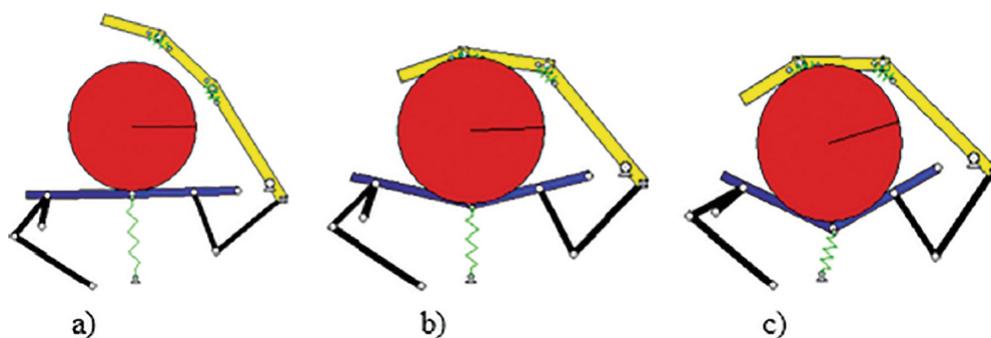


Figura 3.11: Mecanismo propuesto: Simulación para el agarre del mecanismo: a) Posición inicial, b) Movimiento de la palma y c) Posición final.

En la Figura 3.12 se muestran los resultados de las simulaciones numéricas realizadas en Working Model. La Figura 3.12a) muestra la tensión del resorte, la máxima tensión es de 3N, la cual puede ser obtenida con un resorte estándar. La posición del eslabón 1 se muestra en la Figura 3.12b), la gráfica muestra un comportamiento suave con un rango máximo limitado a 6 grados. La rotación del eslabón 3 se muestra en la Figura 3.12c), la cual tiene a un rango de movimiento de 50 grados. La rotación del eslabón 4 se muestra en la Figura 3.12d), su rango de movimiento está limitado a 30 grados. El rango de movimiento del eslabón 5 se muestra en

la gráfica de la Figura 3.12e), el rango de movimiento es de 20 grados. Finalmente, la gráfica 3.12f) muestra el valor del par del motor el cual va de 240 a 251 Nmm, necesarios para mover el mecanismo.

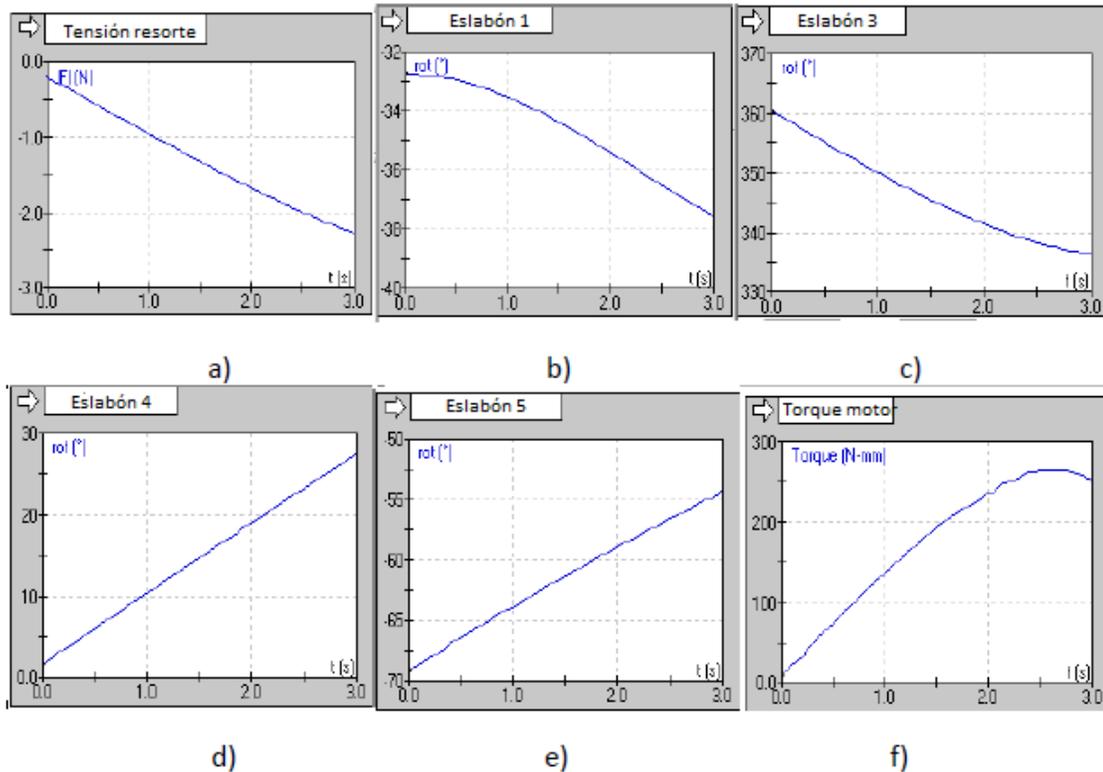


Figura 3.12: Gráficas de: a) rotación del resorte, b) rotación eslabón1, c) rotación eslabón 3, d) rotación eslabón 4, e) rotación eslabón 5 y f) torque del motor.

Con base en los resultados de las simulaciones realizadas, es posible observar que el diseño de una palma movable permite un agarre capaz de envolver completamente al objeto. Con respecto al dedo, se observa que en el mecanismo de la Figura 3.10 está representado simbólicamente por tres eslabones que son capaces de adaptarse al objeto sujetado. Para lograr ese movimiento se propusieron tres diseños para el mecanismo del dedo, los cuales fueron analizados con la finalidad de elegir la configuración más adecuada. El análisis consistió en obtener los grados de libertad utilizando la ecuación de Gruebler-Kutzbach y observar la posición de la falange distal con respecto de la falange proximal utilizando la herramienta Adams view.

La propuesta 1 se muestra en la Figura 3.13, este mecanismo es subactuado. La falange proximal es un mecanismo cruzado de 4 barras formado por los eslabones $L1$, $L2$, $L3$, $L4$ y $L5$. La falange distal es actuada a través de un mecanismo compuesto por los eslabones $L5$,

$L6$, $L7$ y $L8$.

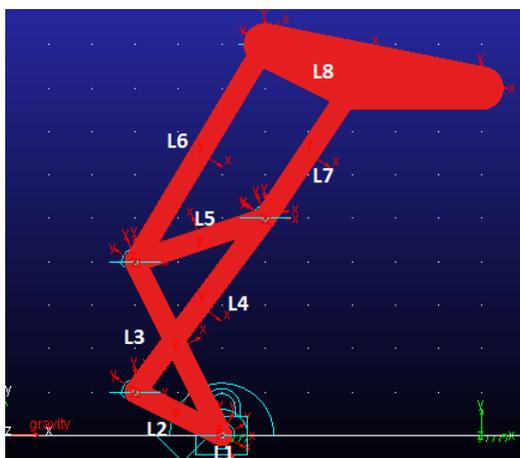


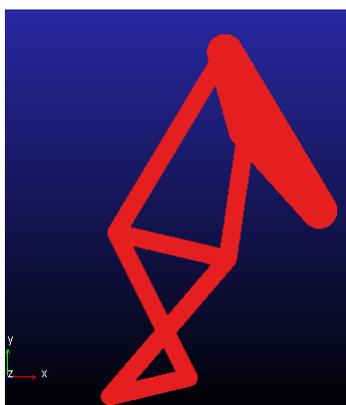
Figura 3.13: Propuesta 1 para el mecanismo del dedo.

Sustituyendo los valores en la ecuación (8) la movilidad que se obtiene es:

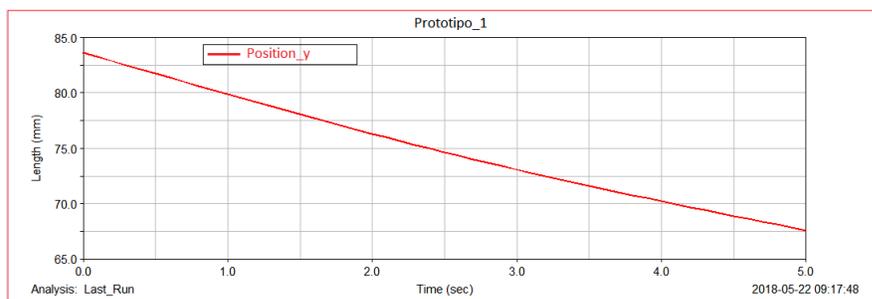
$$M = 3(8 - 1) - 2(9) \quad (10)$$

La movilidad resultante es 3, de los cuales 2 GDL son actuados por medio de resortes y 1 GDL es actuado por medio de un motor.

En la Figura 3.14 se muestra la posición final de la falange proximal con respecto de la falange distal y una gráfica de la trayectoria del dedo.



a)



b)

Figura 3.14: Distal del mecanismo 1: a) Posición final y b) gráfica de posición.

De la Figura 3.14a) se observa que debido a la configuración cruzada del mecanismo, el dedo no presenta un movimiento en la falange medial y el movimiento de la falange proximal

es menor que el de un dedo humano. Por otro lado, con base en la gráfica se observa que la falange distal pasa de una posición de 85 a 65 mm como máximo, es decir, que el rango de movilidad es de 20mm.

El segundo mecanismo propuesto es el mostrado en la Figura 3.15.

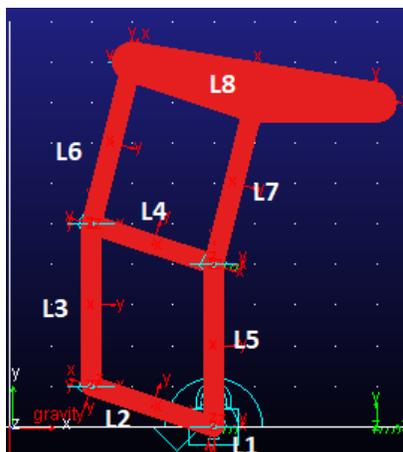


Figura 3.15: Propuesta 2 para el mecanismo del dedo.

Este mecanismo al igual que el anterior es subactuado y está compuesto por 8 eslabones, los cuales permiten el movimiento de dos falanges, medial y proximal. Los eslabones $L2$, $L3$, $L4$ y $L5$ forman un mecanismo de cuatro barras que permite la actuación de la falange proximal. La falange medial al igual que la proximal es actuada por un mecanismo de cuatro barras compuesto por los eslabones $L4$, $L6$, $L7$ y $L8$.

Sustituyendo valores en la ecuación (8) la movilidad resultante es:

$$M = 3(8 - 1) - 2(9) \quad (11)$$

El mecanismo presenta 3 GDL, dos de ellos son actuados por resortes y 1 por medio de un motor. En la Figura 3.16 se muestra la posición final del mecanismo y la gráfica de la trayectoria de la falange distal.

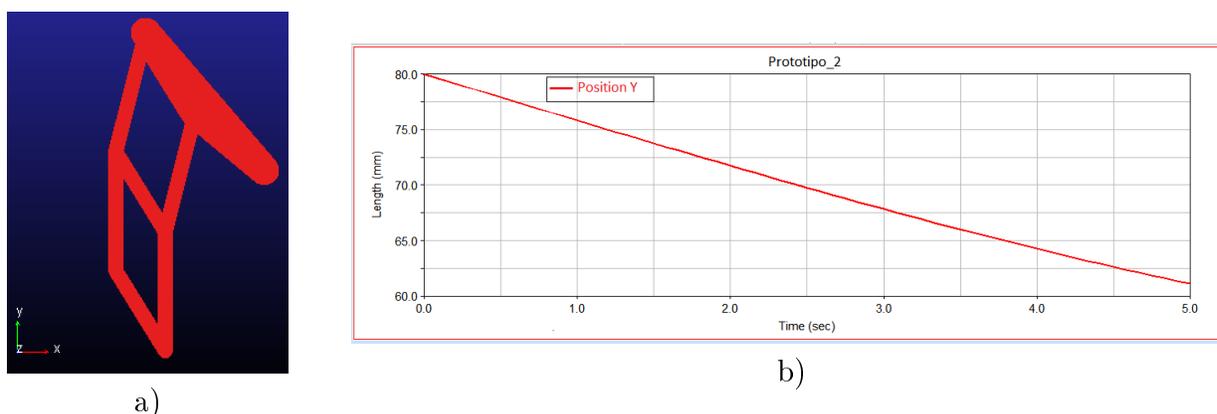


Figura 3.16: Distal del mecanismo 2: a) Posición final y b) gráfica de posición.

De la Figura 3.16a) se observa que debido al uso de los mecanismos de cuatro barras, el dedo presenta un movimiento en la falange medial y en la falange proximal similares al de un dedo humano. Con base en la gráfica se observa que la falange distal pasa de una posición de 80 a 60 mm como máximo, es decir, que el rango de movilidad es de 20mm.

El tercer mecanismo subactuado propuesto es el mostrado en la Figura 3.17. Este mecanismo está compuesto por 11 eslabones, los cuales permiten el movimiento de las tres falanges, proximal, medial y distal. Los eslabones $L2$, $L3$, $L4$ y $L5$ forman un mecanismo cruzado que permite la actuación de la falange proximal. La falange medial es actuada por un mecanismo de cuatro barras compuesto por los eslabones $L5$, $L6$, $L7$ y $L8$. Los eslabones $L10$, $L8$, $L9$ y $L11$ forman el mecanismo para el movimiento de la falange distal.

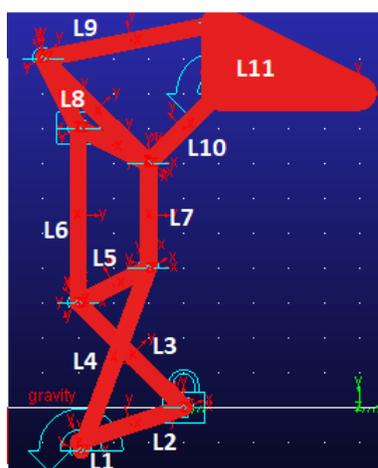


Figura 3.17: Propuesta 3 para el mecanismo del dedo.

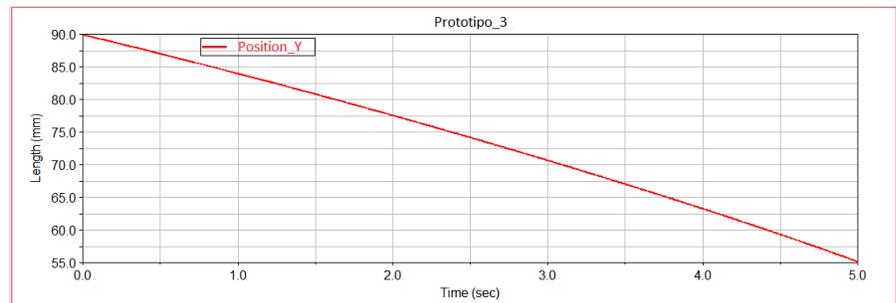
Al igual que los mecanismos anteriores, se calcula la movilidad, sustituyendo valores se obtiene:

$$M = 3(11 - 1) - 2(13) \quad (12)$$

De la ecuación anterior se obtiene una movilidad resultante de 4, de los cuales 3GDL son actuados por medio de resortes y 1 GDL actuado por medio de un motor. En la Figura 3.18 se muestra la posición de la falange proximal y su gráfica de posición.



A)



B)

Figura 3.18: Distal del mecanismo 3: a) Posición final y b) gráfica de posición .

En la Figura 3.18a) se observa que las falanges distal y medial pueden rotar debido a que se añadió un eslabón ternario. Este eslabón es impulsado por el mecanismo cruzado que a su vez permite una rotación de la falange medial y así mismo, la falange distal es impulsada por el eslabón ternario. En la Figura 3.18b) se muestra la gráfica de posición de la falange distal, la cual comienza en 90mm y termina en 55mm, es decir que el rango de movilidad de la distal es de 35mm, mayor al de los otros dos prototipos.

De los prototipos mostrados anteriormente se seleccionó el segundo debido a que el ángulo de transmisión es mayor al de los otros dos, esto es porque cuentan con un mecanismo cruzado y en ese tipo de configuración el ángulo suele ser pequeño. Otra razón para descartar los prototipos 1 y 3 es porque el mecanismo cruzado de la falange proximal necesita un espacio amplio para poder moverse y al tratar de unirlo con la palma, podrían surgir detalles que volverían voluptuoso el prototipo.

El diagrama cinemático completo del mecanismo propuesto y el modelo CAD realizado en Solidworks se muestra en la Figura 3.19. Las medidas del mecanismo se muestran en la Tabla 3.11.

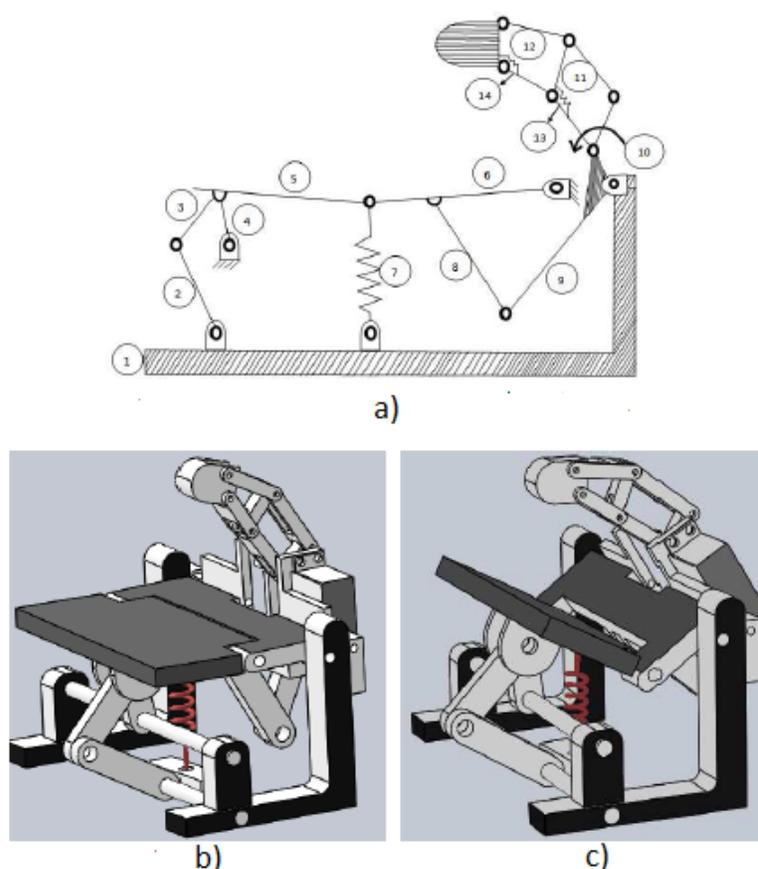


Figura 3.19: Mecanismo: a)Diagrama cinemático, b)CAD con palma abierta y c)CAD con palma cerrada.

Tabla 3.11: Dimensiones de los eslabones del mecanismo.

Eslabón	1	2	3	4	5	6	8	9	11 (corto)	11 (largo)	12 (corto)	12 (largo)
Longitud (mm)	100	50	50	30	50	50	55	40	27	35	30	38

Para observar el comportamiento del mecanismo de la palma y del dedo para el agarre de objetos, se llevaron a cabo simulaciones utilizando la herramienta de SolidWorks. Las simulaciones se realizaron para tres casos : movimiento de la palma y el dedo sin sujeción de objetos, sujeción de un objeto cilíndrico y sujeción de un objeto con forma irregular, la acción de la gravedad se consideró en todos los casos. Los parámetros a evaluar son los mostrados en la Figura 3.20. FP es la posición angular de la punta del dedo, su posición inicial es de 221 grados. TM es el par del motor. PP1 y VP1 son la posición y la velocidad del eslabón 6 del diagrama mostrado en la Figura 3.19a. La posición inicial del eslabón 6 es de 181 grados. LS es la longitud del resorte.

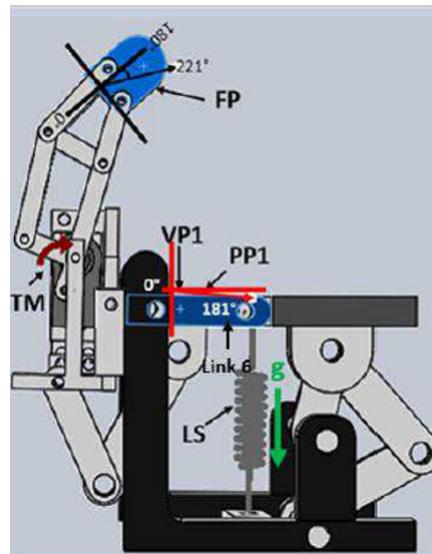


Figura 3.20: Parámetros para la simulación.

En la Figura 3.21 se muestra el agarre de un objeto cilíndrico. Las características de este objeto son: está hecho de aluminio 7075, su peso es de 1.81kg y tiene un largo de 10cm con un diámetro de 70mm. En la Figura 3.22 se muestra el caso para el agarre de un objeto con forma irregular. Tiene 8cm de largo, su peso es de 107.10 gramos y está hecho de plástico.

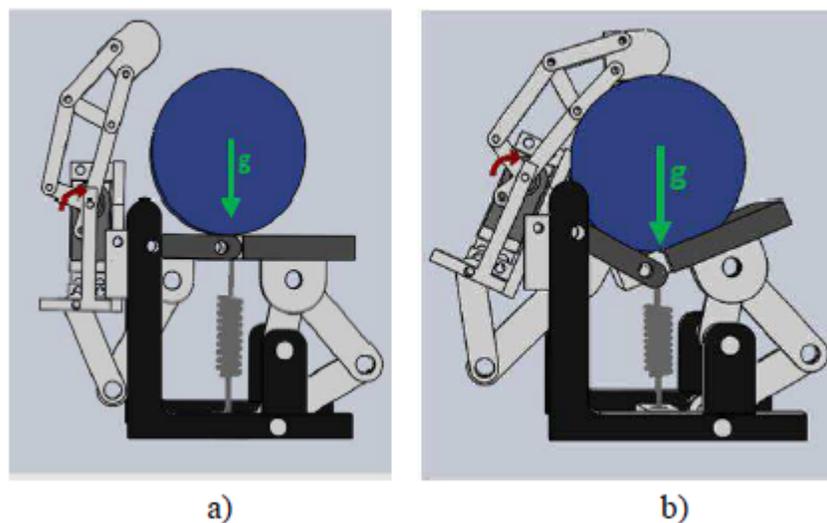


Figura 3.21: Simulación con objeto cilíndrico: a) posición inicial y b) agarre.

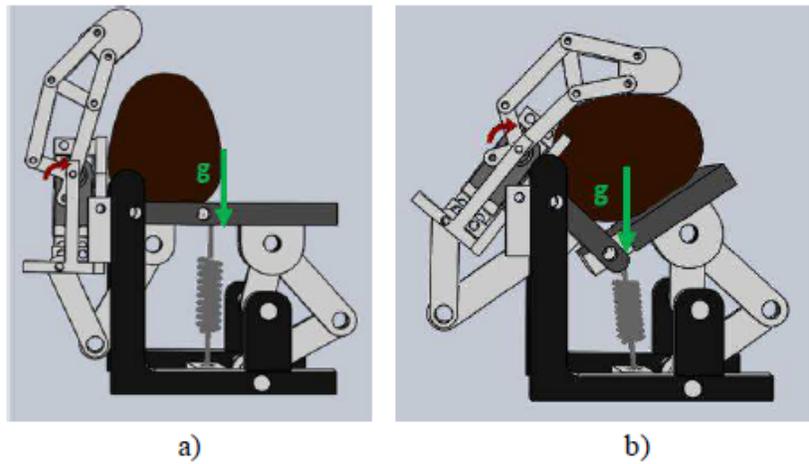


Figura 3.22: Simulación de agarre de un objeto con forma irregular: a) posición inicial y b) agarre.

En la Figura 3.23 se muestran los resultados obtenidos de la simulación del movimiento de la palma y el dedo sin sujeción de objetos.

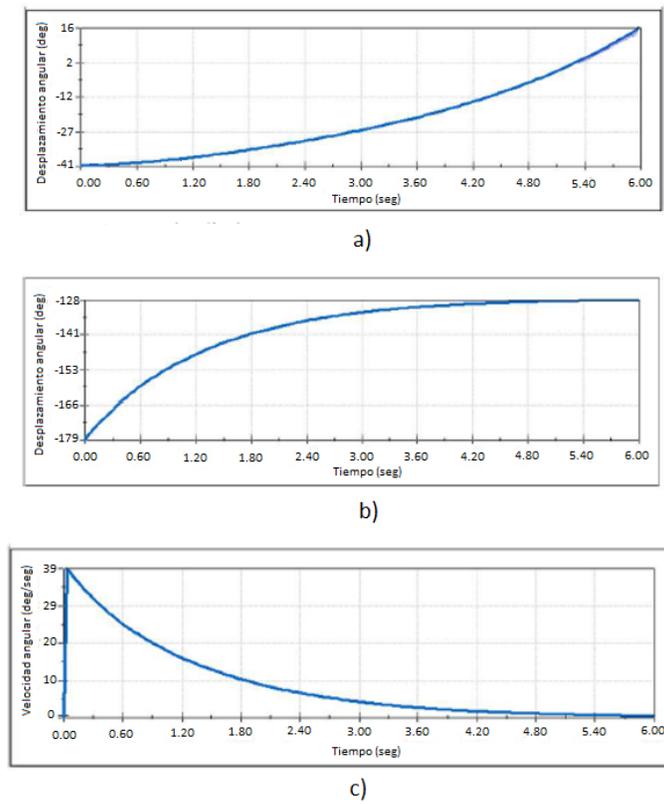


Figura 3.23: a) Posición angular del distal, b) posición angular de la palma y c) velocidad angular de la palma.

En la Figura 3.23a) se muestra la posición angular de la punta del dedo, la posición inicial es de -41 grados. La posición comienza a cambiar después de 0.30s. El resorte es actuado por el peso del mecanismo, como consecuencia el dedo comienza a moverse hasta los 4.80s debido a que el resorte no puede contraerse más. Después de ese tiempo, el servomotor comienza a girar y el dedo se mueve hasta una posición final de 16 grados la cual alcanza hasta los 6s. En la Figura 3.23b) se muestra la posición angular del eslabón 6. La posición inicial es de -179 grados y después de 4.80s la palma alcanza una posición de -128 grados. La velocidad angular de la palma (Figura 3.23c) es de 39 grados por segundo, la palma es actuada por el resorte y con un movimiento suave debido a la ausencia de objetos.

En la Figura 3.24 se muestran los resultados obtenidos de la simulación del movimiento de la palma y el dedo para la sujeción del objeto cilíndrico.

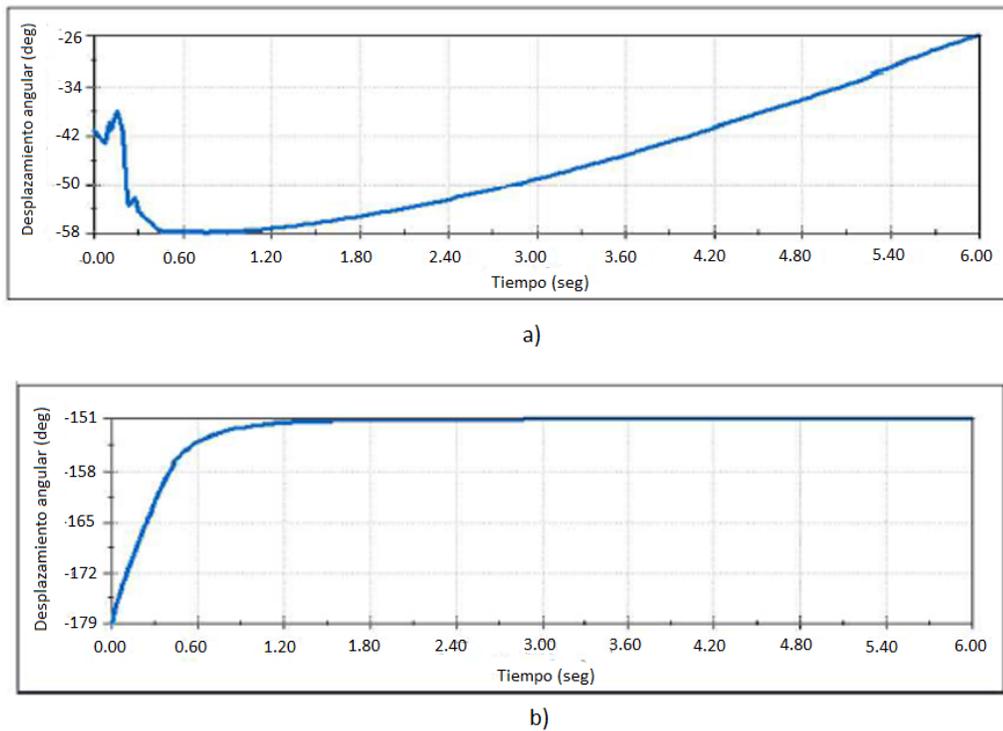


Figura 3.24: a) Posición angular del distal y b) posición angular del eslabón 6.

La Figura 3.24a muestra la posición angular de la punta del dedo durante el proceso de agarre del objeto cilíndrico, la posición inicial es -41 grados, que desde los .60s hasta 1s alcanza una posición de -58 grados debido a que el dedo entra en contacto con el objeto. En el tiempo que va desde los 1.10s hasta los 6s, el dedo llega a una posición de -26 grados, durante este periodo el dedo es actuado por el resorte. Posteriormente, la palma no puede moverse más debido a que los eslabones 5 y 6 han sido bloqueados por entrar en contacto con el objeto, debido a eso, el servomotor comienza a mover el mecanismo del dedo para envolver completamente al objeto. La Figura 3.24b muestra la posición angular del eslabón 6, durante

el periodo de 0 hasta 1.20s el eslabón cambia su posición hasta -151 grados.

En la Figura 3.25 se muestran los resultados obtenidos de la simulación del movimiento de la palma y el dedo para la sujeción de un objeto con forma irregular.

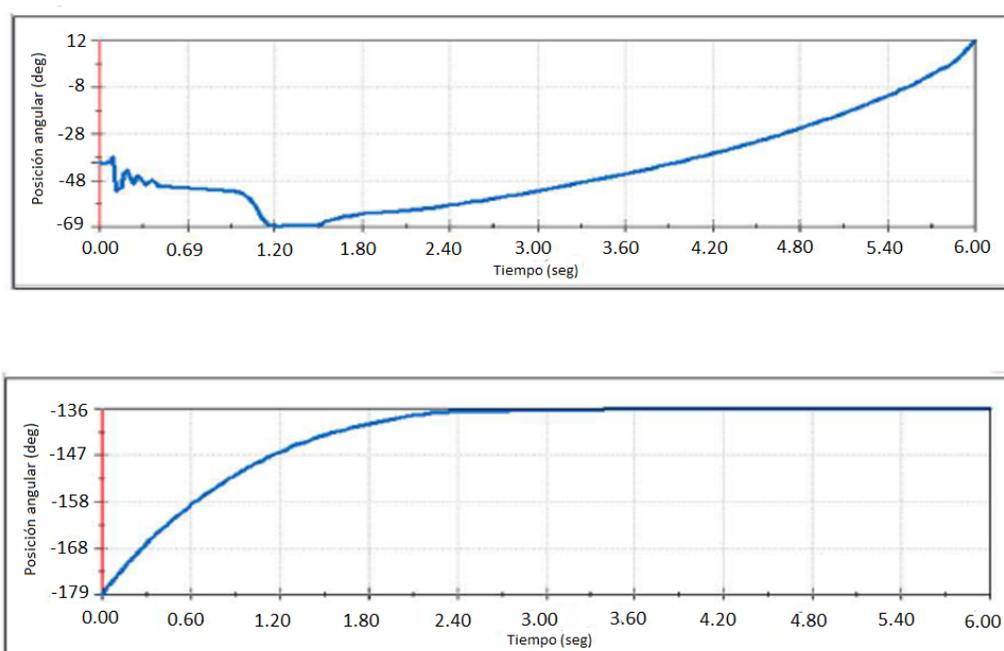


Figura 3.25: a) Posición angular del distal y b) posición angular del eslabón 6.

La Figura 3.25a muestra la posición angular de la punta del dedo. La posición inicial es de -41 grados, en un tiempo de 0 a 1.20s la alcanza una posición de -69 grados debido a que entra en contacto con el objeto. En el tiempo de 1.50 a 6s, el dedo alcanza una posición de 12 grados. El dedo es actuado por el resorte hasta 2.40s, después de ese tiempo el dedo es actuado por el servomotor. La Figura 3.25b muestra la posición angular del eslabón 6. En el tiempo de 0 a 2.40s el eslabón 6 cambia su posición hasta -136 grados.

De los resultados numéricos obtenidos de la medición del par del motor y fuerzas de agarre se muestra en la Tabla 3.12. Con base en los resultados, el agarre de un objeto con forma irregular requiere mayor par que el agarre de un objeto con forma regular. Las fuerzas aplicadas por la palma y el dedo sobre los objetos están indicadas con diferentes valores. Para el caso de la sujeción del objeto cilíndrico se aplica mayor fuerza por la palma. Finalmente, la deformación que presenta el resorte comienza con una posición inicial de 68mm y una constante de 1N/mm. El valor mínimo es 52mm, esto no se debe al peso del objeto porque al comparar los objetos, el cilíndrico es más pesado. Lo que afecta realmente es la forma de los objetos ya que ésta determina cuanto se cierra la palma.

Tabla 3.12: Resultados de las simulaciones.

Parámetros	Sin objeto	Objeto con forma regular	Objeto con forma irregular
Par [Nmm]	10.0	30.1	36.0
Fuerza dedo	0	1.5	0.8
Fuerza palma	0	5.0	3.0
Tamaño del resorte	55	56	52

Con la finalidad de comprobar los resultados obtenidos de las simulaciones, el prototipo se construyó para la realización de pruebas físicas. En la Figura 3.26 se muestra el mecanismo físicamente.

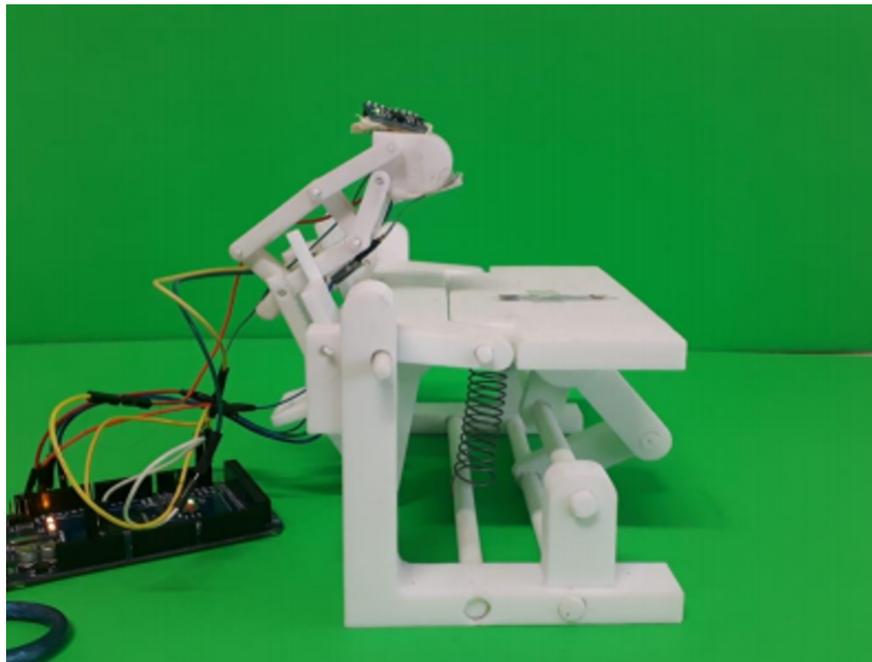


Figura 3.26: Prototipo experimental.

En la Figura 3.27 se muestra el agarre de una botella, su masa es de 670 gramos, tiene un diámetro de 64mm y un largo de 225mm. Por otro lado en la Figura 3.28 se muestran las gráficas de la fuerza ejercida por el dedo y la palma sobre la superficie del objeto.

De la Figura 3.28a) se observa que la fuerza máxima ejercida por el dedo es de 8N, aunque pasados los 3 segundos esta oscila entre los valores de 6N y 4.5N. Por otro lado en la Figura 3.28b) se observa que la fuerza mínima ejercida por la palma es de 8.2N y la máxima es de



Figura 3.27: Agarre experimental de una botella de vidrio: a) posición inicial y b) sujeción.

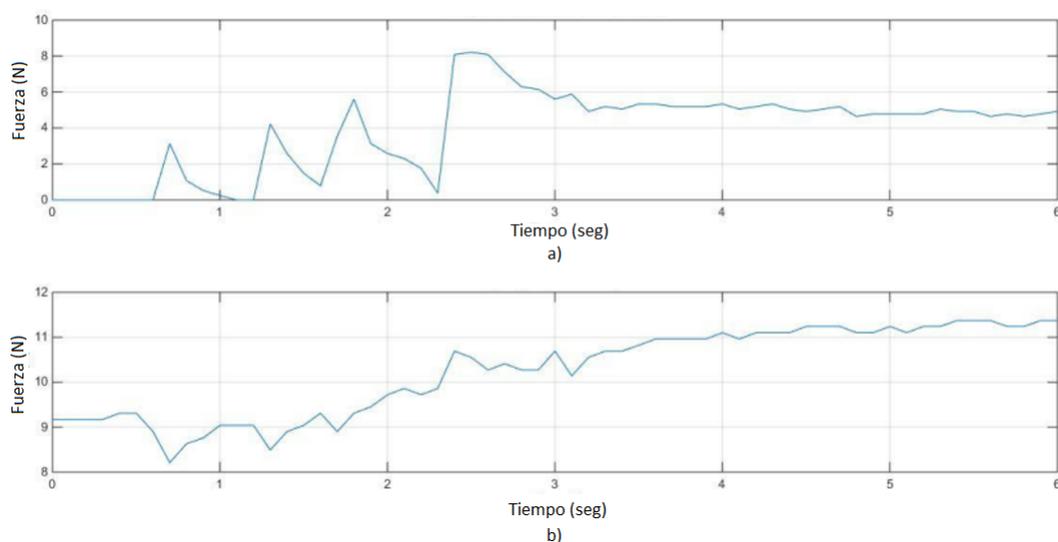


Figura 3.28: Fuerza de agarre en: a) la punta del dedo y b) palma.

11.5N, casi el doble de la fuerza ejercida por el dedo. Como se observa en la Figura 3.27, el prototipo es funcional aunque presenta limitaciones tales como, las únicas falanges que se mueven son la medial y proximal. Debido a que la falange distal es solo una estructura, no tiene movimiento, por ello, no es posible envolver el objeto como lo haría un dedo humano (Figura 3.27b). Este mecanismo es que por ser subactuado no presenta suficiente fuerza en la parte distal del dedo y como resultado no se obtiene una sujeción firme del objeto. Por ello, se realizó la modificación del mecanismo del dedo, considerando dos motores en lugar de uno para aumentar la fuerza de sujeción, para que las tres falanges tengan movimiento, se obtendrá el espacio de trabajo del dedo.

Capítulo 4

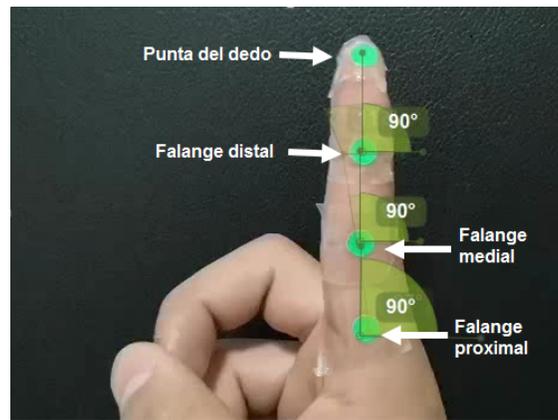
Diseño del mecanismo

En el diseño en ingeniería, específicamente en el diseño de máquinas, se presentan problemas que requieren la creación de dispositivos con características de movimiento particular para cumplir con una trayectoria en un espacio determinado, por ejemplo, mover una herramienta de la posición A hacia la posición B. Comúnmente la solución es hacer uso de un eslabonamiento, para su diseño se utilizan métodos de síntesis cinemática, los cuales permiten formar soluciones de eslabonamiento para desempeñar una tarea deseada [27, 48].

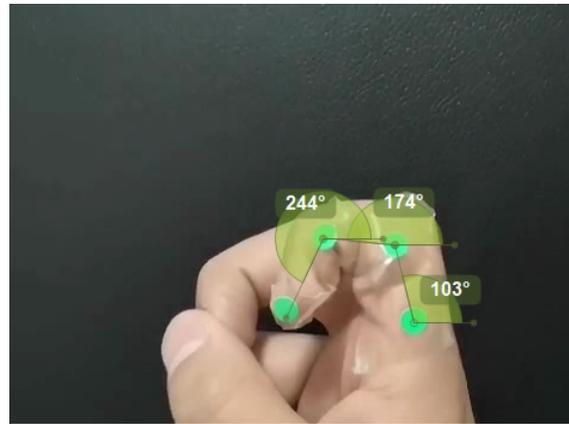
En esta capítulo se presenta el diagrama cinemático del dedo y se realiza la implementación de los métodos de síntesis cinemática con el objetivo de que el mecanismo siga la trayectoria realizada por un dedo humano. Por otro lado, la síntesis de tipo se aplica para obtener el diseño metamórfico de la palma, así mismo se muestra el modelo CAD de la mano.

4.1. Trayectoria del dedo

Previo a la implementación de la síntesis de mecanismos, es necesario proponer una serie de puntos por los que se desea que el mecanismo se mueva. En este caso los puntos son aquellos que forman parte de la trayectoria que realiza el dedo humano, para obtener esta información, se grabó un video con los movimientos de extensión y flexión. El movimiento se estudió utilizando la técnica de la fotogrametría. Este procedimiento consiste en la obtención de las dimensiones y posiciones de objetos en el espacio, a través de la medida o medidas realizadas a partir de la intersección de dos o más fotografías, o de una fotografía y el modelo digital correspondiente al objeto. Para la implementación se colocaron 4 marcadores en el dedo índice, con el software Kinovea (utilizado para estudios biomecánicos) se obtuvo la medición de los ángulos de cada una de las articulaciones del dedo (Figura 4.1). Los valores correspondientes a los ángulos de las falanges para diferentes posiciones se muestran en la Tabla 4.1.



a)



b)

Figura 4.1: Medición de los ángulos de las articulaciones: a) dedo extendido y b) dedo flexionado.

Tabla 4.1: Ángulos de las falanges.

Puntos	Falange proximal	Falange medial	Falange distal
1	90°	90°	90°
2	96°	108°	125°
3	100°	136°	170°
4	100°	149°	203°
5	101°	158°	216°
6	103°	174°	244°

A partir de los valores de la Tabla 4.1, se plantearon las ecuaciones cinemáticas del dedo para que al sustituir los valores de los ángulos se obtengan las posiciones. Las ecuaciones

planteadas se muestran a continuación.

$$\begin{aligned} X &= a_4 * \cos\theta_4 + a_3 * \cos\theta_3 \\ Y &= a_4 * \sin\theta_4 + a_3 * \sin\theta_3 \end{aligned} \tag{13}$$

donde:

a_3 - Longitud de la falange distal.

a_4 - Longitud de la falange medial.

Actualmente no se cuentan con los valores antropométricos de las falanges, solo se tienen las dimensiones que ocupa cada falange con respecto al porcentaje total de la longitud de la mano (Tabla 4.2).

Tabla 4.2: Relación porcentual de las falanges con respecto a la mano [54].

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

Con base en los porcentajes de la Tabla 4.2 y las medidas antropométricas de la mano mostradas en el Capítulo 2, se obtuvieron los valores para cada falange del dedo índice, los resultados son:

Falange distal = 16,75mm

Falange medial = 27,01mm

Falange proximal = 41,89mm.

Los resultados obtenidos al resolver las ecuaciones se muestran en la Tabla 4.3 y en la Figura 4.2 se muestra la trayectoria del dedo.

Tabla 4.3: Resultados de la cinemática.

Puntos	Coordenadas X (mm)	Coordenadas Y (mm)
1	0	43.7600
2	-17.9540	34.4088
3	-35.9249	21.6713
4	-38.0304	7.3664
5	-38.0304	1.5695
6	-34.7709	-12.4353

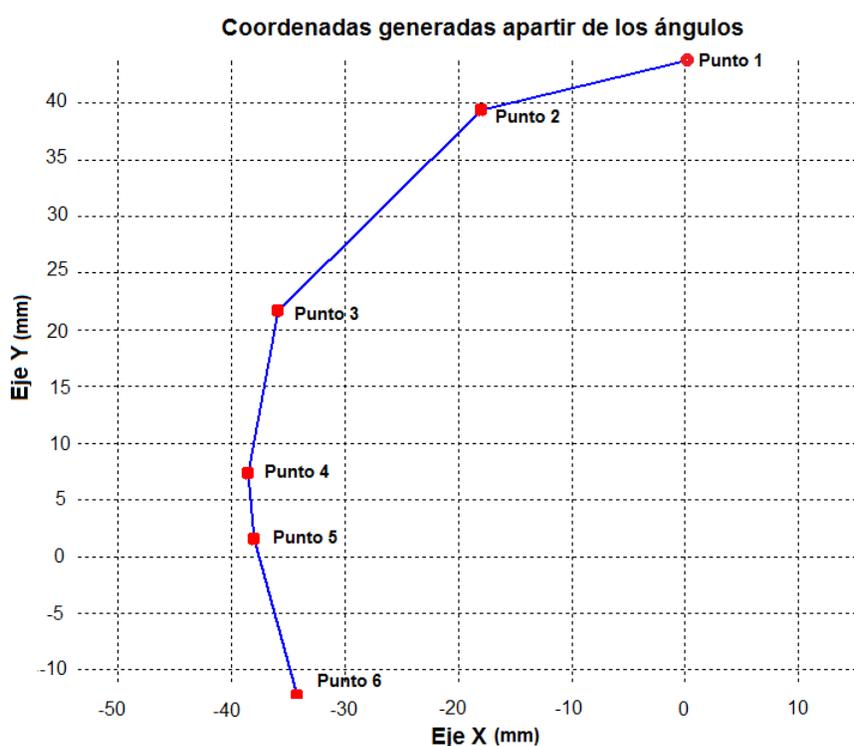


Figura 4.2: Trayectoria del dedo.

4.2. Síntesis del mecanismo para el dedo

En la Figura 4.3 se muestra el diagrama cinemático del mecanismo propuesto para el dedo. El mecanismo se compone por 5 eslabones (a_1 , a_2 , a_3 , a_4 y a_5), 1 es de tipo ternario y los restantes de tipo binario. Su movilidad es igual a 2 y es actuado por medio de dos motores (M_1 y M_2).

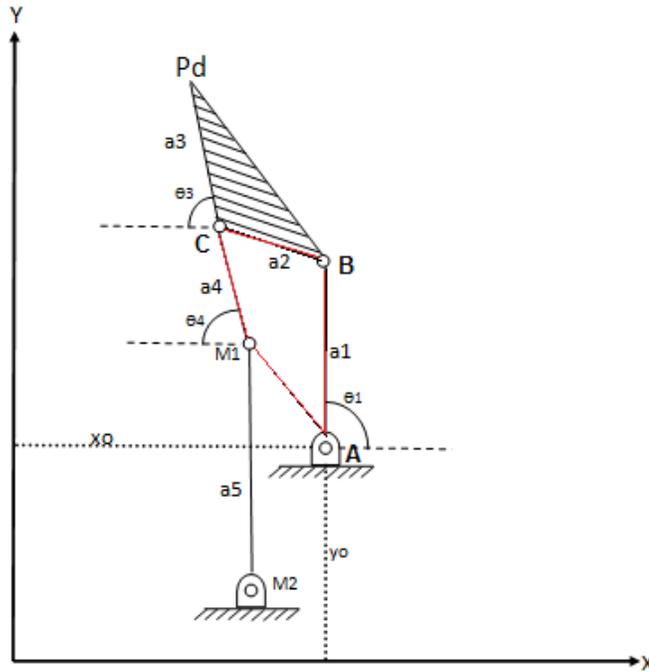


Figura 4.3: Diagrama cinemático.

Las ecuaciones cinemáticas del mecanismo se plantearon para obtener la posición del punto Pd, para ello se utilizó la ecuación de un mecanismo de cuatro barras (marcado en color rojo) para obtener la posición del punto C con respecto del sistema de coordenadas OXY, la ecuación está dada por:

$$\begin{aligned} a_1 \cos \theta_1 + a_2 \cos \theta_2 &= x_0 + a_4 \cos \theta_4 \\ a_1 \sin \theta_1 + a_2 \sin \theta_2 &= y_0 + a_4 \sin \theta_4 \end{aligned} \quad (14)$$

De las ecuaciones anteriores se despeja el término a_2 , se elevan al cuadrado y se suman, el resultado es:

$$\begin{aligned} x_0^2 + y_0^2 + a_1^2 + a_4^2 - 2x_0 a_1 \cos \theta_1 - 2y_0 a_1 \sin \theta_1 + 2x_0 a_4 \cos \theta_4 \\ + 2y_0 a_4 \sin \theta_4 - 2a_1 a_4 \cos \theta_1 \cos \theta_4 - 2a_1 a_4 \sin \theta_1 \sin \theta_4 \end{aligned} \quad (15)$$

Para simplificar la ecuación anterior, se proponen las constantes A, B y C para agrupar a los coeficientes que multiplican los términos $\cos \theta_4$ y $\sin \theta_4$.

$$\begin{aligned} A &= 2a_4(x_0 - a_1 \cos \theta_1) \\ B &= 2a_4(y_0 - a_1 \sin \theta_1) \\ C &= x_0^2 + y_0^2 + a_1^2 + a_4^2 - a_2^2 - 2a_1(x_0 \cos \theta_1 - y_0 \sin \theta_1) \end{aligned} \quad (16)$$

Sustituyendo los valores por las constantes, se obtiene la siguiente ecuación:

$$A \cos \theta_4 + B \sin \theta_4 + C = 0 \quad (17)$$

La ecuación anterior presenta una sola incógnita, por lo que puede resolverse utilizando la ecuación:

$$\theta_4 = 2atan \left[\frac{-B \pm \sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}{C - A} \right] \quad (18)$$

Para obtener θ_2 se despejan θ_4 de la ecuación (14) y se realiza un procedimiento como en la ecuación (15). Obteniéndose lo siguiente:

$$\theta_2 = 2atan \left[\frac{-E \pm \sqrt{D^2 + E^2 + F^2}}{F - D} \right] \quad (19)$$

donde las constantes D , E y F se definen como:

$$\begin{aligned} D &= 2a_2(a_1 \cos\theta_1 - x_0) \\ E &= 2a_2(a_1 \sin\theta_1 - y_0) \\ F &= x_0^2 + y_0^2 + a_1 + a_2 - a_4 - 2a_1(x_0 \cos\theta_1 + y_0 \sin\theta_1) \end{aligned} \quad (20)$$

Una vez resueltas las ecuaciones (18) y (19), la posición de los puntos B , C y Pdc se obtienen con respecto del sistema de coordenadas $O_2X_0Y_0$:

$$\begin{aligned} B_{x0} &= a_1 \cos\theta_1 \\ B_{y0} &= a_1 \sin\theta_1 \\ C_{x0} &= B_x + a_2 \cos\theta_2 \\ C_{y0} &= B_y + a_2 \sin\theta_2 \\ Pdc_{x0} &= C_x + a_3 \cos(\theta_3 + \beta) \\ Pdc_{y0} &= C_y + a_3 \sin(\theta_3 + \beta) \end{aligned} \quad (21)$$

Se pueden reescribir estas posiciones en el sistema de coordenadas absoluto OXY:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos\theta_0 & -\sin\theta_0 \\ \sin\theta_0 & \cos\theta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{x0} \\ B_{y0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} C_x \\ C_y \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos\theta_0 & -\sin\theta_0 \\ \sin\theta_0 & \cos\theta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{x0} \\ C_{y0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} Pdc_x \\ Pdc_y \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos\theta_0 & -\sin\theta_0 \\ \sin\theta_0 & \cos\theta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Pdc_{x0} \\ Pdc_{y0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (22)$$

Para obtener la solución de las ecuaciones no lineales del mecanismo, es común el uso del método de Newton-Raphson. Éste se basa en la aproximación de Taylor, consiste en trazar una recta tangente a f que pase por el punto $(x_0, f(x_0))$, considerando una aproximación x_i a

la raíz del punto en el cual dicha recta tangente corta al eje x , es decir el punto $(x_i, 0)$ [73]. La ventaja de usar este método es su fácil implementación, puede encontrar raíces complejas y convergencia rápida comparada con otros métodos, converge cuadráticamente para raíces simples y linealmente para raíces múltiples. Por otro lado, las desventajas son la necesidad de calcular la derivada, no se puede prever la cantidad de iteraciones a partir de una cota de error, no siempre converge y la principal desventaja es que los valores iniciales x^0 no pueden ser arbitrarios, es importante señalar que en principio se desconoce toda información acerca de la solución óptima, por lo que no se tiene un buen criterio para la selección de los valores iniciales [3, 19]. Por esta razón se descarta el uso de este método y en vez de utilizar un método determinístico, se optó por el uso de un método heurístico, específicamente algoritmos genéticos, los cuales fueron descritos en el Capítulo 2.

Como parte de la implementación de los algoritmos genéticos, para determinar el valor del error se propone una función objetivo. Ésta es la suma de dos términos, la primera parte calcula el error de posición como la suma del cuadrado de las distancias euclidianas entre cada P_d^i y el correspondiente P^i donde:

P_d^i es el conjunto de puntos con los cuales el mecanismo debe cumplir y son propuestos por el diseñador, en este caso dichos puntos son los pertenecientes a la trayectoria del dedo. Se pueden escribir en un sistema de coordenadas en el origen OXY como:

$$P_d^i = [P_{xd}^i, P_{yd}^i]^t \quad (23)$$

P^i es el conjunto de posiciones del mecanismo diseñado para un conjunto de valores del ángulo de entrada θ_3^i , estas posiciones pueden escribirse como:

$$P^i = [P_x^i, P_y^i]^t = [P_x(\theta_3^i), P_y(\theta_3^i)]^t \quad (24)$$

Con base en las ecuaciones (4) y (5), la primera parte de la función objetivo puede ser expresada por:

$$\sum_{i=1}^N \left[(P_{xd}^i - P_x^i)^2 + (P_{yd}^i - P_y^i)^2 \right] \quad (25)$$

donde N es el número de puntos a ser sintetizado.

La segunda parte la función objetivo se deriva de las restricciones impuestas en el mecanismo, para este caso solo se considera una restricción, los rangos para las variables de diseño.

Con la función objetivo completa, el problema queda definido por:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^N \left[(P_{xd}^i - P_x^i)^2 + (P_{yd}^i - P_y^i)^2 \right] + h(x) \\ \text{suje}to \quad & a : x_i \in [V_i, V_s] \forall x_i \in X \text{ donde } X = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6] \end{aligned} \quad (26)$$

donde $h(x)$ evalúa la condición de secuencia para el ángulo de entrada, si la condición de entrada θ_2 es cierta, $h(x) = 0$. Si la condición es falsa, es decir, que los ángulos de entrada no estén ordenados en forma ascendente o descendente, $h(x) = 1$.

Para la implementación de los algoritmos genéticos en la síntesis del mecanismo, se consideraron los siguientes parámetros:

– Valores de entrada :

$$\begin{bmatrix} a_3 = 16,75mm & a_4 = 27,01mm & \theta_3^1 = 90 & \theta_3^2 = 125 \\ \theta_3^3 = 170 & \theta_3^4 = 203 & \theta_3^5 = 216 & \theta_3^6 = 244 \end{bmatrix}$$

– Variables de diseño:

$$X = [a_1, a_2, \theta_1, x_0, y_0, \beta]$$

– Puntos deseados (en mm):

$$\{P_d^i\} = \begin{bmatrix} (0, 43.7600) & (-17.9540, 34.4088) & (-35.9249, 21.6713) \\ (-38.0304, 7.3664) & (-38.0304, 1.5695) & (-34.7709, -12.4353) \end{bmatrix}$$

– Rango de las variables :

$$a_1 \in [20, 50], \quad a_2 \in [6, 16], \quad x_0 \in [-5, 15], \quad y_0 \in [-20, 20], \quad \beta \in [65, 180]$$

– Parámetros del algoritmo:

$$\text{Población} = 1000, \quad \% \text{Cruzamiento} = 0.8, \quad \% \text{Mutación} = 0.2, \quad \text{Núm. de iteraciones} = 500$$

Establecidos los parámetros, se calcularon los valores para las variables utilizando el entorno de programación *Matlab*[®] (el código se muestra en el Anexo B). Los mejores resultados para el diseño del mecanismo obtenidos por los algoritmos se muestran a continuación.

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ x_0 \\ y_0 \\ \theta_1 \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 43,43 \text{ mm} \\ 10,00 \text{ mm} \\ 1,80 \text{ mm} \\ 19,99 \text{ mm} \\ 80,35^\circ \\ 115,57^\circ \end{bmatrix}$$

En la Figura 4.4 se muestra el mecanismo y la trayectoria seguida por la punta del dedo, por otro lado en la Tabla 4.4 se muestra una comparativa entre los puntos deseados y los obtenidos.

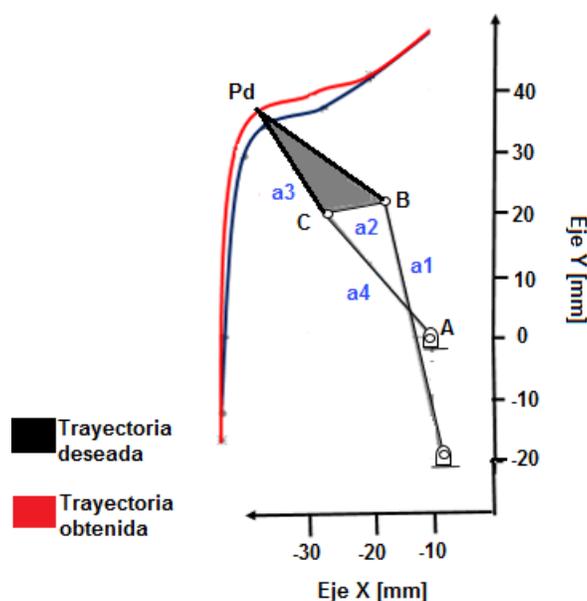


Figura 4.4: Mecanismo y trayectoria deseada vs obtenida.

Tabla 4.4: Valores deseados vs calculados

	1	2	3	4	5	6
X_d [mm]	0	-17.9540	-35.9249	-38.0304	-38.0304	34.7709
X_{Obt} [mm]	0	-17.52	-37.3949	-38.9504	-38.9504	34.7709
Δ_x [mm]	0	0.12	-1.47	-0.92	-0.92	0
Y_d [mm]	43.7600	39.4088	21.6713	7.3664	1.5695	-12.4353
Y_{Obt} [mm]	43.7600	39.7088	23.6913	8.0864	2.67	-16.7553
Δ_y [mm]	0	-0.3	-2.02	-0.72	-1.1005	4.32

La diferencia existente entre la trayectoria obtenida con respecto a la deseada es de 5.34 %, de acuerdo con la Figura 4.4 y con base en los resultados mostrados en la Tabla 4.4,

los errores entre la mayoría de los puntos son menores a 1mm, con excepción en los puntos 3 y el punto 5, para este último específicamente en la coordenada y, esto representa que el mecanismo es capaz de replicar la trayectoria del dedo humano con un mínimo error de .9908 mm en promedio.

4.3. Diseño de la palma

Para el diseño del mecanismo de la palma se utilizó la síntesis cualitativa, ésta se describió en la Sección 2.6.1. Para la aplicación de la síntesis se propuso la metodología mostrada en la Figura 4.5.

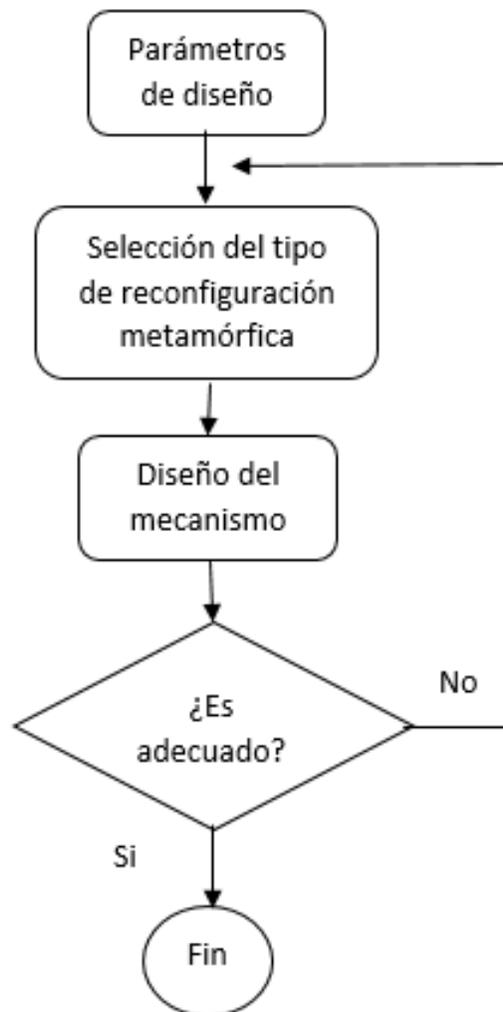


Figura 4.5: Metodología para el diseño de la palma.

Parámetros de diseño. En esta etapa se presentan los requerimientos de diseño, específicamente los de la palma, con referencia al capítulo anterior, la palma debe ser metamórfica y debe presentar 1 GDL. Aunado a esto, también se realizó un estudio centrándose en el mo-

movimiento del metacarpo del pulgar, debido a que su movimiento es fundamental para realizar diferentes tipos de agarres. En la Figura 4.6 se muestran los ángulos para los movimientos de flexión - extensión y aducción - abducción.

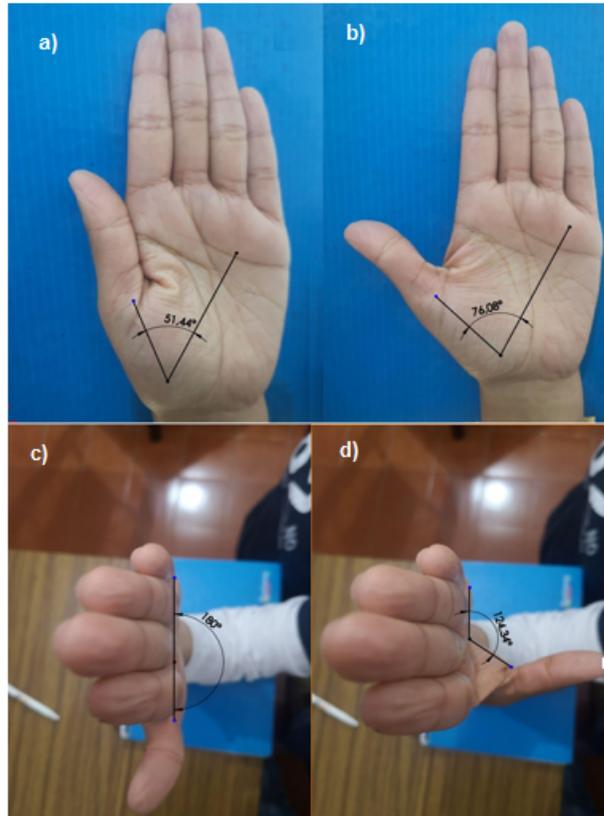


Figura 4.6: Movimientos del dedo pulgar: a) flexión, b) extensión, c) aducción, d) abducción.

Selección del tipo de reconfiguración metamórfica. En esta etapa se elige el tipo de reconfiguración a emplear en el mecanismo, *juntas metamórficas*, *enlaces metamórficos* o *restricciones geométricas de orientación*, todas ellas descritas en el Capítulo 2. Con base en los movimientos del pulgar presentados, Figura 4.6, se busca que los eslabones no cambien su tamaño, por el contrario, que mantengan su forma y sean capaces de modificar su orientación, por ello se seleccionó una reconfiguración de tipo restricciones geométricas.

Diseño del mecanismo. En esta parte se realiza la propuesta del mecanismo, algunos puntos a considerar son: el tipo de eslabones a utilizar, número de eslabones, tipo de juntas, actuadores y sistemas de transmisión. Posteriormente se realizan pruebas para observar que cumpla con los requerimientos, utilizando un software CAD. En la Figura 4.7 se muestra la propuesta del mecanismo para la palma. Las características con las que cuenta el mecanismo son: 8 eslabones de tipo binario, 8 juntas de tipo revoluta y dos fases.

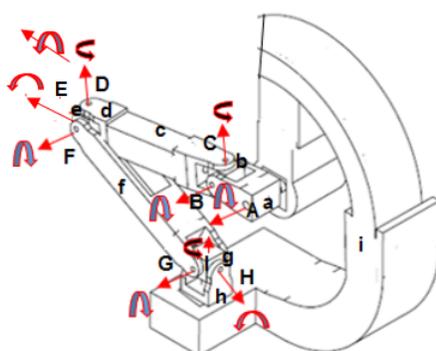


Figura 4.7: Propuesta de mecanismo.

Para comprobar que el mecanismo es el adecuado, se verifica que realice los movimientos de flexión-extensión y aducción-abducción. En la figura 4.8 se muestran los resultados.

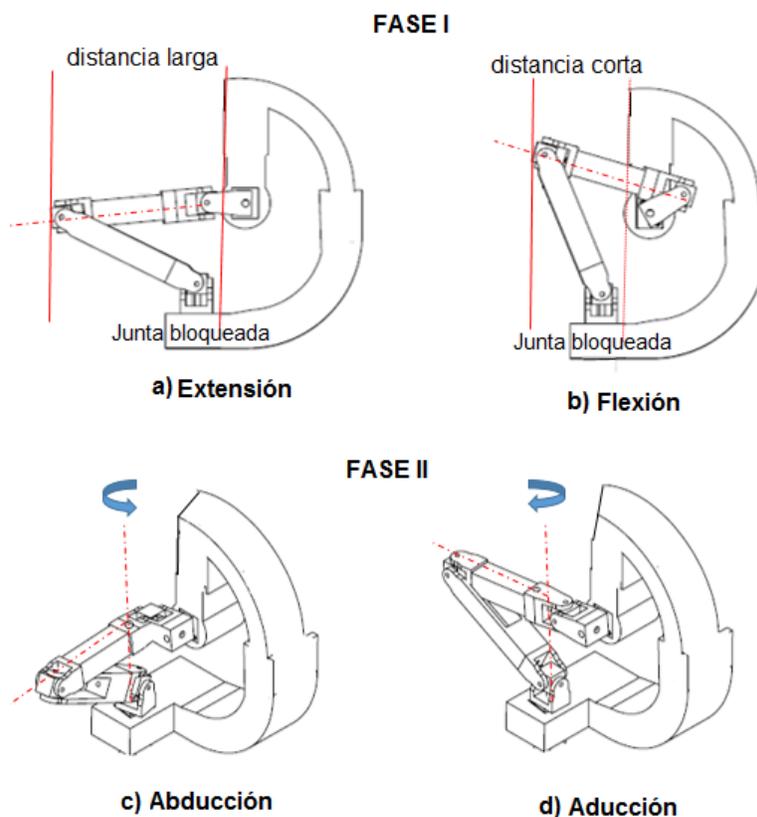


Figura 4.8: Movimientos del mecanismo.

Como se puede observar en la Figura 4.8 para la fase 1 (flexión-extensión), la junta 8 se encuentra bloqueada por lo que el mecanismo solo se mueve en el plano, tal como se muestra en 4.8a) y 4.8b). Por otro lado, en la fase 2(aducción-abducción), todos los eslabones presentan movimiento y no hay juntas bloqueadas, es decir, todas las juntas se encuentran trabajando

debido a que se requiere de un movimiento de tipo espacial. Aquí puede observarse que los ejes de rotación de los eslabones 4 hasta 8 cambian su orientación. Con estas características, el mecanismo además de poder realizar los movimientos pre-establecidos, cumple con ser metamórfico y cuenta con 2GDL.

4.3.1. Estructura topológica del mecanismo metamórfico de la palma

Como se mencionó en la sección anterior, el mecanismo metamórfico tiene dos fases (Figura 4.8). Cuando el mecanismo está en la primera configuración como se muestra en la Figura 4.8a), la estructura topológica del mecanismo metamórfico puede representarse en forma matricial de acuerdo con la ecuación (6). Sustituyendo valores se obtiene:

$$A^{(1)} = \begin{pmatrix} i & R & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & a & R_{//R} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & b & R_{\perp R} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & c & R_{\perp R} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & d & R_{\perp R} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & e & R_{\perp R} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & f & R_{//R} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & g & R_{\perp R} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & h \end{pmatrix} \quad (27)$$

En la diagonal principal de la matriz (27) representada por letras, se muestra la secuencia de los eslabones en el mecanismo. Los elementos de la diagonal superior representan el tipo de conexión entre los eslabones, puede observarse que se representa por una letra, la cual indica el tipo de junta entre los eslabones y el subíndice representa la relación de restricciones geométricas entre los ejes de las juntas. Por otro lado, la diagonal inferior representa la secuencia de números de los estados de las configuraciones, es decir, indica qué junta es la que se modificó al cambiar la estructura del mecanismo (cambio de fase). Sabiendo esto, se puede observar que el mecanismo en esta fase es de tipo 8R, es decir, posee 8 juntas de tipo revoluta. La junta entre los eslabones h e i se encuentra bloqueada, el eje de la junta entre los eslabones a-b es perpendicular el eje de la junta entre los eslabones b-c, así mismo puede decirse que el eje de la junta entre los eslabones d-e es perpendicular al eje de la junta entre los eslabones e-f. Se puede observar que el eje de la junta que se encuentra entre los eslabones i-a es paralelo al eje de la junta que se encuentra entre los eslabones a-b. Por otro lado, en la diagonal inferior se muestran algunas casillas con el número uno, esto se interpreta como la estructura base del mecanismo metamórfico, ya que ninguna junta ha cambiado un estructura, esto se entiende de mejor manera con matriz topológica de la fase 2 (ecuación 28).

$$A^{(2)} = \begin{pmatrix} i & R & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{\perp R} \\ 1 & a & R_{//R} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & b & R_{\perp R} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & c & R_{\perp R} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & d & R_{\perp R} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & e & R_{\perp R} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & f & R_{//R} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & g & R_{\perp R} \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & h \end{pmatrix} \quad (28)$$

Para la segunda configuración del mecanismo, la diagonal principal se mantiene igual, en la diagonal superior donde se encontraba el -1, ahora se colocó una R indicando la existencia de una junta de tipo revoluta. Ahora el mecanismo cuenta con 9 juntas y su topología se modificó de 8R a 9R. Las relaciones entre las flechas de las juntas se mantienen. En la diagonal inferior se observa un número 2, indica que esa junta presentó un cambio, en este caso, representa que no existe una junta bloqueada como en la configuración 1; la segunda es que indica en que número de configuración ocurrió la modificación, en este caso solo se presentan dos fases, si existiera una tercera y la junta volviera a sufrir un cambio, entonces ese 2 se cambiaría por un tres indicando nuevamente un cambio pero en la fase 3.

Como punto adicional, es importante resaltar que utilizando las matrices de representación topológica, se puede obtener la matriz original del mecanismo metamórfico aplicando la siguiente operación:

$$A^0 = A^1 \cup A^2 \quad (29)$$

se obtiene:

$$A^{(0)} = A^{(1)} \cup A^{(2)} = \begin{pmatrix} i & R & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \cup R_{\perp R} \\ 1 & a & R_{//R} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & b & R_{\perp R} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & c & R_{\perp R} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & d & R_{\perp R} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & e & R_{\perp R} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & f & R_{//R} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & g & R_{\perp R} & 0 \\ [1,2] & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & h & 0 \end{pmatrix} \quad (30)$$

Y la matriz de variación de las juntas correspondiente a la matriz (30):

$$A_{var}^{(2,1)} = A^{(2)} - A^{(1)} = \begin{pmatrix} i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h \end{pmatrix} \quad (31)$$

Los elementos $-1 \cup R_{\perp R}$ en la matriz $A^{(0)}$ representan la secuencia de cambio que los ejes de orientación de la junta ubicada entre los eslabones 1 y 9 ha realizado, es decir el cambio de una fase a otra. En la matriz (31) se indica la junta que actúa durante el proceso de cambio de la fase 1 a la fase 2, se muestra su estado inicial, es decir el tipo de junta, o si está o no bloqueada; y el número indica en qué fase la junta cambia su estado.

4.3.2. Cinemática de la palma

Para calcular la cinemática directa de la mano se utilizó el método de Denavith-Hartenberg, el cual se describió en el Capítulo 2. El modelo empleado se muestra en la Figura 4.9 y en la Tabla 4.5 se presentan los parámetros de Denavith-Hartenberg (D-H).

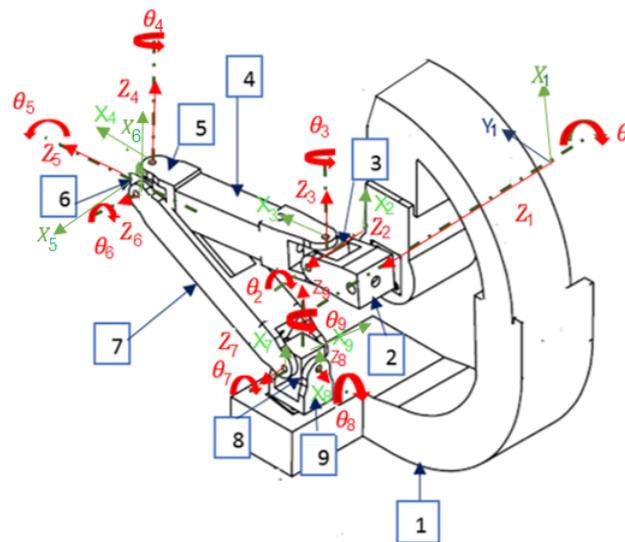


Figura 4.9: Sistema de coordenadas D-H de la palma.

Tabla 4.5: Parámetros D-H de la palma

Articulación	θ	d	a	α
1	ϕ_1	Gp	0	0
2	$\phi_2 + 90$	0	0	-90
3	ϕ_3	0	0	0
4	$\phi_4 + 90$	0	L	90
5	$\phi_5 + 90$	0	0	90
6	ϕ_6	0	0	0
7	ϕ_7	0	0	90
8	$\phi_8 - 90$	0	0	90
9	ϕ_9	0	0	0

donde:

Gp Corresponde al ancho de la palma

L Corresponde a la distancia entre las articulaciones 2 y 3.

A continuación se muestran los rangos funcionales y dimensionales de los parámetros mostrados en la Tabla 4.5.

$$\begin{aligned}
 Gp &= 20\text{mm} \\
 L &= 45\text{mm} \\
 70^\circ &< \phi_1 < 200^\circ \\
 70^\circ &< \phi_2 < 180^\circ \\
 90^\circ &< \phi_3 < 180^\circ \\
 145^\circ &< \phi_4 < 190^\circ \\
 90^\circ &< \phi_5 < 110^\circ \\
 140^\circ &< \phi_6 < 160^\circ \\
 120^\circ &< \phi_7 < 135^\circ \\
 90^\circ &< \phi_8 < 100^\circ \\
 180^\circ &< \phi_9 < 280^\circ
 \end{aligned}$$

Establecidos los parámetros D-H y los rangos de movilidad, se calcularon las matrices de transformación homogénea ${}^{i-1}A_i$ y las matrices 0T_i .

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} C\phi_1 & -S & 0 & 0 \\ S & C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & Gp \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (32)$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} C(\phi_2 + 90) & -S(\phi_2 + 90) & -S(90)S(\phi_2 + 90) & -90C(\phi_2 + 90) \\ S\phi_{2+90} & 0 & -S(-90)C(\phi_2 + 90) & -90S(\phi_2 + 90) \\ 0 & S(-90) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (33)$$

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} C\phi_3 & -S(\phi_3) & 0 & 0 \\ S\phi_3 & C\phi_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (34)$$

$${}^3A_4 = \begin{bmatrix} C(\phi_4 + 90) & 0 & -S(90)S(\phi_4 + 90) & LC(\phi_4 + 90) \\ S(\phi_4 + 90) & 0 & -S(90)C(\phi_4 + 90) & LS(\phi_4 + 90) \\ 0 & S(90) & 0 & L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (35)$$

$${}^4A_5 = \begin{bmatrix} C(\phi_5 + 90) & 0 & -S(90)S(\phi_5 + 90) & 0 \\ S(\phi_5 + 90) & 0 & -S(90)C(\phi_5 + 90) & 0 \\ 0 & S(90) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (36)$$

$${}^5A_6 = \begin{bmatrix} C\phi_6 & -S(\phi_6) & 0 & 0 \\ S\phi_6 & C\phi_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (37)$$

$${}^6A_7 = \begin{bmatrix} C\phi_7 & 0 & -S(90)S\phi_7 & 0 \\ S(\phi_7) & 0 & -S(90)C\phi_7 & 0 \\ 0 & S(90) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (38)$$

$${}^7A_8 = \begin{bmatrix} C(\phi_8 - 90) & 0 & -S(90)S(\phi_8 + 90) & 0 \\ S(\phi_8 - 90) & 0 & -S(90)C(\phi_8 + 90) & 0 \\ 0 & S(90) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (39)$$

$${}^8A_9 = \begin{bmatrix} C\phi_9 & -S\phi_9) & 0 & 0 \\ S\phi_9 & C\phi_9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (40)$$

El resultado final esta dado por:

$${}^0T_9 = {}^0A_1 + {}^1A_2 + {}^2A_3 + {}^3A_4 + {}^4A_5 + {}^5A_6 + {}^6A_7 + {}^7A_8 + {}^8A_9$$

Sustituyendo valores en la ecuación anterior se obtiene el espacio de trabajo de la palma (Figura 4.10). Por otro lado, en la Figura 4.11 se muestra el espacio de trabajo de la mano diseñada por Dai et al. con la finalidad de hacer una comparativa.

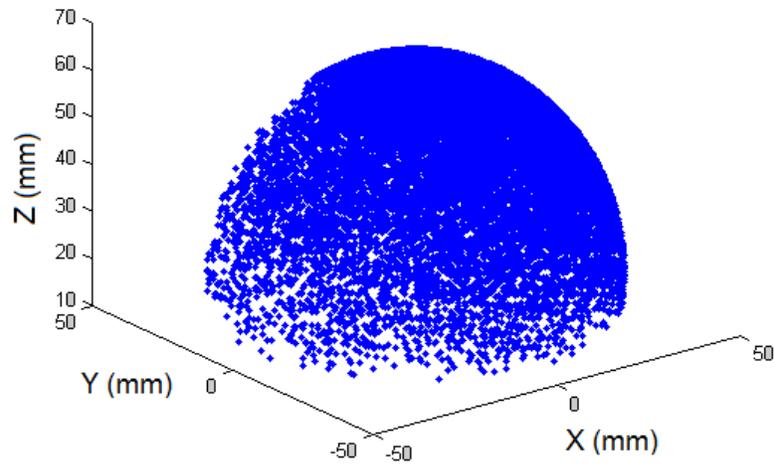


Figura 4.10: Espacio de trabajo.

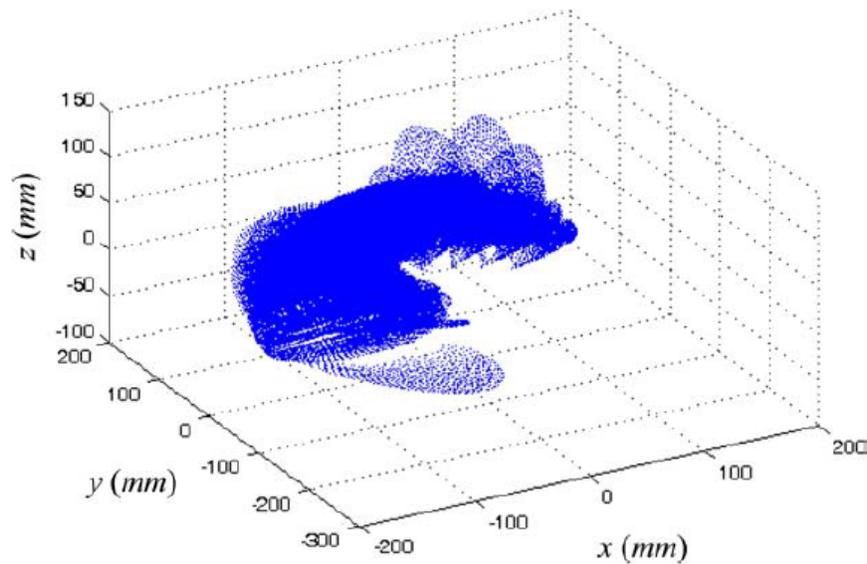


Figura 4.11: Espacio de trabajo de la mano desarrollada por Dai et al [33].

De las Figuras 4.10 y 4.11 respectivamente, se observa que la palma de la mano desarrollada por Dai et al., presenta un espacio de trabajo de 100X100X100 mm (ejes x, y, z). Por el contrario, el espacio presentado por la palma desarrollada en este trabajo es de 50X50X70 mm, presentando este un menor alcance.

4.4. Prototipo final

En esta sección se presenta la versión final de la mano. El diseño fue desarrollado en *SolidWorks*[®] cubriendo los requerimientos descritos en la Tabla 3.2.

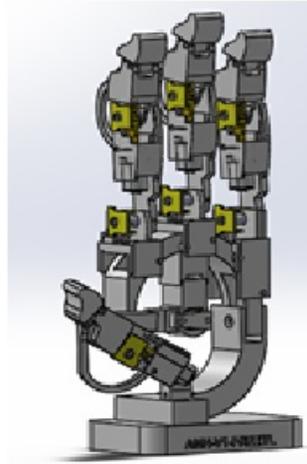


Figura 4.12: Diseño de la mano.

Como se observa en la Figura 4.12, la mano cuenta con cuatro dedos, pulgar, índice, medio y anular; a excepción del pulgar todos cuentan con tres falanges mientras que el pulgar solo cuenta con 2. Se realizó una simulación del movimiento de los dedos índice, medio y anular, con la finalidad de determinar su rango de movilidad. Como punto inicial se partió de la posición mostrada en la Figura 4.12 hasta llegar a la posición final de la Figura 4.13.

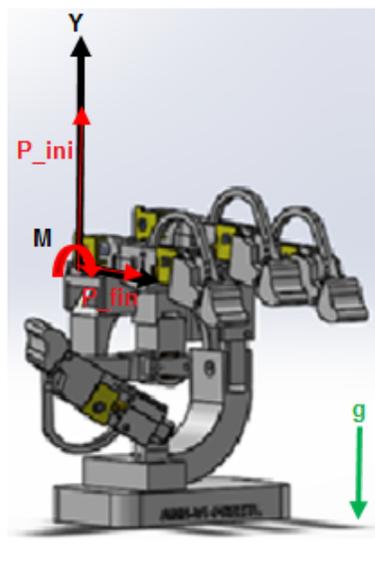


Figura 4.13: Posición final de la mano.

De los resultados obtenidos se observó que los dedos presentaron gráficas iguales de desplazamiento, por lo que en la Figura 4.14 se muestra la gráfica de posición angular correspondiente a los tres dedos. La medición fue realizada sobre las falanges proximales y con respecto a los metacarpianos tal como se muestra en la Figura 4.13, donde P_{ini} es la posición inicial, P_{fin} es la posición final de la falange proximal y m representa el sentido de los motores.

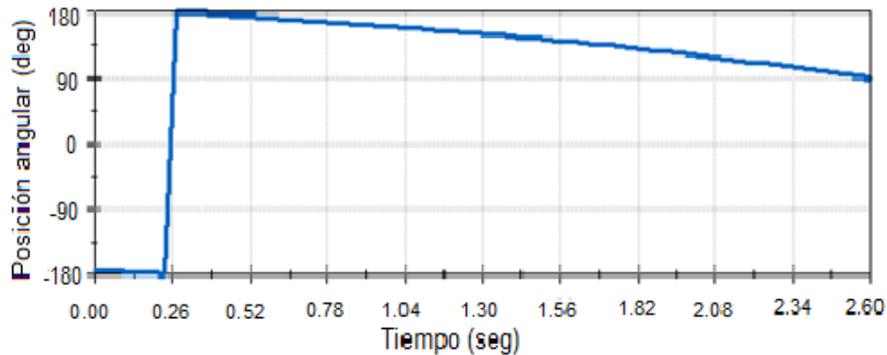


Figura 4.14: Trayectoria de los dedos.

Como se observa en la Figura 4.14, la posición inicial de las proximales es 180° . La posición comienza a cambiar después de los .26s, esto debido a que los motores comienzan a girar. Los proximales alcanzan su posición final en un tiempo de 2.60s y con respecto a la gráfica, ésta es de 90° . Con base en esto, se observa que el rango de movilidad de los dedos está entre los 180° y los 90° .

En la Figura 4.15 se muestra la simulación del movimiento del pulgar, desde la posición inicial hasta la posición final. Se midió el desplazamiento del dedo respecto a un sistema de coordenadas, específicamente se obtuvo el desplazamiento de la punta del dedo (Pd) indicado por un círculo de color blanco. Así mismo se midió el desplazamiento del eslabón $E1$ debido a que su movimiento permite determinar la posición final del pulgar (Figura 4.15b). Aunado a esto, en la Figura 4.15a) se muestra la posición del motor (M) y el sentido de giro. En las Figuras 4.16 y 4.17 se muestran los resultados obtenidos de la simulación.

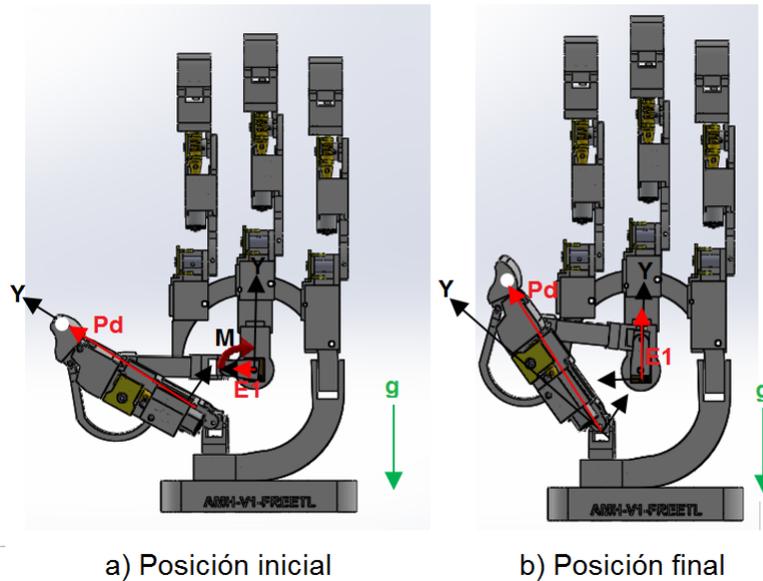


Figura 4.15: Movimiento del pulgar.

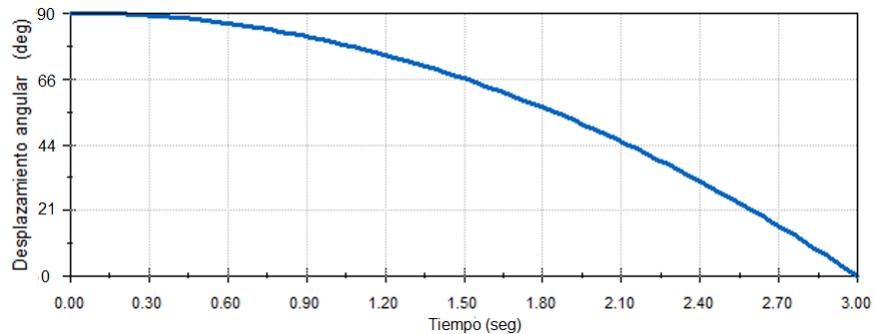


Figura 4.16: Desplazamiento del eslabón E1.

De la Figura 4.16 se observa que la posición inicial del eslabón ($E1$) es de 90° . Después de 0.20 seg el motor se activa y en consecuencia el eslabón comienza a moverse hasta alcanzar su posición final, de acuerdo con la gráfica el eslabón llega a 0° en un tiempo de 3 seg, con base en esto, se observa que el rango de movilidad del pulgar es de 90° . Por otro lado, en la Figura 4.17 se muestra el desplazamiento del dedo pulgar con respecto al sistema de coordenadas de la Figura 4.15. En la gráfica se observa que el dedo comienza a moverse pasados los .70 seg, es decir que se mueve .50 seg después de que el motor ha comenzado a moverse, esto se debe a que como existe un mecanismo entre ellos, el movimiento no se transmite directamente. La posición inicial del pulgar es de 48° y su posición final es de 23° , esto representa que el rango de movilidad del dedo para este movimiento será de 25° .

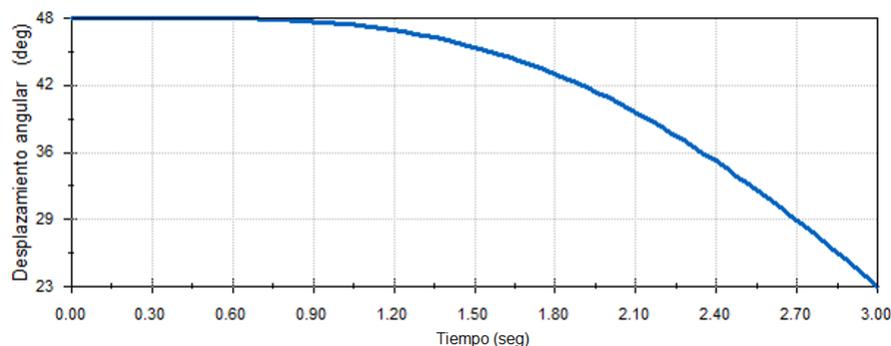


Figura 4.17: Desplazamiento del pulgar.

Para determinar si los rangos de movilidad de los dedos son adecuados para las tareas de sujeción, se realizó una simulación para el agarre de un objeto cilíndrico, ya que este tipo de agarre involucra el movimiento de todos los dedos. Las características de este objeto son: está hecho de PLA, su peso es de 100 gramos, tiene un largo de 20cm y un radio de 85mm. En la Figura 4.18 se muestra la posición inicial de la mano y el objeto, así como la sujeción del mismo.

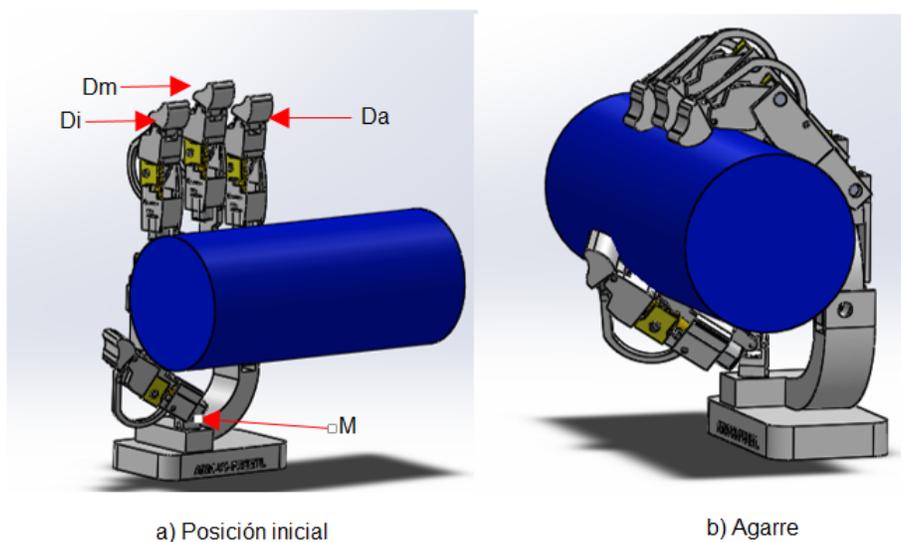


Figura 4.18: Simulación del agarre de un objeto cilíndrico.

En la Figura 4.19 se muestra el movimiento del pulgar. Como se observa en la gráfica, el dedo comienza a cambiar su posición en 0.10 seg, momento en el que el motor M de la Figura 4.18 es activado. El desplazamiento angular es de 69° y le toma 4 seg alcanzar su posición

final, en este caso la posición final se interpreta como el momento en el que el dedo entra en contacto con el cilindro y lo presiona contra la palma. En la Figura 4.20 se muestra el desplazamiento de las falanges proximales de los dedos índice, medio y anular, debido a que tienen el mismo desplazamiento solo se colocó una gráfica. En ella se observa que las falanges entran en contacto con el objeto después de rotar 44° . Por otro lado en las Figuras 4.21, 4.22 y 4.23 se muestran los desplazamientos de las falanges distales (D_i , D_m , D_a) hasta la sujeción completa del objeto.

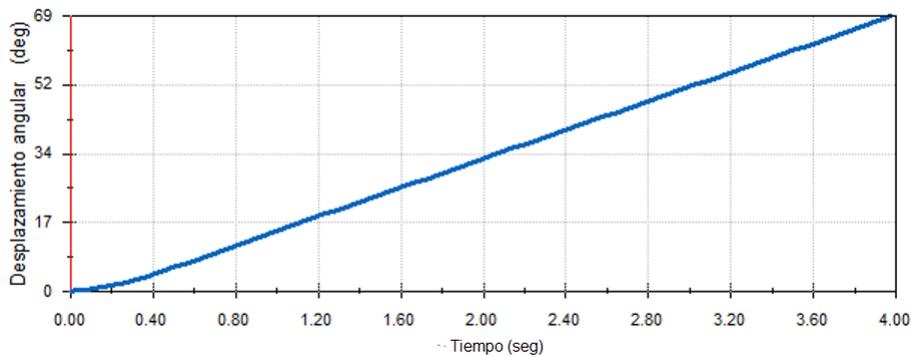


Figura 4.19: Desplazamiento del dedo pulgar.

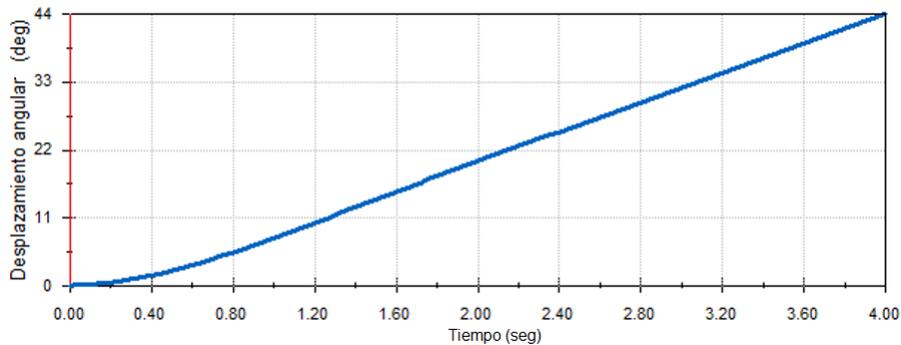


Figura 4.20: Desplazamiento de las falanges proximales.

En Figura 4.21 se observa que la falange D_i presenta una rotación de 37° con respecto a la falange medial del dedo índice, necesaria para entrar en contacto con el objeto. La rotación de la falange D_m es de 44° con base en la Figura 4.22, la rotación es mayor con respecto a la de la falange D_i debido a que los dedos presentan diferentes longitudes. En la Figura 4.23 se muestra que la falange D_a rota 40° con respecto a la medial del dedo anular para entrar en contacto con el cilindro. Las rotaciones de cada una de las falanges representan el punto de sujeción máximo, es decir los dedos envuelven al objeto sin dañarlo y sin permitirle movimiento alguno, tal como lo hace una mano humana.

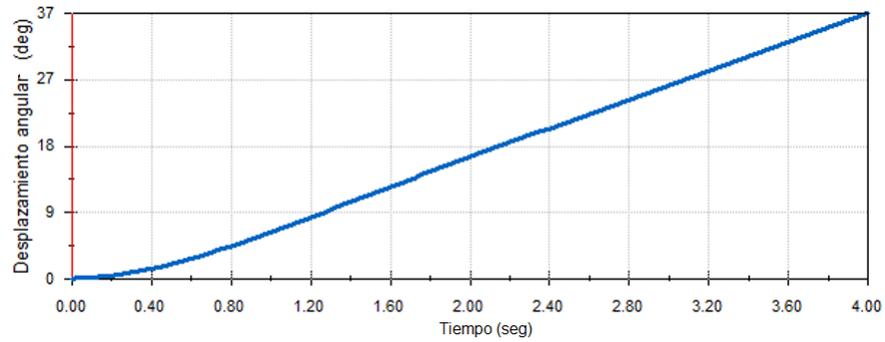


Figura 4.21: Desplazamiento de la falange Di.

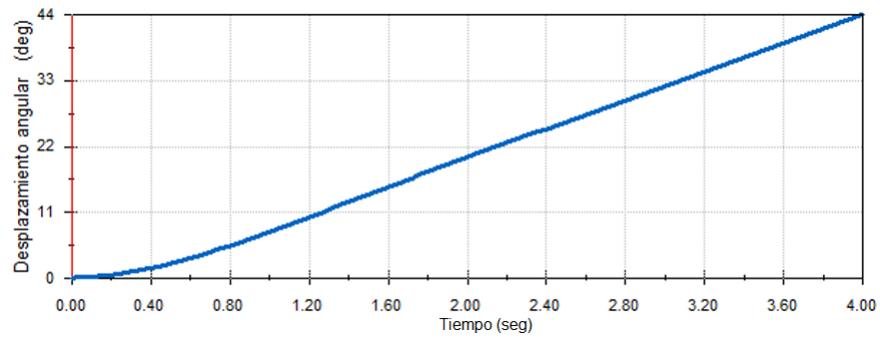


Figura 4.22: Desplazamiento de la falange Dm.

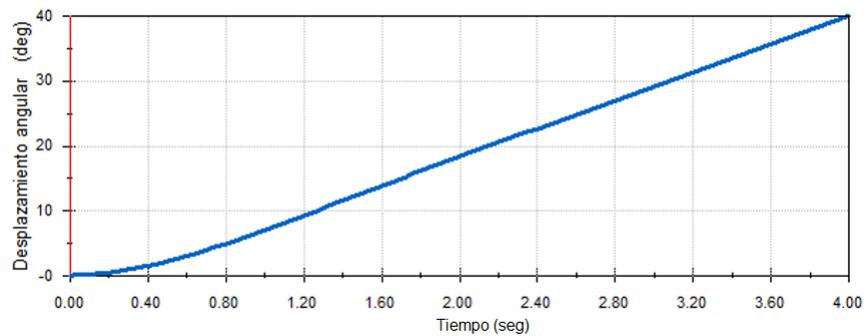


Figura 4.23: Desplazamiento de la falange Da.

Capítulo 5

Construcción del prototipo

En este capítulo se muestra el proceso para la construcción del prototipo final, seguido de esto, se realiza una propuesta para el diseño de los circuitos empleados en el manejo de la mano, así como una sección para la instrumentación del prototipo, mostrando los elementos a utilizar y sus características de operación. Finalmente se describen algunas pruebas experimentales de sujeción con diferentes objetos junto con el análisis de resultados.

5.1. Procesos de manufactura

La manufactura es el proceso de convertir la materia prima en productos, siendo estos de tipo discreto o continuo. Los productos de tipo discreto hacen referencia a piezas individuales, clavos, engranes, latas de refresco son algunos ejemplos. Por otra parte, un rollo de alambre, una lámina de metal o plástico, tramos de manguera o de tubo son algunos ejemplos de productos continuos debido a que pueden ser cortados y posteriormente se convierten en piezas individuales. El proceso de manufactura puede caracterizarse en tres etapas: diseño del producto, selección de la materia prima y los procesos a través de los cuales será manufacturado el producto [36].

De acuerdo con Groover [32], los procesos de manufactura pueden dividirse en dos tipos: operaciones de proceso y operaciones de ensamblaje (Figura 5.1). Una operación de proceso transforma un material de trabajo de una etapa a otra más avanzada por medio de energía (mecánica, térmica, eléctrica o química). Una operación de ensamblaje une dos o más componentes para crear una nueva entidad llamada ensamble.

Con base en la figura 5.1 y las necesidades del prototipo, el proceso de manufactura que se utilizará es un ensamblaje de tipo mecánico junto con la fabricación aditiva.

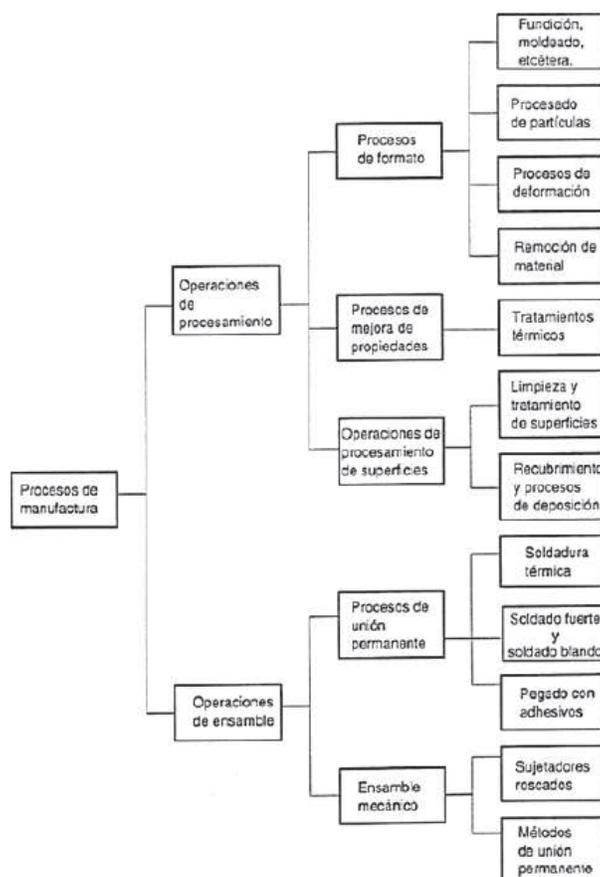


Figura 5.1: Procesos de manufactura (clasificación) [32].

5.2. Fabricación aditiva

Fabricación aditiva es el nombre técnico que engloba todas las tecnologías de impresión 3D. Consiste en fabricar objetos tridimensionales por aportación de material en vez de sustracción. En impresión 3D, partiendo de un archivo digital (modelo 3D), se utilizan diferentes procesos aditivos en los que se aplican capas sucesivas de material para la creación de un objeto. Uno de los procesos más utilizados es el de modelado por deposición fundida (FDM, por sus siglas en inglés). El proceso FMD utiliza como materia prima un filamento de tipo termoplástico (un tipo de plástico que se vuelve líquido a ciertas temperaturas), estos filamentos generalmente varían entre un diámetro de 1.75mm y 3mm. Los filamentos son colocados sobre unas poleas que los transportan a un extrusor el cual se encuentra calentado entre temperaturas que van desde los 180 a los 300 grados Celsius. El extrusor actúa como una pistola de silicón, depositando el material sobre una base. El material saliente se enfría pasado un tiempo de 0.1 s a temperatura ambiente después de la soldadura en frío a las capas anteriores [9, 50].

5.3. Manufactura del prototipo

El procedimiento para la obtención de las piezas se muestra en la Figura 5.2. Consta de 4 etapas, las dos primeras, hacen referencia a la obtención de la materia prima, herramientas e insumos; la tercera etapa hace referencia al proceso de manufactura de las piezas y la última etapa muestra la parte de ensamblaje.

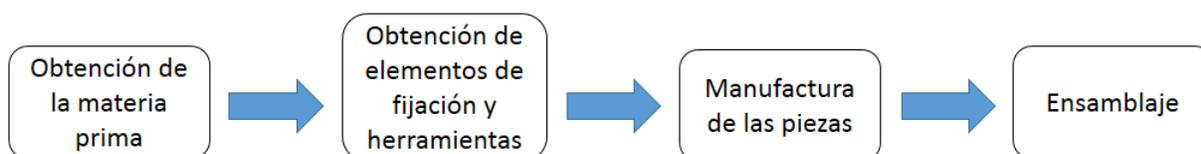


Figura 5.2: Procedimiento de manufactura para la obtención del prototipo final.

Obtención de la materia prima. Como materia prima se utilizó un filamento de ácido poliláctico color negro de diámetro 1.75mm y un pedazo de caucho de 30 x 25 cm.

Elementos de fijación y herramientas. Como elementos de fijación se utilizaron tornillos de 2mm, broca de 1/16, machuelos de 2mm, tornillo de 5mm y una tuerca. Las herramientas utilizadas: desarmadores, pinzas de corte, espátula, pinzas de punta, limas, discos de corte, maneral para machuelos, banco para taladro y un Dremel. En la Tabla 5.1 se muestran la cantidad de elementos utilizados y sus características.

Tabla 5.1: Características de los elementos utilizados

Cantidad	Descripción	Costo
15	Tornillo cabeza métrica M2x0.4 – 1.5mm	\$60
10	Tornillo cabeza métrica M2x0.4 – .5mm	\$20
1	Broca de 1/6 in	\$15
1	Machuelo M2x0.4	\$25
1	Desarmador con juego de 25 puntas	-
1	Pinzas de corte	-
1	Espátula	-
2	Limas tipo circular y media caña	\$60
1	Disco de corte	-
1	Banco para taladro Dremel mod. 220	-
1	Pinzas de punta	-
1	Dremel mod. 4000	.
1	Maneral 3/32 in-3/8in	\$30

Manufactura de las piezas. En esta parte del proceso, se utilizó la impresora CR10-S, sus características se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Características de la impresora CR10-S

Parámetro	Valor
Tecnología de impresión	Modelado por deposición fundida
Filamento	1.75mm
Volumen de trabajo	300x300x400mm
Materiales	PLA, ABS, TPU, PETG
Temperatura promedio del extrusor	250 - 270°C
Velocidad de impresión	150mm/s
Formatos de archivo	JPG, STL, código G y OBJ
Diámetro de la boquilla	4mm
Software	Ultimaker CURA® 3.6.0

En la Tabla 5.3 se muestran las piezas que se imprimieron, el tiempo de impresión dado por el software Ultimaker CURA® 3.6.0, la cantidad de filamento y el peso.

Tabla 5.3: Tiempos de impresión y material requerido

No. De parte	Tiempo de impresión por pieza (min)	Cantidad de filamento por pieza (m)	Peso calculado por el software
AMH1SF008	16	0.71	2g
AMH1SF009	21	0.96	3g
AMH1SF10	6	0.30	1g
AMH1SF11	36	0.71	6g
AMH1SP001	59	6.41	19g
AMH1SP002	65	6.29	19g
AMH1SP003	8	0.64	2g
AMH1SP004	8	0.29	1g
AMH1SP005	4	0.17	1g
AMH1SP006	38	3.05	9g
AMH1SP007	25	2.14	6g
AMH1SP008	22	1.81	5g
AMH1SP009	22	1.82	5g
AMH1SP010	8	0.48	1g
AMH1S003	83	11.85	35g

Para información detallada sobre los componentes de la Tabla 5.3 , consultar el Apéndice C.

Ensamblaje. Con base en la Figura 5.1 el tipo de ensamblaje utilizado es mecánico, es decir que el prototipo se puede armar y desarmar cuando se desee. Para el ensamblaje de los componentes se utilizaron los planos de los diseños de conjunto de la mano, los de subensambles (Apéndice C) con el objetivo de una rápida identificación de los componentes. Para el procedimiento de ensamblaje se utilizaron los diagramas de Ishikawa, los cuales muestran el número de la pieza, secuencia en el ensamblaje y número de elementos requeridos (Figura 5.3).

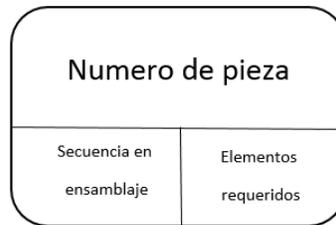


Figura 5.3: Elementos del diagrama de Ishikawa.

Como se muestra en la Figura 5.4, la mano se compone de tres subensamblajes, uno correspondiente a los dedos, otro a la palma y a la base de la mano. Los diagramas de ensamble se muestran en las Figuras 5.5 (del dedo) y 5.6 (el de la palma), el diagrama de la base de la mano no se muestra debido a que consta solo de una pieza.

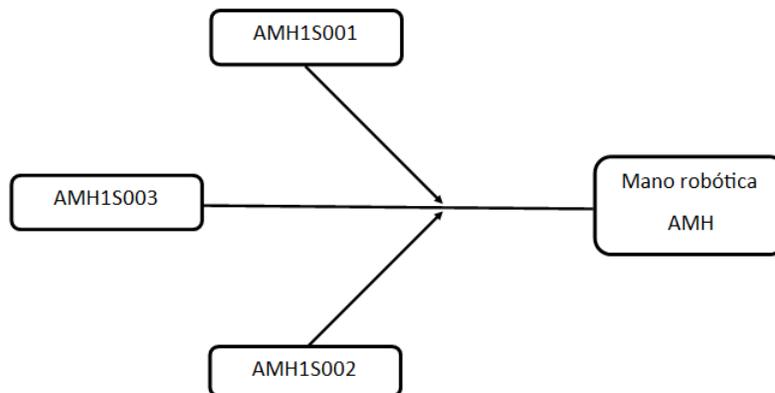


Figura 5.4: Descomposición del ensamblaje.

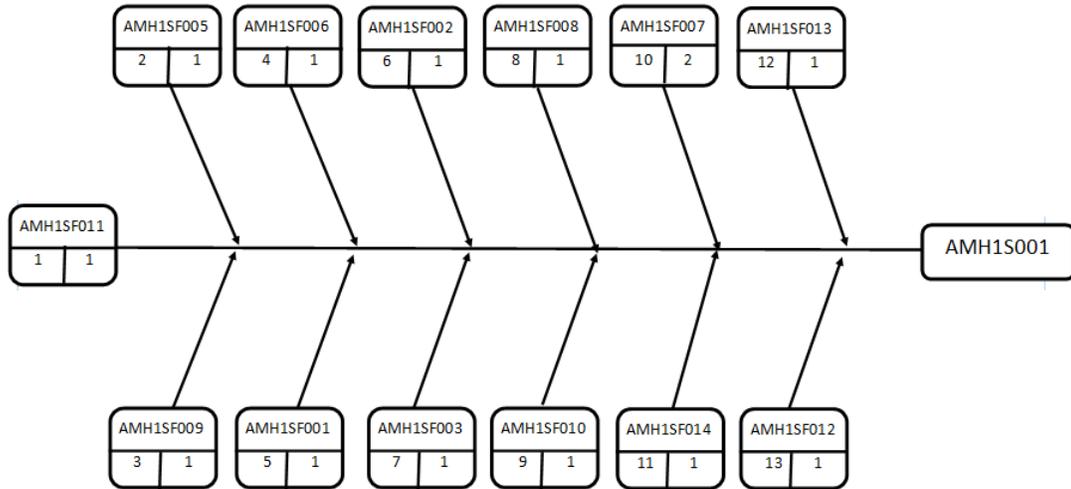


Figura 5.5: Subensamblaje dedo.

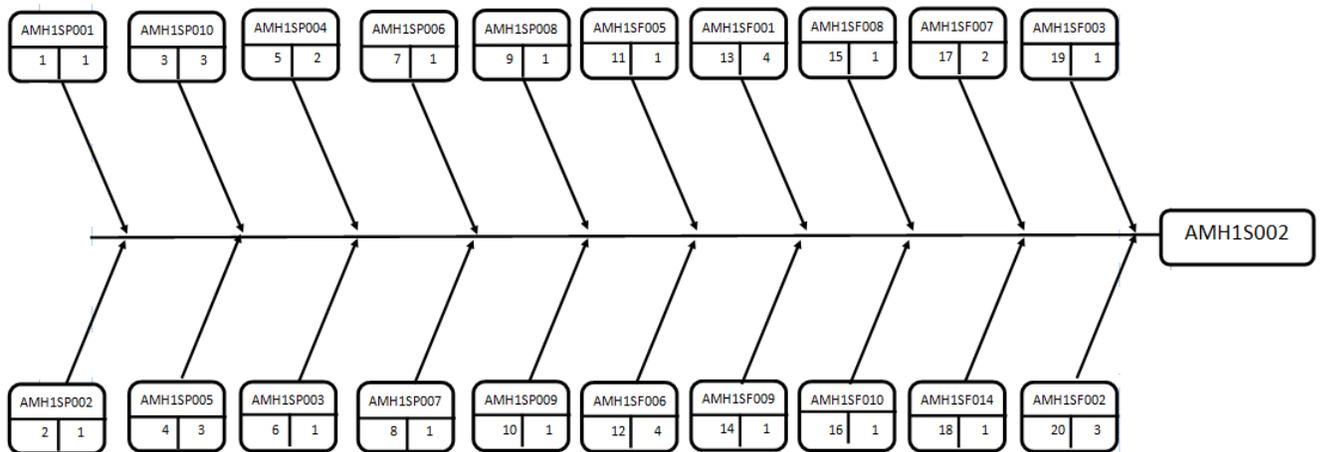


Figura 5.6: Subensamblaje palma.

En la Figura 5.7 se muestra el prototipo final después de ensamblar todos los componentes.



Figura 5.7: Prototipo final.

5.4. Instrumentación del prototipo

Para la instrumentación del prototipo se implementaron los diagramas eléctricos mostrados en las Figura 5.8 y 5.9, correspondientes al control de los motores y para la medición de las fuerzas de agarre.

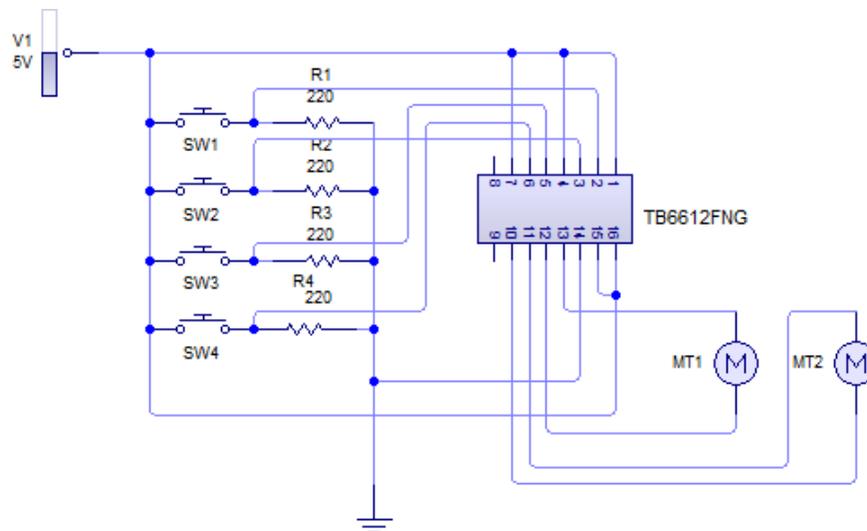


Figura 5.8: Diagrama eléctrico para control de motores.

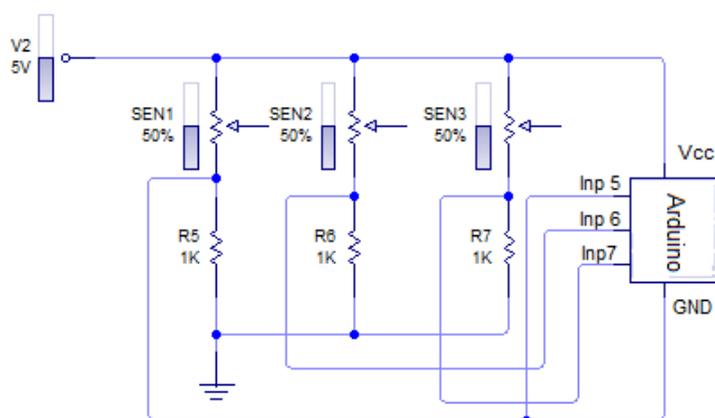


Figura 5.9: Diagrama eléctrico para lectura de fuerza.

Ambos circuitos se alimentaron con una fuente de 5 volts a 2 amperes. Del diagrama de la Figura 5.8 se muestran las características físicas del controlador para los motores, los sensores y del arduino (Figuras 5.10, 5.11 y Tablas 5.4, 5.5 y 5.6).

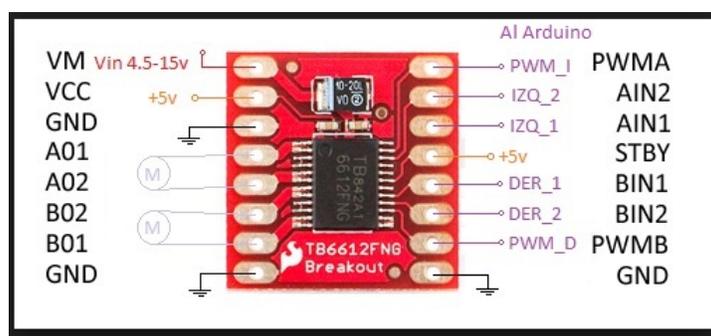


Figura 5.10: TB6612FNG.

Tabla 5.4: Características del controlador

Especificaciones	
Tensión de alimentación	2.7 - 5.5V
Alimentación de motores	4.5 V a 13.5 V
Corriente de salida	1,2 (media) o 3.2A (máximo)
Pulso PWM max	100 kHz
Dimensiones	20,32 x 20,32 mm
Doble salida MOSFET en H	control de dos motores DC



Figura 5.11: Sensor de fuerza.

Tabla 5.5: Características del sensor

Especificaciones	
Longitud	44.5mm
Diámetro	7.62mm
Fuerza mínima de actuación	2 gramos
Rango de fuerzas	0.1N - 10N

Tabla 5.6: Características del controlador arduino

Especificaciones	
Microcontrolador	ATmega328
Voltaje operación	5v
Voltaje entrada	7- 12v
Pines digitales	14 (6 con PWM)
Pines analógicos	6
EEPROM	1KB
Velocidad de reloj	16MHZ

En la Figura 5.12 se muestra el prototipo con los circuitos físicos ya conectados.

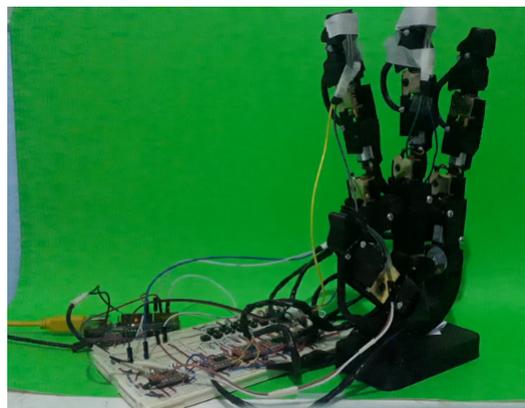
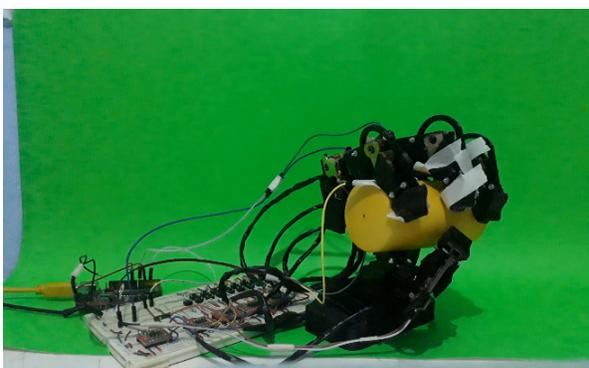


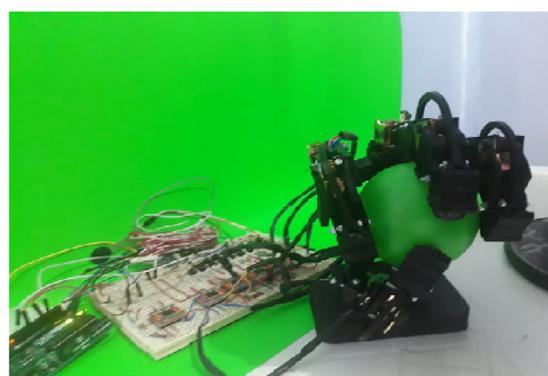
Figura 5.12: Prototipo instrumentado.

5.5. Pruebas experimentales

Con la finalidad de observar la funcionalidad de la mano robótica AMH, se realizaron pruebas de agarre de tipo cilíndrico, esférico y pinzoidal. Para el agarre cilíndrico se utilizó un cilindro de plástico, su peso es de 40 gramos, tiene un diámetro de 40mm y un largo de 10cm. Para los agarres de tipo esférico se utilizó una pelota de plástico, su peso es de 30 gramos. Para los agarres de tipo pinzoidal se utilizó una tarjeta, sus medidas son 80mm de largo por 40 mm de alto con un espesor de 1mm. En la Figura 5.13 se muestra la mano realizando los agarres mencionados.



a) Agarre cilíndrico



b) Agarre esférico



c) Agarre pinzoidal

Figura 5.13: Pruebas experimentales de agarre con el prototipo desarrollado.

Los resultados obtenidos de los sensores de fuerza para cada uno de los agarres, se muestran en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7: Fuerzas ejercidas durante la sujeción

Objeto	Pulgar	Índice	Medio	Anular
Cilindro	5N	7N	7N	6.3N
Pelota	4N	-	8N	6N
Tarjeta	5N	6N	-	-

Como se observa en la Tabla 5.7 para la sujeción del objeto cilíndrico se aplicaron fuerzas de entre 5 y 7N, siendo el dedo índice y el medio los que ejercieron mayor presión sobre el objeto, como se muestra en la Figura 5.13 a), el objeto no sufrió ningún daño. Por otro lado, en el agarre de tipo esférico, las fuerzas aplicadas tuvieron valores de entre los 4 y 8N, siendo el dedo medio el que mayor fuerza ejerció. Se puede observar que en la columna de índice aparece un guión, la razón es porque como se observa en a Figura 5.13 b), la punta del dedo índice no entra en contacto con la pelota debido a que ésta no es lo bastante grande como para abarcar el espacio del dedo índice. En el agarre de tipo pinzoidal solo se utilizaron dos dedos, el índice y el pulgar, tal como se muestra en la Figura 5.13 c). La fuerza ejercida por el pulgar es de 5N y la del índice de 6N, suficientes para evitar que el objeto se caiga o se tambalee.

5.5.1. Consumo energético

Para el cálculo del consumo energético se utilizó la siguiente ecuación:

$$P = IV \quad (1)$$

donde:

P - Potencia (watts).

I - Corriente(amperes).

V - Voltaje (volts).

Empleando la ecuación anterior a los componentes del circuito para el control de motores y para la adquisición de datos, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8: Consumo energético de la mano AMH

Componente	Número de elementos	Corriente (A)	Voltaje (V)	Cosumo energético (W)
Motor	9	0.07	5	3.15
TTB6612FNG	5	1.2	5	30
Circuito para adquisición	1	0.054	5	0.27

Sumando los valores de la columna 5 de la Tabla 5.8, se obtiene que la potencia total es

de 33.42 W, suponiendo que el circuito trabaje durante un periodo de 1 hora, se multiplica la potencia total por el tiempo y se obtiene que el consumo energético es de 33.42 Wh.

5.6. Análisis de resultados

Los resultados obtenidos en el desarrollo de este proyecto de tesis son los siguientes:

Como se observó en la Figura 4.4, el mecanismo desarrollado para el dedo sigue la trayectoria deseada con un error del 5.34%. Cabe mencionar que el ángulo de transmisión del mecanismo es de 60 a 120, por lo que está dentro de los rangos considerados aptos, de acuerdo con la literatura estos deben estar entre 45 y 135 grados.

En las Figuras 4.13 y 4.15 se muestran los rangos de trabajo de la palma y los dedos, así mismo, en la Figura 4.10 se observa que el espacio manipulable de la palma obtenido a partir de sus ecuaciones cinemáticas, es de 50X50X70 mm. Para verificar que los resultados obtenidos sean aceptables, se realizó una simulación de un agarre de tipo esférico ya que para este tipo de agarre se requiere la actuación de todos los dedos. Los resultados obtenidos de la simulación muestran que el diseño y sus rangos de trabajo son adecuados para realizar agarres que requieren el uso de toda la mano.

En la Sección 5.3 se mostró el proceso para la fabricación del prototipo, partiendo desde el tipo de material, tipo de herramientas y máquinas utilizadas, tiempo de fabricación para cada elemento, planos de cada una de las piezas, diagramas de ensamblaje y subensamblaje. En la Figura 5.7 se muestra el prototipo mecánico, se observa que el tipo de transmisión utilizada es por engranajes debido a la fuerza de transmisión que se obtiene en comparación con otros sistemas.

Para el control del prototipo se implementó un circuito eléctrico que se dividió en dos partes. Por un lado, en la Figura 5.8 se mostró el circuito para el control de los motores y en la Figura 5.9 el circuito para la adquisición de datos. Los sistemas se separaron debido a que se buscó evitar generar ruido en las mediciones por parte de los sensores y obtener mediciones erróneas. En el sistema desarrollado para el control de los motores se implementaron 5 controladores TB6612FNG ya que cada módulo es capaz de controlar dos motores, cuenta con diodos que evitan que se generen regresos de corrientes que pueden dañar los circuitos, además es capaz de utilizar el PWM para la variación de la velocidad. Esta última característica mencionada fue muy útil debido a que se realizaron pruebas de movilidad y los movimientos de los dedos eran bruscos debido a que los motores tienen una reducción de 150:1. Para corregir ese problema se redujo la velocidad por medio del uso de los PWM hasta en un 25%, de manera que los movimientos realizados ya eran más suaves. Por otro lado, para el circuito de adquisición de datos, se implementó un arduino uno, debido a que el número de entradas de tipo digital (13) es suficiente para los sensores (5 entradas) que se utilizaron. Para asegurar la medición de fuerzas se calibraron los sensores utilizando objetos de diferentes tamaños y pesos para generar una gráfica de voltaje contra fuerza, posteriormente se obtuvo la ecuación

que relaciona ambos parámetros y se implementó en el arduino, los datos se leyeron por medio del monitor serial.

En la sección 5.5 se realizaron pruebas experimentales de sujeción con el prototipo final instrumentado. Se observó que la mano es capaz de realizar agarres de tipo esférico, cilíndrico y pinzoidal. Los resultados de los sensores se muestran en la Tabla 5.7, en promedio la fuerza aplicada por la mano a los objetos es de 5N, fuerza suficiente para apresar objetos y no permitir que estos se tambaleen, como en el caso del primer prototipo mostrado en la Figura 3.26. Así mismo, se observó que los objetos no sufrieron ningún daño.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajos futuros

En este capítulo se muestran las conclusiones obtenidas a partir del desarrollo del presente trabajo, así mismo, se proponen algunas mejoras con la finalidad de continuar con el trabajo de investigación.

Se presentó una propuesta de mano robótica usando un mecanismo metamórfico, con la finalidad de emular el comportamiento de una mano humana, los objetivos se cumplieron de la siguiente forma:

1. En el Capítulo 2 se describió la estructura ósea de la mano, los nombres de las articulaciones y los grados de libertad de cada una de ellas. Aunado a esto, se mostraron los rangos de movilidad de todos los dedos, esto con base en el tipo de movimiento realizado, pudiendo ser estos: flexión-extensión y abducción-aducción. Por otro lado, en el Capítulo 3 se realizaron pruebas experimentales de agarre y fuerza con diferentes tipos de objetos, los resultados de las fuerzas aplicadas a cada objeto se resumieron en una tabla y fueron utilizados para generar una primera propuesta de diseño. A partir de esto, se publicaron dos capítulos de libro y se tiene aceptado un trabajo más en congreso internacional.
2. En el Capítulo 3 se presentaron tres propuestas para el mecanismo del dedo, todas ellas de tipo subactuado. Al final la opción elegida se construyó físicamente junto con un primer modelo de palma y se realizaron pruebas de agarre. Aunque estos mecanismos presentaban la ventaja de poder adaptarse con facilidad a la forma de los objetos, como se muestra en las simulaciones de las Figuras 3.21 y 3.22, los resultados obtenidos no fueron buenos, ya que la fuerza aplicada durante la sujeción no era suficiente para apresar el objeto firmemente. Por ello en el Capítulo 4, se realizaron pruebas de movimiento tanto de la palma como del dedo humano para obtener más información y proponer mejoras al mecanismo. Como resultado se obtuvo un mecanismo para el dedo con dos motores en vez de 1 como el primero, y con la característica de contar con las medidas antropométricas de una persona mexicana promedio. Respecto al diseño de la palma, se

obtuvo un prototipo más antropomórfico y en vez de ser subactuado como su predecesor, se implementaron dos motores para su movimiento y con la característica de ser metamórfica, presentando movimientos en el plano y en el espacio.

3. Se realizó el análisis cinemático del dedo y la palma por separado, ya que para el diseño del primero se utilizó la síntesis de seguimiento de trayectoria y para el otro se implementó la síntesis de tipo cualitativa. Con las ecuaciones obtenidas del modelo cinemático del dedo, se calcularon las longitudes de los eslabones por medio del uso de los algoritmos genéticos, ya que otros métodos como Newton-Raphson o Levenware no entregaban soluciones factibles. Para la palma se obtuvieron las ecuaciones cinemáticas utilizando la convención de Denavith-Hartenberg, para posteriormente obtener el área manipulable del mecanismo.
4. Al final de la Sección 4.32 se muestra el espacio de trabajo de la mano desarrollada en este trabajo y el de la mano metamórfica desarrollada por Dai et al., se observó que después de compararlas, el espacio de trabajo no se incrementó. Esto se debe a que el diseño tiene las medidas antropométricas del mexicano promedio y la del profesor Dai et al. no tiene dimensiones estándar.
5. En el Capítulo 5 se mostraron los procesos para la construcción del prototipo físico. Como resultado se obtuvo una mano capaz de realizar agarres de tipo esférico, cilíndrico y pinzoidal. Se implementó un sistema de control manual para mover los dedos y la palma. Al evaluar las fuerzas de agarre, los resultados que se obtuvieron fueron satisfactorios, debido a que la fuerza de sujeción ejercida permitía generar agarres fijos (es decir que los objetos no se tambaleaban) y no se presentaba daño alguno en sus estructuras. También se presentó un análisis del consumo energético de la mano, que en comparación con las manos mostradas en la Tabla 3.5 fue mejorado, en la cuestión del rendimiento de la batería y por la tensión de alimentación, como se muestra en el Capítulo 4.
6. Finalmente se debe aclarar que no existen muchos puntos para realizar una comparación más detallada entre el modelo realizado en este trabajo de tesis y la mano metamórfica de Dai et al. ya que dicha información no se encuentra disponible. Cabe resaltar que en el diseño presentado en este trabajo se implementó 1 motor más, pero el tamaño de los motores empleados con respecto a los de la mano metamórfica, son más pequeños y el espacio donde se colocan se redujo considerablemente.

Como trabajos futuros se plantea:

1. Rediseño de la mano para volverla más compacta, y modificar el tipo de transmisión.
2. Realizar la síntesis analítica de la palma para seguimiento de trayectoria, así mismo mejorar el mecanismo para aumentar un grado de libertad.
3. Obtener el espacio de trabajo de los dedos en conjunto con la palma.

4. Implementar el uso de señales electromiográficas para sustituir el modo de operación de la mano.
5. Implementar un sistema de control para determinar las fuerzas de sujeción a un objeto dependiente del tipo de agarre que se pretenda realizar.
6. Realizar un análisis para la selección de materiales que podrían utilizarse en un diseño a futuro.
7. Realizar un análisis para la selección de una batería que pueda ser incorporada a la estructura de la mano, permitiéndole no estar fija.

Bibliografía

- [1] AKAO, Y. *Quality Function Deployment: Integrating Customer Requirements Into Product Design*. Taylor & Francis, 2004. ISBN 978-15-632-731-31.
- [2] AUTOMATICA FORUM. Hightech-prothese bringt nur 380 gramm auf die waage. http://www.automaticaforum.de/servicerobotik/-/article/32571342/40314183/Hightech-Prothese-bringt-nur-380-Gramm-auf-die-Waage/art_co_INSTANCE_0000/maximized/, 2017.
- [3] BARKI, A. *An inverse kinematic approach using Groebner basis theory applied to gait cycle analysis*. Master thesis, Department of Engineering Physics. Air Force Institute of Technology, 2013.
- [4] BARRIENTOS, A., PEÑIN, L. F., BALAGUER, C. y ARACIL, R. *Fundamentos de Robótica*. McGraw-Hill, 1997. ISBN 84-481-0815-9.
- [5] BELTER, J. T. y DOLLAR, A. M. Performance characteristics of anthropomorphic prosthetic hands. *In: Proceedings of Rehabilitation Robotics (ICORR), 2011 IEEE International Conference on*, páginas 1–7, 2011.
- [6] BELTER, J. T., SEGIL, J. L., S DOLLAR, A. M. y WEIR, R. F. Mechanical design and performance specifications of anthropomorphic prosthetic hands: a review. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, vol. 50(5), páginas 599–618, 2013.
- [7] BENNETT, D. A., DALLEY, S. A., TRUEx, D. y GOLDFARB, M. A multigrasp hand prosthesis for providing precision and conformal grasps. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 20(4), páginas 1697–1704, 2015.
- [8] BERNAL, M. y MEDELLIN, H. Análisis, simulación y evaluación biomecánica de un mecanismo para prótesis de mano robótica. *En Memorias del XXII congreso de la SOMIM*, 2016.
- [9] BERNIER, S. N., REINHARD, T. y LUYT, B. *Make: Design for 3D printer*. Maker Media Inc, 2015. ISBN 978-14-5718732-2.
- [10] BURGOS, C. Q. y ALBÁN, O. *Diseño y construcción de una prótesis robótica de mano funcional adaptada a varios agarres*. Tesis de Maestría, Universidad del Cauca, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Popayan, Colombia, 2010.

- [11] CABRERA, J. A., SIMON, E. y PRADO, M. Optimal synthesis of mechanisms with genetic algorithms. *Mechanism and Machine Theory*, vol. 37(10), páginas 1165–1177, 2002.
- [12] CARBONE, G. y CECCARELLI, M. Design of larm hand: Problems and solutions. *Journal of Control Engineering amd Applied informatics*, vol. 10, páginas 39–46, 2008.
- [13] CARDONA, S. y CLOS, D. *Teoría de máquinas*. Universidad Politécnica de Cataluña, 2001. ISBN 84-8301-452-1.
- [14] CECCARELLI, M., RODRIGUEZ, E. y CARBONE, G. Optimal design of driving mechanism in 1 dof anthropomorphic finger. *Mechanism Machine Theory*, vol. 40(8), páginas 897–911, 2006.
- [15] CECCARELLI, M. *Recent Advances in Mechanism Desing for Robotics*, capítulo Finger Mechanisms for Robotic Hands, páginas 3–13. Springer, 2015.
- [16] CENTROBIÓNICO. Prótesis. <http://centrobionico.com/pages/protesis.php>, consultado el 12 de julio del 2017.
- [17] CHAURAND, R. A., LEÓN, L. R. P. y MUÑOZ, E. L. G. *Dimensiones antropométricas de población latinoamericana*. Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño, 2001. ISBN 978-970-27-1193-3.
- [18] CHILDS, P. *Mechanical Design*. Elsevier, 2004. ISBN 0 7506 5771 5.
- [19] CORDERO, A., HUESO, J. J., MARTINEZ, E. y TORREGROSA, J. R. *Problemas resueltos de métodos numéricos*. Thomson, 2006. ISBN 84-9732-409-9.
- [20] CRUZ, P. P. *Inteligencia artificial con aplicaciones a la ingeniería*. Alfaomega, 2010. ISBN 978-607-7854-83-8.
- [21] CUI, L. y DAI, J. S. Reciprocity-based singular value decomposition for inverse kinematic analysis of the metamorphic multifingered hand. *Journal of Mechanisms and Robotics*, vol. 4(3), página 034502, 2012.
- [22] DAI, J. S. y CUI, L. Posture, workspace, and manipulability of the metamorphic multifingered hand with an articulated palm. *Journal of Mechanisms and Robotics*, vol. 3(2), página 021001, 2011.
- [23] DAI, J. S. y REES, J. J. Matrix representation of topological changes in metamorphic mechanisms. *ASME Trans. J. Mech. Design*, vol. 127(4), páginas 610–619, 2005.
- [24] DAI, J. S. y REES-JONES, J. Mobility in metamorphic mechanisms of foldable/erectable kinds. En *the 25th ASME Biennial Mechanisms and Robotics Conference*. Atlanta, GA, 1998.

- [25] DAI, J. S., WANG, D. y CUI, L. Orientation and workspace analysis of the multifingered metamorphic handmetahand. *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 25(4), páginas 942–947, 2009.
- [26] ENGADGET. I-limb pulse, la nueva mano biónica de touch bionics. <http://es.engadget.com/2010/05/06/i-limb-pulse-la-nueva-mano-bionica-de-touch-bionics/>, consultado el 5 de Junio del 2016.
- [27] ERDMAN, A. G. y SANDOR, G. N. *Diseño de mecanismos análisis y síntesis*. Pearson, tercera edición, 1998. ISBN 970-17-0163-1.
- [28] FITE, K. B., WITHROW, T. J., SHEN, X., WAIT, K. W., MITCHELL, J. E. y GOLDFARB, M. A gas-actuated anthropomorphic prosthesis for transhumeral amputees. *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 24(1), páginas 159–169, 2008.
- [29] G. CAI, H. W., Y. PAN y DAI, J. *Advances in Reconfigurable Mechanisms and Robots I*, capítulo Topological Analysis of Configuration Evolution of a Novel Type of Electric Loader with Metamorphic Functions, páginas 139–148. Springer, 2012. ISBN 978-1-4471-4140-2.
- [30] GAO, Z., WEI, G. y DAI, J. S. Inverse kinematics and workspace analysis of the metamorphic hand. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 229(5), páginas 965–975, 2015.
- [31] GONZÁLEZ, E. L. *Diseño de mecanismos utilizando algoritmos genéticos con aplicación en prótesis para miembro inferior*. Tesis Doctoral, Instituto Politécnico Nacional, 2010.
- [32] GROOVER, M. P. *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. Pearson Educación, 1997. ISBN 0-13-312182-8.
- [33] GUOWU, W. y DAI, J. S. Kinematic analysis and prototype of a metamorphic anthropomorphic hand with a reconfigurable palm. *International Journal of Humanoid Robotics*, vol. 8(03), páginas 459–479, 2011.
- [34] HURST, K. *Engineering Design Principles*. Elsevier, 1999. ISBN 0 470 23594 2.
- [35] J. CAO, Y. W. y SUN, J. *Advances in Reconfigurable Mechanisms and Robots I*, capítulo Analysis of Freedom Degrees of Self-Help Chair for the Old Based on the Principle of Metamorphic Mechanism, páginas 149–159. Springer, 2012. ISBN 978-1-4471-4140-2.
- [36] KALPAKJIAN, S. y SCHMID, S. R. *Manufactura ingeniería y tecnología*. Prentice Hall, 2002. ISBN 970-26-0137-1.
- [37] KAWASAKI, H. *Robot hands and multi-fingered haptic interfaces. Fundamentals and applications*. World Scientific, 2015. ISBN 978-9814635608.
- [38] KRAUSZ, N. E., RORRER, R. A. y WEIR, R. F. Design and fabrication of a six degree-of-freedom open source hand. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 24(5), páginas 562–572, 2016.

- [39] L. ZHONG, J. Z., P. FEI y ZHAO, G. *Advances in Reconfigurable Mechanisms and Robots I*, capítulo Metamorphic Mechanism Analysis of a Chinese Massage Robot End-Effector, páginas 569–577. Springer, 2012. ISBN 978-1-4471-4140-2.
- [40] LEAL, E. y DAI, J. S. From origami to a new class of centralized 3-dof parallel mechanisms. En *Proceedings of ASME 31st Mechanisms and Robotics Conference, Parts A and B, Las Vegas, NV, Sept*, páginas 4–7. 2007.
- [41] LENZI, T., LIPSEY, J. y SENSINGER, J. W. The ric arm a small anthropomorphic transhumeral prosthesis. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 21(6), páginas 2660–2671, 2016.
- [42] LI, S. J. y DAI, J. S. Configuration transformation matrix of metamorphic mechanisms and joint-orientation change metamorphic metod. *China Mech. Eng.*, vol. 21(14), páginas 1698–1703, 2010.
- [43] LIPPERT, L. S. *Clinical kinesiology and anatomy*. F. A. Davis company, Clinical kinesiology for physical therapist assistants, 2006. Four edition, ISBN 13: 978-0-8036-1243-3.
- [44] LIU, C. y YANG, T. Essence and characteristics of metamorphic mechanisms and their metamorphic ways. En *the 11th World Congress in Mechanism and Machine Science*, páginas 1285–1288. Tianjin, China, 2004.
- [45] LOAIZA, J. L. y ARZOLA, N. Evolution and trends in the development of hand prosthesis. *DYNA*, vol. 78(169), páginas 191–200, 2011.
- [46] LÓPEZ, L. Biomecánica y patrones funcionales de la mano. *Morfolia*, vol. 4(1), 2012.
- [47] NEW ATLAS. Touch bionics introduces app-controlled prosthetic hand. <http://newatlas.com/i-limb-ultra-revolution/27150/>, 19-04-2013.
- [48] NORTON, R. L. *Diseño de Maquinaria, síntesis y análisis de máquinas y mecanismos*. Mc Graw Hill, quinta edición, 2013. ISBN 978-607-15-0935-2.
- [49] ODOMIROK, P. W. *AFFORDABILITY Integrating value, Customer, and Cost for Continuous Improvement*. CRC Press, 2016. ISBN 13: 978-1-4987-6240-3.
- [50] ORTEGA, A. J. *Fabricación digital: Introducción al modelado e impresión 3D*. Ministerio de educación, Cultura y Deporte, 2017. ISBN 978-84-3695745-7.
- [51] OTTOBOCK. Prótesis de mano sensorhand speed y variplus speed. <http://www.ottobock.com.mx/prosthetics/upper-limb/solution-overview/myoelectric-devices-speedhands/>, 2013.
- [52] OTTOBOCK. Grip patterns. http://bebionic.com/the_hand/features&prev\unhbox\voidb@x\bgroup\let\unhbox\voidb@x\setbox\@tempboxa\hbox{s\global\mathchardef\accent@spacefactor\spacefactor}\accent9s\egroup\spacefactor\accent@spacefactorearch, consultado el 10 de junio del 2016.

- [53] OTTOBOCK PROTESIS. Michelangelo. <http://www.ottobock.com.ar/prosthetics/upper-limb/solution-overview/axon-bus-prosthetic-system-with-michelangelo-hand/>, 2013.
- [54] PÉREZ, M. A. *Análisis cinématico e implementación de una mano robótica servo articulada aplicable como prótesis*. Tesis de maestría, Sección de estudios de posgrado e investigación Escuela Superior de Ingenierías Mecánica y Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, 2011.
- [55] PROSTHETIC ORTHOTIC SOLUTIONS INTERNATIONAL (POSI). Bebionic. <http://prostheticsolutions.com/bebionic/>, consultado el 12 de junio del 2016.
- [56] PUIG, J. E., RODRIGUEZ, N. E. y CECCARELLI, M. A methodology for the design of robotic hands with multiple fingers. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 5(2), página 22, 2008.
- [57] ROBOTNIK. Shadow dexterous. <http://www.robotnik.eu/robotic-hands/shadow-dexterous/>, 2017.
- [58] S. ZIRBEL, R. B., S. CUTIS y DUFFIELD, L. *Advances in Reconfigurable Mechanisms and Robots I*, capítulo Bi-Behavioral Prosthetic Knee Enabled by a Metamorphic Compliant Mechanism, páginas 401–411. Springer, 2012. ISBN 978-1-4471-4140-2.
- [59] SAPUAN, S. M. *Composite Materials, Concurrent Engineering Approach*. Elsevier, 2017. ISBN 978-0-12-802507-9.
- [60] SHADOWN ROBOT COMPANY. Shadown dexterous hand technical specification. http://www.robotnik.es/web/wp-content/uploads/2014/04/shadow_dexterous_hand.pdf, 2017.
- [61] SHIGLEY, J. y UICKER, J. J. *Teoría de máquinas y mecanismos*. McGraw-Hill, primera edición, 1988. ISBN 968-451-297-X.
- [62] THIELE, L., MIETTINEN, K., KORHONEN, P. J. y MOLINA, J. A preference-based evolutionary algorithm for multi-objective optimization. *Evolutionary Computation*, vol. 17(3), páginas 411–436, 2009.
- [63] TOUCH BIONICS. i-limb ultra. <http://www.touchbionics.es/downloads/MA000001ES/20rev3/20August/202016/20i-limb/20ultra/20product/20sheet.pdf>, 2017.
- [64] TOUCH BIONICS. I-limb ultra revolution. <http://www.touchbionics.es/downloads/MA/2001094/20ES/20re/20datasheet-ES.pdf>, consultado el 12 de junio del 2016.
- [65] TSAI, L.-W. *Mechanims design enumeration of kinematic structures according to function*. CRC PRESS, 2001. ISBN 0-8493-0901-8.
- [66] VÁZQUEZ, E. *Los amputados y su rehabilitación. Un reto para el Estado*. Intersistemas, 2016. ISBN 978-607-443-623-5.

- [67] VICENT SYSTEMS. vicent evolution 2. <http://vincentsystems.de/en/prosthetics/vincent-evolution-2/>, consultado el 12 de junio del 2016.
- [68] W. YE, Y. F. y GUO, S. *Advances in Reconfigurable Mechanisms and Robots I*, capítulo Structural Synthesis of a Class of Metamorphic Parallel Mechanisms with Variable Mobility, páginas 119–126. Springer, 2012. ISBN 978-1-4471-4140-2.
- [69] WEBBER, L. y WALLACE, M. *Quality Control for DUMMIES*. Wiley Publishing, Inc., 2011. ISBN 978-0-470-06909-7.
- [70] WOHLHART, K. Kinematotropic linkages. En *Recent Advances in Robot Kinematics* (editado por J. Lenarcic y V. Parenti-Castelli), páginas 359–368. Kluwer, Dordrecht, 1996.
- [71] XHU, Z. y TODOROV, E. Design of a highly biomimetic anthropomorphic robotic hand towards artificial limb regeneration. *Proceedings of Robotics and Automation (ICRA), 2016 IEEE International Conference on, IEEE*, páginas 3485–3492, 2016.
- [72] XU, K., HUAN, L., L AMD ZENGHUI, YUHENG, D. y XIANGYANG, Z. A single-actuator prosthetic hand using a continuum differential mechanism. *Proceedings of Robotics and Automation (ICRA), 2015 IEEE International Conference on*, páginas 6457–6462, 2015.
- [73] YIGITER, A. y UNLU, H. A comparison study of newton-raphson and genetic algoritrhms for change point problem in non-homogeneous poisson process. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, vol. 6(3), páginas 47–55, 2016.
- [74] ZHANG, L. y DAI, J. S. Metamorphic techniques and geometric reconfiguration principles. *Proceedings of Reconfigurable Mechanisms and Robots, 2009. ReMAR 2009. ASME/IFTToMM International Conference on*, páginas 32–40, 2009.
- [75] ZHANG, L. y DAI, J. S. Reconfiguration of spatial metamorphic mechanisms. *Journal of Mechanisms and Robotics*, vol. 1(1), página 011012, 2009.
- [76] ZHANG, W., DING, X. y LIU, J. A representation of configurations and evolution of metamorphic mechanisms. *Mechanical Science*, vol. 7, páginas 39–47, 2016.

Apéndice A

Programa para obtener la trayectoria del dedo

```
clc
clear all
```

```
*****Valores de las falanges*****
```

```
a3 = 16.75; %falangedistal
a4 = 27.01; %falangemedial
a5 = 41.89; %falangeproximal
```

```
*****Angulos*****
```

```
n=10; %Numerodepuntos
t3_1 = linspace(90, -90, n); %Valoresparalafangedistal
t4_1 = linspace(90, 0, n); %Valoresparalafangemedial
t5_1 = linspace(90, 90, n); %Valoresparalafangeproximal
```

```
THETHA3=[t3_1];
THETHA4=[t4_1];
THETHA5=[t5_1];
```

```
*****Ecuaciones del dedo*****
```

```
X = a5 * cosd(THETHA5) + a4 * cosd(THETHA4) + a3 * cosd(THETHA3);
Y = a5 * sind(THETHA5) + a4 * sind(THETHA4) + a3 * sind(THETHA3);
```

```
*****Grafica de la trayectoria*****
```

```
    line(X(:),Y(:),'LineWidth',2);  
hold on  
plot(X(:),Y(:),'r*','LineWidth',5);  
axis equal  
xlabel('X','fontsize',10)  
ylabel('Y','fontsize',10)  
title('X - Y Coordenadas generadas a partir de los ángulos','fontsize',10)  
grid on
```

Apéndice B

Programa para síntesis de mecanismos con algoritmos genéticos

```
%Ecuaciones cinemáticas del mecanismo
function f = kinematic (x)

*****Dimensiones de las falanges*****

    a1 = 41.89;
    a2 = 27.01;
    a3 = 16.75;

*****Vector de los ángulos de entrada theta3*****

    theta3 = [90 70 50 30 10 -10 -30 -50 -70 -90];

*****Puntos deseados en X*****

    pxd = [0 10.4191 20.0017 28.0109 33.8572 37.1864 37.8973 36.1478 32.3285 27.01];

*****Puntos deseados en Y*****

    pyd = [85.65 84.2295 80.1023 73.6563 65.9895 56.3432 47.02 38.29 30.8404 25.14];

*****Calculo de Pxc y Pyc*****

    %Punto1
    pxc1 = x(1) + x(3)*cosd(x(4)) + x(5)*cosd(x(6)+theta3(1)-180) + a3*cosd(theta3(1));
    pyc1 = x(2) + x(3)*sind(x(4)) + x(5)*sind(x(6)+theta3(1)-180) + a3*sind(theta3(1));
```

%Punto2

```
pxc2 = x(1) + x(3)*cosd(x(7)) + x(5)*cosd(x(8)+theta3(2)-180) + a3*cosd(theta3(2));
pyc2 = x(2) + x(3)*sind(x(7)) + x(5)*sind(x(8)+theta3(2)-180) + a3*sind(theta3(2));
```

%Punto3

```
pxc3 = x(1) + x(3)*cosd(x(9)) + x(5)*cosd(x(10)+theta3(3)-180) + a3*cosd(theta3(3));
pyc3 = x(2) + x(3)*sind(x(9)) + x(5)*sind(x(10)+theta3(3)-180) + a3*sind(theta3(3));
```

%Punto4

```
pxc4 = x(1) + x(3)*cosd(x(11)) + x(5)*cosd(x(12)+theta3(4)-180) + a3*cosd(theta3(4));
pyc4 = x(2) + x(3)*sind(x(11)) + x(5)*sind(x(12)+theta3(4)-180) + a3*sind(theta3(4));
```

%Punto5

```
pxc5 = x(1) + x(3)*cosd(x(13)) + x(5)*cosd(x(14)+theta3(5)-180) + a3*cosd(theta3(5));
pyc5 = x(2) + x(3)*sind(x(13)) + x(5)*sind(x(14)+theta3(5)-180) + a3*sind(theta3(5));
```

%Punto6

```
pxc6 = x(1) + x(3)*cosd(x(15)) + x(5)*cosd(x(16)+theta3(6)-180) + a3*cosd(theta3(6));
pyc6 = x(2) + x(3)*sind(x(15)) + x(5)*sind(x(16)+theta3(6)-180) + a3*sind(theta3(6));
```

%Punto7

```
pxc7 = x(1) + x(3)*cosd(x(17)) + x(5)*cosd(x(18)+theta3(7)-180) + a3*cosd(theta3(7));
pyc7 = x(2) + x(3)*sind(x(17)) + x(5)*sind(x(18)+theta3(7)-180) + a3*sind(theta3(7));
```

%Punto8

```
pxc8 = x(1) + x(3)*cosd(x(19)) + x(5)*cosd(x(20)+theta3(8)-180) + a3*cosd(theta3(8));
pyc8 = x(2) + x(3)*sind(x(19)) + x(5)*sind(x(20)+theta3(8)-180) + a3*sind(theta3(8));
```

%Punto9

```
pxc9 = x(1) + x(3)*cosd(x(15)) + x(5)*cosd(x(16)+theta3(9)-180) + a3*cosd(theta3(9));
pyc9 = x(2) + x(3)*sind(x(15)) + x(5)*sind(x(16)+theta3(9)-180) + a3*sind(theta3(9));
```

%Funciones euclidianas para el calculo del error

```
f(1) = sqrt((pxd(1) - pxc1)^2 + (pyd(1) - pyc1)^2)
f(2) = sqrt((pxd(2) - pxc2)^2 + (pyd(2) - pyc2)^2)
f(3) = sqrt((pxd(3) - pxc3)^2 + (pyd(3) - pyc3)^2)
f(4) = sqrt((pxd(4) - pxc4)^2 + (pyd(4) - pyc4)^2)
f(5) = sqrt((pxd(5) - pxc5)^2 + (pyd(5) - pyc5)^2)
f(6) = sqrt((pxd(6) - pxc6)^2 + (pyd(6) - pyc6)^2)
f(7) = sqrt((pxd(7) - pxc7)^2 + (pyd(7) - pyc7)^2)
f(8) = sqrt((pxd(8) - pxc8)^2 + (pyd(8) - pyc8)^2)
f(8) = sqrt((pxd(9) - pxc9)^2 + (pyd(9) - pyc9)^2)
```

end

%Implementacion del GA para sintesis del mecanismo

%Parametros del algoritmo

Objfun = @freudenstein; *%Ecuaciones cinematicas del mecanismo*

nvar = 10; *%Numero de variables*

LB = [-5 10 0 5 80]; *%Valor minimo de las variables*

UB = [5 30 60 10 160]; *%Valor maximo de las variables*

options = ga('PopulationSize', 1000, 'SelectionFcn', @selectiontournament, 4,
'CrossoverFcn', @crossovertwopoint, 'MutationFcn', @mutationuniform, 0,01,
'ParetoFraction', 0,7, 'PlotFcns', @gaplotpareto);

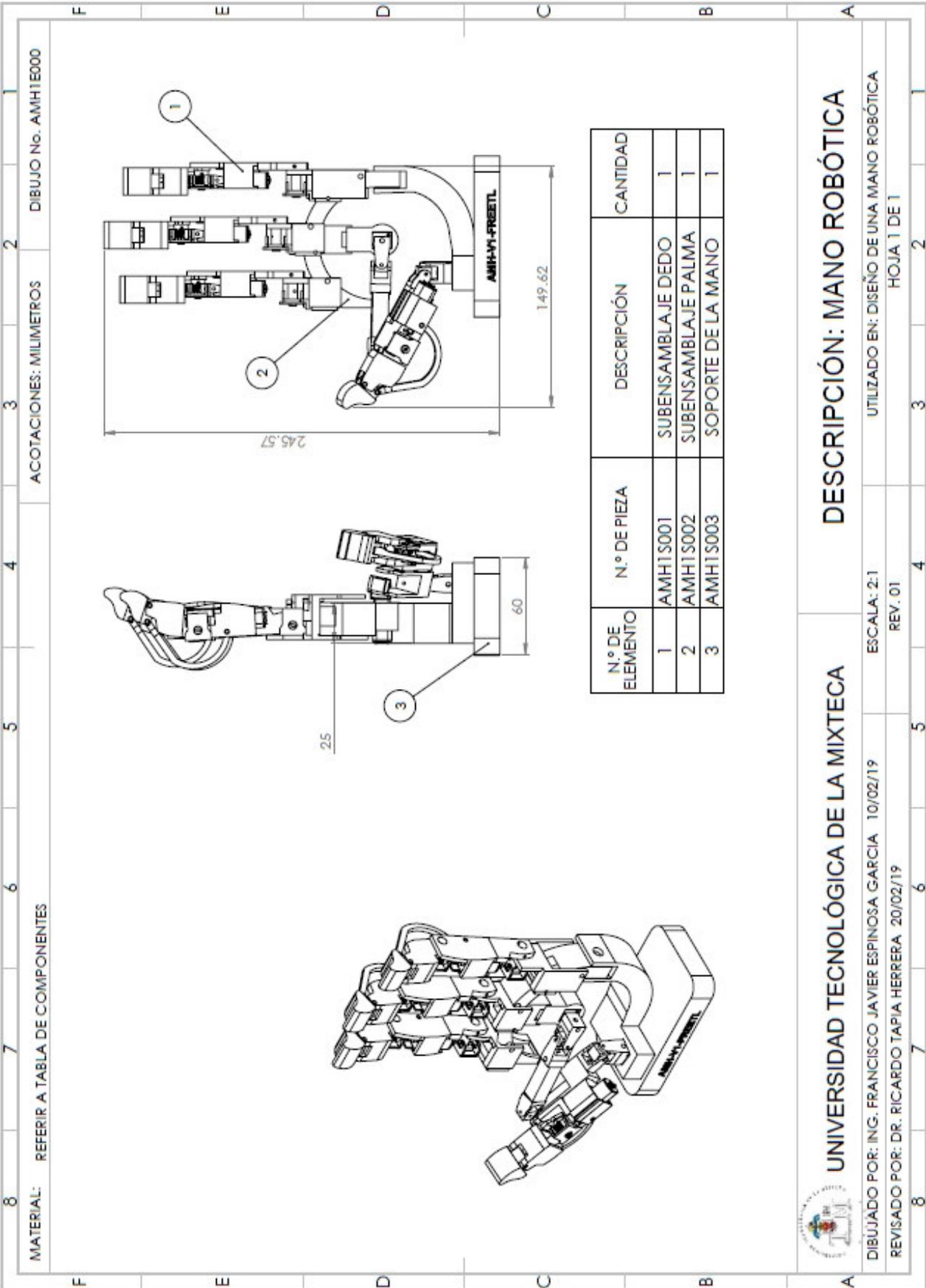
% Llamada al algoritmo genetico

[x fval] = gamultiobj (Objfun, nvar, [], [], [], [], LB, UB, options)

Apéndice C

Dibujos técnicos

Para la representación de piezas o partes de maquinaria se emplea el uso del dibujo técnico. Es importante resaltar que para representar un solo elemento se utilizan los planos de pieza, para la representación de un mecanismo simple o una máquina formada por un conjunto de piezas, se utilizan los planos de conjunto. En esta sección se muestran ambos tipos de planos correspondientes a la mano metamórfica AMH (Anthropomorphic metamorphic hand).



DIBUJO No. AMH1E000

ACOTACIONES: MILIMETROS

MATERIAL: REFERIR A TABLA DE COMPONENTES

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	AMHTS001	SUBENSAMBLAJE DEDO	1
2	AMHTS002	SUBENSAMBLAJE PALMA	1
3	AMHTS003	SOPORTE DE LA MANO	1



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

DESCRIPCIÓN: MANO ROBÓTICA

DIBUJADO POR: ING. FRANCISCO JAVIER ESPINOSA GARCIA 10/02/19

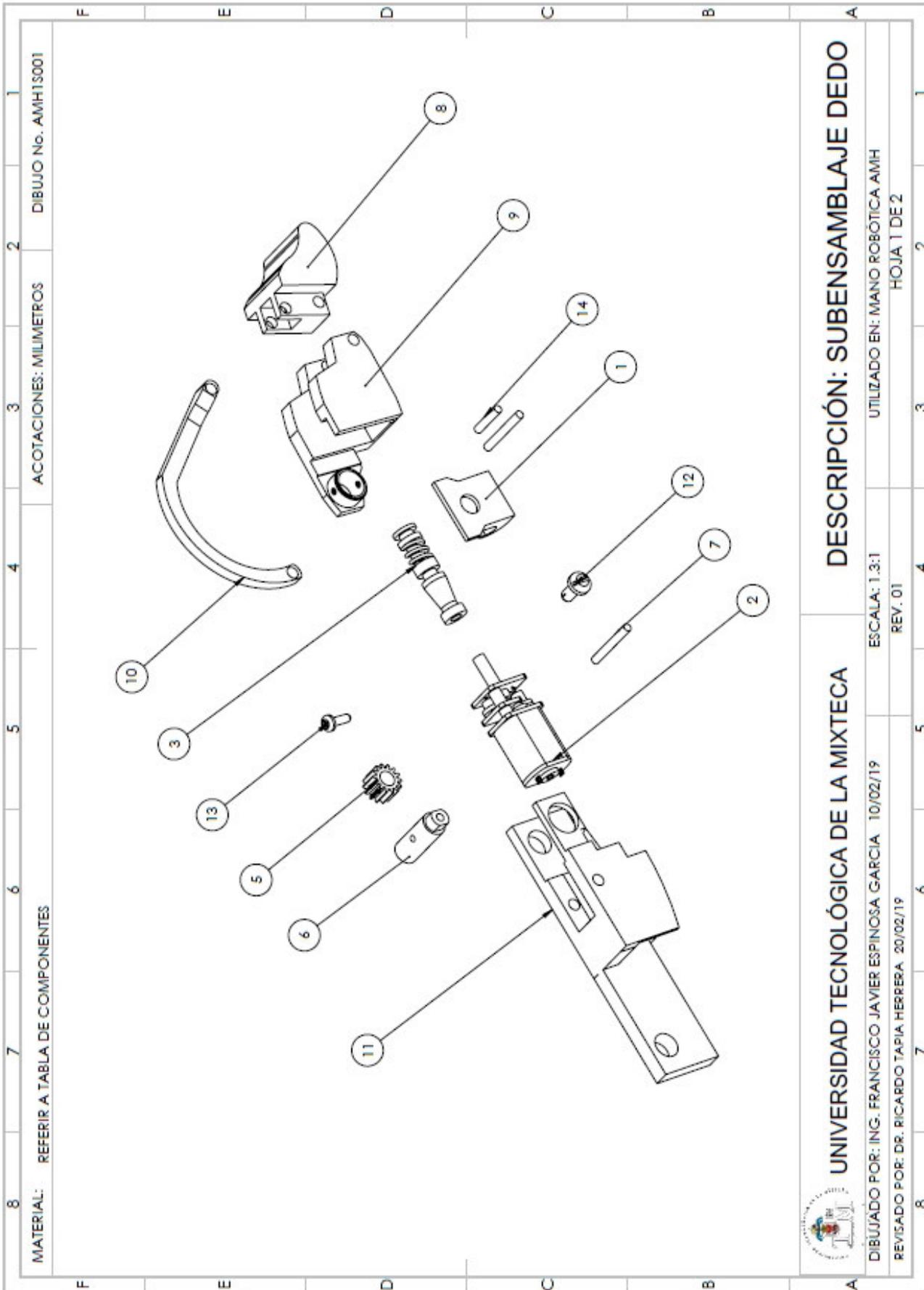
UTILIZADO EN: DISEÑO DE UNA MANO ROBÓTICA

REVISADO POR: DR. RICARDO TAPIA HERRERA 20/02/19

HOJA 1 DE 1

ESCALA: 2:1

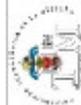
REV. 01



MATERIAL: REFERIR A TABLA DE COMPONENTES

ACOTACIONES: MILIMETROS

DIBUJO No. AMH15001



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

DESCRIPCIÓN: SUBENSAMBLAJE DEDO

DIBUJADO POR: ING. FRANCISCO JAVIER ESPINOSA GARCIA 10/02/19

ESCALA: 1.3:1

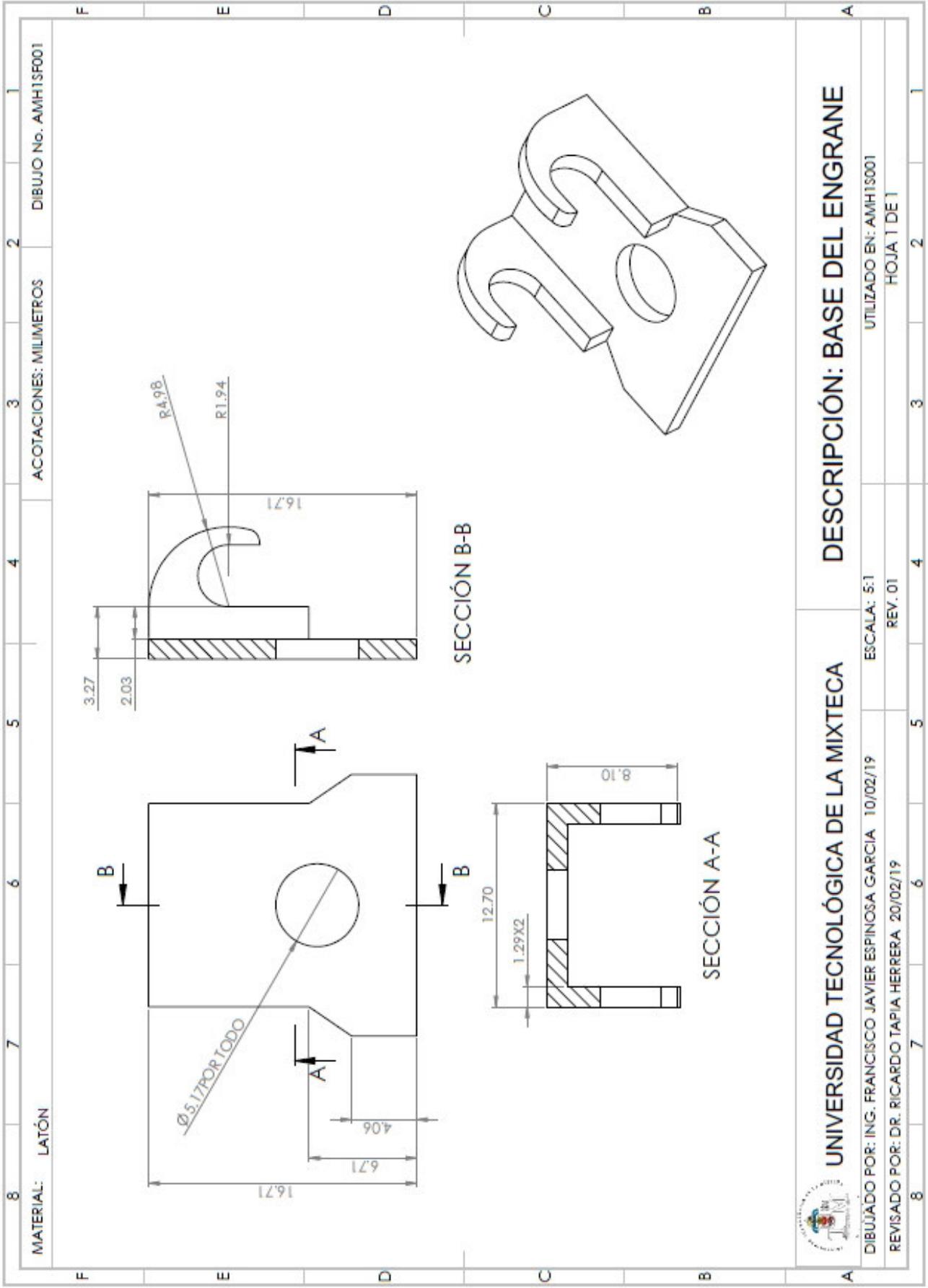
UTILIZADO EN: MANO ROBÓTICA AMIH

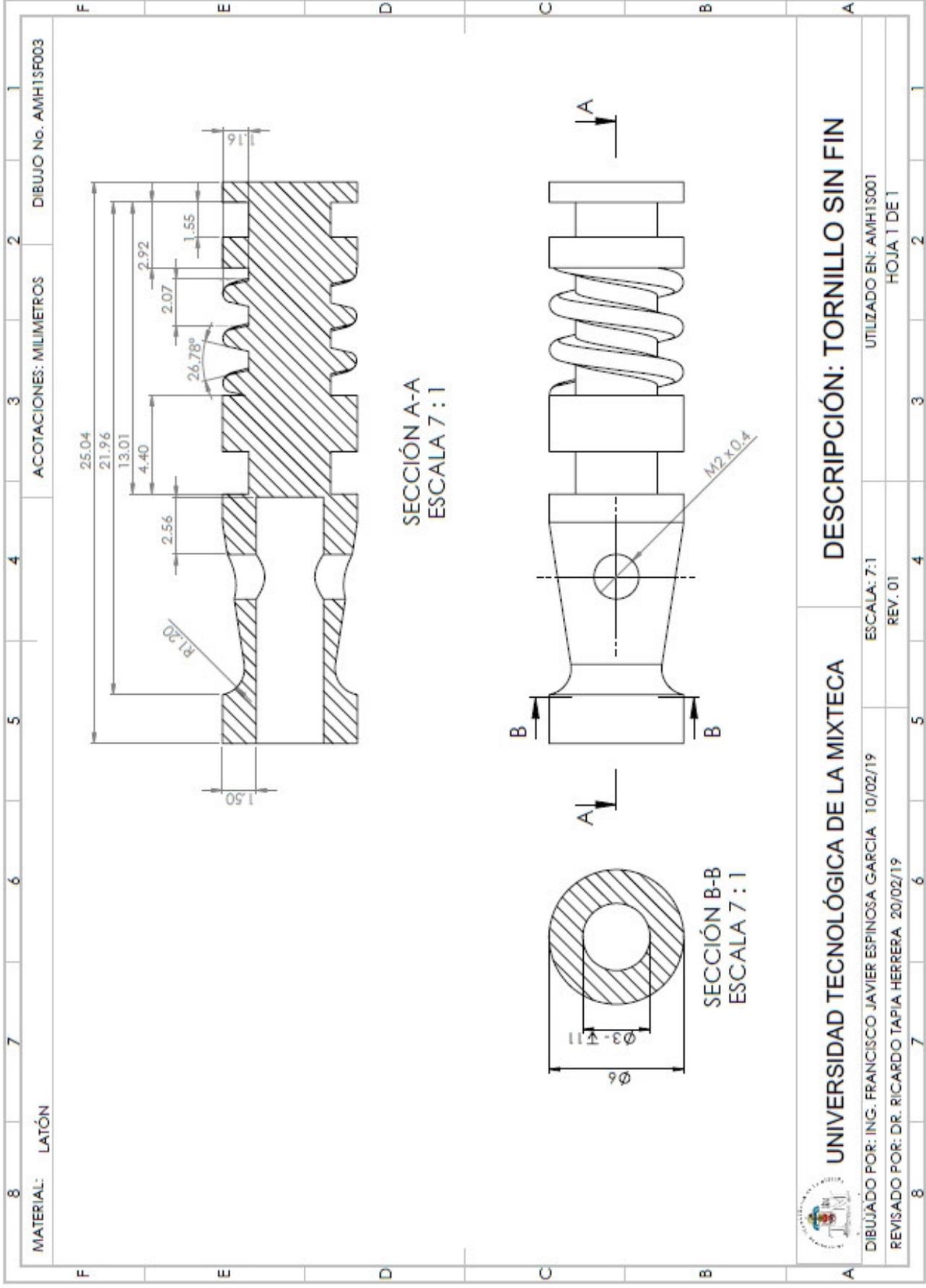
REVISADO POR: DR. RICARDO TAPIA HERRERA 20/02/19

REV. 01

HOJA 1 DE 2

8		7		6		5		4		3		2		1	
MATERIAL: REFERIR A TABLA DE COMPONENTES										ACOTACIONES: MILIMETROS			DIBUJO No. AMH1S001		
F															
E	N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD											
	1	AMH1SF001	BASE DEL ENGRANE	1											
	2	AMH1SF002	MICROMOTOR 210RPM 150:1	1											
	3	AMH1SF003	TORNILLO SIN FIN 3HILOS- PASO 2	1											
	5	AMH1SF005	ENGRANE M= 2, N=12	1											
	6	AMH1SF006	PERNO 6X17	1											
D	7	AMH1SF007	PERNO 2X16	2											
	8	AMH1SF008	DISTAL DE DEDO	1											
	9	AMH1SF009	MEDIAL DEL DEDO	1											
	10	AMH1SF010	PALANCA TRANSMISIÓN	1											
C	11	AMH1SF011	PROXIMAL DEL DEDO	1											
	12	AMH1SF012	TORNILLO M3X6X5.5	1											
	13	AMH1SF013	TORNILLO M2X6X5.5	1											
B	14	AMH1SF014	PERNO 2X10	1											
A															
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA										DESCRIPCIÓN: SUBENSAMBLAJE DEDO					
DIBUJADO POR: ING. FRANCISCO JAVIER ESPINOSA GARCIA 10/02/19										ESCALA: NA	UTILIZADO EN: MANO ROBOTICA AMH				
REVISADO POR: DR. RICARDO TAPIA HERRERA 20/02/19										REV. 01	HOJA 2 DE 2				
8	7	6	5	4	3	2	1	8	7	6	5	4	3	2	1





MATERIAL: LATÓN

ACOTACIONES: MILIMETROS

DIBUJO No. AMH1SR003

DESCRIPCIÓN: TORNILLO SIN FIN

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

DIBUJADO POR: ING. FRANCISCO JAVIER ESPINOSA GARCIA 10/02/19

REVISADO POR: DR. RICARDO TAPIA HERRERA 20/02/19

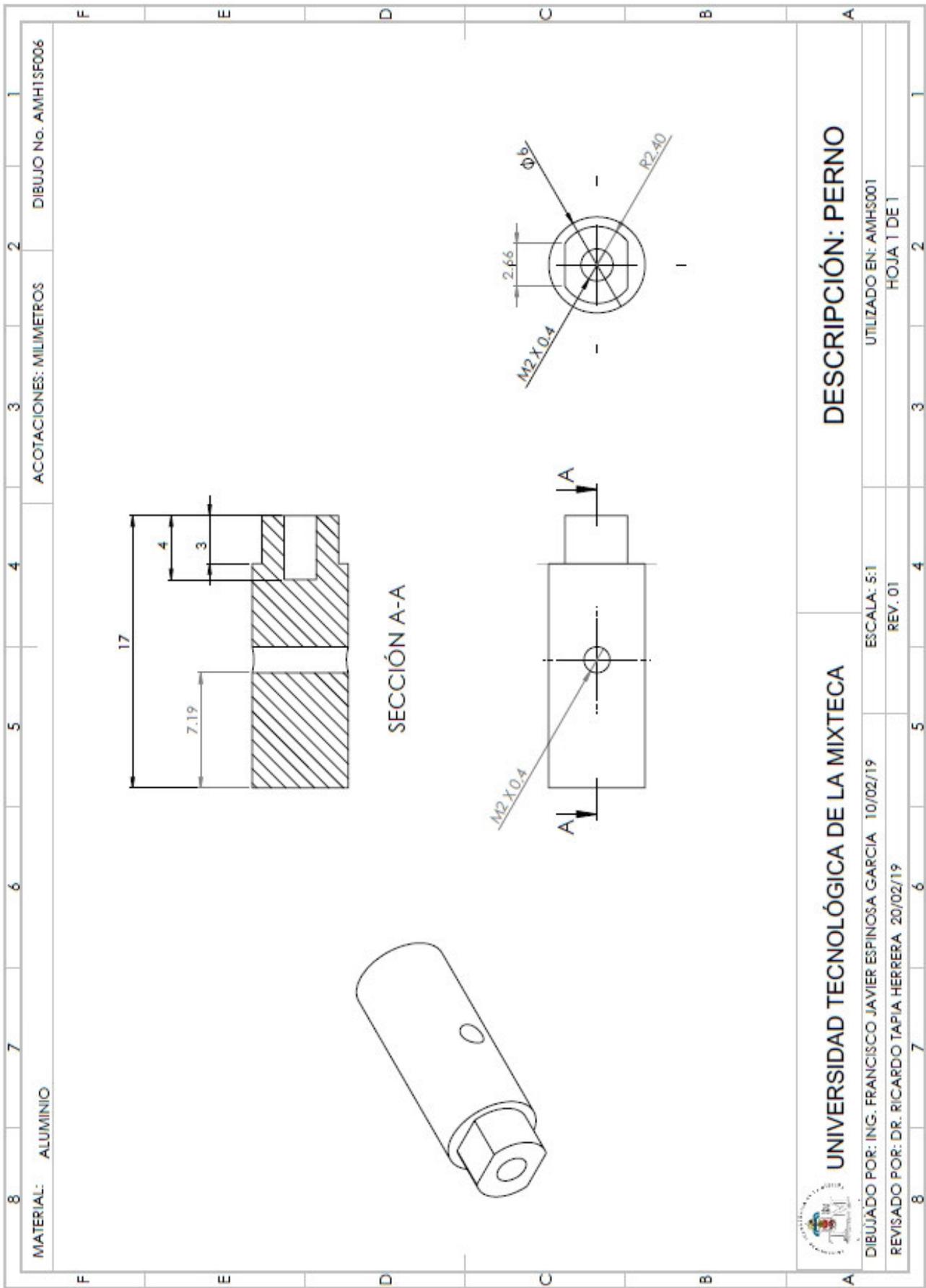
UTILIZADO EN: AMH1S001

HOJA 1 DE 1

ESCALA: 7:1

REV. 01





MATERIAL: ALUMINIO

ACOTACIONES: MILIMETROS

DIBUJO No. AMH1SF006



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

DESCRIPCIÓN: PERNO

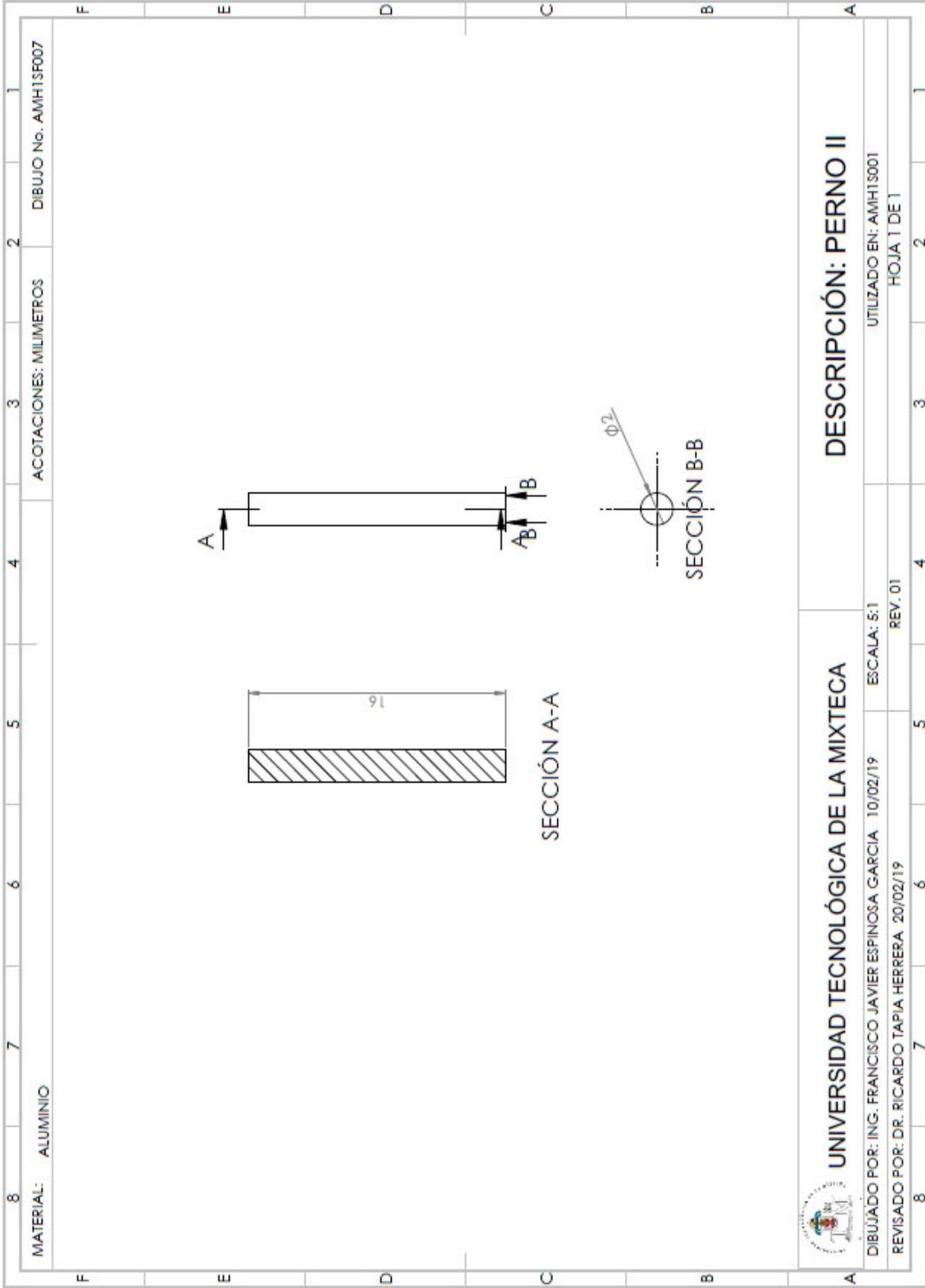
DIBUJADO POR: ING. FRANCISCO JAVIER ESPINOSA GARCIA 10/02/19

UTILIZADO EN: AMH1S001

REVISADO POR: DR. RICARDO TAPIA HERRERA 20/02/19

ESCALA: 5:1

HOJA 1 DE 1



MATERIAL: ALUMINIO

ACOTACIONES: MILIMETROS

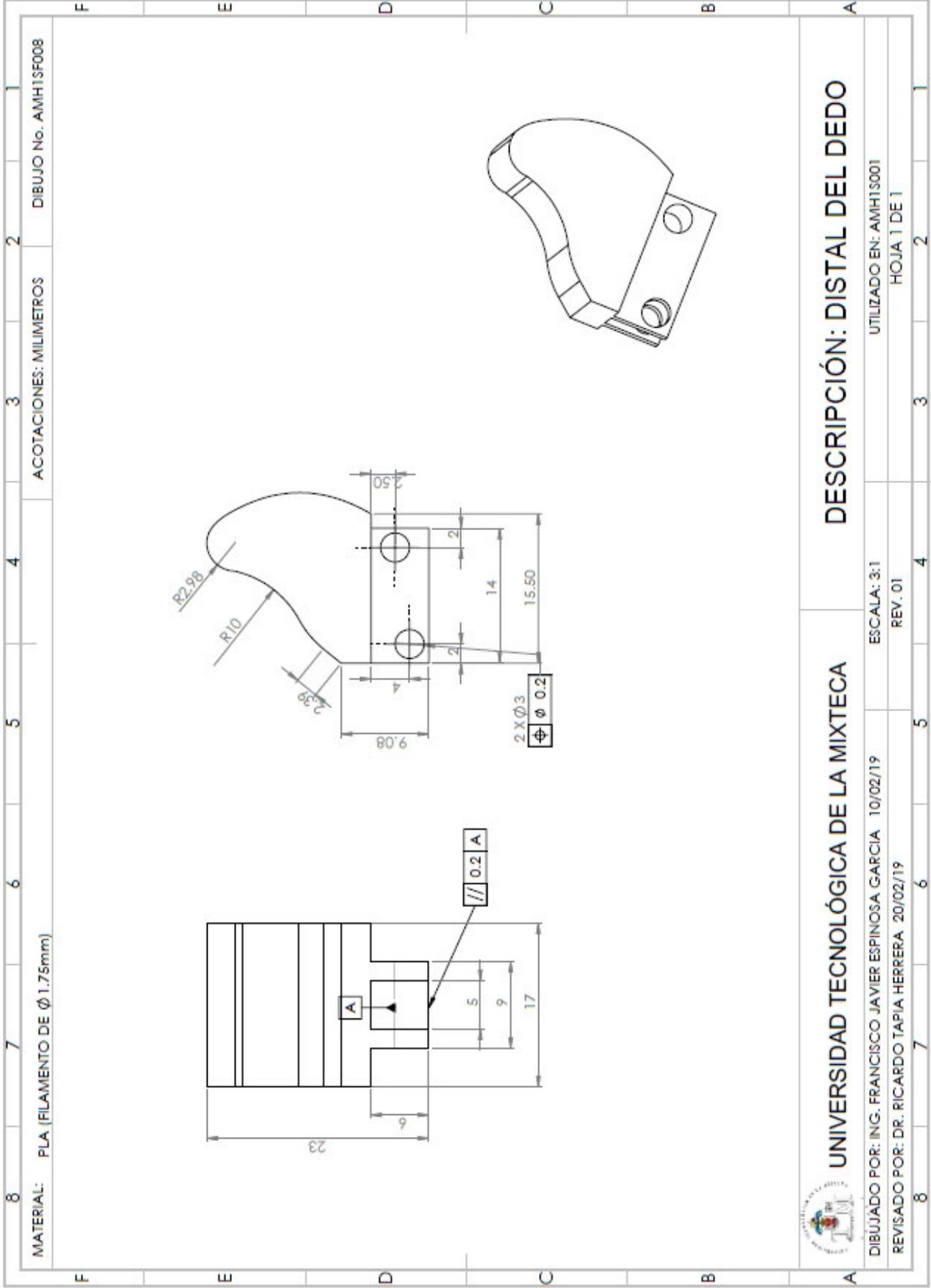
DIBUJO No. AMH1SR007



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

DESCRIPCIÓN: PERNO II

DIBUJADO POR: ING. FRANCISCO JAVIER ESPINOSA GARCIA	10/02/19	ESCALA: 5:1	UTILIZADO EN: AMH1S001
REVISADO POR: DR. RICARDO TAPIA HERRERA	20/02/19	REV. 01	HOJA 1 DE 1



MATERIAL: PLA (FILAMENTO DE Ø 1.75mm)

ACOTACIONES: MILIMETROS

DIBUJO No. AMH1SF008



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

DESCRIPCIÓN: DISTAL DEL DEDO

DIBUJADO POR: ING. FRANCISCO JAVIER ESPINOSA GARCIA 10/02/19
 REVISADO POR: DR. RICARDO TAPIA HERRERA 20/02/19

ESCALA: 3:1
 REV. 01

UTILIZADO EN: AMH1S001
 HOJA 1 DE 1

8

7

6

5

4

3

2

1

F

E

D

C

B

A

F

E

D

C

B

A

8

7

6

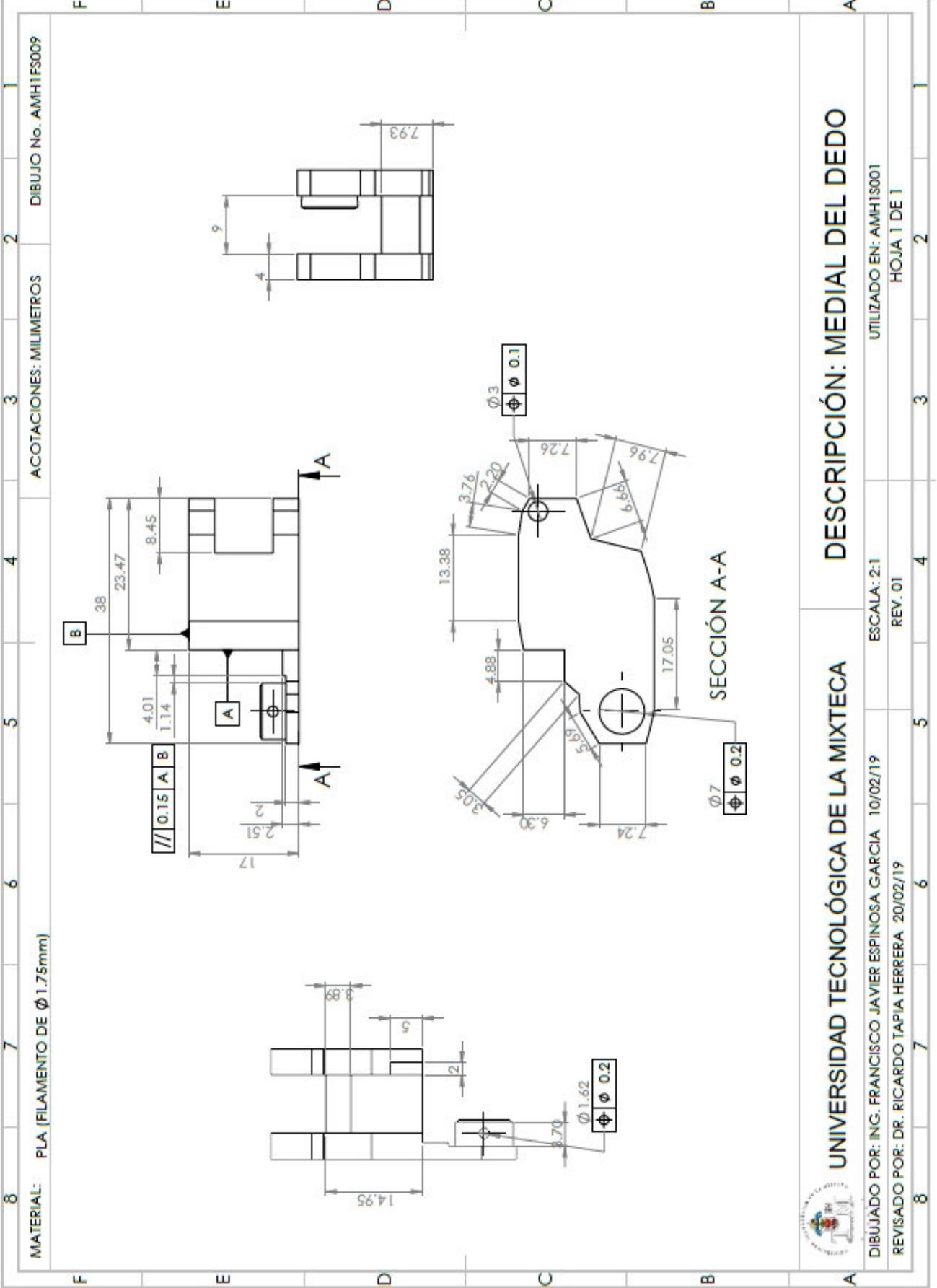
5

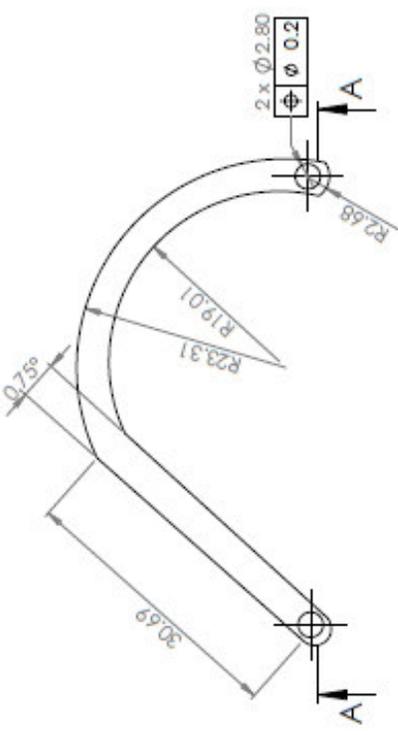
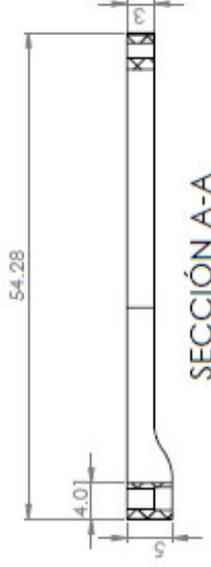
4

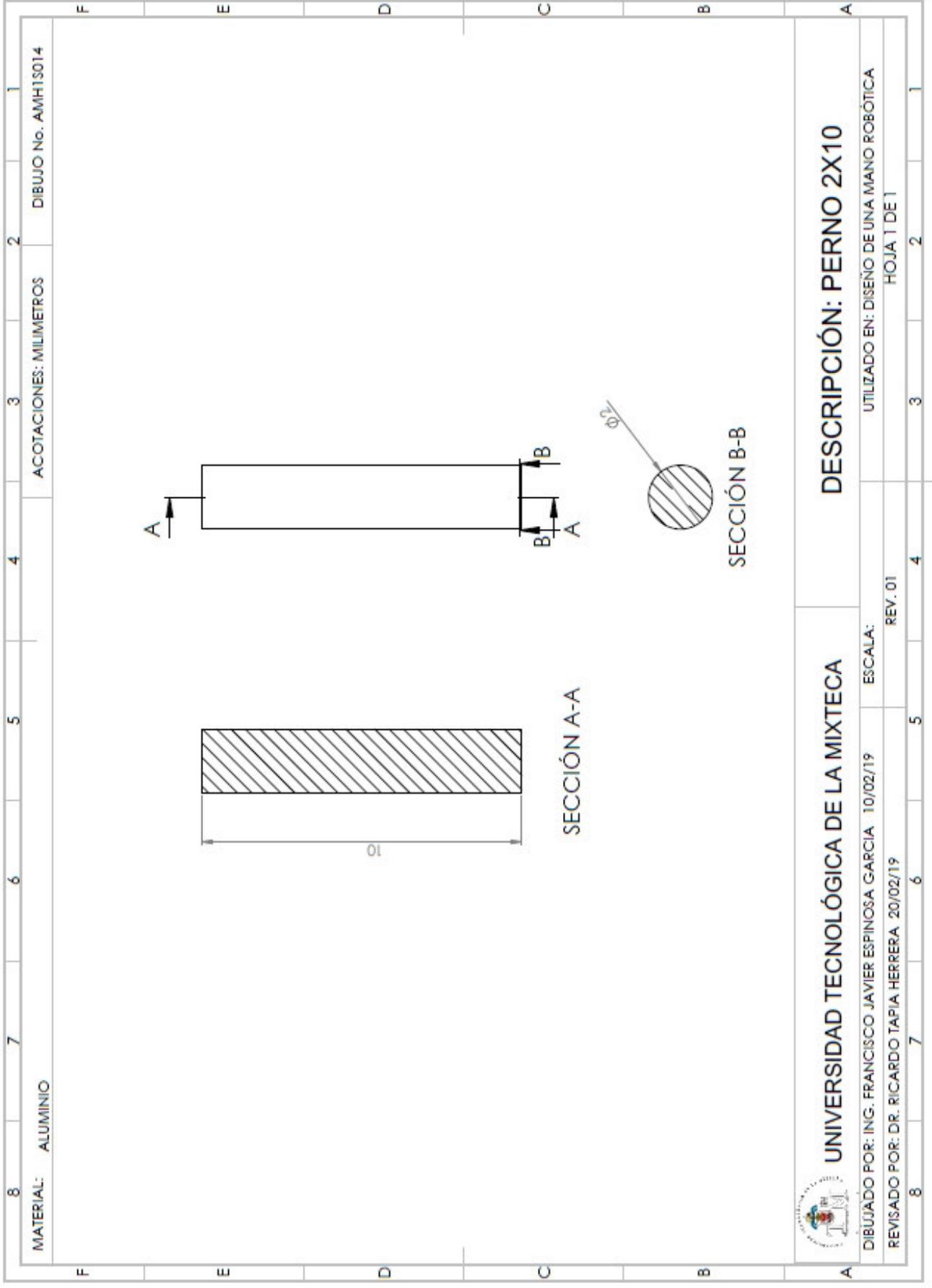
3

2

1



8	7	6	5	4	3	2	1	
F	E	D	C	B				A
MATERIAL: PLA (FILAMENTO DE $\phi 1.75\text{mm}$)		ACOTACIONES: MILIMETROS						DIBUJO No. AMH1S010
								
		SECCIÓN A-A						
		UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA			DESCRIPCIÓN: PALANCA DE TRANSMISIÓN			
DIBUJADO POR: ING. FRANCISCO JAVIER ESPINOSA GARCIA 10/02/19		ESCALA: 2:1		UTILIZADO EN: AMH1S001				
REVISADO POR: DR. RICARDO TAPIA HERRERA 20/02/19		REV. 01		HOJA 1 DE 1				
8	7	6	5	4	3	2	1	



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

DESCRIPCIÓN: PERNO 2X10

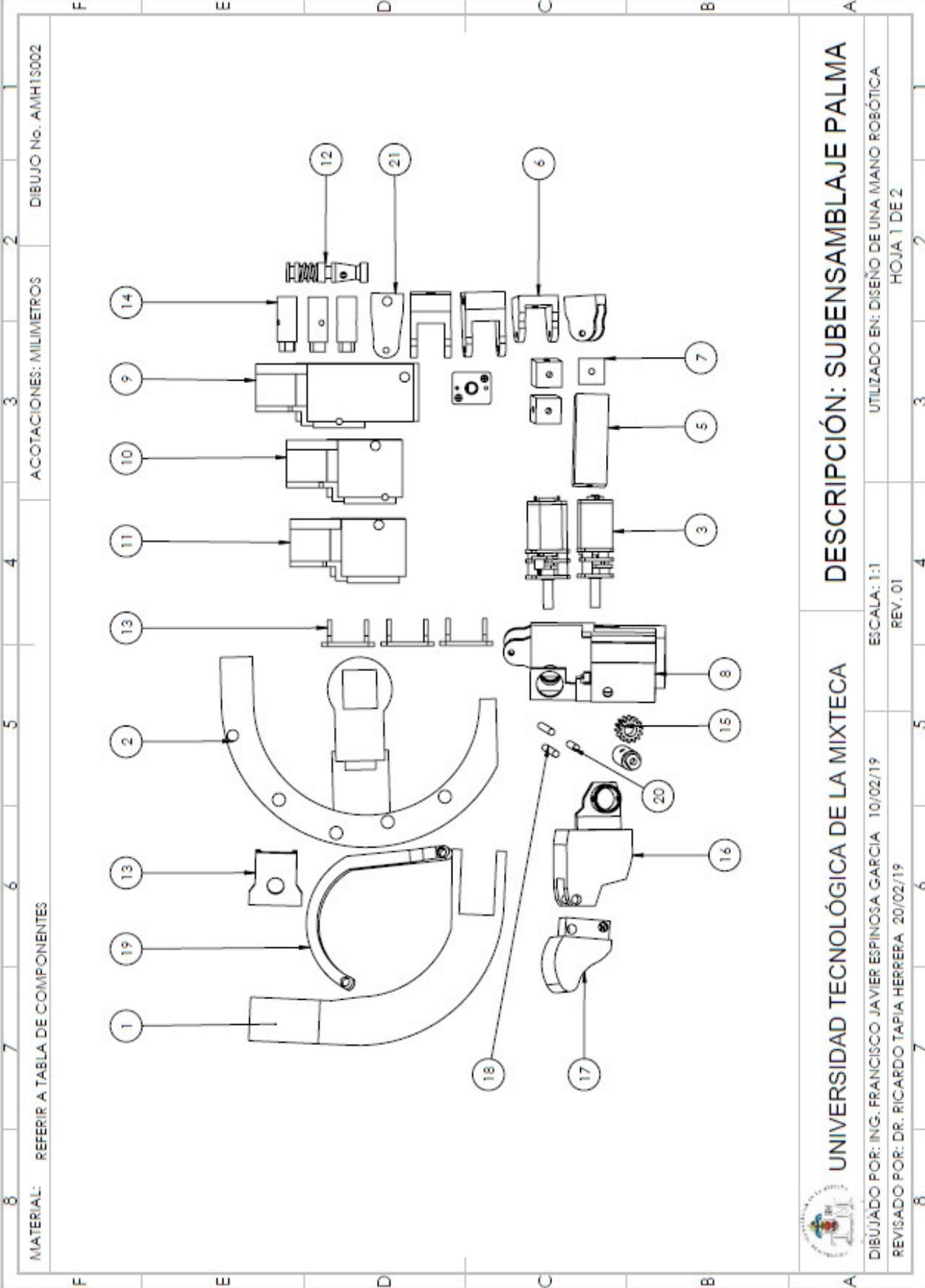
DIBUJADO POR: ING. FRANCISCO JAVIER ESPINOSA GARCIA 10/02/19 ESCALA:

UTILIZADO EN: DISEÑO DE UNA MANO ROBÓTICA

REVISADO POR: DR. RICARDO TAPIA HERRERA 20/02/19

HOJA 1 DE 1





MATERIAL: REFERIR A TABLA DE COMPONENTES

ACOTACIONES: MILIMETROS

DIBUJO No. AMHTS002



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

DESCRIPCIÓN: SUBENSAMBLAJE PALMA

DIBUJADO POR: ING. FRANCISCO JAVIER ESPINOSA GARCIA 10/02/19

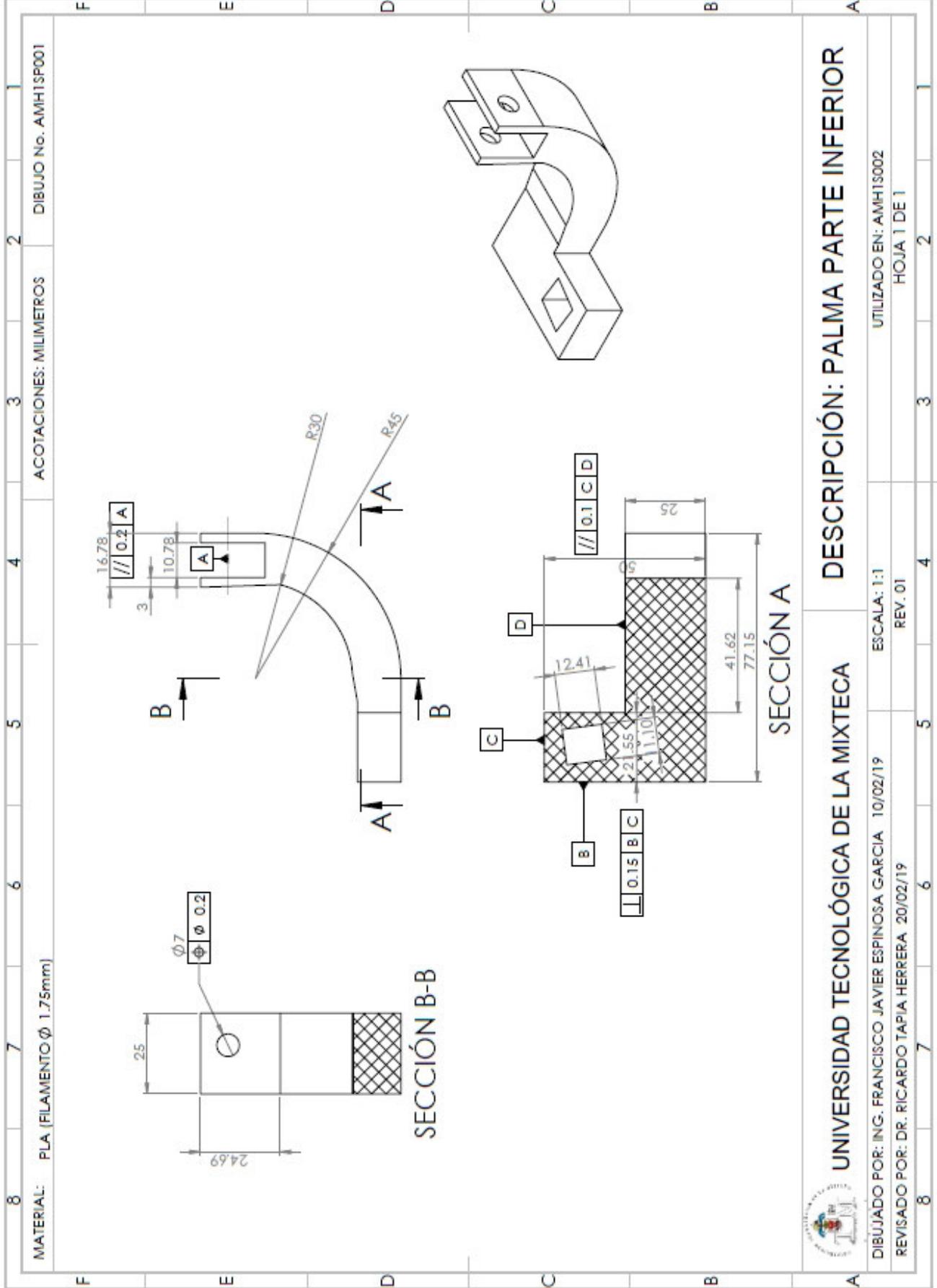
ESCALA: 1:1

UTILIZADO EN: DISEÑO DE UNA MANO ROBÓTICA

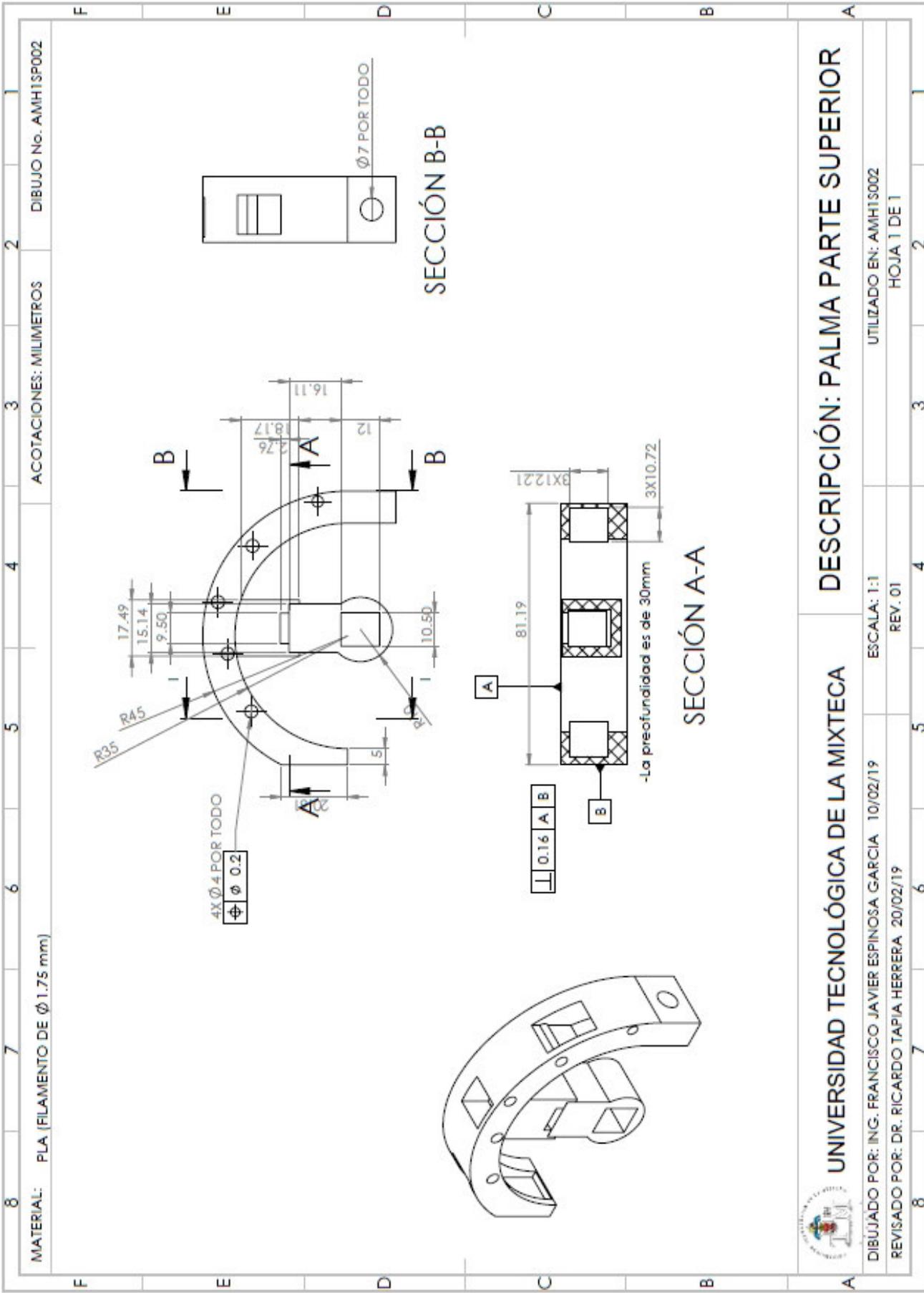
REVISADO POR: DR. RICARDO TAPIA HERRERA 20/02/19

REV. 01

HOJA 1 DE 2



8	7	6	5	4	3	2	1
---	---	---	---	---	---	---	---



MATERIAL: PLA (FILAMENTO DE ϕ 1.75 mm)

ACOTACIONES: MILIMETROS

DIBUJO No. AMH1SP002



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

DESCRIPCIÓN: PALMA PARTE SUPERIOR

DIBUJADO POR: ING. FRANCISCO JAVIER ESPINOSA GARCIA 10/02/19

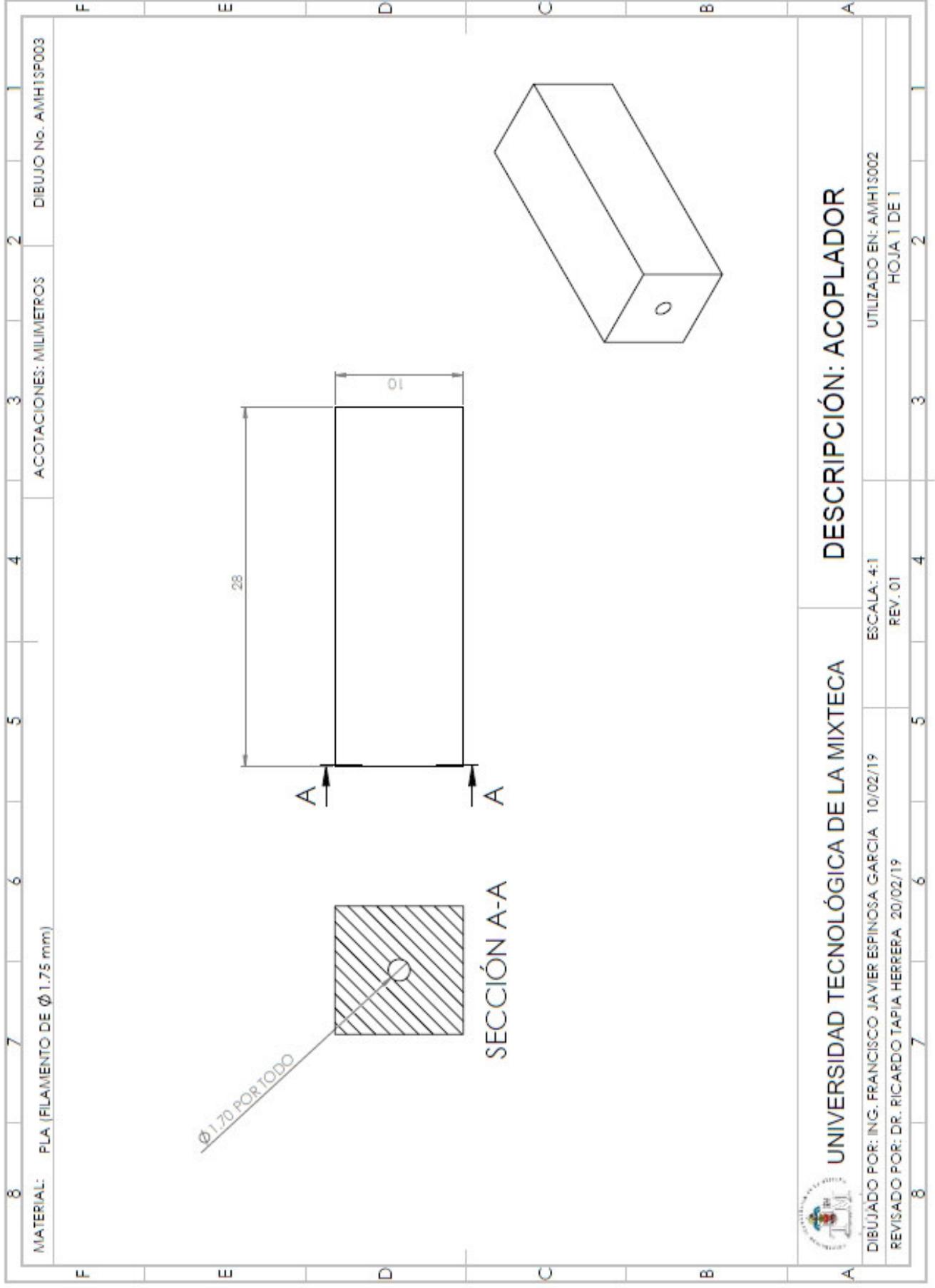
UTILIZADO EN: AMH1S002

REVISADO POR: DR. RICARDO TAPIA HERRERA 20/02/19

HOJA 1 DE 1

ESCALA: 1:1

REV. 01



MATERIAL: PLA (FILAMENTO DE ϕ 1.75 mm)

ACOTACIONES: MILIMETROS

DIBUJO No. AMH1SP003



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

DESCRIPCIÓN: ACOPLADOR

DIBUJADO POR: ING. FRANCISCO JAVIER ESPINOSA GARCIA 10/02/19

ESCALA: 4:1

UTILIZADO EN: AMH1S002

REVISADO POR: DR. RICARDO TAPIA HERRERA 20/02/19

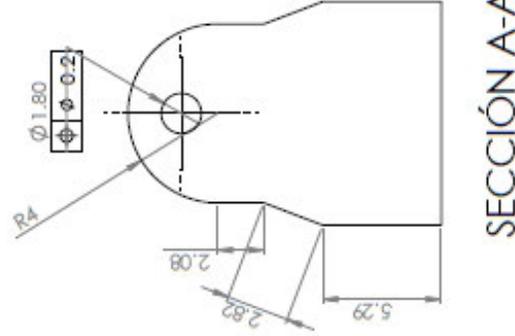
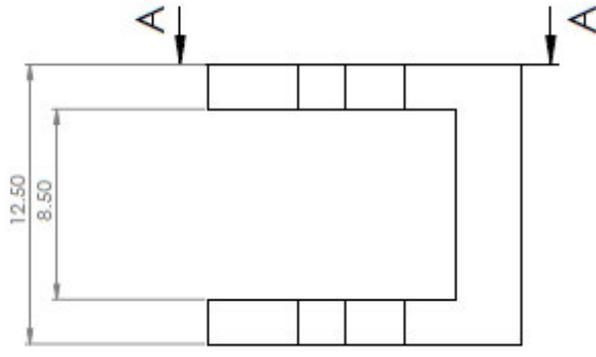
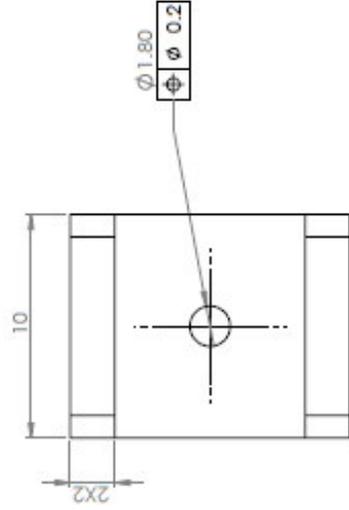
REV. 01

HOJA 1 DE 1

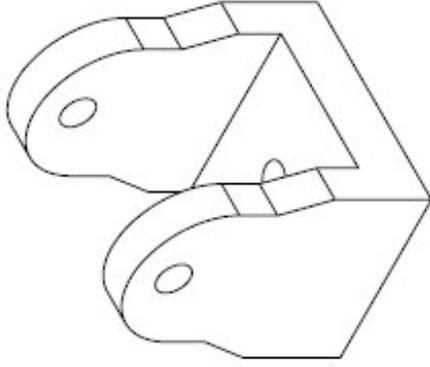
MATERIAL: PLA (FILAMENTO DE ϕ 1.75mm)

ACOTACIONES: MILIMETROS

DIBUJO No. AMH1SP004



SECCIÓN A-A



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

DESCRIPCIÓN: JUNTA CORTA

DIBUJADO POR: ING. FRANCISCO JAVIER ESPINOSA GARCIA 10/02/19

UTILIZADO EN: AMH1S002

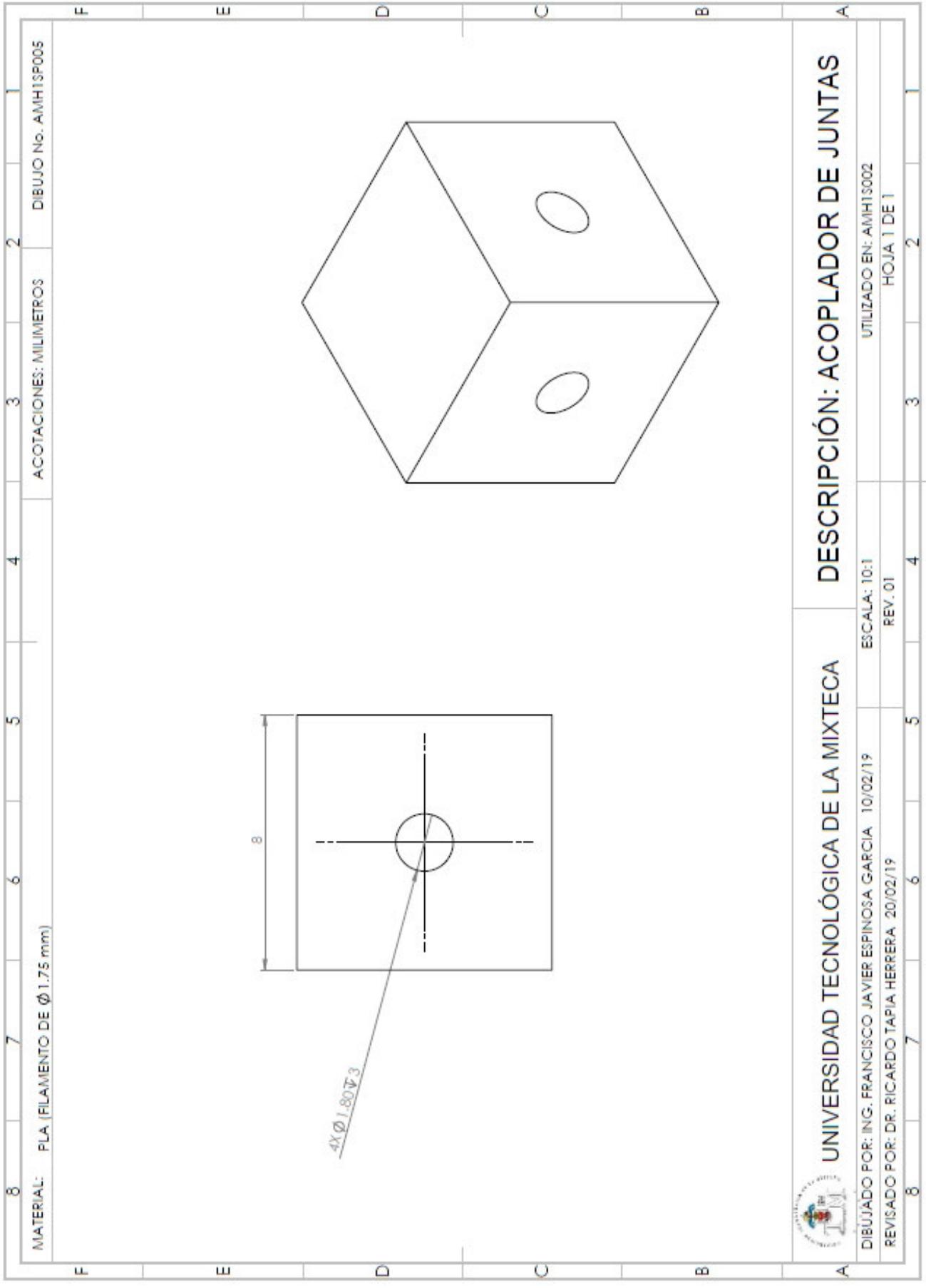
REVISADO POR: DR. RICARDO TAPIA HERRERA 20/02/19

HOJA 1 DE 1

ESCALA: 5:1

REV. 01

8 7 6 5 4 3 2 1



MATERIAL: PLA (FILAMENTO DE Ø 1.75 mm)

ACOTACIONES: MILIMETROS

DIBUJO No. AMH1S005



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

DESCRIPCIÓN: ACOPLADOR DE JUNTAS

DIBUJADO POR: ING. FRANCISCO JAVIER ESPINOSA GARCIA 10/02/19

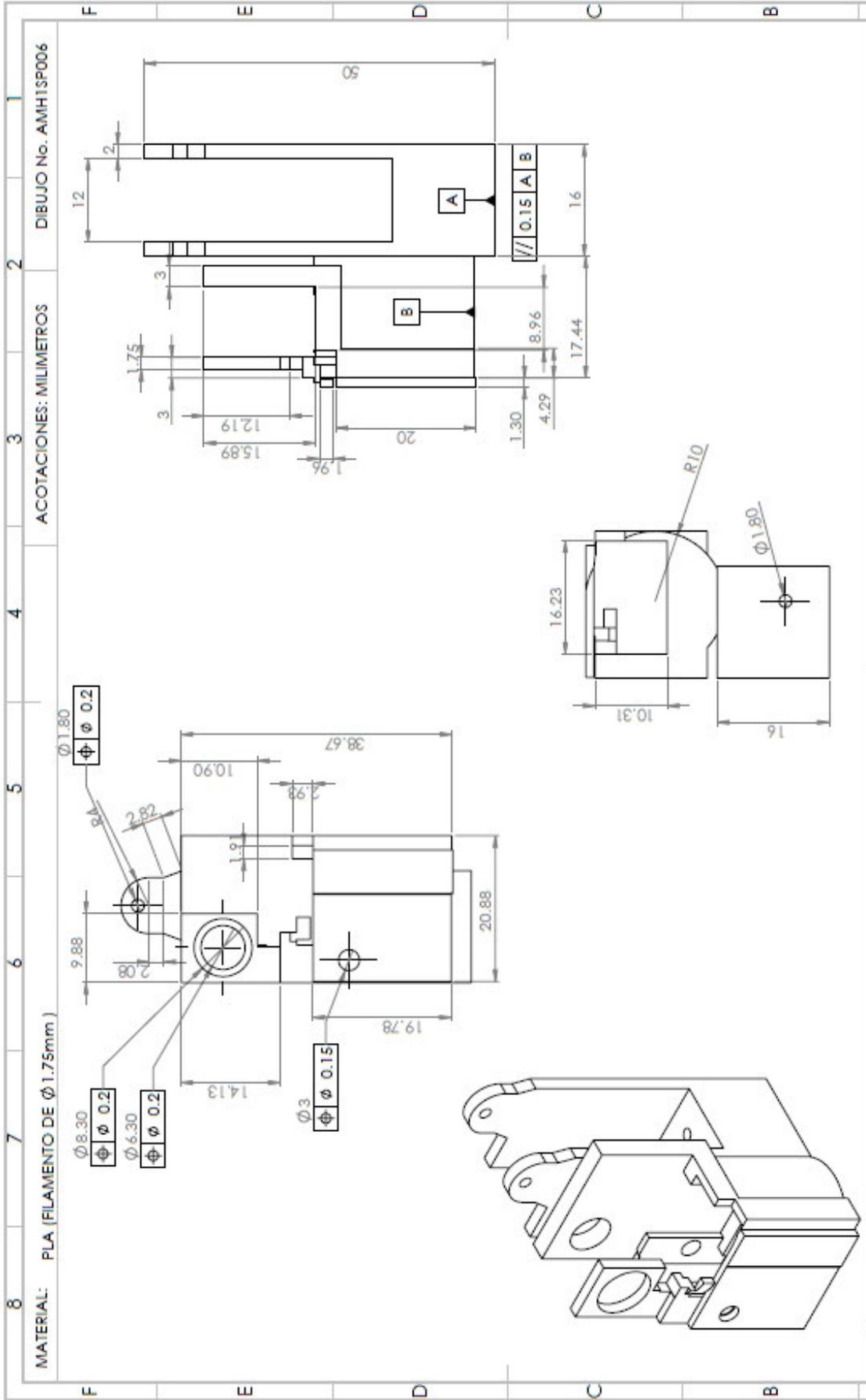
ESCALA: 10:1

UTILIZADO EN: AMH1S002

REVISADO POR: DR. RICARDO TAPIA HERRERA 20/02/19

REV. 01

HOJA 1 DE 1



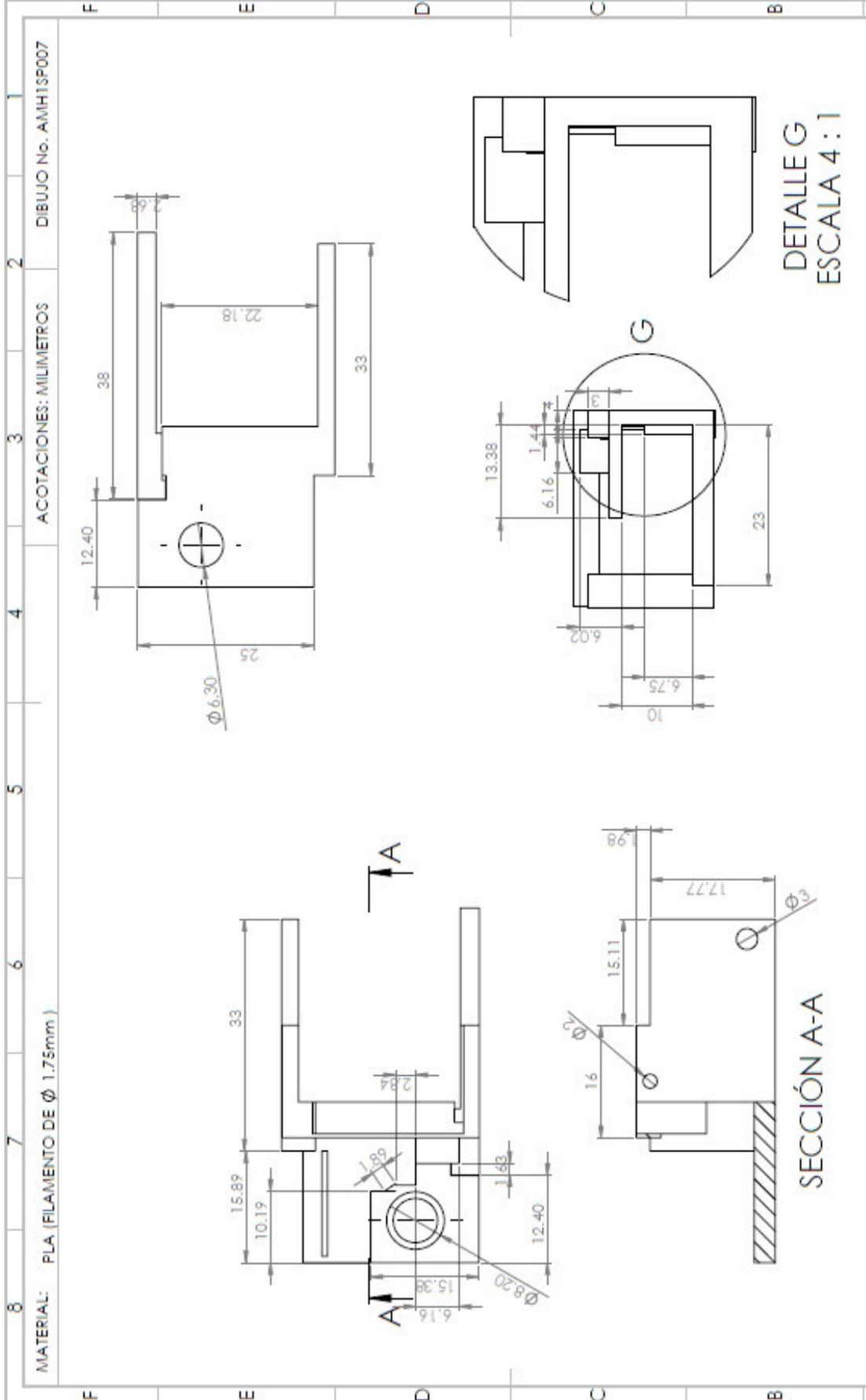
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

DESCRIPCIÓN: BASE PARA PULGAR

DIBUJADO POR: ING. FRANCISCO JAVIER ESPINOSA GARCIA 10/02/19
 REVISADO POR: DR. RICARDO TAPIA HERRERA 20/02/19

ESCALA: 2:1
 REV. 01

UTILIZADO EN: AMH1S002
 HOJA 1 DE 1



DETALLE G
ESCALA 4:1

DIBUJO No. AMH1SP007

ACOTACIONES: MILIMETROS

MATERIAL: PLA (FILAMENTO DE ϕ 1.75mm)

DESCRIPCIÓN: BASE PARA ANULAR



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

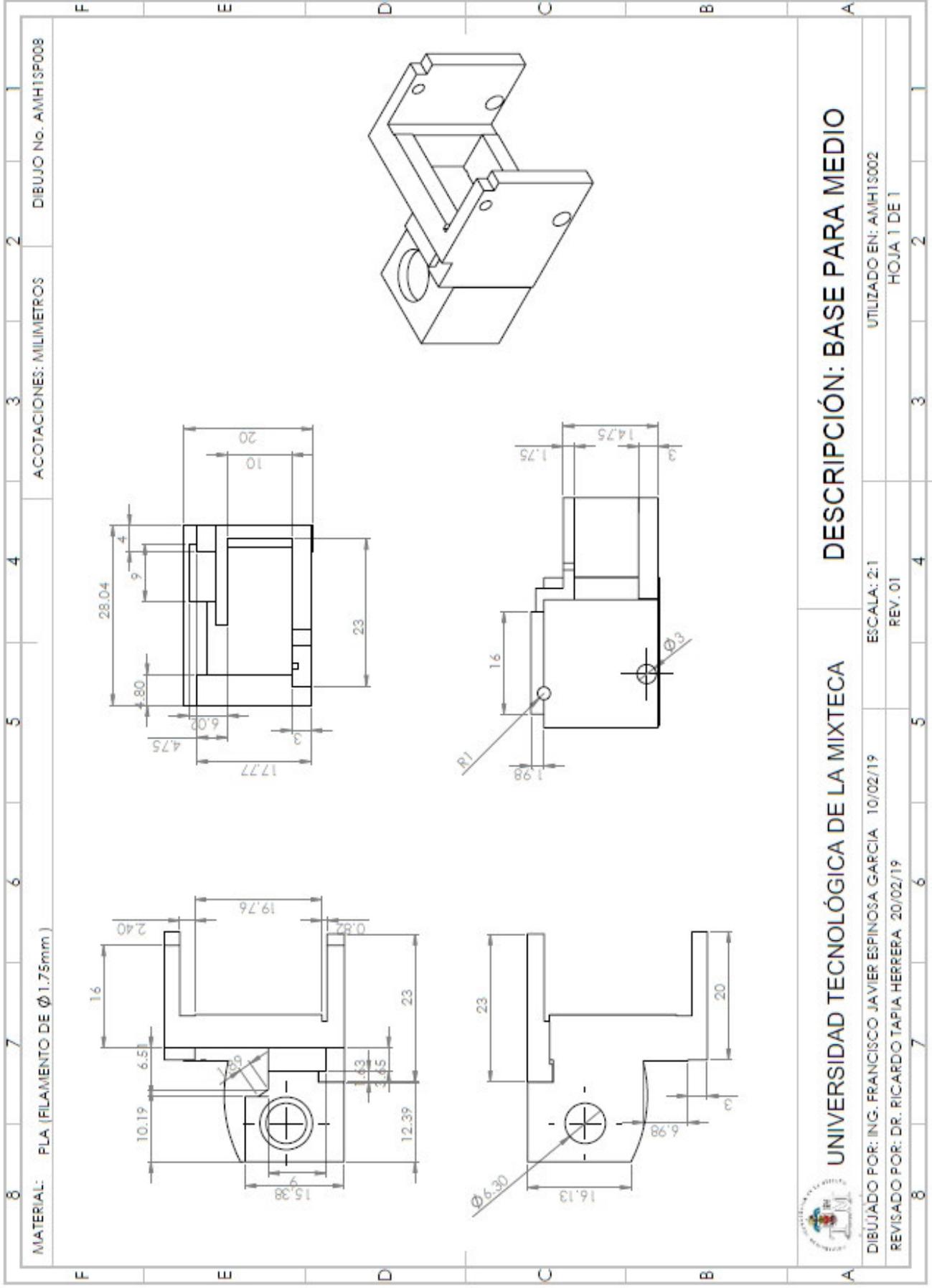
ESCALA: 4:1
REV. 01

DIBUJADO POR: ING. FRANCISCO JAVIER ESPINOSA GARCIA 10/02/19
REVISADO POR: DR. RICARDO TAPIA HERRERA 20/02/19

UTILIZADO EN: AMH1S002
HOJA 1 DE 1

1 2 3 4 5 6 7 8

F E D C B A



MATERIAL: PLA (FILAMENTO DE $\phi 1.75\text{mm}$)

ACOTACIONES: MILIMETROS

DIBUJO No. AMHISP008



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

DESCRIPCIÓN: BASE PARA MEDIO

DIBUJADO POR: ING. FRANCISCO JAVIER ESPINOSA GARCIA 10/02/19

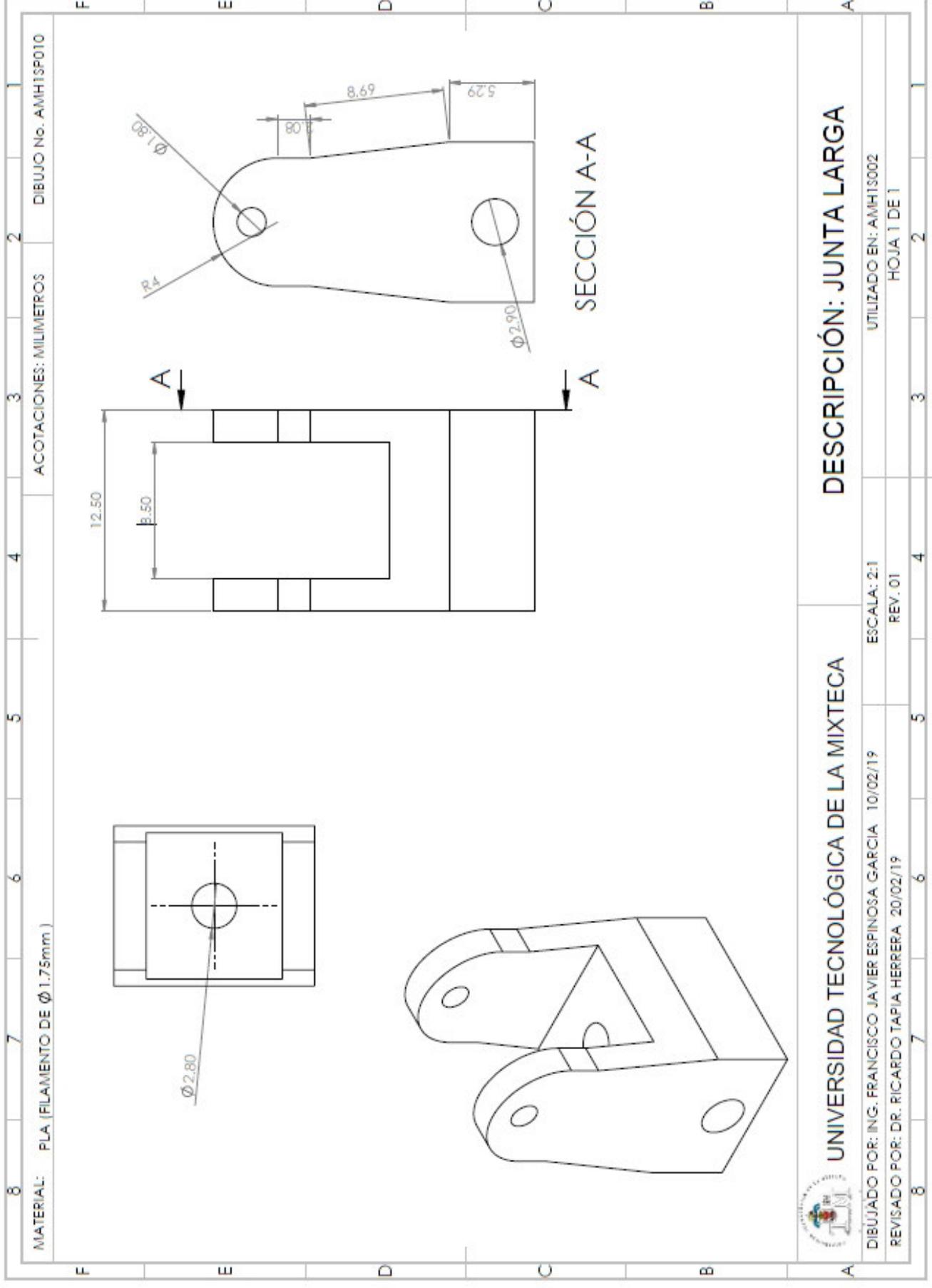
ESCALA: 2:1

REVISADO POR: DR. RICARDO TAPIA HERRERA 20/02/19

REV. 01

UTILIZADO EN: AMHISP002

HOJA 1 DE 1



DIBUJO No. AMH13P010

ACOTACIONES: MILIMETROS

DESCRIPCIÓN: JUNTA LARGA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA



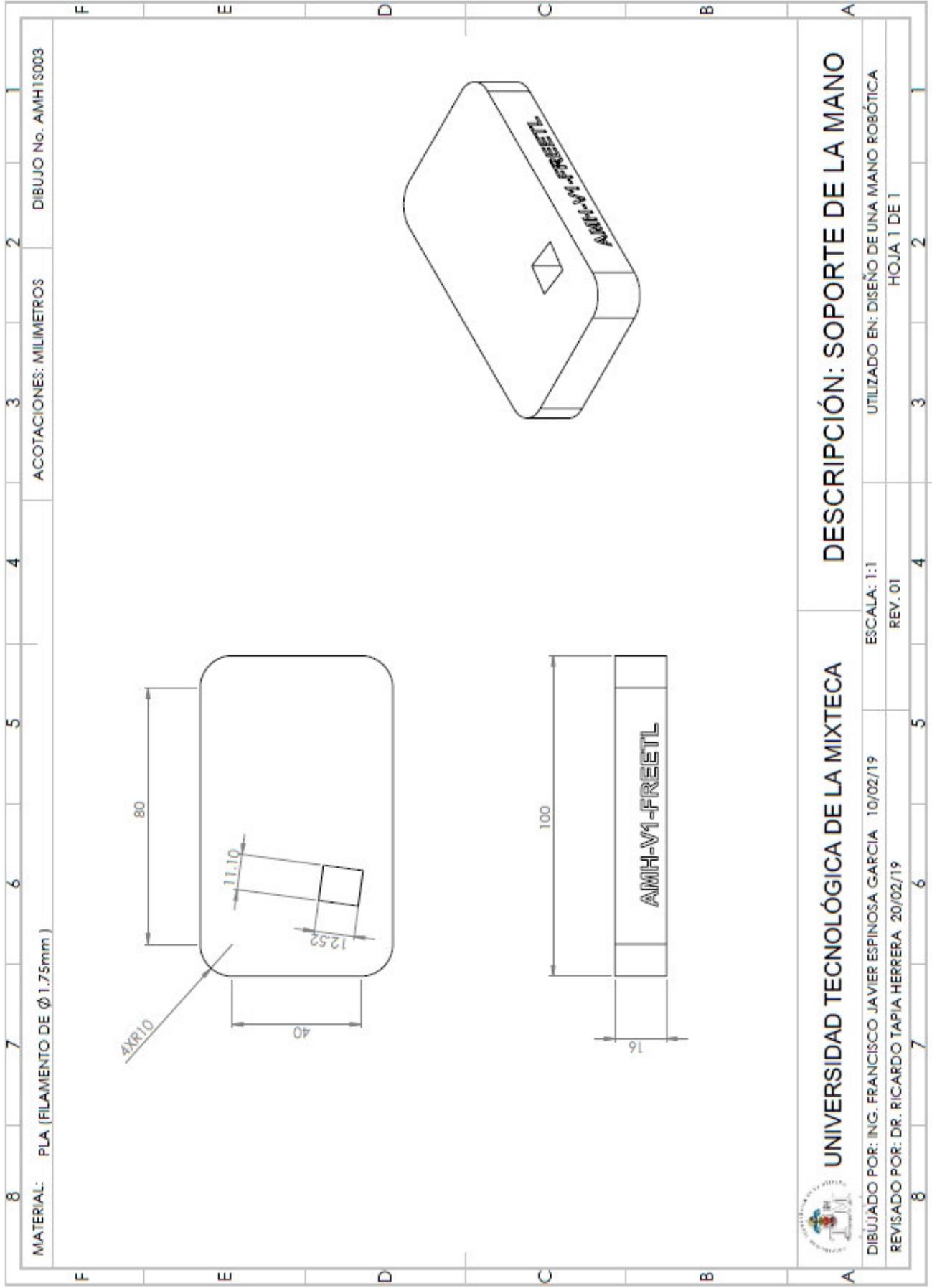
ESCALA: 2:1

DIBUJADO POR: ING. FRANCISCO JAVIER ESPINOSA GARCIA 10/02/19

REVISADO POR: DR. RICARDO TAPIA HERRERA 20/02/19

UTILIZADO EN: AMH13002

HOJA 1 DE 1



MATERIAL: PLA (FILAMENTO DE ϕ 1.75mm)

ACOTACIONES: MILIMETROS

DIBUJO No. AMH1S003



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

DESCRIPCIÓN: SOPORTE DE LA MANO

DIBUJADO POR: ING. FRANCISCO JAVIER ESPINOSA GARCIA 10/02/19

ESCALA: 1:1

UTILIZADO EN: DISEÑO DE UNA MANO ROBÓTICA

REVISADO POR: DR. RICARDO TAPIA HERRERA 20/02/19

REV. 01

HOJA 1 DE 1

8

7

6

5

4

3

2

1

8

7

6

5

4

3

2

1

F

E

D

C

B

A

F

E

D

C

B

A

Apéndice D

Publicaciones derivadas

International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region (RAAD), del 6 al 8 de Junio del 2018, Patras, Grecia.



A Study of Feasibility for a Design of a Metamorphic Artificial Hand

F. J. Espinosa-Garcia¹, Giuseppe Carbone², M. Ceccarelli³(✉),
D. Cafolla², M. Arias-Montiel⁴, and E. Lugo-Gonzalez⁴

¹ Postgraduate Division, Technological University of the Mixteca, Acatlima,
69000 Huajuapán de León, Mexico
fjeg_1234@hotmail.com

² LARM: Laboratory of Robotics and Mechatronics, University of Cassino and
South Latium, Via dell'Università, 03043 Cassino, Italy

³ LARM: Laboratory of Robotics and Mechatronics, University of Cassino and
South Latium, Via G. Di Biasio 43, 03043 Cassino, Italy
marco.ceccarelli@unicas.it

⁴ Institute of Electronics and Mechatronics, Technological University of the
Mixteca, Acatlima, 69000 Huajuapán de León, Mexico
mam@mixteco.utm.mx

Abstract. This paper proposes a design concept for a novel robotic hand with a metamorphic palm mechanism. A design inspiration is elaborated from laboratory experiences on human grasping. The proposed design is presented with concepts and kinematic design that is based on linkages. A design model has been implemented in SolidWorks environment for a performance evaluation. Results are presented to show the feasibility and efficiency of the proposed solution.

Keywords: Grasping · Robotic hands · Metamorphic mechanism
Design · Analysis

1 Introduction

The hand is considered a highly functional component to manipulate and interact with the environment. In general, to different approaches are proposed to develop anthropomorphic finger mechanisms namely, complex mechanisms with a reduced number of degrees of freedom (DOFs) and solutions with several DOFs and actuators in combination with simple kinematic mechanisms [1].

Design of robotic hands have focused most attention at the design of fingers while the palm is often neglected. Currently the hands have a palm with a rigid and fixed structure. However, a human hand strongly benefits of its foldable and flexible palm to achieve effective and versatile grasping of objects, as reported for example in [2, 3]. This suggests to investigate the design of a movable palm to improve the versatility and grasping effectiveness of a robotic hand. However, this should not significantly increase the design and operation complexity and should be adaptable to the grasping conditions as function of object size and shape. These goals can be achieved with mechanisms with reduced number of degrees of freedom (DOFs). In addition the implementation of

metamorphic/underactuated mechanisms can be quite promising to achieve a feasible solution. A mechanism is defined metamorphic when its topology and degrees of freedom are variable as function of the configuration [4]. Similarly, underactuated mechanisms have less actuators than active DOFs leading to useful features of adaptability to object sizes and shapes [5]. Literature shows items of interesting preliminary works on metamorphic mechanisms. For example, in 1998 Jian S. Dai and Rees Jones introduced the concept of metamorphic mechanism which was based on the idea of reconfiguration capability of a mechanism [6]. Liu and Yang studied the essence and characteristics of metamorphic mechanisms and in 2004, they proposed three ways to achieve metamorphic structures: variable components, adjacent relations and kinematic joints [7]. A new methodology for synthesis and configuration design of metamorphic mechanisms is proposed in 2008 that with a focus on biological modeling and genetic evolution [8]. Previous developments of reference can be considered the following designs: Federica hand [9], LARM hand [10], reconfigurable palm [11], hand using a continuum differential mechanism [12], a reconfigurable three-finger robotic gripper [13] and underactuated LARM finger [5], just to mention significant examples.

In this paper, the design of a new metamorphic artificial hand is proposed for LARM Hand as focused on easy operation and anthropomorphic grasp.

2 Grasping Features

As first step for designing a novel robotic hand, we have investigated main grasping features and design requirements by studying the influence of different aspects such as grasping phases, object sizes and shapes in performing a manipulation such as proposed in [14]. A preliminary activity consisted in experimental tests of the grasping behavior by a human hand. Then, experimental tests have been carried out with a robotic hand for comparison purposes.

2.1 Human Grasping

In order to validate experimentally a new mechanical design, human grasp tests are considered. The aim is get the forces and angles during grasping. Markers have been installed on the joints of the index finger and thumb as shown in Fig. 1. In addition, five sensors have been installed on the fingertips to measure the applied forces.

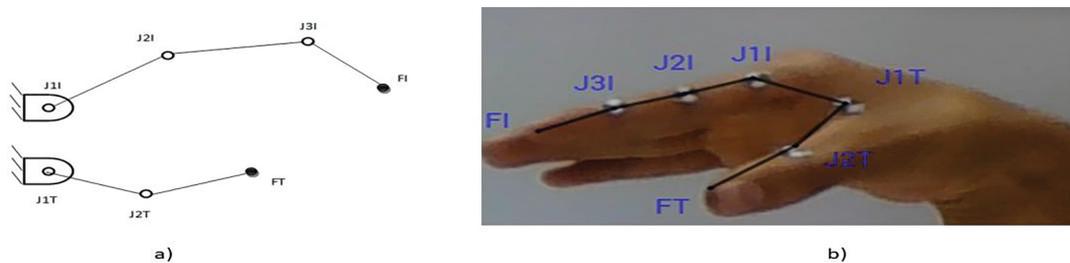


Fig. 1. Schemes of the two-finger grasping: (a) Kinematic scheme, (b) Markers on human hand

Tests have been divided in three phases namely; approaching motion, stable grasp, and lifting the object. Test using a piece of wood is shown in Fig. 2 and results are shown in Fig. 3.

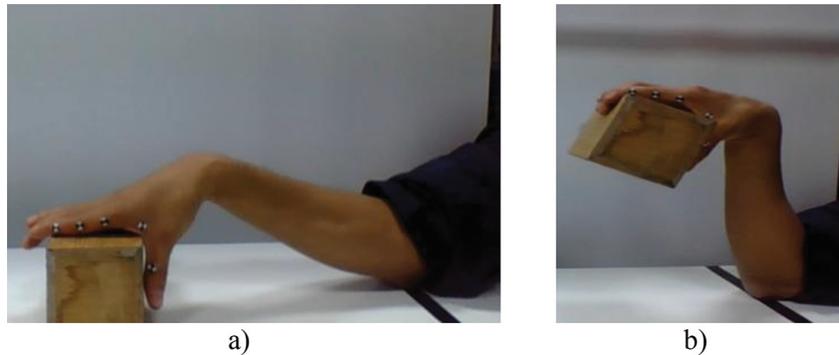


Fig. 2. Test phases: (a) Stable grasp, (b) Lifting object.

Figure 3(a) presents the results with the angles of the joints of index, palm and thumb. Comparing the results, it can be seen that the values of J1I, J2I and J2T decrease while the values of J1T and J3I increase. Results can be interpreted as J1I, J2I and J2T decrease because the index finger needs to adapt to the shape of the object. On the other hand, the J1T and J3I increase because they need to open the palm for grasping adequately the object in order to lift it. From Fig. 3(b) maximum grasping force has been measured about 17.0N by middle finger and the smallest value is 8.0N.

2.2 LARM Hand

LARM IV prototype hand has been designed and built at LARM in Cassino Italy as evolution of LARM, [10]. This is shown in Fig. 4.

LARM hand IV is 1.2 times larger than a human hand, Its design has been focused on low-cost and easy operation. This hand has three fingers (1 DOF per finger) which together with the palm are made of aluminum and also the palm has a plastic cover (Fig. 4(a)). The actuation system consists of three DC motors and the control system has been developed to be implemented una PLC [10, 15]. Each finger has a piezoresistive sensor to get grasping force mesures.

The LARM hand was used for grasping experiences. The aim is to get the maximum and minimum force during grasps with different kind of objects and to observe how the fingers fit the shape of these objects. FSR 400 sensor was used to measure force; to view the results, labview software has been implemented and the NI 6009 card was used as an interface between them.

A test using a plastic bottle is shown in Fig. 5. Acquired forces at finger and palm are shown in Fig. 6. Figure 6 illustrates the grasping force of finger 1 and the palm during the experiment with a plastic bottle. The graphics show some periods where there are not measurements. This is due to the design of the hand and the movement of the fingers because the object moves during the grasping. On the other hand, when the

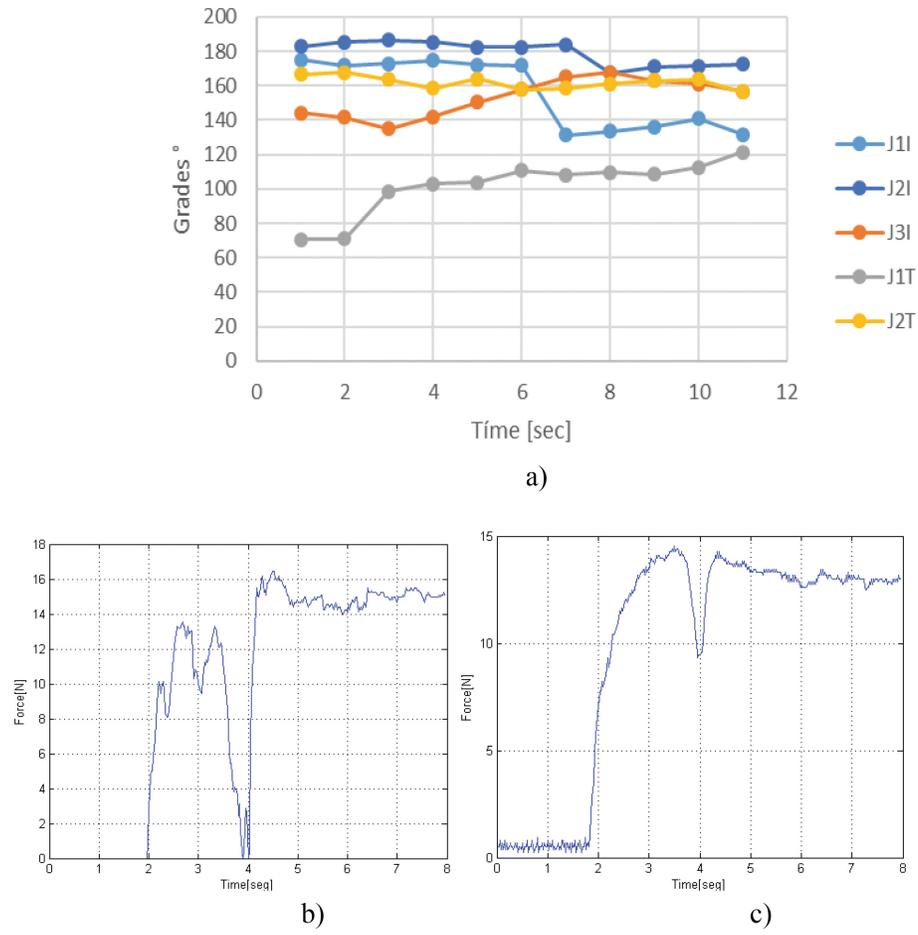


Fig. 3. Acquired results of test with human grasping in Fig. 2: (a) Joint finger angles; (b) Grasping forces index; (c) Grasping forces middle.

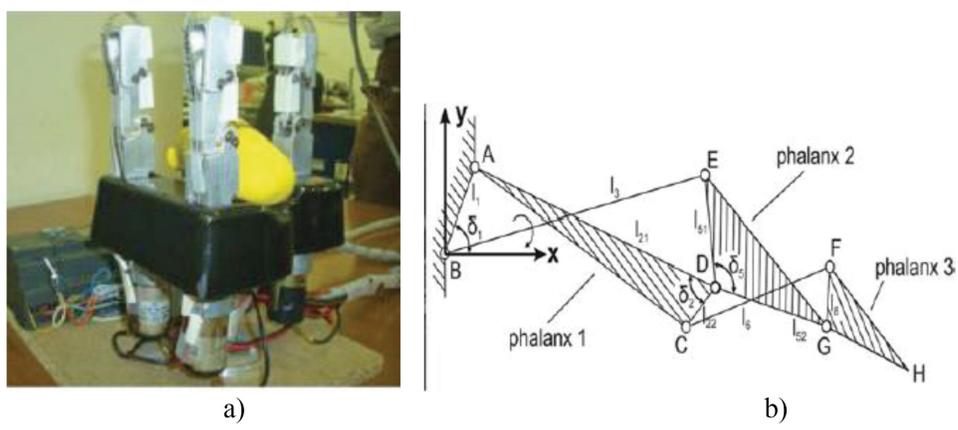


Fig. 4. LARM hand: (a) Prototype of version IV; (b) A scheme of finger mechanism [10].

force is applied by the fingers the weight of the object is concentrated on the palm. Consequently, force of palm is greater than the fingers. The maximum value force is

4N and the minimum applied force is 0.8N. These values are suitable for grasping the object and preventing its deformation.

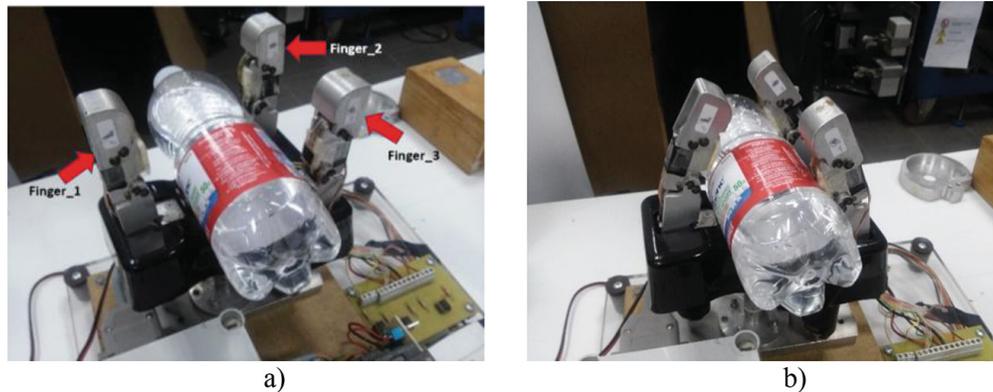


Fig. 5. A grasping test with LARM hand: (a) Fingers open, (b) Gripping a plastic bottle.

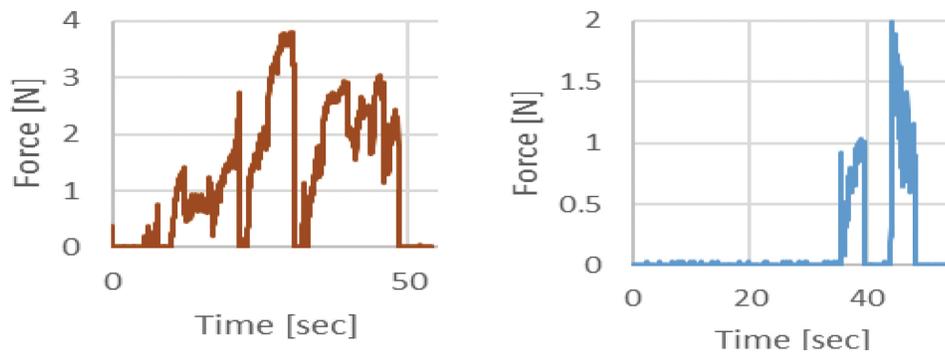


Fig. 6. Acquired forces at LARM hand for test in Fig. 5.

3 Requirements for Metamorphic Mechanism

Based on results from tests by using LARM hand and human hand, new features can be proposed for a new mechanism design of robotic hand. The following features for the robotic hand that will be incorporated into the proposed design have been prioritized as follows:

- The hand must have four fingers (thumb, index, middle and ring) because it is enough for a good and stable grasping;
- Mechanism of fingers must be underactuated with the aim to get a flexible manipulation and to avoid complex designs;
- Fingers must adapt to the shape of objects for a good grasping;
- Metamorphic palm is expected to improve the grasping;
- Lightweight for easy manipulation.

4 A New Conceptual Design

A kinematic scheme of mechanism proposed is shown in Fig. 7. One can calculate the degrees of freedom of the mechanism as using Gruebler's equation as,

$$M = 3(n - 1) - 2J_p - J_h \quad (1)$$

Where M is number of degrees of freedom, n is the numbers of links, J_p is number of lower kinematic pairs and J_h is the number of higher kinematic pairs.

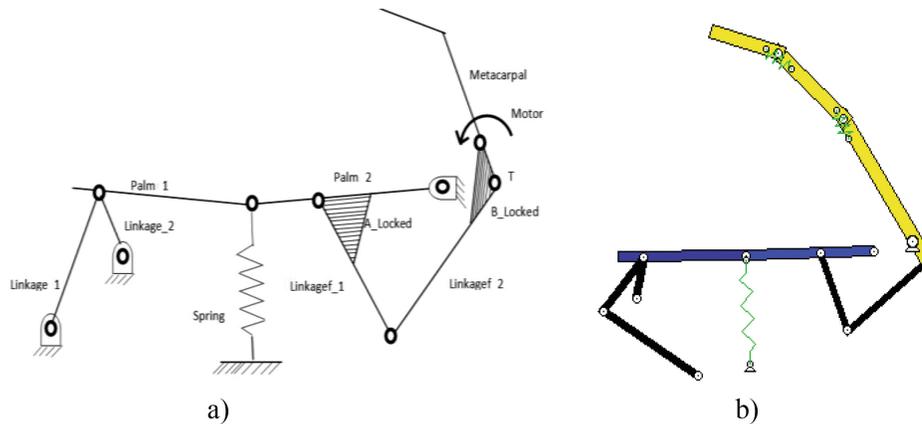


Fig. 7. The proposed mechanism proposed for new LARM hand design (a) a kinematic scheme, (b) a mechanical model.

The mobility with 2 DOFs can be conveniently driven by one active actuator while one spring can be used to move the palm from at its rest configuration. The active DOF can be driven by a motor, which can also move the finger. In this way it is possible to achieve a synchronized motion of palm and finger with a single motor as an under-actuated solution. In order to get metamorphic mechanism two ways can be proposed. The first one is using a cylinder in parallel with the spring to lock-unlock the position of the palm and achieving an independent movement of the finger. Another way is with a motor connecting the palm to the finger. In this way, the relative position of palm and finger can be locked-unlocked to reach different grasping configurations. The advantages are that finger can adapt better to the shape of different objects and in consequence its mobility range increases. Figure 8 shows the phases of grasping: in Fig. 8(a) the initial position of the palm and finger is shown; Fig. 8(b) shows the palm closed slightly with a circular object gripped by the finger. This is enough to maintain a secure grip but the finger does not easily adapt to the object. Finally, Fig. 8(c) shows how finger adapt to the shape of circular object due to movement of the palm. Figure 9 shows results of a numerical simulation, which has been carried out as referring to the grasping simulation in Fig. 8.

Figure 9(a) shows the tension of the spring which supports the palm with a maximum tension of 3N which can be obtained with a standard miniaturized coil spring. Figure 9(b) shows the rotation of linkage_1. With a suitable smooth behaviour with a

maximum range limited to about 6° . Figure 9(c) shows the rotation of palm_1 and the range of movement is about 50° . Rotation of palm_2 is shown in Fig. 9(d) and its range is limited to about 30° . Figure 9(d) shows the rotation of linkagef1 with the range of movement is 20° . Finally, Fig. 9(e) shows the torque value which is 240. 251 Nmm, necessary to move the mechanism.

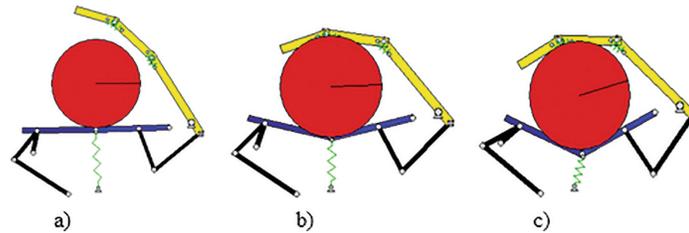


Fig. 8. A mechanism simulation grasping a circular object: (a) Initial Position, (b) Movement of palm, (c) Final position.

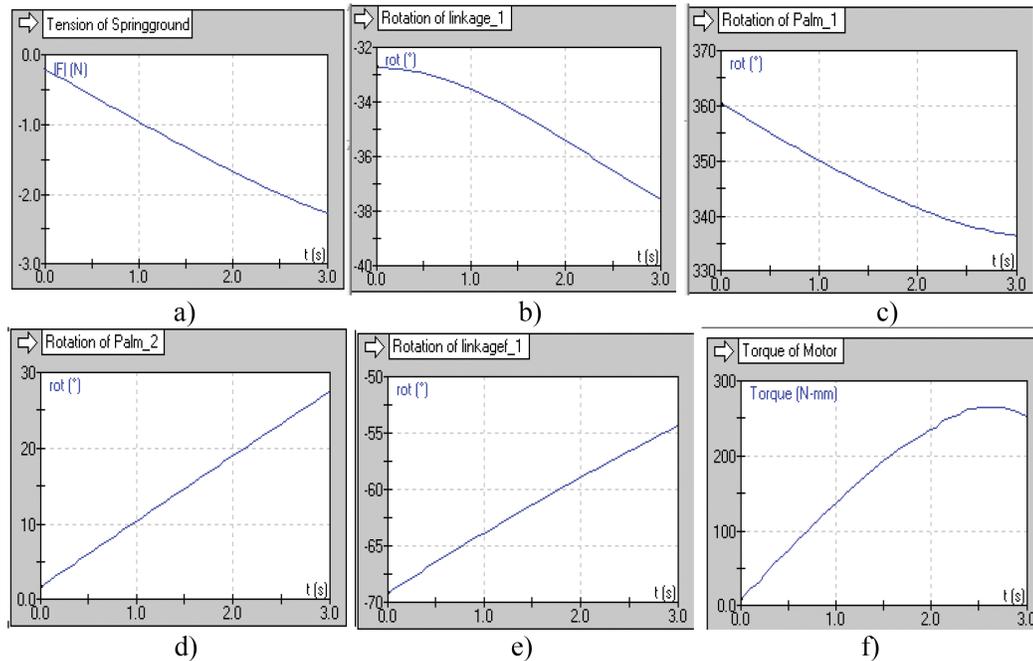


Fig. 9. Completed results for the simulation in Fig. 8: (a) Tension of spring, (b) Rotation of linkage_1, (c) Rotation of palm_1, (d) Rotation of palm_2, (e) Rotation of linkagef_1 and (f) Torque of Motor.

5 Conclusions

In this paper, the design of a new metamorphic mechanism is presented. Attention is devoted to the design of a mechanism to move the palm, which helps the finger to adapt to the shape and size of objects for a proper grasping. Human grasps have been investigated and LARM Hand IV have been tasted in order to understand the relation

between hand, object and movement for grasping. Numerical simulations show a reasonable match of the proposed mechanism with the obtained design requirements and constraints showing the feasibility of a novel design. As a future work, a 3D printed prototype will be designed and built at LARM in Cassino.

Acknowledgements. First author is grateful to the National Council of Science and Technology (CONACYT) from Mexico for supporting his master studies by the national grants program and his research stay at the Laboratory of Robotics and Mechatronics (LARM) in the University of Cassino and South Latium, Italy in the year 2018.

References

1. Ceccarelli, M.: Finger mechanism for robotic hands. In: Bai, S., Ceccarelli, M. (eds.) *Recent Advances in Mechanism Design for Robotics*, pp. 3–13. Springer, Cham (2015)
2. Ghafoor, A., Dai, J.S., Duffy, M.: Stiffness modeling of a soft-finger contact in robotic grasping. *ASME Trans. J. Mech. Des.* **126**(4), 646–656 (2004)
3. Dai, J.S., Wang, D., Cui, L.: Orientation and workspace analysis of the multifingered metamorphic hand-metahand. *IEEE Trans. Robot. Autom.* **25**, 942–947 (2009)
4. Duanling, L., Wang, Z., Ceccarelli, M.: Configuration change analysis and design of metamorphic mechanism. In: *14th IFToMM World Congress*, Taipei, Taiwan, pp. 25–30 (2015)
5. Wu, L., Carbone, G., Ceccarelli, M.: Designing an underactuated mechanism for a 1 active DOF finger operation. *Mech. Mach. Theory* **44**(2), 336–348 (2009)
6. Dai, J.S., Rees, J.: Mobility in metamorphic mechanisms of foldable/erectable kind. In: *Proceedings of the 25th ASME Biennial Mechanisms and Robotics Conference*, vol. 121, no. 3, pp. 375–382 (1998)
7. Liu, C.H., Yang, T.L.: Essence and characteristics of metamorphic mechanism and their metamorphic ways. In: *Proceedings of the 11th World Congress in Mechanism and Machine Science*, vol. 3, pp. 1285–1288 (2004)
8. Zhang, L.P., Wang, D.L., Dai, J.S.: Biological modeling and evolution based synthesis of metamorphic mechanisms. *Trans. ASME J. Mech. Des.* **130**(7), 1–11 (2008)
9. Carbone, G., Rossi, C., Savino, S.: Performance comparison between Federica hand and LARM hand. *Int. J. Adv. Robot. Syst.* **12**(7), 1–12 (2015)
10. Carbone, G., Ceccarelli, M.: Design of LARM hand: problem and solutions. *J. Control Eng. Appl. Inform.* **10**, 39–46 (2008)
11. Wei, G., Dai, J.S., Wang, S., Luo, H.: Kinematic analysis and prototype of a metamorphic anthropomorphic hand with a reconfigurable palm. *Int. J. Hum. Robot.* **8**(3), 459–479 (2011)
12. Xu, K., Lui, H., Liu, Z., Du, Y., Zhu, X.: A single-actuator prosthetic hand using continuum differential mechanism. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seattle, WA, USA, pp. 6457–6462 (2015)
13. Li, G., Fu, C., Zhang, F., Wang, S.: A reconfigurable three-finger robotic gripper. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Information and Automation*, Lijiang, China, pp. 1556–1561 (2015)
14. Cai, M., Kitani, K.M., Sato, Y.: Understanding hand-object manipulation with grasp types and object attributes. In: *Robotics: Science and Systems (RSS)*, vol. 12, no. 34, pp. 1–10 (2016)
15. Ceccarelli, M., Rodriguez, E., Carbone, G.: Optimal design of driving mechanism in a 1-DOF anthropomorphic finger. *Mech. Mach. Theory* **41**(8), 897–911 (2006)

6th International Workshop on New Trends in Medical and Service Robotics (MESROB), del 4 al 6 de Julio del 2018, Cassino, Italia.



A Characterization of a Robotic Hand with Movable Palm

F. J. Espinosa García¹(✉), M. Ceccarelli², M. Arias Montiel³,
G. Carbone², E. Lugo Gonzalez³, and M. Russo²

¹ Postgraduate Division, Technological University of the Mixteca,
69000 Acatlima, Mexico
fjeg_1234@hotmail.com

² LARM: Laboratory of Robotics and Mechatronics, University of Cassino
and South Latium, Via G. Dibiasio 43, 03043 Cassino, Italy
marco.ceccarelli@unicas.it

³ Institute of Electronics and Mechatronics, Technological University
of the Mixteca, 69000 Acatlima, Mexico
elugog@mixteco.utm.mx

Abstract. In this paper the numerical results for the characterization of a new design of an underactuated mechanism for a robotic hand are presented. The hand is composed by a palm and one finger. The finger is actuated by a four-bar mechanism and the palm is composed by two links which are actuated by a spring. The aim of the proposed mechanism is to improve the grasping performance of the LARM hand and avoid to increasing in the number of actuators. The numerical simulations have been carried out using the SolidWorks environment to evaluate the performance of the mechanism on grasping objects with different shapes, the obtained results show the optimal tracking of trajectories of this proposed solution.

Keywords: Robotic hands · Design · Finger mechanism · Movable palm

1 Introduction

Human hand is considered as a highly functional component, since it allows to successfully manipulate and interact with the environment. In recent years, in order to develop anthropomorphic finger mechanism, researchers have used two different approaches: namely complex mechanisms with a reduce number of degrees of freedom (DOFs) and actuators with reduced performance but a simplified device operation [1], and sophisticated designs with a full replica of human hand. The design of anthropomorphic hand must fulfill basic requirements for human-like motion and grasp, such as compact size actuation, lightweight, efficiency, position and force control, by respecting functional requirements of manipulative dexterity, grasp robustness, and human operability [2, 3].

By using underactuated mechanisms it is possible to achieve an adaptive grasp that mimics the human grasping action. Human hand can also be considered underactuated, since the distal phalanges of the fingers are not independently controllable [4].

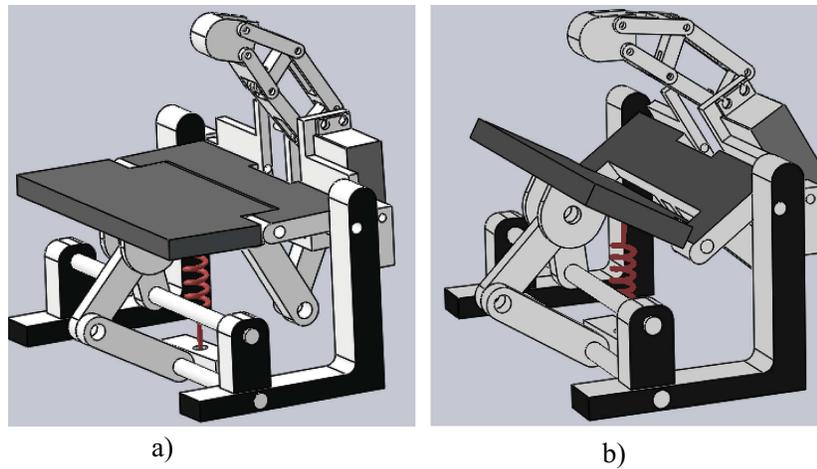


Fig. 2. CAD model of the proposed robotic hand, (a) Open palm and (b) closed palm.

3 The Simulation Model

Simulations have been worked out using the SolidWorks environment. The simulations have been planned for three cases, namely without an object, grasping a cylindrical object and grasping an object with an irregular shape, the action of gravity is considered in all the cases. The aim of numerical simulations is to evaluate the parameters which are shown in Fig. 3. FP is the angular position of the fingertip body and its initial position is 221° . TM is the torque of the motor, PP1 and VP1 are the position and velocity on palm link (6). The initial position of the link 6 is 181° . LS is the length of the spring. In Fig. 4a simulation for the case in which a cylindrical object is gripped is

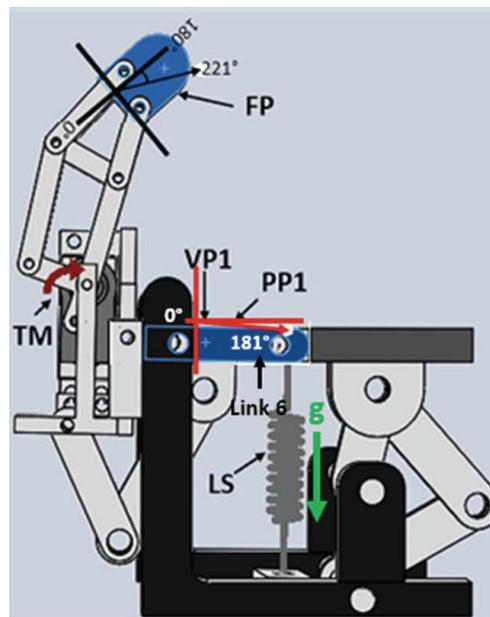


Fig. 3. Main parameters for simulation results.

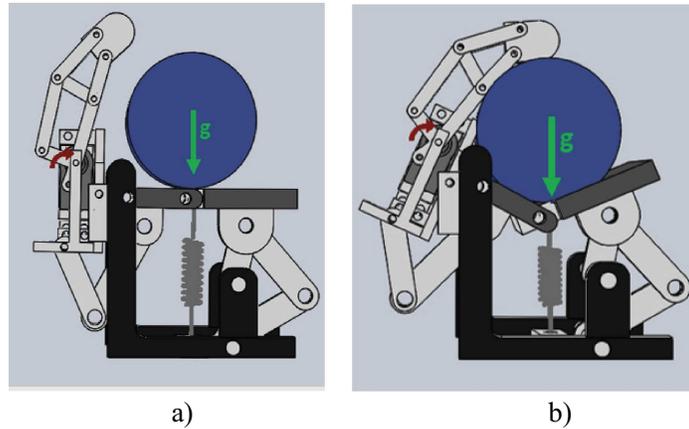


Fig. 4. Example of simulation with a cylindrical object: (a) Initial position and (b) grasping.

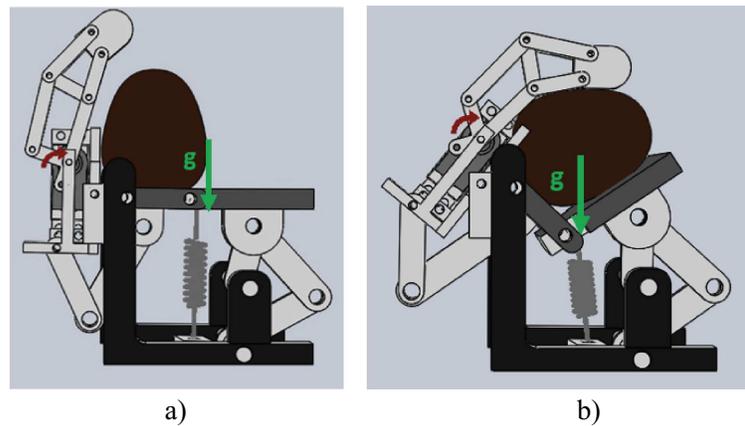


Fig. 5. Example of simulation with an object with irregular shape: (a) Initial position and (b) grasping.

shown. This object is made of aluminum 7075, its weight is 1.81 kg and its body is 10 cm long with a diameter of 70 mm. In Fig. 5, an object with irregular shape is gripped. Its body is 8 cm long, its weight is 107.10 grams and it is made of plastic.

Referring to Figs. 4 and 5, the palm and the finger are on an initial position, after that, the palm and finger are actuated, so that the finger moves against the palm. With the movement of the palm the grasped object is closed also between palm links (5, 6). When the finger is in contact to the object, the four-bar linkages (13, 14) are actuated to get a wrapping grasp by the finger.

4 Numerical Evaluation

Numerical evaluations have been worked out in the SolidWorks environment by running the designed underactuated mechanism with design features and anthropomorphic motion with the characteristics that are previously presented. The results are

reported in this section. Figures 6, 7 and 8 correspond to the simulation of a trajectory tracking without object and Figs. 9 and 10 show the results of grasping a cylindrical object. Finally, Figs. 11 and 12 correspond to simulation grasping an object with irregular shape. The time of simulations is 6 s due to that is enough to the palm and finger wrap an object.

In Fig. 6 the computed angular position of the fingertip is shown. The initial position is -41° , the position starts to change in 0.30 s. The spring is actuated by the weight of the mechanism in consequence finger starts to move until 4.80 s due the spring cannot be contracted anymore. After that time, the servomotor starts to rotate and the finger is actuated by it until final time of 6 s achieving a position of 16° . Figure 7 shows the angular position of the palm (link 6). The initial position is -179° and after 4.80 s, the palm achieves the maximum position which is -128° . The angular velocity of the palm is shown in Fig. 8. The maximum angular velocity of the palm is

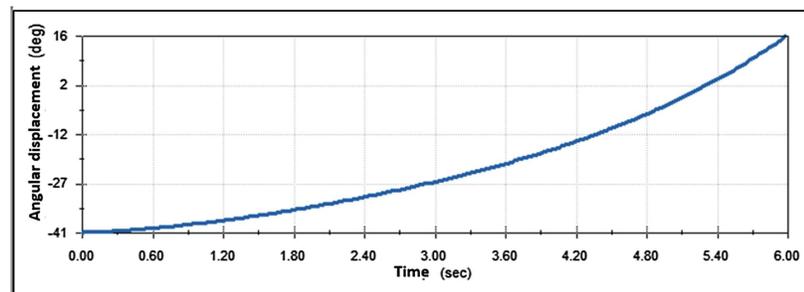


Fig. 6. Computed angular displacement of the fingertip during a motion without object.

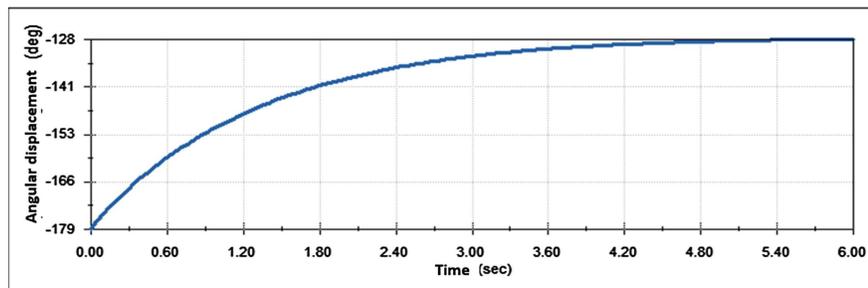


Fig. 7. Angular position of the palm.

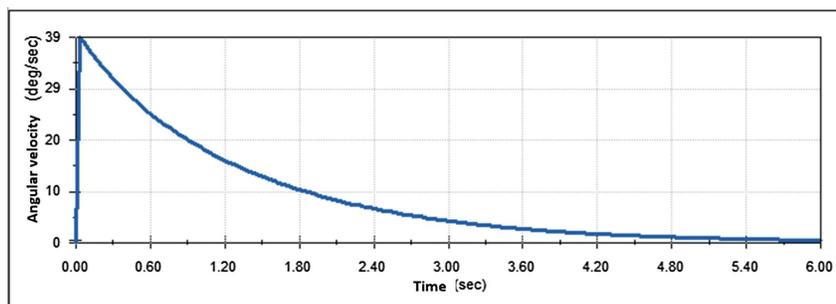


Fig. 8. Angular velocity of the palm.

39° per second near to the motion start. The palm is actuated by the spring and the movement is soft due to there is not an object that generates sudden movements.

Figure 9 shows the angular position of the fingertip for the cylindrical object grasp case. The initial position is -41° , from .60 s to 1 s the position is -58 due to the fingertip touches the cylindrical object. From 1.10 to 6 s, the finger achieves a position of -26° , in this period the finger is actuated by the spring and the position changes because the phalanges touch the object and as result the fingertip is driven up and it stops touching the object. After that time, the palm cannot move and the servomotor starts to move the finger mechanism to the aim to adapt to the shape of the cylindrical object, as a consequence the fingertip achieves to touch the object again. The difference is that the finger has adapted to the shape of the object (Fig. 4b). Figure 10 shows the angular position of the link 6 (palm). From 0 to 1.20 s. link 6 changes its position until -151° and after that, the position is the same. It is due to the object is wrapped by the palm and a consequence, the palm cannot move any more.

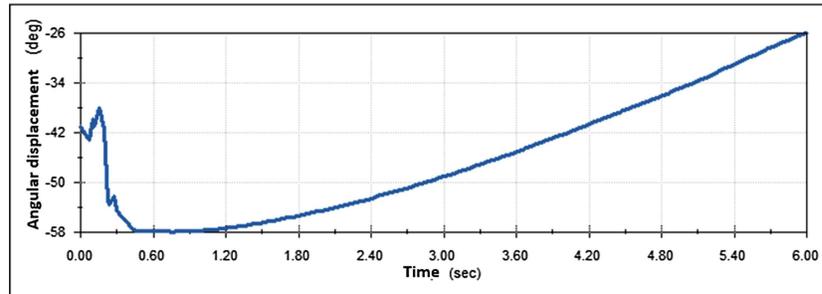


Fig. 9. Angular position of the fingertip.

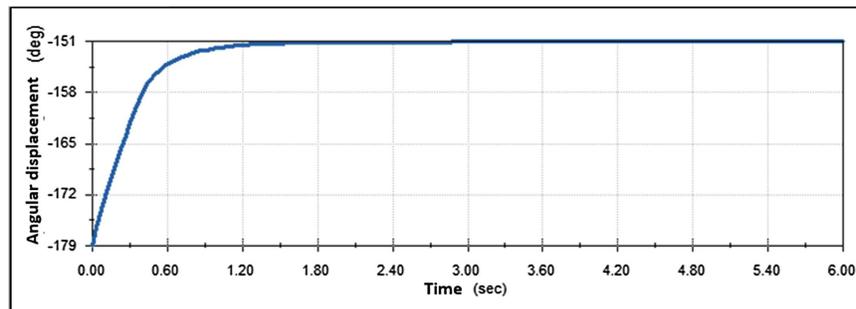


Fig. 10. Angular position of the palm (link 6).

Figure 11 shows the angular position of the fingertip in grasping with an irregular object. The initial position is -41° , from 0 s to 1.20 s the position is -69 due to the fingertip touches the irregular object. From 1.50 to 6 s, the finger achieves a position of 12° . The finger is actuated by the spring until 2.40 s. after that the servo-motor actuates the finger. Figure 12 shows the angular position of the link 6 (palm). From 0 to 2.40 s. link 6 changes its position until -136° and after that, the position is the same. It is due to the object is wrapped by the palm and a consequence, the palm cannot move any more.

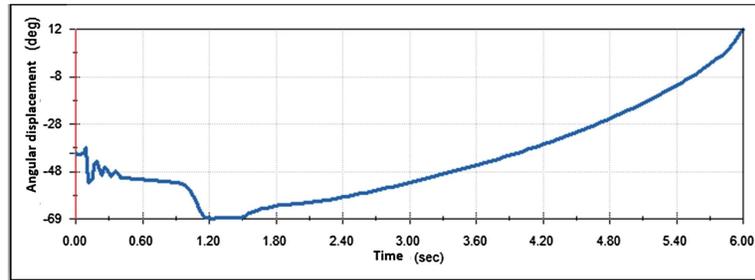


Fig. 11. Angular position of the fingertip.

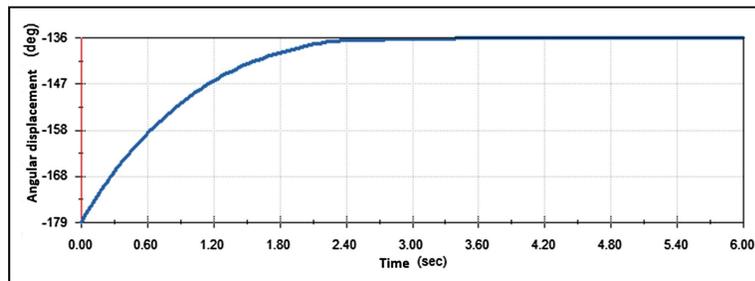


Fig. 12. Angular position of the palm (link 6).

Numerical results obtained from the simulation for the motor torque and grasping forces are listed in Table 1. It shows the values of maximum torque for grasping the two different objects. Based on the results, grasping an irregular object requires more torque power than when the object has a regular shape. The forces applied by the palm and the fingertip to the objects are also indicated with different values. In the case to grasp a cylindrical object a higher force is applied. Finally, the deformation presented by the spring is reported from its initial value of 68 mm and a spring constant of 1 N/mm. The minimum value is 52 mm that is not due to the weight of the object because if the objects are compared, the cylindrical object is heavier than the other one. In this case it is due to the shape as the palm requires to be closed more to totally wrap the object.

Table 1. Maximum values for grasping simulations

	Without object	Cylindrical object	Object with irregular shape
Torque [Nmm]	10.0	30.1	36.0
Finger force[N]	0	1.5	0.8
Palm force[N]	0	5.0	3.0
Spring length [mm]	55	56	52

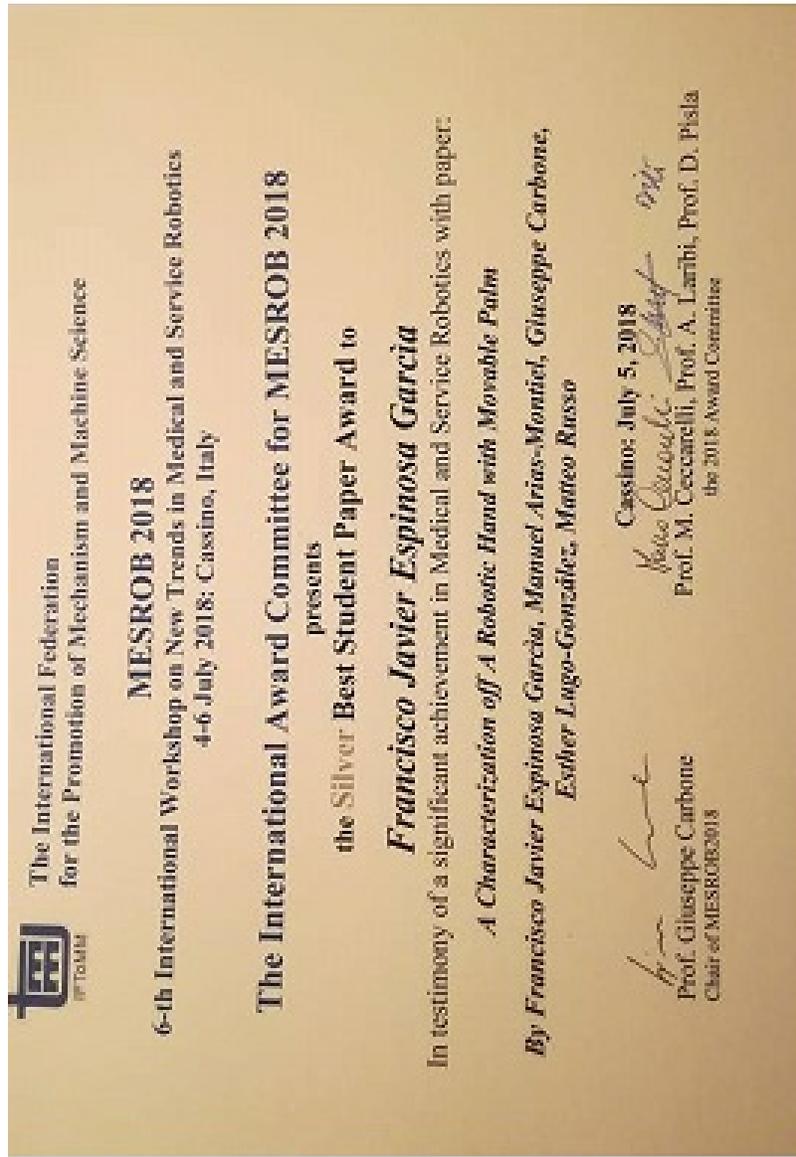
5 Conclusion and Future Works

In this paper, the numerical characterization of a new mechanism for a robotic hand is presented with an active palm. The finger is actuated by one servomotor, in cooperation with a spring on the palm. The robotic hand mechanism has been simulated in the SolidWorks environment to grasp objects with regular and irregular shapes. The main advantage of this mechanism is that palm and finger can adapt their configuration to the shape and size of an object due to the movement of the palm. The undergrasp structure of the mechanism permit moves the palm and the finger only with one motor. Other advantages are the easy operation and simple design for a fairly simple manufacturing. This mechanism can be useful in the field of robot arms due to improve their grasp abilities. As a future works a dynamic study of the hand, the study of the influence of the spring constant in the gripping and an experimental study of the prototype are proposed.

Acknowledgements. First author is grateful to the National Council of Science and Technology (CONACYT) from Mexico for supporting his master studies by the national grants program and his research stay at the Laboratory of Robotics and Mechatronics (LARM) in the University of Cassino and South Latium, Italy during 2017–2018.

References

1. Ceccarelli, M.: Finger mechanism for robotic hands. In: Bai, S., Ceccarelli, M. (eds.) *Recent Advances in Mechanism Design for Robotics*, pp. 3–13. Springer (2015)
2. Krausz, N.E., Rorrer, R.A., Weir, R.F.: Design and fabrication of six degree-of-freedom open source spurge hand. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.* **24**(5), 562–572 (2016)
3. Ceccarelli, M., Rodriguez, N.E., Carbone, G.: Optimal design of driving mechanism in a 1-DOF anthropomorphic finger. *Mech. Mach. Theor.* **41**(8), 897–911 (2005)
4. Ceccarelli, M., Tavolieri, C., Lu, Z.: Design considerations for underactuated grasp with one D.O.F. anthropomorphic finger mechanism. In: *International Conference on Intelligence Robots and Systems IROS*, pp. 1611–1616 (2006)
5. Wei, G., Dai, J.S., Wang, S., Luo, H.: Kinematic analysis of a metamorphic anthropomorphic hand with a reconfigurable palm. *Int. J. Humanoid Robot.* **8**(3), 459–479 (2011)
6. Dai, J.S., Wang, D., Cui, L.: Orientation and workspace analysis of multifingered metamorphic hand-metahand. *IEEE Trans. Robot.* **25**(4), 942–947 (2009)



**The 15th International Federation for the Promotion of
Mechanism and Machine Science (IFToMM) World
Congress, del 30 de Junio al 4 de Julio, Krakow, Polonia,
aceptado.**

Advances on the development of a robotic hand with movable palm

Francisco J. Espinosa-García¹, Manuel Arias-Montiel², Marco Ceccarelli³,
Esther Lugo-González², and Giuseppe Carbone⁴

¹ Postgraduate Division, Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León,
Oaxaca 69000, México,

`fjeg_1234@hotmail.com`

² Institute of Electronics and Mechatronics, Universidad Tecnológica de la Mixteca,
Huajuapán de León, Oaxaca 69000, México,

`mam@mixteco.utm.mx`, `elugog@mixteco.utm.mx`

³ LARM2: Laboratory of Robot Mechatronics, University of Rome, Tor Vergata
00133, Italy

`ceccarelli@uniroma2.it`

⁴ Department of Mechanical, Energy and Management Engineering, University of
Calabria, Calabria 87036, Italy

`giuseppe.carbone@unical.it`

Abstract. This paper presents the development of a robotic hand with a movable palm configuration. The proposed design was developed as based on requirements that are obtained by some experiences with LARM hand and experiments with human hand. The conceptual design of the robotic hand is composed by a movable palm and one finger and its performance is based on underactuated mechanisms in order to only use one actuator for the palm and finger movements. This novel design pretends to improve the grasping performance of the LARM hand avoiding to increase the number of actuators. An experimental prototype was built in order to validate the robotic hand design and the obtained results show the viability of the underactuated mechanism to exert the grasping forces on different objects.

Keywords: robotic hand, underactuated mechanism, movable palm

1 Introduction

In general, the problem of developing robotic hands with mechanisms has been dealt by using rigid palm configurations and articulated fingers. Frequently, this approach restricts the workspace and gives very complex mechanical design for the fingers and the need to use a lot of actuators in order to obtain the adequate grasping ability [1], [2], [3]. However, a human hand takes advantage of its foldable and flexible palm to achieve effective and versatile grasping of objects, as reported for example in [4], [5]. This suggests to investigate the design of a movable palm to improve the versatility and grasping effectiveness of a robotic hand.

On the other hand, underactuated mechanisms have been proposed in the development of robotic hands in order to decrease the number of actuators. By using underactuated mechanisms it is possible to achieve an adaptive grasp that mimics the human grasping action as reported in [6], [7], [8]. Underactuated robotic hands present advantages over the fully actuated hands, such as small weight, size and price, simple electromechanical structure and not excessively complex control systems [9], [10].

The design of anthropomorphic hand must fulfill basic requirements for human-like motion and grasp, such as compact size actuation, lightweight, efficiency, position and force control, by respecting functional requirements of manipulative dexterity, grasp robustness, and human operability [1], [11]. In this paper, the advances on the development of a novel robotic hand with movable palm configuration are presented. The conceptual design of the robotic hand is composed by a movable palm and one finger and its performance is based on underactuated mechanisms in order to only use one actuator for the palm and finger movements. This novel design pretends to improve the grasping performance of the LARM hand by allowing to adapt its configuration to the shape and size of grasped objects which is the major limitation of the different prototypes developed for the LARM hand.

2 Grasping features

In this section, preliminary results about grasping with robotic and human hands are presented. These experiments were carried out to understand the relationship between grasp types and object attributes and to establish the requirements for the design of the robotic hand with movable palm.

The aim of these tests is to measure the forces exerted by human hand and measure the angles of finger phalanxes during the grasping of different objects. Markers have been installed on the joints of the index and thumb fingers as shown in Fig. 1. Also, five sensors have been installed on the fingertips to measure the grasping forces (see Fig. 2).

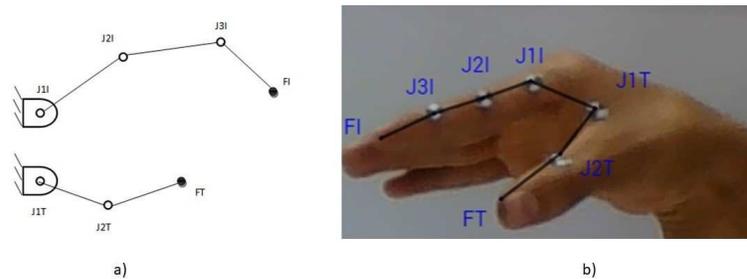


Fig. 1. The two finger grasping a) a kinematic scheme, b) markers on finger joints.

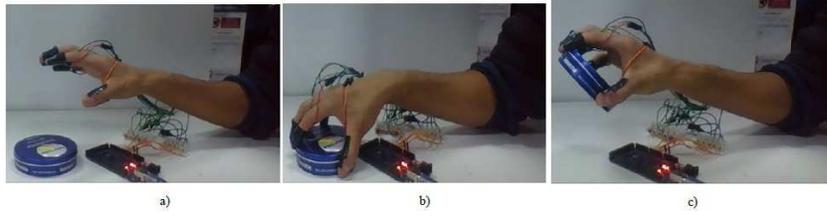


Fig. 2. Phases of a grasping test: a) approaching motion, b) stable grasp, c) lifting.

Grasping tests have been divided in three phases: approaching motion (Fig. 2a)), stable grasp (Fig. 2b)) and lifting the object (Fig. 2c)). Results for measurement of the angles of finger phalanxes are shown in Fig. 3 and for the grasping forces in Fig. 4. Tests were carried out by using different objects. The results are summarized in Table 1. The measured finger angles and grasping forces are useful to define the requirements for design of the novel robotic hand. Details about these tests can be consulted in [12].

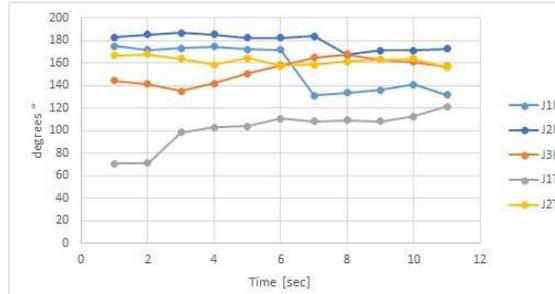


Fig. 3. Acquired results of test with human grasping in Fig 2 as joint finger angles.

Table 1. Minimum and maximum values for the measured grasping force

Object	Water bottle	Piece of wood	Credit card	Top
Thumb sensor	1 - 18N	1 - 18N	2 - 17N	13.9 - 17.9N
Index finger sensor	2 - 15N	3 - 16.5N	11 - 21N	15 - 19N
Middle finger sensor	0.5 - 14N	9 - 14.8N	Without lecture	15.5 - 20N
Ring finger sensor	10 - 17N	10 - 17N	Without lecture	3.9 - 15N
Little finger sensor	2 - 14.5N	2 - 14.8N	Without lecture	0.5 - 13N

The LARM hand IV is 1.2 times larger than a human hand, its design have been focused on low-cost an easy operation. This hand has three fingers (1 DOF per finger) made of aluminum and the palm made of aluminium with a plastic

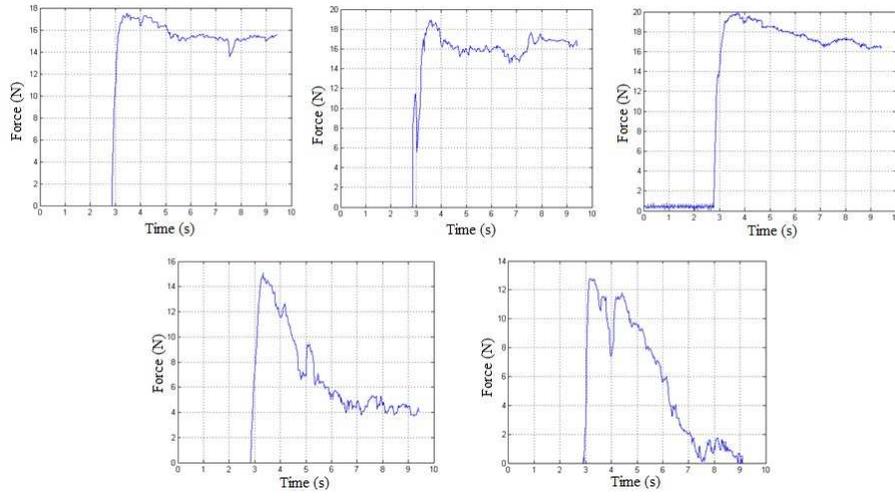


Fig. 4. Acquired results of test with human grasping in Fig. 2 as grasping forces.

cover. The actuation system consists of three DC motors and the control system has been developed to be implemented in a PLC. Each finger has a piezoresistive sensor to get the grasping force measurements [13], [14]. The LARM hand IV was used for robotic grasping experiences. The aim is to get the maximum forces in grasping with different objects and observe how the fingers fit the shape of these objects. Fig. 5 shows a schematic diagram for the experiments and the physical system used in the tests.

A grasping test using a plastic bottle is shown in Fig. 6. Acquired forces on fingers and palm of the LARM hand IV are shown in Fig. 7. The plots show time intervals where the measured fingers force is zero. This is due to the design of the hand and to the movement of the object during the grasping. However, when the force is applied by the fingers the weight of the object is concentrated on the palm. Consequently, force on the palm is greater than on the fingers. The maximum value for the force on the palm is $4N$ and on the fingers is $0.8N$. These values are suitable for grasping the object and preventing its deformation. Results for tests with different objects can be consulted in [12]. From these experimental tests, a limitation can be observed in grasping performance of LARM hand i.e., the fingers and the rigid palm are not able to adapt their configuration to the shape and size of grasped objects.

Based on results from experimental tests by using LARM hand and human hand, some features are proposed for a new mechanism design of robotic hand in order to provide it the capability of adapt its final configuration according to the shape and size of the object to manipulate but maintaining the underactuated approach and compact size actuation, lightweight, and functional requirements of manipulative dexterity as it is specified in [1], [11]. The following features for an improved robotic hand are considered as follows [12]:

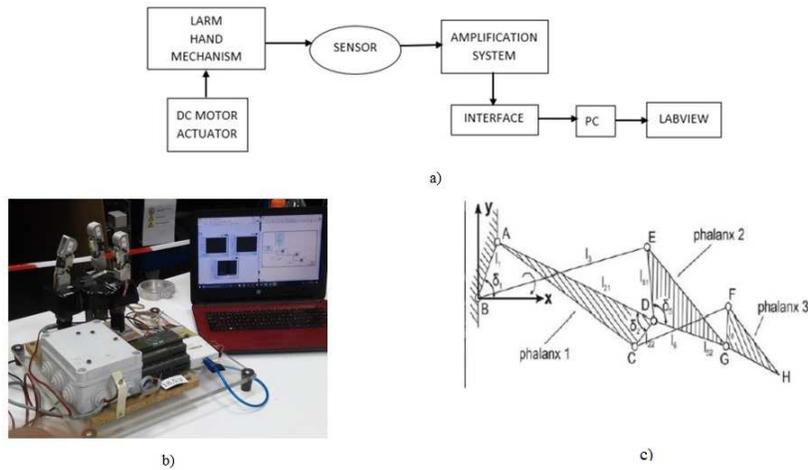


Fig. 5. An experimental layout: a) schematic diagram for grasping tests with robotic hand, b) lab layout with LARM hand IV, c) a kinematic model of the LARM hand finger mechanism.

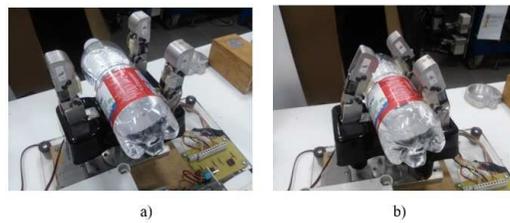


Fig. 6. LARM hand IV during a grasping test.

- Mechanism of fingers must be underactuated with the aim to get a flexible manipulation and to avoid complex designs;
- Fingers must adapt to the shape of objects to get a good grasping;
- A foldable palm is required to achieve effective and versatile grasping of objects with different shapes and sizes.

3 Underactuated palm and finger mechanism

In this section, the design solution based on the requirements mentioned above is described. The proposed mechanism is an innovative solution that is designed with an actuator which moves the palm and the finger to grasp an object. Fig. 8 shows the kinematic scheme with link indications.

The mechanism for robotic hand is composed by the palm and one finger. The palm is composed by links (5) and (6) connected by a revolute joint. Link (5) is connected to the fixed base (1) by the mechanism formed by links (2), (3)

provides to the finger the ability to adapt its configuration to the shape and size of the grasped object by moving the finger in opposition to the palm. Moreover, the torque by the motor (10) provides the grasping force of the finger on the object. The dimensions of each link of the described mechanisms are listed in Table 2 and in Fig. 9 is presented a CAD design with the mechanical design in open and closed configurations of the palm. A kinematic characterization of the design is presented in [15].

Table 2. Dimensions for links of the proposed mechanism in Fig. 8.

Element	Length (mm)	Element	Length (mm)
1	100	9	40
2	50	11 (short)	27
3	50	11 (long)	35
4	30	12 (short)	30
5	50	12 (long)	38
6	50	Finger tip	27
8	55		

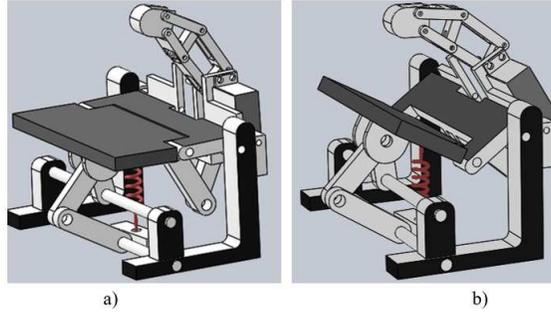


Fig. 9. CAD design of robot hand in Fig. 8; a) with open palm, b) with closed palm

4 Experimental characterization of the proposed design

In order to evaluate the proposed underactuated mechanism for the robotic hand with movable palm, a prototype was built by using 3D printing. Tests were carried out to experimentally characterize the grasp adaptability to objects with different shapes and sizes and the grasping force on the movable palm and on the finger tip.

Fig. 10 shows a grasping experiment with two steel bars put together by adhesive tape. The weight of the bars is 1100g and the diameter of each bar is

19mm. The grasping forces measured on the movable palm and on the finger tip are presented in Fig. 11.

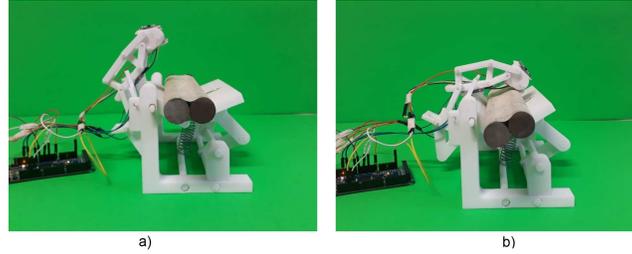


Fig. 10. A grasping experiment with steel bars. a) Initial position. b) grasping.

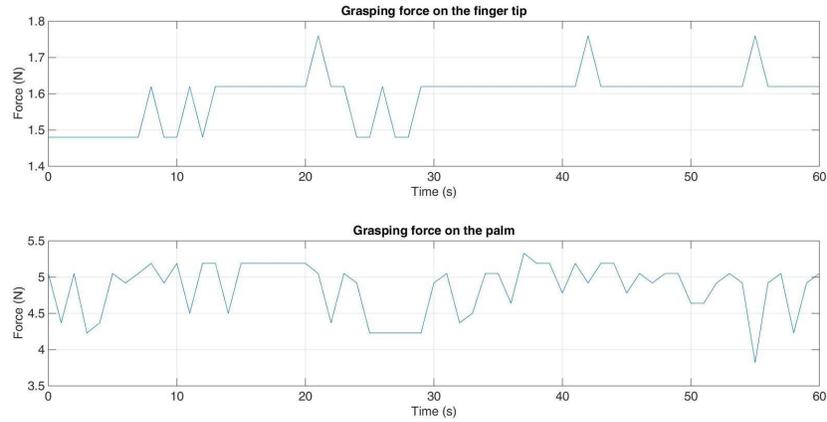


Fig. 11. Grasping force on the palm and on the finger tip for steel bars during a test of Fig. 10.

Another experiment with a glass bottle is illustrated in Fig. 12. The weight of the bottle is 670g and its diameter is 64mm. The results for the grasping forces are shown in Fig. 13.

From Figs. 10 and 12, one can note that the robotic hand is able to grasp different objects adapting its final configuration on depending to shape and size of the objects by using the proposed mechanism with movable palm. From the obtained results for the grasping forces in Figs. 11 and 13, the force values on the finger tip are in the range of grasping forces developed by the human hand and they are greater than those measured on LARM hand, according to the reference results presented in Section 2 and references within. Moreover, it is possible to



Fig. 12. A grasping experiment with a glass bottle. a) Initial position. b) grasping.

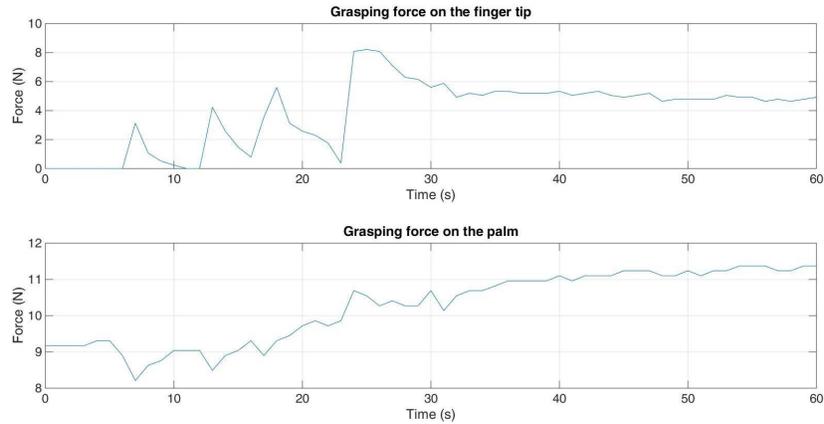


Fig. 13. Grasping force on the palm and on the finger tip for a glass bottle during a test of Fig.12

observe the change in the grasping force on the finger tip and on the palm on depending to the size and weight of the manipulated object. It is important to mention that the grasping forces on the palm are not reported in the consulted literature referring to robotic hand designs and this data could be useful in the design and evaluation of the performance of this kind of devices with either rigid or movable palm configurations.

5 Conclusions

In this work, results are presented on the design and experimental characterization of a new mechanism for a robotic hand with movable palm. The proposed underactuated mechanism actuates all the elements of the hand, finger and palm by only one servomotor in cooperation with a spring to adapt the grasping of objects with different size, shape and weight. A lab prototype was developed for an experimental characterization of the grasping forces in various scenarios. The obtained experimental results show the correct performance of the proposed

design in comparison with the experimental tests carried out with human hand and with the LARM hand. Advantages of the proposed design are the easy operation and fairly simple design for a simple and low-cost manufacturing. The future work can be oriented to develop a multi-finger hand with the proposed mechanism.

References

1. Bennet, D.A., Dalley, S.A., Truex, D., Goldfarb, M.: A multigrasp hand prosthesis for providing precision and conformal grasps. *IEEE/ASME Trans Mechatron.* 20(4), 1697–1704 (2015).
2. Krausz, N.E., Rorre, R.A., Weir, R.F.: Design and fabrication of six degree-of-freedom open source hand. *IEEE Trans. Neural Sys. Rehabil. Eng.* 24(5), 562–572 (2016).
3. Paik, J.K., Shin, B.H., Bang, Y., Shim, Y.: Development of an anthropomorphic robotic arm and hand for interactive humanoids. *J. Bionic Eng.* 9(2), 133–142 (2012).
4. Dai, J.S., Wang, D., Cui, L.: Orientation and workspace analysis of the multifingered metamorphic hand-metahand. *IEEE Trans Robot Autom.* 25(4), 942–947 (2009).
5. Ghafoor, A., Dai, J.S., Duffy, M.: Stiffness modeling of a soft-finger contact in robotic grasping. *J. Mech. Des.* 124(4), 646–656 (2004).
6. Wu, L., Carbone, G., Ceccarelli, M.: Designing an underactuated mechanism for a 1 active DOF finger operation. *Mech. Mach. Theory* 44(2), 336–348 (2009).
7. Luo, M., Carbone, G., Ceccarelli, M., Zhao, X.: Analysis and design for changing finger posture in robotic hand. *Mech. Mach. Theory* 45(6), 828–843 (2010).
8. Yao, S., Ceccarelli, M., Carbone, G., Dong, Z.: Grasp configuration planning for a low-cost and easy-operation underactuated three-fingered robot hand. *Mech. Mach. Theory* 129, 51–69 (2018).
9. Kyberd, P.J., Clawson, A., Jones, B.: The use of underactuation in prosthetic grasping. *Mech. Sci.* 2(1), 27–32 (2011).
10. Tavakoli, M., Enes, B., Santos, J., Marques, L., de Almeida, A.T.: Underactuated anthropomorphic hands: Actuation strategies for a better functionality. *Rob. Auton. Sys.* 74, 267–282 (2015).
11. Ceccarelli, M., Rodriguez, N.E., Carbone, G.: Optimal design of driving mechanism in a 1-DOF anthropomorphic finger. *Mech. Mach. Theory* 41(8), 897–911 (2005).
12. Espinosa-Garcia, F.J., Carbone, G., Ceccarelli, M., Cafolla, D., Arias-Montiel, M., Lugo-Gonzalez, E.: A study of feasibility for a design of a metamorphic artificial hand. In: *Advances in Service and Industrial Robotics*. Nikos A. Aspragathos, Panagiotis N. Koustoumpardis, Vassilis C. Moulianitis (Eds.), 283–290, Springer, Cham (2019).
13. Carbone, G., Gonzalez, A.: A numerical simulation of the grasp operation by LARM Hand IV: A three finger robotic hand. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 27(2), 450–459 (2011).
14. Carbone, G., Rossi, C., Savino, S.: Performance comparison between FEDERICA hand and LARM hand. *Int. J. Adv. Robot Syst.* 12(90), 1–12 (2015).
15. Espinosa-Garcia, F.J., Ceccarelli, M., Arias-Montiel, M., Carbone, G., Lugo-Gonzalez, E., Russo, M.: A characterization of a robotic hand with movable palm. In: *New Trends in Medical and Service Robotics*. Giuseppe Carbone, Marco Ceccarelli, Doina Pislă (Eds.), 118–125, Springer, Cham (2019).