



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Diseño y construcción de un banco de pruebas para el estudio de la intuición del movimiento de sujeción de la mano humana

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniera Mecatrónica

P R E S E N T A N

Erika Sandoval Rodríguez
Mariana Angélica Vielma Villalbaz

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Víctor Javier González Villela



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

Dedicatorias

A mi madre, gracias a sus enseñanzas pude recorrer y terminar esta etapa de mi vida.

A mi Padre, quien siempre me brindó su apoyo.

A mi hermana, con quién compartí varias etapas de mi vida, incluida esta.

A mi mejor amiga, Yoali, porque demostramos que nuestra amistad va más allá de estudiar la misma carrera.

Y a Angie, mi compañera y amiga con la que recorrí este camino.

Erika Sandoval Rodríguez.

A mi padre, porque su guía durante el tiempo que estuvimos juntos es inamovible.

A mi madre, por su apoyo y sus ánimos, porque cada acción suya me fue forjando para ser quien soy.

A mi hermana, por estar siempre para mí, por su confianza y por su cariño.

A mis padrinos Arturo y María Guadalupe, por su cariño y por procurarme.

A Yaird, Carina, Karla y Jonna, mis mejores amigos, quienes, a pesar del tiempo y la distancia, siempre han estado presentes.

A Erika, por todo lo que aprendimos y compartimos juntas, por vivir esta experiencia conmigo hasta el final, por su amistad.

Y Kamin y Taiki, por ser la mejor compañía a lo largo de esta travesía.

Mariana Angélica Vielma Villalbaz.

Agradecimientos

Agradecemos al Dr. Víctor Javier González Villela por su excelente dirección y guía a lo largo de este trabajo.

“Las respuestas ya están en el universo, solo falta descubrirlas [...]”

Al M.I. Erik Peña Medina, por su apoyo en la manufactura del banco de pruebas.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por los excelentes conocimientos brindados para nuestra formación como profesionales.

Agradecemos en lo que corresponde a la DGAPA, por el apoyo brindado para la realización de este trabajo, a través del proyecto UNAM-DGAPA-PAPIIT IN118117: "Investigación sobre robótica topofixadaptable aplicada a robots móviles híbridos, que operan en ambientes inteligentes estructurados, en tareas de sujeción, traslación y orientación de objetos con cierto grado de asimetría"

Diseño y construcción de un banco de pruebas para el estudio de la intuición del movimiento de sujeción de la mano humana

“El diseño significa ser bueno, no solo verse bien.”

-Clement Mok-

Índice

Resumen	1
Objetivo	1
Metas	1
Introducción.....	2
1. Bancos de pruebas	3
1.1 Bancos de pruebas en robótica	3
1.2 Bancos de pruebas en robótica intuitiva	4
2. La intuición humana	5
2.1 Diferencia entre intuición y otros procesos	5
2.2 Aprendizaje intuitivo	6
2.3 Movimientos intuitivos.....	6
3. Movimientos de sujeción de la mano humana.....	7
3.1 Tipos de prensión	8
3.1.1 Prensión tipo pinza	8
4. Generalidades del diseño del banco de pruebas	12
4.1 Mano mecatrónica antropomórfica.....	12
4.1.1 Diseño en general	13
4.2 Guante de sensado	14
4.2.1 Diseño en general	14
5. Diseño de la mano mecatrónica antropomórfica	15
5.1 Estructura de la mano humana	15
5.1.1 Arcos flexibles.....	15
5.1.2 Estructura ósea	19
5.1.3 Antropometría	20
5.2 Diseño del dedo meñique	21
5.2.1 Juntas y grados de libertad	21
5.2.2 Simplificaciones	23
5.2.3 Eslabones.....	24

5.2.4	Escalamiento del meñique a la mano	25
5.3	Tipo de actuación y transmisión.....	26
5.3.1	Actuadores.....	28
5.3.2	Transmisión	30
5.3.3	Acoplamiento de transmisión y actuadores	30
5.4	El pulgar	32
5.4.1	Particularidades del diseño	33
5.4.2	Diseño del pulgar.....	35
5.5	Diseño de la base de la mano	36
5.5.1	Movimientos de abducción y aducción	37
5.5.2	Oposición del pulgar.....	37
5.5.3	Soporte del 2º al 5º metacarpo.....	38
5.5.4	Soporte del 1 ^{er} metacarpo	39
5.5.5	Base final de la mano	41
5.6	Diseño de la base para los motores.....	44
5.7	Control de los motores	49
6.	Diseño del guante para el sensado de los movimientos de la mano humana.....	50
6.1	Puntos principales de la mano para la obtención de información	50
6.1.1	Movimientos principales de la mano humana	50
6.2	Diseño del guante de sensado.....	52
6.3	Tipo de sensado	54
6.4	Caracterización del movimiento.....	58
7.	Pruebas de los subsistemas.....	61
7.1	Reproducción de los movimientos	61
7.1.1	Pruebas Antropométricas.....	61
7.1.2	Pruebas de motricidad en prensiones tipo pinza.....	63
7.1.3	Adaptabilidad	68
7.2	Sensado de los movimientos	70
7.2.1	Calibración	73
7.2.2	Prueba: Comprobación de ángulos	74
7.2.3	Prueba Flexión-Extensión	75
8.	Resultados	76

8.1	Resultados de la mano mecatrónica antropomórfica	76
8.2	Resultados del guante de sensado.....	78
9.	Conclusiones	81
10.	Referencias	83
Apéndices	86
Apéndice A.	Planos de los eslabones de un dedo.....	87
Apéndice B.	Planos de las poleas	91
Apéndice C.	Planos del pulgar	94
Apéndice D.	Planos de la base de la mano	97
Apéndice E.	Planos de la base de los motores.....	100
Apéndice F.	Métodos para obtener como salida la posición deseada en grados usando el controlador PCA9685	109
Apéndice G.	Métodos para controlar las falanges de cada dedo según el puerto y una posición de entrada	110
Apéndice H.	Posición de los sensores en el guante de sensado	111
Apéndice I	Gráficas para la caracterización del movimiento.....	112
Apéndice J.	Programa para las pruebas del guante de sensado: grados	122
Apéndice K.	Programa para las pruebas del guante: Reconocimiento	123
Índice de figuras	124
Índice de Tablas.	128
Índice de Gráficas.	128

Resumen

En este trabajo se presenta la propuesta del diseño y la construcción de un banco de pruebas que tenga las capacidades necesarias para el estudio de la intuición, específicamente de la intuición en el movimiento de sujeción de la mano humana, puntualizando en la sujeción tipo pinza.

El banco de pruebas que se plantea se divide en dos subsistemas, un subsistema de sensado de movimientos y otro subsistema que sirva para, posteriormente, ejecutar los movimientos estudiados. El subsistema de sensado consiste en un guante capaz de medir el movimiento angular de los dedos de la mano humana al realizar la flexión o extensión al mismo tiempo que brinda ergonomía al usuario; mientras que el de ejecución de movimientos consiste en una mano mecatrónica antropomórfica que sea capaz de realizar los movimientos de la mano humana y que pueda sujetar objetos esféricos y de superficies irregulares gracias a su diseño.

Ambos subsistemas se validaron a lo largo de este trabajo para demostrar que servirán como banco de pruebas, para estudiar, obtener y programar las ecuaciones del movimiento de sujeción de la mano humana en un futuro.

Objetivo

- Diseñar y construir un banco de pruebas capaz de sensar los movimientos de la mano humana con la finalidad de que, en un futuro, se pueda obtener un modelo matemático de la intuición del movimiento de sujeción de la mano humana para poder ser aplicado a una mano mecatrónica antropomórfica.

Metas

- Diseñar y construir una mano mecatrónica antropomórfica con los grados de libertad suficientes para ser capaz de reproducir los movimientos de sujeción de una mano humana.
- Diseñar y construir un guante de sensado que sea capaz de obtener información sobre los movimientos de la mano humana.

Introducción

La inteligencia artificial ha sido utilizada durante años para dotar a la tecnología con la capacidad de responder ante los estímulos del medio, esto logra que la tecnología esté cada vez más capacitada para interactuar con el ser humano. Este tipo de interacciones serán cada vez más frecuentes conforme la tecnología se hace más presente en la vida diaria de las personas, sin embargo, la inteligencia artificial no es el único camino que existe para lograr una interacción entre humano-máquina. Pese a que esta es la más popular tiene el contra de tener complicados algoritmos para obtener respuestas, y aunque la inteligencia se considera como una capacidad inherente al ser humano, existe otra que el ser humano usa diariamente sin darse cuenta: la intuición. Debido a que la intuición proviene de alguna parte del cerebro, es lógico pensar que esta puede obtenerse mediante el estudio del comportamiento humano. Esta intuición que posee todo ser humano también es la causa de algunos movimientos, que son considerados como movimientos intuitivos, la intuición que se propone estudiar en este caso es la del movimiento de sujeción de la mano humana.

Si se realizara el estudio de la intuición humana se podría obtener la descripción de dichos movimientos para después ser aplicados a agentes inteligentes ahorrándoles tiempo de procesamiento.

El estudio de la intuición se puede abordar desde distintos enfoques, en este caso se propone mediante un banco de pruebas, ya que son aplicados para comprobar la teoría o probar la aplicación de esta.

Por esta razón es necesario el desarrollo de un banco de pruebas que sirva para el estudio de la intuición de los movimientos de la mano humana, específicamente de los de sujeción. El cual se plantea como la unión de dos subsistemas, uno para recabar de datos y otro para la implementación de los mismos, una vez que estos fueron procesados y analizados.

1. Bancos de pruebas

“La necesidad de validación experimental ha originado la aparición de una amplia variedad de bancos para experimentación en robótica.”[1]

La investigación científica requiere pruebas experimentales para comprobar que sus hipótesis son acertadas. En ingeniería también se necesitan este tipo de pruebas para sustentar sus aportes al desarrollo tecnológico. A la hora de diseñar grandes proyectos se suelen desarrollar plataformas experimentales cuyo fin sea probar variables específicas, estas suelen recibir el nombre de bancos de pruebas.

Los bancos de pruebas tienen la propiedad de medir variables en entornos repetibles y controlados, corroborando que los datos pueden afirmar o rechazar las hipótesis para las que se diseñan los experimentos. Pese a que existen bancos de pruebas diseñados para ser versátiles la mayoría de estos se suelen plantear bajo condiciones específicas y para un único experimento en concreto.

Sin los bancos de pruebas la información necesaria para el diseño sería complicada o costosa de obtener, y en ciertos casos imposible, por lo que han demostrado ser una herramienta útil tanto en ingeniería como en diversas áreas.

1.1 Bancos de pruebas en robótica

La robótica es considerada como un área de la ingeniería, y por tanto se ha beneficiado de los bancos de pruebas. Aunque existen algunas áreas donde los simuladores son empleados con frecuencia, en robótica esta información suele ser difícilmente obtenible sin un modelo físico en el que medir estas variables, por lo que los bancos de pruebas son elementales para este fin.[1]

Uno de los objetivos fundamentales de la robótica es crear robots autónomos, es decir, que sean capaces de responder y ejecutar acciones sin que un ser humano los guíe paso a paso.[2] Para este fin la robótica suele dotar a sus robots de inteligencia artificial, esta inteligencia permite a los robots desarrollar estrategias para resolver problemas. La autonomía de los robots es proporcional al nivel de inteligencia artificial con el que se dote[3], por este motivo el desarrollo de inteligencias artificiales ha tenido un gran impacto en el desarrollo tecnológico de la robótica.

1.2 Bancos de pruebas en robótica intuitiva

La inteligencia artificial suena como una última solución para resolver el problema de los robots autónomos, sin embargo, la mayoría de las investigaciones están orientadas al software, y la aplicación en la robótica resulta ser muy cara debido a los microprocesadores que deben ser utilizados.[4]

Una solución diferente para los robots autónomos ha sido la creación de redes neuronales. Estas están inspiradas en el comportamiento del cerebro humano y se basa, en la creación de modelos artificiales que solucionen problemas difíciles de resolver mediante técnicas algorítmicas convencionales. [4]

Ambas soluciones están inspiradas en el cerebro humano. Si bien, la inteligencia es un rasgo cognitivo asociado al ser humano, existe otro que también es inherente a estos y que no suele ser tomado en cuenta a la hora de diseñar robots autónomos: la intuición.

La robótica intuitiva, por tanto, es un área que no ha sido explorada a gran profundidad. La intuición artificial programada en estos robots los dotaría de una autonomía natural y eliminaría la necesidad de tener un proceso cognitivo previo para obtener la solución.

2. La intuición humana

“Escucha más a tu intuición que a tu razón. Las palabras forjan la realidad pero no la son[5].”

-Alejandro Jodorowsky-

Los humanos somos seres con la capacidad de raciocinio, y por lo tanto solemos tomar decisiones con base en él, sin embargo, existe otra facultad que ayuda a tomar decisiones y esta se conoce como intuición.

Desde el punto de vista científico la intuición no es un proceso lógico, es un proceso que toma lugar en el subconsciente o es tan rápido que parece que proviene del subconsciente y por lo tanto da la impresión de ser instantáneo o carente de razonamiento.

La intuición ofrece la capacidad de obtener respuestas mucho más rápido que el proceso normal de pensamiento basado en lógica, por lo que se suele usar cuando se trabaja con horizontes de tiempo cortos y datos que son de mala calidad y/o muy limitados[5].

2.1 Diferencia entre intuición y otros procesos

Todo tipo de reacciones y procesos innatos como los reflejos y el instinto se asemejan mucho a la intuición, sin embargo, estos no son considerados intuitivos porque no vienen de un conocimiento previo almacenado en la memoria de largo plazo.

La característica clave de la intuición es que opera automáticamente en un nivel del subconsciente. Una persona no pone su atención en todas las piezas relevantes de información al mismo tiempo, sino que se centran en una pieza y después en otra; en otras palabras, la deliberación de pensamiento que lleva a cabo involucra un procesamiento secuencial. En contraste, los procesos automáticos consideran múltiples piezas de información simultáneamente, ya que estos procesos emplean un procesamiento paralelo de información[6].

Para hacer uso de un procesamiento paralelo, la intuición es capaz de manejar una cantidad enorme de información. La experiencia proporciona a una persona una amplia base de datos de la cual la intuición puede obtener información, es por esto que se pueden obtener respuestas altamente precisas si el ejemplo de una experiencia anterior es representativo para la tarea que se está presentando en ese momento[7].

2.2 Aprendizaje intuitivo

Se sabe que la intuición es un proceso que toma parte en el subconsciente, pero lo siguiente que se debe responder es de dónde o de qué manera se adquiere la intuición.

El comienzo de un proceso intuitivo viene a partir de conocimiento adquirido a través de experiencia y almacenado en la memoria de largo plazo[8]. Como tal, la intuición le da mayor valor al conocimiento adquirido previamente por medio de un sistema de aprendizaje lento y menor a la información reciente que se guarda en la memoria de corto plazo, ya que, el aprendizaje lento es guiado por los principios de aprendizaje asociativo a través del uso.

La memoria de largo plazo contiene una cantidad sustancial de sobreaprendizaje. Las experiencias son almacenadas en la memoria de largo plazo, sin embargo, no toda clase de experiencia es inmediatamente almacenada. Regularmente, la repetición y elaboración son condiciones previas para el aprendizaje. La mayor parte del comportamiento de la gente se basa en rutinas que han sido frecuentemente repetidas en el pasado. Estas rutinas están sobreaprendidas y pueden ser seleccionadas y ejecutadas de modo automático[6].

Dicho lo anterior, se puede inferir que la intuición se obtiene después de un aprendizaje que surge al realizar una actividad, proceso o procedimiento repetidas veces durante un largo periodo de tiempo. Dando como resultado el almacenamiento en la memoria de largo plazo de una respuesta ya dada a una actividad o procedimiento conocido, convirtiéndose así en intuición.

2.3 Movimientos intuitivos

Los humanos repetimos un sinnúmero de actividades que involucran los movimientos de diversos músculos hasta que llega un punto en que estos movimientos musculares se producen de manera inconsciente, es decir, no se necesita pensar en que se tiene que realizar el movimiento, simplemente los músculos otorgan una respuesta a una necesidad que se presenta en una situación ya conocida.

Si partimos de que los procesos intuitivos pueden ser adquiridos después de repetir una acción constantemente durante un largo periodo de tiempo, es posible afirmar que estas respuestas musculares instantáneas obtenidas sin realizar un proceso cognitivo son meramente producidas por intuición.

Para una acción simple y que se repite en innumerables ocasiones, como el sujetar o atrapar un objeto, la respuesta de los movimientos que se deben ejecutar para concretar dicha acción ya está dada, ha pasado a formar parte de la intuición de una persona, convirtiendo dichos movimientos en movimientos intuitivos.

3. Movimientos de sujeción de la mano humana

“De la misma forma que el pie evoluciono y se convirtió en un órgano de sustentación y locomoción, la mano se ha convertido en un instrumento de manipulación dotado de una aguda discriminación sensorial [9].”

-Nigel Palastanga-

La facultad de prensión del hombre se debe a la forma en la que se encuentra constituida la mano humana, ya que, le permite tanto una amplia apertura como un cierre sobre si misma o en torno a un objeto.

Cuando la mano se separa para coger un objeto (Figura 1), los dedos largos se elongan por la acción de los músculos extensores. La extensión de los dedos disminuye desde el dedo índice al dedo meñique mientras que el pulgar se extiende y se separa en abducción gracias a la profundidad de su comisura.

Los cinco dedos no tienen la misma relevancia en la utilización de la mano (Figura 2) que comporta tres pares: la zona del pulgar (Figura 2-I), que desempeña un papel preponderante por su oposición a los otros dedos; la zona de las pinzas (Figura 2-II), compuesta por el dedo corazón y, principalmente, por el dedo índice, indispensables para la pinza bidigital (pulgarcorazón) o pinza triangular (pulgarcorazón/índice); la zona de los alcances (Figura 2-III) ubicada en el borde cubital de la mano, con los dedos anular y meñique, indispensables para garantizar la firmeza de la prensa con toda la palma de la mano o también la prensa en forma de puño.[10]



Figura 1. Mano humana ejecutando la acción de coger un objeto. Se observa la elongación de los dedos largos por acción de los músculos extensores. [10]

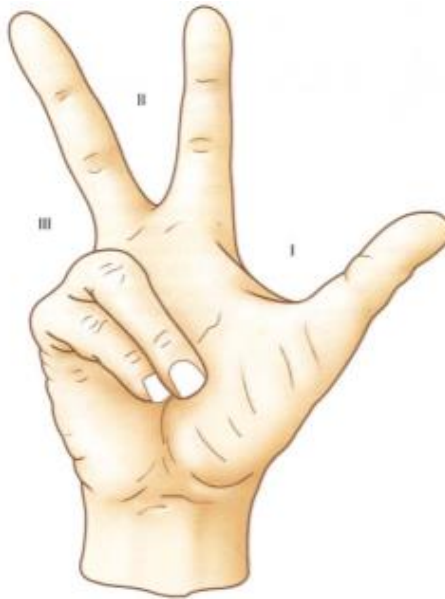


Figura 2. Zonas de mayor importancia en la mano humana: I) Zona del pulgar, II) Zona de las pinzas y III) Zona de los alcances [10].

3.1 Tipos de prensión

La compleja organización anatómica y funcional de la mano converge en la prensión, sin embargo, no existe un solo tipo de prensión, sino varios que se clasifican en tres grandes grupos: prensas propiamente dichas o pinzas, prensas con gravedad y prensas con acción.[11] En este trabajo únicamente nos centraremos en prensas tipo pinza.

3.1.1 Prensión tipo pinza

En este tipo de prensa no es necesaria la implementación de fuerzas externas ni tampoco la realización de un movimiento de acción una vez realizado el movimiento de prensión.

Las prensas o pinzas propiamente dichas se clasifican en tres grupos: las prensas digitales, las prensas palmares y las prensas centradas. Este tipo de prensas no necesitan la participación de la gravedad [11].

1. Las prensas o pinzas digitales:

Las prensas digitales se dividen a su vez en dos subgrupos: las pinzas bidigitales y las pinzas pluridigitales. Las prensas bidigitales constituyen la clásica pinza pulgodigital, generalmente pulgar-índice[12] (Figura 3); mientras que las prensas pluridigitales hacen intervenir, además del

pulgar, los otros dos, tres o cuatro dedos (Figura 4) permitiendo una presión mucho más firme que la bidigital que persiste como prensa de precisión.

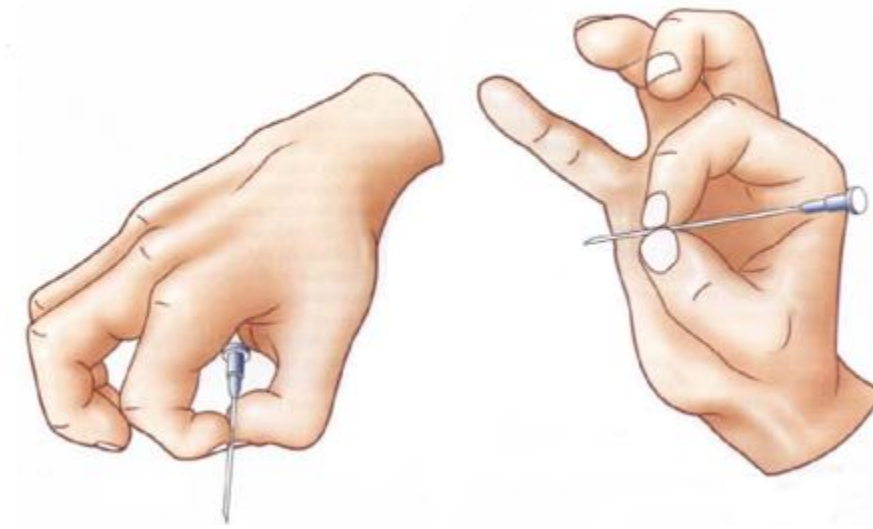


Figura 3. Ejemplos de prensas bidigitales. [10]



Figura 4. Ejemplos de prensas pluridigitales. [10]

2. Las prensas palmares.

Las prensas palmares hacen intervenir, además de los dedos, la palma de la mano. Son de dos tipos según se utilice o no el pulgar.

La presión digitopalmar opone la palma de la mano a los cuatro últimos dedos (Figura 5); es un tipo de prensa accesoria pero utilizada con frecuencia cuando se maneja una palanca o sujeta un volante.

La presión palmar con la totalidad de la mano o la totalidad de la palma (Figura 6) es la presión de fuerza para los objetos pesados y relativamente voluminosos[12]. El puño es idóneo para denominar este tipo de prensa; la mano se enrolla literalmente en torno a objetos cilíndricos, mientras que el eje del objeto adopta la misma dirección que el eje de la corredera palmar.

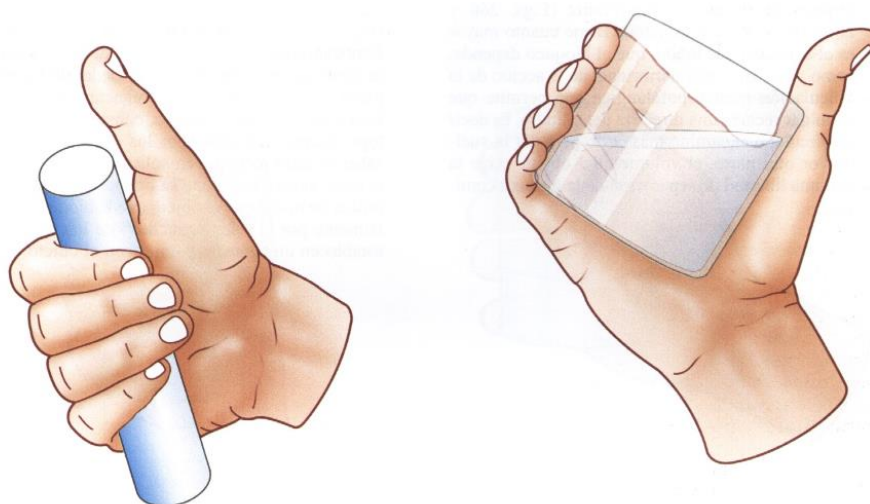


Figura 5. Ejemplos de prensas digitopalmares. [10]

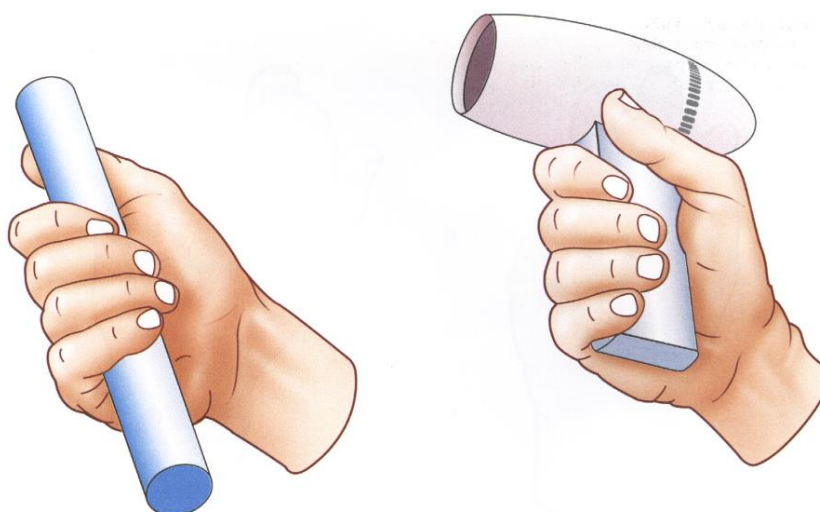


Figura 6. Ejemplos de presión palmar. [10]

3. Las prensas centradas.

Las prensas centradas realizan, de hecho, una simetría en torno al eje longitudinal (Figura 7) que, en general, se confunde con el eje del antebrazo. Estas prensas son muy útiles; requieren la integridad de la flexión de los tres últimos dedos, la extensión completa del dedo índice cuyos músculos flexores deben ser eficaces, y un mínimo de oposición del pulgar para el que la flexión de la articulación interfalángica no es indispensable [10].

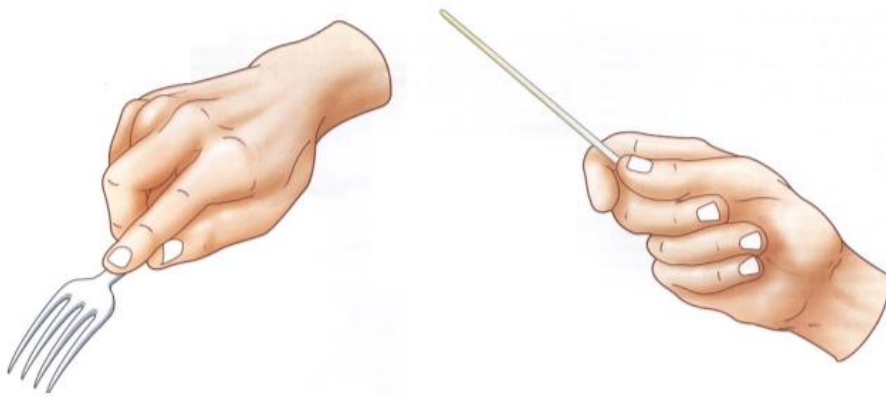


Figura 7. Ejemplos de prensas centradas. [10]

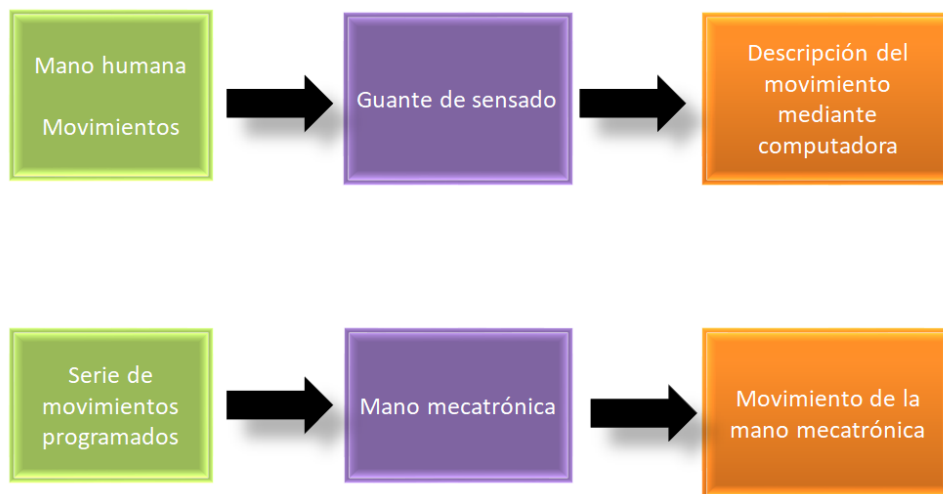
4. Generalidades del diseño del banco de pruebas

*“Hay tres respuestas para una pieza de diseño: sí, no y ¡WOW!
Wow es el objetivo.”*

-Milton Glaser-

El proyecto consiste en diseñar, construir y probar un banco de pruebas para obtener ecuaciones del movimiento de intuición de la mano humana. El banco de pruebas para desarrollar esta tarea consiste en dos subsistemas: Una mano mecatrónica antropomórfica y un guante de sensor.

En esta tesis las ecuaciones de movimiento de sujeción de la mano humana no serán tratadas, pero se harán pruebas objetivas a los subsistemas para comprobar el funcionamiento necesario para obtenerlas en un futuro. El flujo de información obtenido y probado se dará de la siguiente manera:



Esquema 1. Flujo de información de la mano mecatrónica y el guante de sensor.

4.1 Mano mecatrónica antropomórfica

Las manos y los brazos son herramientas poderosas con las que contamos los seres humanos para interactuar con el medio ambiente. Gracias a ellas somos capaces de manipular y transportar una gran variedad de objetos. [13]

Las manos mecánicas aparecieron a principios de los años 60's, sus diseños han variado a través de los años y se han utilizado para varias aplicaciones. Debido a su versatilidad las restricciones de sus diseños se adaptan a las aplicaciones para las que serán utilizadas.

El diseño de las manos mecánicas, por ejemplo, se basa en recrear el mayor número posible de habilidades que se encuentren en una mano humana, así como duplicar su destreza sin limitantes indispensables de diseño.[14] Para lograr, esto las manos han sido diseñadas con diferentes enfoques, logrando manos con varios grados de libertad y rangos de movimientos cercanos a los de una mano humana. [15] Sin embargo, los movimientos de estas manos no logran replicar totalmente el rango que las manos humanas pueden alcanzar, por ejemplo, las soluciones desarrolladas con una palma rígida usan mecanismos simplificados para el anular y el meñique, es decir, cuentan con un modelado cinemático simplificado. [14]



Figura 8. Shadow Dexterous Hand.

4.1.1 Diseño en general

En el diseño de esta mano mecatrónica antropomórfica se hizo énfasis en mantener los arcos flexibles de la palma. Mediante dichos arcos es posible obtener la destreza característica de los humanos, además de permitir la manipulación de objetos amorfos y de tamaños considerables[14]. Gracias a ellos la mano puede pasar de una posición de puño cerrado a una de mano abierta, en resumen, la mano tiene gran versatilidad de funciones debido a la flexibilidad de su palma[16].

El énfasis en que la mano mecatrónica tenga esta habilidad se hace debido a los movimientos de la mano humana que se van a estudiar, sujeción de la mano humana, y a la necesidad de que la mano mecatrónica sea capaz de realizar estos movimientos de manera natural.



Figura 9. Movimiento de sujeción.

4.2 Guante de sensado

Aunque los esfuerzos por construir manos mecánicas han dado frutos para conseguir características avanzadas en estas, la determinación automática de sus movimientos sigue siendo complicada, principalmente debido al gran número de grados de libertad involucrados[14].

La adquisición de datos del movimiento de la mano se ha usado en muchas aplicaciones de ingeniería, que van desde el análisis de gestos hasta las ciencias biomédicas. La obtención de estos datos basados en guantes representa uno de los mayores esfuerzos dirigidos a este fin[17].

Las aplicaciones de los guantes instrumentales varían desde juguetes[18], espacio exterior[19], control de brazos mecánicos mediante gestos manuales[20], tareas en conjunto humano-máquina[21], en la educación[22], idioma de señas[23], verificación de firmas electrónicas[24], manipulación de eventos en ambientes virtuales[25], entre otras.

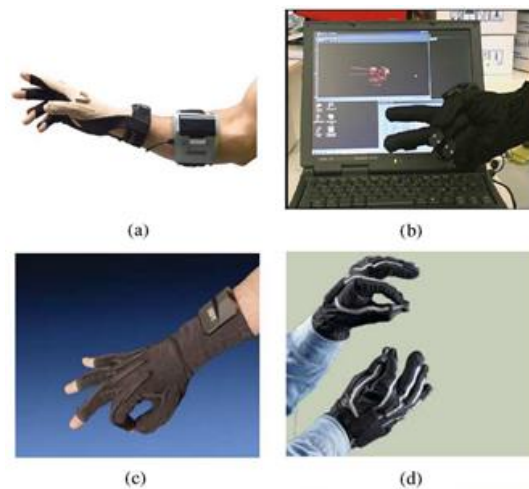


Figura 10. Ejemplos de otros guantes de sensado utilizado en diversos ámbitos.

4.2.1 Diseño en general

La selección de sensores en los guantes instrumentales se da debido a la aplicación de este y los grados de libertad que se medirán, por lo tanto, están condicionados. En el caso de este trabajo las restricciones y la información mínima fue dada de acuerdo al diseño de la mano mecatrónica y los movimientos que se estudiaran.

Trabajos similares se han hecho anteriormente, tenemos, por ejemplo, el diseño de un guante instrumental cuya aplicación en la tele operación, dio pie a tener una mano mecatrónica [14].

5. Diseño de la mano mecatrónica antropomórfica

“La robótica está empezando a cruzar esa línea de movimiento absolutamente primitivo a movimiento que se asemeja al comportamiento humano o animal.”

-J. J. Abrams-

La flexibilidad es un factor sumamente importante para los movimientos de la mano mecatrónica antropomórfica que se va a desarrollar.

El diseño parte de un dedo meñique desarrollado en el 2012 por Pedro Enrique Ávila Hernández, en su tesis: *“Actuación de un dedo antropomórfico mecatrónico”*. En esta tesis se aborda un sistema modular constituido por el mismo número de eslabones que el dedo meñique humano[26], este dedo meñique cuenta con las características de flexibilidad de la palma necesarias para la capacidad motora que se buscó obtener en la mano mecatrónica antropomórfica que se elaboró, agregando a este, algunas modificaciones convenientes a su diseño para mejorar su funcionamiento.

5.1 Estructura de la mano humana

La mano humana es un objeto de interés científico en muchas áreas de investigación debido a su estructura, ya que esta le otorga tanto la capacidad de producir una innumerable cantidad de movimientos como la capacidad de adaptar su forma y esto a su vez le permite la sujeción de objetos con formas irregulares.

Es por eso que, para poder diseñar un modelo capaz de asemejarse tanto en función como en morfología a la mano humana, es necesario estudiar el aspecto en concreto que le permite adaptar su forma (arcos flexibles), así como su estructura ósea y la antropometría que esta tiene.

5.1.1 Arcos flexibles

Para coger objetos la mano puede adaptar su forma. Cuando se quiere coger un objeto voluminoso, la mano se ahueca y se forman unos arcos orientados en tres direcciones [10]:

En sentido transversal [Figura 11] el arco carpiano XOY que corresponde a la concavidad del macizo carpiano. Se prolonga distalmente mediante el arco metacarpiano, en el cual se alinean las cabezas metacarpianas. El eje longitudinal del conducto carpiano pasa por el semilunar, el hueso grande y el tercer metacarpo.

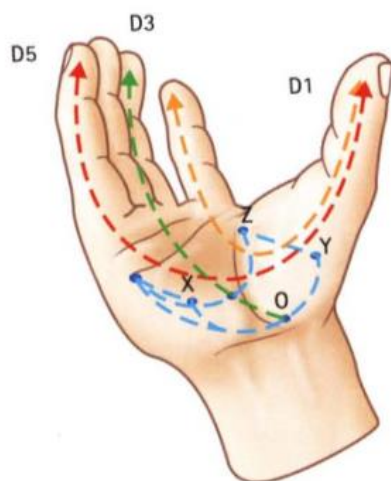


Figura 11. Mano representando los puntos de interés en la formación de los arcos flexibles. [10]

En sentido longitudinal, los arcos carpo-metacarpofalángicos, adoptan una posición radiada desde el macizo carpiano y están constituidos en cada dedo por el metacarpiano y las falanges correspondientes. La concavidad de estos arcos se orienta hacia delante de la palma y la clave de bóveda se localiza en la articulación metacarpofalángica. Los dos arcos longitudinales más importantes son:

El arco del dedo corazón OD3 [Figura 11], arco axial, ya que prolonga el eje del conducto carpiano.

El arco del índice OD2 [Figura 12], que es el que se opone con mayor frecuencia al del pulgar.

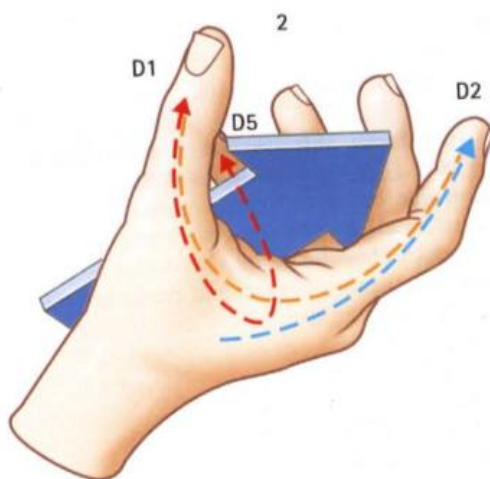


Figura 12. Vista de los arcos de oposición al pulgar. [10]

En el sentido oblicuo, los arcos de oposición del pulgar con los otros cuatro dedos, de estos resaltan dos:

El arco oblicuo que reúne y opone al pulgar y al índice, D1 – D2 [Figura 12].

El arco de oposición que pasa por el pulgar y el meñique, D1 – D5 [Figura 11, 12 y 13].

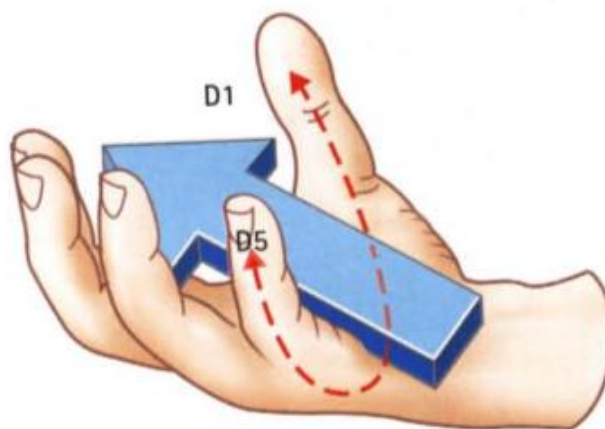


Figura 13. Arco de oposición pulgar meñique. [10]

En conjunto, cuando la mano se ahueca, forma un conducto de concavidad anterior, cuyos bordes están limitados por tres puntos: el pulgar D1, que constituye por sí sólo el borde externo, el índice D2 y el meñique D5 que limitan el borde interno. Entre estos dos bordes se despliegan los cuatro arcos oblicuos de oposición [Figura 12 y 13].

Por el contrario, cuando se separan los dedos al máximo [Figura 14], la mano se aplana y la distancia máxima entre el pulpejo del pulgar y el del meñique se denomina palmo o cuarta. Finalmente, una mano normal y sana presenta una arquitectura armoniosa, cuyas líneas de constitución pueden seguirse, en la Figura 15 las espirales unen las articulaciones homólogas convergiendo finalmente en un punto focal [10].



Figura 14. Máxima separación de los dedos [10].

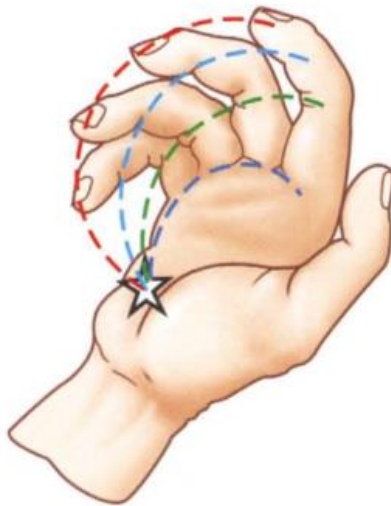


Figura 15. Posición en espiral las articulaciones homologas convergiendo en un punto focal. [10]

5.1.2 Estructura ósea

Cuando se habla de la estructura ósea de la mano podemos dividir los huesos en dos grupos:

1. Los huesos del metacarpo:

Constituyen el esqueleto de la palma y el dorso de la mano, formado por cinco huesos largos, los metacarpianos, denominados de lateral a medial como primero (I), segundo (II), tercero (III), cuarto (IV) y quinto (V) [27]. Los metacarpianos se encuentran separados entre sí, limitando los cuatro espacios interóseos [Figura 16].

2. Los huesos de los dedos:

Los dedos son muy móviles y están articulados con los metacarpianos, se denominan de lateral a medial como pulgar, índice, medio, anular y meñique. A excepción del pulgar, poseen tres segmentos óseos [27], falange proximal, media y distal; el pulgar sólo posee falange proximal y falange distal [Figura 16].

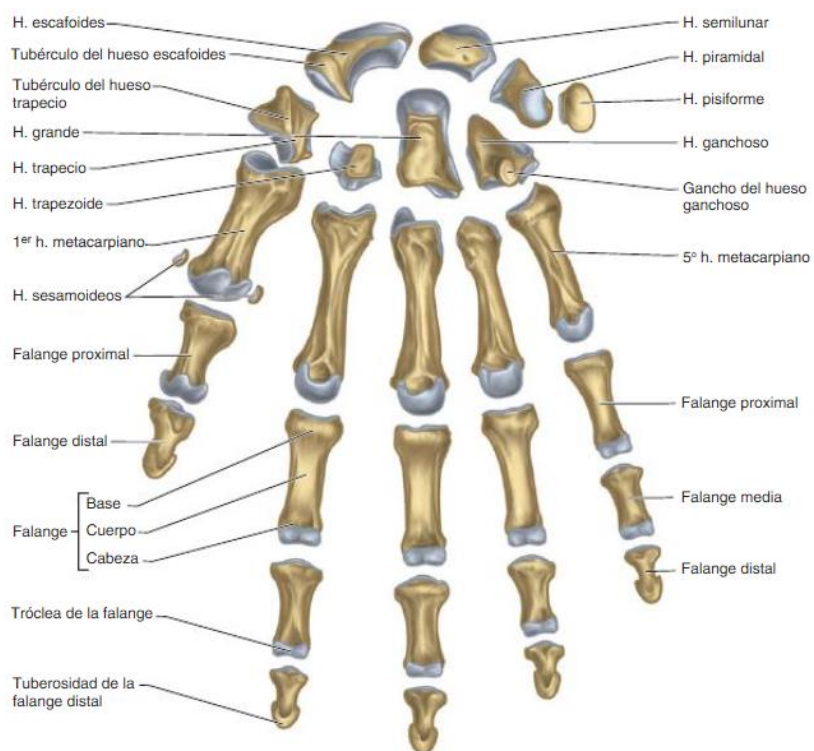


Figura 16. Esquema de los huesos de la mano humana [27].

5.1.3 Antropometría

El éxito funcional que tiene la estructura de la mano humana es, en parte, debido a sus dimensiones y proporciones. La mano cuenta con veintisiete huesos incluyendo a los de la muñeca y catorce falanges [28].

El metacarpo y las tres falanges (dos falanges en el caso del pulgar) que conforman a los dedos se pueden enrollar a modo de espiral logarítmica también llamada equi-angular [Figura 17], construida con base a la encajadura sucesiva de “Rectángulos de Oro”, denominados por la proporción entre su longitud y su anchura, que es de 1.618, conocido como “Número de oro” [26].

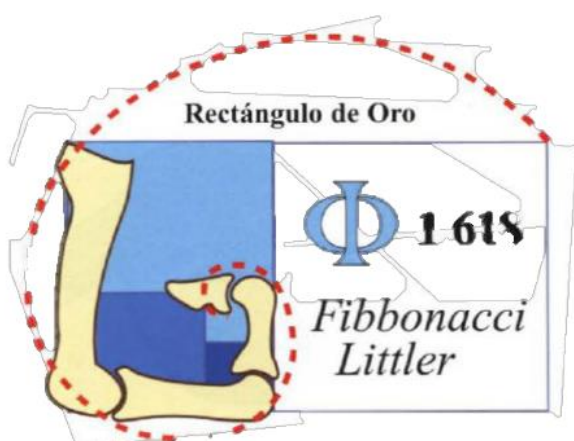


Figura 17. Dedo en posición equi-angular [26].

Gracias a esto se puede determinar la proporción entre los cuatro huesos, esta proporción está dada mediante la relación entre las longitudes de dos huesos contiguos [Figura 18], uno anterior y uno posterior, y corresponde al número de oro [26].

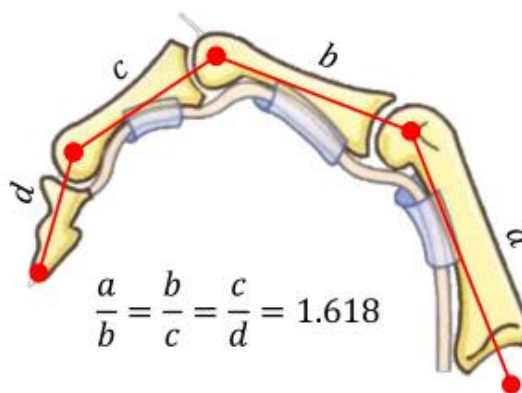


Figura 18. Relación entre las longitudes de las falanges de un dedo humano [26].

La relación mostrada en la Figura 18 nos permite conocer la medida de todas las falanges a partir del conocimiento de una sola de ellas. La proporción entre sus falanges se repite a lo largo los cinco dedos.

5.2 Diseño del dedo meñique

La estructura del dedo meñique se encuentra formada desde el macizo carpiano por 4 huesos: metacarpo, falange proximal, media y distal. Así mismo cuenta con 4 articulaciones: carpo-metacarpal CMC, metacarpo-falangeal MCP, interfalángica-proximal PIP e interfalángica distal DIP [Figura 19]. Un punto que es importante resaltar es que cuando el dedo humano se encuentra en extensión los centros rotacionales de las cuatro juntas anteriormente mencionadas se encuentran alineadas.

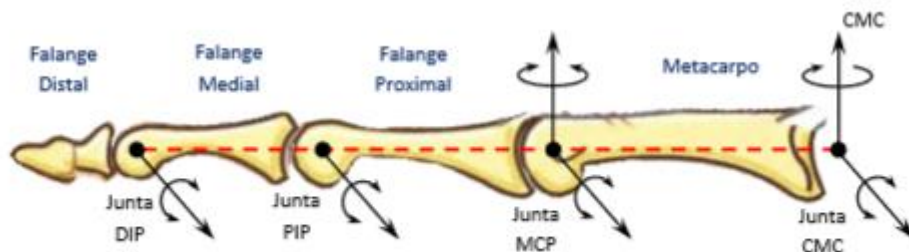


Figura 19. Falanges de un dedo humano en posición de extensión, así como centros y ejes de rotación en cada articulación [26].

Una característica importante de los ejes de flexión de las articulaciones CMC, MCP, PIP y DIP es que su orientación y posición no es fija. Durante el transcurso de la flexión se convierten progresivamente en oblicuos. Esta característica se llama evolutividad y se debe a la asimetría de las superficies articulares metacarpianas y falángicas[26].

5.2.1 Juntas y grados de libertad

El dedo meñique cuenta con seis grados de libertad: dos en la junta CMC, dos en la junta MCP, uno en la junta PIP y uno en la junta DIP.

La junta CMC presenta los movimientos de flexión de escasa amplitud e inclinación lateral prácticamente inexistente, es decir, cuenta con dos grados de libertad, uno en dos sentidos en torno

al eje X'X, flexión y extensión activa; y otro en un solo sentido lateral entorno al eje Y'Y [Figura 20].

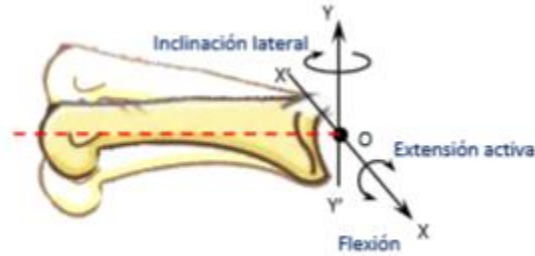


Figura 20. Articulación CMC, ejes y rotaciones [26].

La junta MCP presenta dos grados de libertad, uno de flexión entorno al eje X'X y otro de inclinación lateral (abducción y aducción) entorno al eje Y'Y [Figura 21].

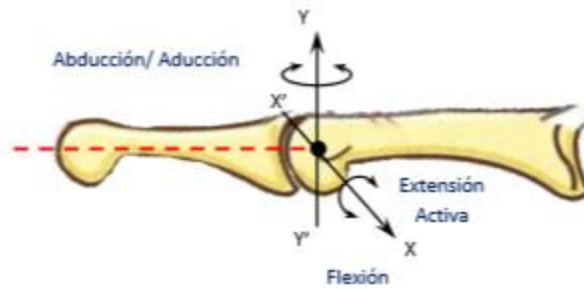


Figura 21. Articulación MCP, ejes y rotaciones [26].

Las juntas PIP y DIP son articulaciones de un solo grado de libertad. Tanto la articulación PIP como la DIP poseen un solo eje de rotación, X'X y Y'Y, respectivamente, y entorno a estos realizan los movimientos de flexoextensión [Figura 22].

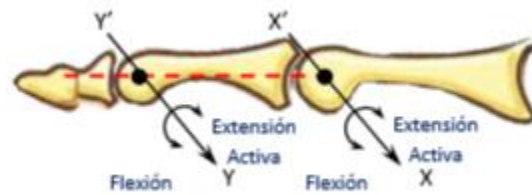


Figura 22. Articulación PIP y DIP, ejes y rotaciones [26].

Los rangos de movimiento para cada articulación son diferentes. En la Tabla 1 se muestra los rangos de movimiento para las distintas articulaciones del dedo meñique.

Tabla 1. Rangos de movimiento por articulación. [26]

Nombre de la articulación	Movimiento	Rango del movimiento
CMC	Flexión/Extensión Activa	15° / 15°
MCP	Flexión/Extensión Activa	110° / 40°
MCP	Abducción/Aducción	30° / 30°
PIP	Flexión/Extensión Activa	135° / 5°
DIP	Flexión/Extensión Activa	90° / 5°

5.2.2 Simplificaciones

Tomando en cuenta los grados de libertad de cada articulación, se hicieron algunas modificaciones que facilitarían el diseño del dedo meñique tratando de afectar su movilidad en la menor medida posible.

El rango de movimiento de inclinación lateral de la junta CMC es prácticamente inexistente, por lo que para el diseño del dedo meñique no será tomado en cuenta, reduciendo de esta forma los grados de libertad en la junta CMC a uno [Figura 23-II].

Se decidió eliminar el grado de libertad de la junta DIP y enlazar su movimiento con el de la junta PIP [Figura 23-II] mediante un mecanismo de cuatro barras. Esta simplificación fue implementada debido a que, durante la flexión del dedo, en general, el cambio angular de estas dos articulaciones mantiene una relación proporcional.

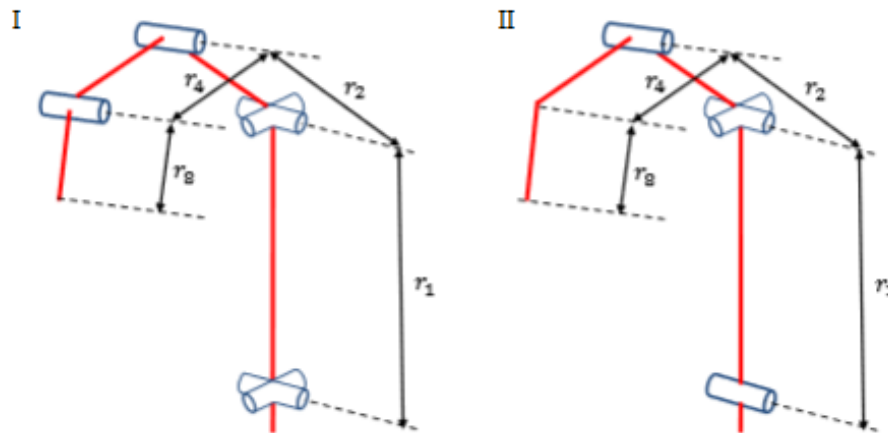


Figura 23. I) Grados de libertad en las articulaciones del dedo meñique sin modificaciones, II) grados de libertad aplicando las simplificaciones propuestas. [26]

Otra de las simplificaciones anexadas al diseño del dedo meñique radica en que las juntas no mantienen la característica de evolutividad de las articulaciones del dedo humano, es decir, los ejes de rotación de las juntas serán, para cualquier posición, perpendiculares a los ejes longitudinales de los eslabones durante la flexión del dedo. Así mismo, la posición relativa del centro de rotación de las juntas será invariante, caso contrario a los centros de rotación de las articulaciones del dedo humano en flexión.

5.2.3 Eslabones

Una característica importante del diseño de este dedo antropomórfico mecatrónico incide en que cada eslabón que conforma su estructura mecánica corresponde a uno de los huesos que conforman la estructura del dedo humano, en este caso, el meñique.

Otra característica resaltable es que las medidas longitudinales de los eslabones se encuentran en proporción aurea, ya que, como se mencionó anteriormente en la sección 6.1.3, el dedo humano cumple con la siguiente relación.

$$\frac{r1}{r2} = \frac{r2}{r4} = \frac{r4}{r8} = 1.618$$

Ecuación 1. Relación entre los eslabones del dedo mecatrónico antropomórfico.

Se tomó como medida inicial la longitud de la falange proximal r4, y con base en esta y a la Ecuación 1, se determinaron las medidas longitudinales de los demás eslabones, los cuales están definidos como las distancias entre los centros de rotación de las juntas [Tabla 2].

Tabla 2. Medidas longitudinales de los eslabones.

Nombre de la medida longitudinal o distancia entre centros de rotación.	Inicio- Fin	Magnitud (mm)
r1	CMC – MCP	77.6
r2	MCP – PIP	48
r4	PIP – DIP	30.2
r8	DIP – Punta del dedo	19

Si se quiere tener una visión más completa del diseño de cada uno de los eslabones, se pueden consultar los planos en el Apéndice A. Planos de los eslabones de un dedo

5.2.4 Escalamiento del meñique a la mano

Se ha mencionado antes que las proporciones de las falanges no son aplicables únicamente al dedo meñique, esta proporción es aplicable a todos los dedos de la mano. No solo las proporciones del dedo meñique pueden ser replicables a los otros dedos en general, los grados de libertad son iguales en cada dedo, lo que significa que la mano mecatrónica antropomórfica en general tendrá unos 20 grados de libertad en conjunto, y cuatro grados de libertad por dedo.

Gracias a esto al diseñar un dedo se puede considerar que se tienen los otros cuatro, con unas variaciones para el pulgar que se verán en el capítulo siguiente, los tres dedos que si pueden seguir el diseño del meñique son el anular, el medio y el índice, para los cuales se escaló el meñique.

Para conservar la funcionalidad de la mano se necesita, no solo que se mantenga el número de falanges por dedo, si no que las medidas tengan la proporción natural de los dedos en una mano humana, el meñique por tanto se escaló en base a esta proporción.

Las medidas para escalar los dedos se tomaron a partir del trabajo realizado por Garret [Tabla 3], donde se encuentra la relación de medidas entre falanges y la longitud del dedo.

Tabla 3. Estudio antropométrico de la mano por Garrett [29].

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

A partir de esta tabla se hizo una relación entre las medidas de los dedos para poder escalarse. Después del escalamiento las medidas de las falanges de los dedos quedaron de esta forma:

Tabla 4. Medidas de las falanges después de escalar el dedo meñique siguiendo la propuesta de proporción de Garrett.

	Meñique	Anular	Medio	Índice	Pulgar
Distal	16.11	21.11	22.56	19.98	20.08
Media	30.2	37.68	42.28	35.67	
Proximal	41.62	56.75	58.35	53	43.72
Metacarpo	78.12	102.41	109.45	96.94	78.12

5.3 Tipo de actuación y transmisión.

En la actualidad se han propuesto algunos sistemas de actuación para las prótesis comerciales, prototipos en desarrollo y manos robóticas antropomórficas. Estos sistemas se diferencian unos de otros no sólo en el principio de funcionamiento, ya que hay factores muy relevantes como el ruido, cantidad de energía consumida, tamaño, peso, eficiencia, potencia alcanzada, entre otros [30].

Para manos robóticas antropomórficas los actuadores más comunes son los eléctricos, neumáticos e hidráulicos.

Los actuadores eléctricos son los más socorridos por los diseñadores debido a su gran disponibilidad, alta eficiencia y tamaños compactos. Los actuadores eléctricos más comunes son el motor de corriente directa, y los servomotores, aunque también se han propuesto y utilizado motores ultrasónicos y motores sin escobillas. Algunas manos robóticas que utilizan actuadores eléctricos son “CyberHand”[31], “Gifu Hand III” [32], “MANUS Hand” [33], “DLR Hand II” [13], entre otros [Figura 24].

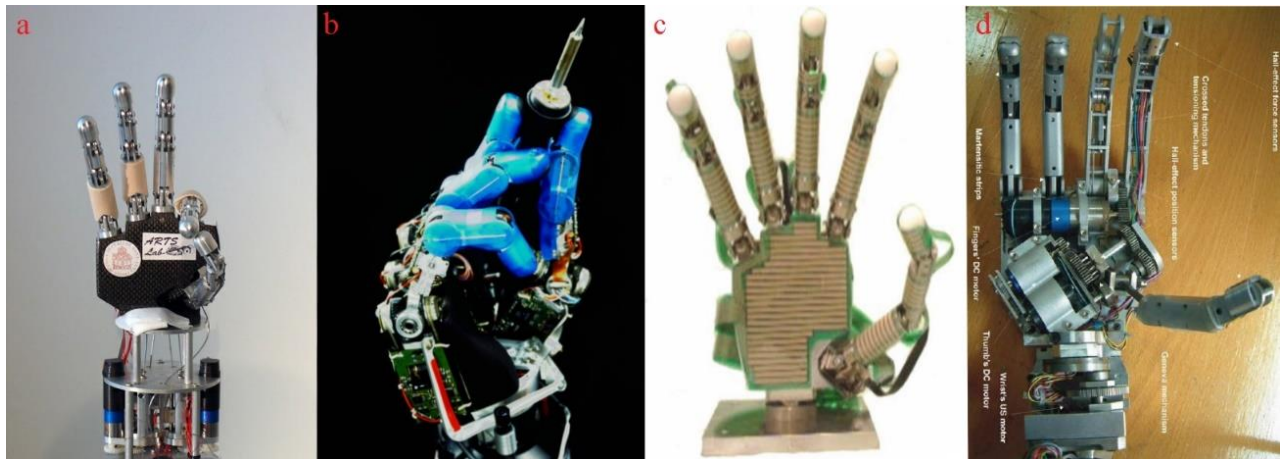


Figura 24. a) CyberHand, desarrollada en la Scuola Superiore Sant'Anna. b) DLR Hand II, del Centro Alemán de Investigaciones Aeroespaciales. c) Gifu Hand III, e la Universidad de Gifu en Japón. d) MANUS Hand, fue desarrollada como mano robótica antropomórfica.

Los actuadores neumáticos e hidráulicos, aunque no son tan usados como los eléctricos, también llegan a implementarse, estos dos tipos de actuadores tienen generalmente el mismo principio, la diferencia entre ellos es el fluido con el que funcionan, la neumática utiliza gases y la hidráulica líquidos, principalmente aire y agua, respectivamente. El principio de estos dos actuadores es un pistón que comprime un fluido a través de una manguera o tubo, su ejemplo más conocido como actuador en manos robóticas es un músculo artificial neumático/hidráulico.

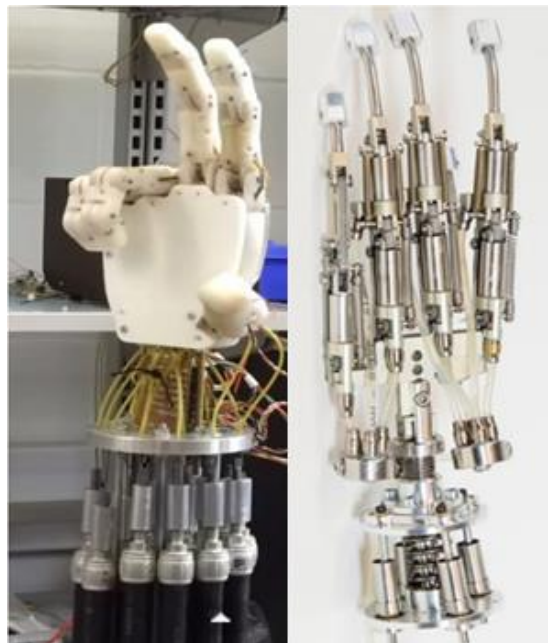


Figura 25. A la izquierda, Ambidextrous Robot Hand actuada por un músculo artificial neumático [Artículo 6]. A la derecha, una muñeca hidráulica integrada con la Delft Cylinder Hand [34].

En este caso, para seleccionar el tipo de actuación y transmisión que se implementó en la mano mecatrónica antropométrica y algunos componentes de los subsistemas se utilizó la técnica de “Selección de Concepto de Pugh”, en esta técnica se elabora una matriz de selección que sirve para evaluar y ordenar los conceptos, para finalmente escoger uno o más con base en la información presentada en la matriz.

Para evaluar los conceptos de referencia se usará el siguiente código:

- + "Mejor qué "
- 0 "Neutral "
- -- "Peor qué "

Después de evaluar los conceptos, se hace una suma de evaluaciones “mejor qué”, “neutral” y “peor qué”; introduciendo la suma de cada categoría en las filas inferiores, una vez hecha la suma se clasifican del más alto al más bajo, según la calificación que se obtuvo en la evaluación neta, en este punto es fácil identificar los criterios que realmente pueden ser de utilidad para el proyecto y que cumplan en su mayoría y de mejor forma todos los criterios requeridos.

Con base en los resultados obtenidos de la matriz se decide que concepto se va a elegir, y si es que existe más de un concepto que cumpla con los criterios se puede decidir si habrá una segunda ronda de filtrado.

5.3.1 Actuadores.

Como ya se mencionó, se tiene registro de diversos tipos de actuadores empleados en manos mecánicas, sin embargo, por el diseño del dedo antropomórfico mecatrónico en el que se basa el diseño de la mano, los actuadores que se emplearán serán motores, razón por la que la matriz de selección de concepto servirá para decidir el tipo de motor que se empleará como actuador: motor step by step, micro servo SG90, servomotor HD 1051MG o encoder.

Tabla 5. Matriz de selección para tipo de actuación.

Criterios de Selección	Conceptos			
	MicroServo SG90	Servomotor HD1501 MG	Motor Step by Step	Encoders
Mano Mecatrónica: Actuadores				
Disponibilidad de movimiento gradual.	0	0	0	0
Fácil adquisición de información de la posición.	+	+	-	0
Fuerza suficiente para objetos ligeros	0	+	0	0
Capacidad de mantenerse en una posición	+	+	-	0
Menor tamaño	+	-	0	0
Par motor suficiente para movimiento de los dedos	0	+	0	0
Precio	+	-	0	0
Suma +	4	4	0	0
Suma 0	3	2	5	7
Suma -	0	2	1	0
Evaluación Neta	4	2	-1	0
Lugar	1	2	4	3
¿Continuar?	Si	Revisar	No	No

Por los resultados obtenidos, el MicroServo SG90 es el más adecuado debido a su fácil adquisición, su capacidad de mantener la posición, su tamaño y precio; seguido de este se encuentra el Servomotor HD1501MG que, aunque tiene una capacidad de par motor mayor, es inconveniente en tamaño y precio.

El número de actuadores necesarios por dedo es de cinco, por lo que se necesitan un total de 25 MicroServos SG90 para brindarle completo movimiento a la mano. Sin embargo, en los dedos más grandes (dedo índice, medio y anular) es necesario un par motor mayor que el que ofrece el MicroServo SG90 para poder jalar uno de los tendones que proporciona el movimiento de flexión y extensión de manera adecuada, motivo por el cual se decidió usar como actuador para este tendón en estos tres dedos el Servomotor HD1501MG. Siendo así, 22 MicroServos SG90 y 3 Servomotores HD1501MG.

5.3.2 Transmisión

Igual que en el caso de los actuadores, el diseño en el que se basa la mano mecatrónica antropomórfica este hecho para que su transmisión sea por medio de tendones, por lo que la matriz de decisión es para decidir el tipo de tendón que se empleara a modo de transmisión.

Tabla 6. Matriz de selección para tipo de transmisión.

Criterios de Selección.	Conceptos.			
	Hilo de cobre	Hilo de aluminio	Hilo de níquel	Nylon
Tendones				
No se deforma	0	0	0	0
Resiste la tensión para mover los eslabones de los dedos	0	-	0	+
Es lo suficientemente delgado para atravesar los agujeros de los eslabones	0	0	0	0
No daña los eslabones	-	-	-	+
Suma +	0	0	0	1
Suma 0	3	2	3	2
Suma -	1	2	1	0
Evaluación Neta	-1	-2	-1	1
Lugar	2	3	2	1
¿Continuar?	No	No	No	Si

El tendón más conveniente es el de nylon ya que es más resistente al ser tensionado y no daña los eslabones, este último punto es importante debido a que las piezas son de ABS y los tendones podrían llegar a cortar las piezas.

5.3.3 Acoplamiento de transmisión y actuadores

Para acoplar el sistema de transmisión a los actuadores se diseñaron poleas que se adaptaran a los brazos para servo que traen incluidos cada uno de los servomotores [Figura 26]. La extensión del brazo del servo motor se acorto según las dimensiones requeridas en la polea a la que se iba a adaptar.



Figura 26. La pieza color blanca corresponde al brazo del MicroServo SG90 y la pieza negra corresponde al brazo del Servomotor HD1501MG.

Las poleas diseñadas se dividen en tres tipos según el motor y el tendón al que están asignadas y tienen el mismo principio de diseño.

El diseño consiste en una polea con dos orificios en la llanta usados para que pase el tendón, en la parte trasera del cuerpo tienen una modificación para adaptar el brazo del MicroServo o del Servomotor y donde iría el eje de la polea se modificó para que tuviera un orificio que sirve para fijar con un tornillo la polea al brazo correspondiente. [Figura 27]. Los planos correspondientes cada una de las poleas son visibles en el Apéndice B. Planos de las poleas

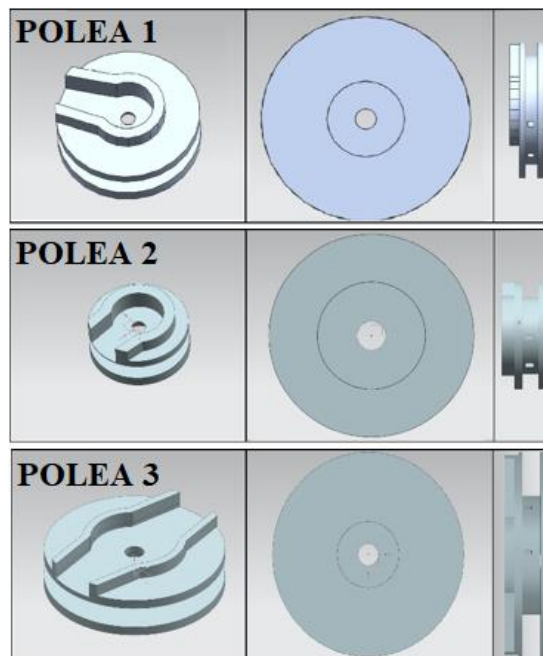


Figura 27. Vista isométrica, superior y lateral de las poleas diseñadas. La polea 1, 2 y 3 respectivamente.

Por cada dedo se requieren cinco tendones [Figura 28] y por lo tanto se requiere un total de cinco poleas.

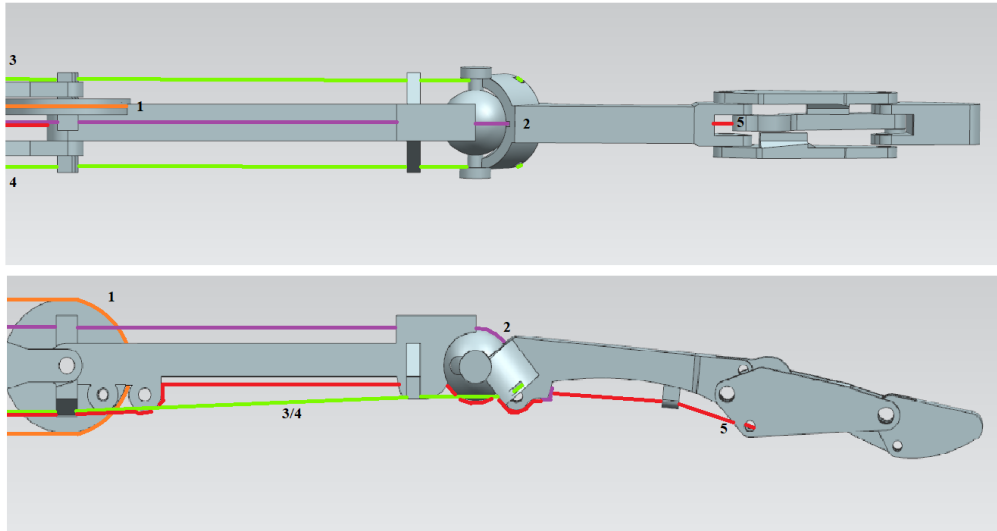


Figura 28. Distribución de los tendones en un dedo enumerados del 1 al 5: 1) Ligeró movimiento de flexión y extensión del metacarpo. 2) Movimiento de extensión del dedo. 3/4) Movimiento de abducción y aducción. 5) Movimiento de flexión.

La manera en que se distribuyeron las poleas fue la siguiente:

1. Polea 1: Esta polea fue diseñada para ser usada con el brazo de los MicroServo SG90 en los tendones 1 y 2 de todos los dedos y en el tendón 5 del meñique y el pulgar.
2. Polea 2: Esta polea también fue diseñada para ser usada con el brazo de los MicroServo SG90 en los tendones 3 y 4 de todos los dedos.
3. Polea 3: Esta polea fue diseñada para ser usada con el brazo de los Servomotores HD1501MG en el tendón 5 del índice, medio y anular.

5.4 El pulgar

Antes se ha mencionado la importancia de las manos mecánicas y el desarrollo que han tenido a lo largo de los años. El diseño de cada una de estas manos suele corresponder a las aplicaciones que se tendrán, ya sean prótesis o manos mecánicas pensadas en manipulación industrial. La razón principal de estudiar la arquitectura de las manos humanas para su aplicación a la industria se debe a que dotan al robot que las integra con la capacidad de llevar a cabo tareas de una forma versátil y con cierta destreza.

La habilidad que este tipo de manos tiene para reconfigurarse y adoptar diversas formas [Figura 29] permite realizar distintos tipos de sujeción, reduciendo la posibilidad de tener que cambiar las herramientas [35].

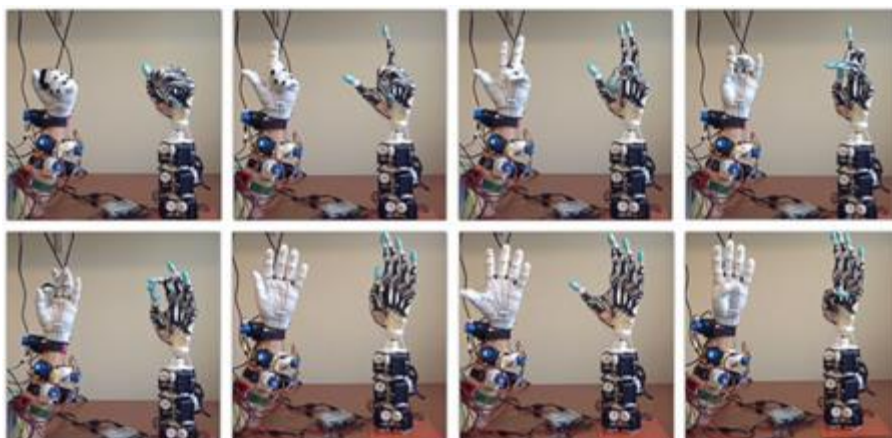


Figura 29. Mano robótica adaptando diversas configuraciones.

Una de las acciones más complejas que integran la actividad motora y sensorial es el hecho de agarrar algo con la mano [36]. El dedo pulgar se considera como uno de los dedos más importantes, se suele hacer énfasis en la capacidad de movimiento de este dedo, además esta capacidad de manipulación es lo que distingue principalmente a los seres humanos de otros mamíferos.

Las manos humanas se distinguen de los simios por poseer pulgares más largos en relación con los dedos [37]. El dedo pulgar está fijo por debajo de los otros dedos y puede realizar los movimientos de cierre y rotación debido a la gran movilidad de su metacarpo [38]. Esta capacidad es la que permite oponer el dedo pulgar a los otros dedos y suele pensarse como la clave de la manipulación humana, aunque el ser humano es el único mamífero con un pulgar completamente oponible [39].

5.4.1 Particularidades del diseño

Este dedo se diferencia de los demás porque carece de falange media, por lo que solo tiene una articulación interfalángica, las articulaciones metacarpofalángicas y la trapeciometacarpal. Estas son clave para los movimientos tanto de abducción y aducción del pulgar [35].

En cuanto a la prensión, el dedo pulgar participa en la prensión bidigital, sin él los movimientos de los dedos constituirían solo prensiones globales en vez de movimientos precisos [38].

El dedo pulgar puede realizar los siguiente [38].

- Abducción-extensión [Figura 30a] que separa el dedo pulgar del eje de la mano, su amplitud es de 35 a 40°, este movimiento abre la mano.
- La aducción [Figura 30b] que aproxima el dedo pulgar al eje de la mano. Su amplitud es de 35 a 40°.
- La oposición [Figura 30c] que, combinada con la flexión del dedo pulgar, lo conduce frente al dedo meñique. Se trata de un movimiento de prensión o cierre de la mano, este movimiento se tocará con mayor profundidad más adelante.
- La reposición [Figura 30d] devuelve el dedo pulgar a su posición inicial de partida, su amplitud es necesariamente igual a la del movimiento precedente.

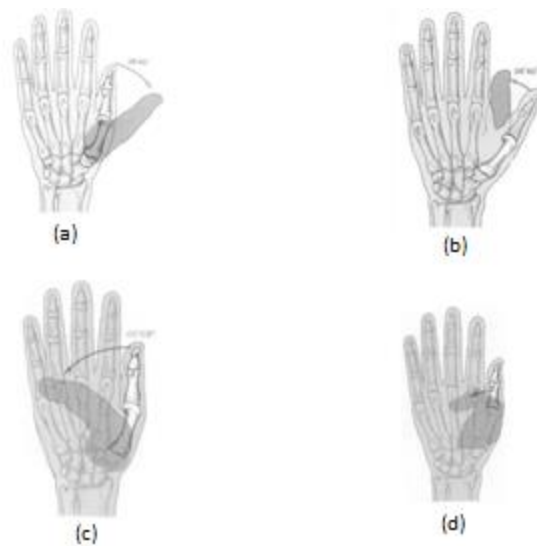


Figura 30. Movimientos que puede realizar el pulgar: abducción-extensión, aducción, oposición, reposición.

El dedo pulgar, además se usa para varios tipos de prensiones [38] [Figura 31].

- Pinza bidigital: postura que se logra cuando el dedo índice y el dedo pulgar se juntan (o el dedo índice, el dedo medio y pulgar) para coger objetos y mantenerlos cuando se necesita precisión.
- Pinza pluridigital: se consigue rotando el pulgar en oposición directa al dedo índice (abducción palmar) en el caso de objetos esféricos más pequeños y en diferentes grados de abducción palmar para objetos esféricos más grandes. Se utiliza para sujetar una pelota, una manzana u otros objetos redondos.
- Prensa palmar: Se consigue rotando el pulgar totalmente en la posición de aducción o acercamiento palmar. Se utiliza para sujetar latas, maletines y bolsas de la compra con un agarre totalmente envolvente del objeto.

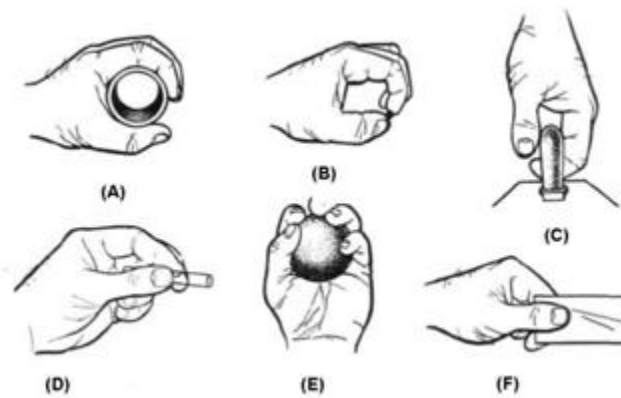


Figura 31. Tipo de prensiones que se realizan principalmente por la participación del pulgar.

5.4.2 Diseño del pulgar

El diseño de este dedo sigue las mismas líneas que los anteriores. El metacarpo también es diseñado para mantener los arcos palmares, aunque la oposición que logrará el pulgar no se trata en el diseño del dedo si no, en el la base de la mano. Los planos para construcción de este pulgar se pueden ver en el Apéndice C. Planos del pulgar

Las medidas del pulgar, al igual que los otros dedos, se tomaron a partir de la Tabla 3.

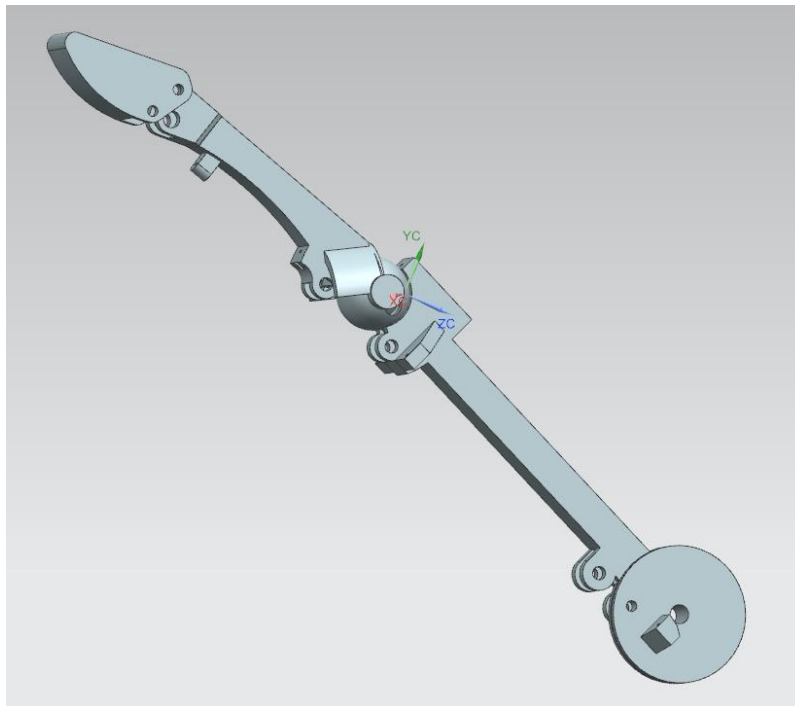


Figura 32. Dedo pulgar diseñado en NX, se puede observar los tres elementos, la falange distal y proximal sin que exista una media, y el metacarpo.

El movimiento de la falange distal, al igual que en los otros dedos está relacionada con la falange próxima a este, en este caso es la proximal en lugar de la media, por lo que el hueco del resorte para relacionar ambos movimientos se rediseñó para entrar entre la falange media y distal.

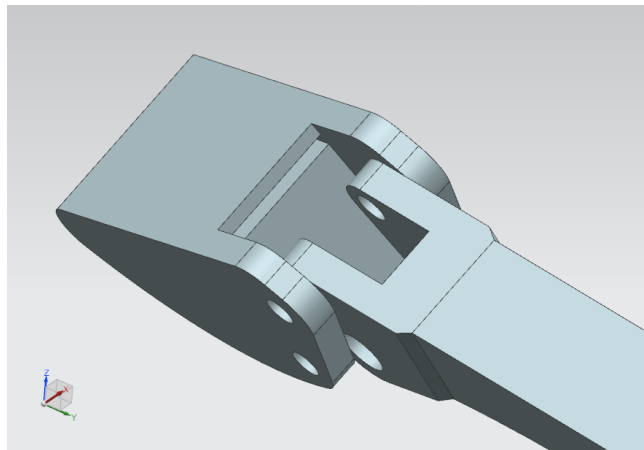


Figura 33. Acercamiento a la falange distal, donde se puede observar la adaptación que se hizo para que el resorte entre en entre las dos falanges y se pueda regresar el dedo a su posición inicial sin necesidad de insertar un acoplador.

Finalmente, el metacarpo del dedo pulgar fue adaptado a la rótula diseñada para la base de la mano, de modo que, aunque los tendones de este dedo son los mismos, la forma de operar es distinta. El tipo de rótula y sus especificaciones para mantener los ángulos del movimiento serán tratados más adelante.

5.5 Diseño de la base de la mano

Para diseñar una base que pueda sostener los cinco metacarpianos con las posiciones y el espaciamiento requerido para su movimiento, es necesario considerar principalmente la amplitud de la abducción y aducción de las articulaciones metacarpofalángicas, para considerar el rango angular en el que se desplazan al realizar dichos movimientos y estos no choquen entre sí. En cuanto a la flexión y extensión, estos son movimientos que no intervienen para el diseño de la base ya que el eje en el que se realiza el desplazamiento de este movimiento no interfiere en ningún momento con algún dedo contiguo; otro aspecto importante a la hora de diseñar la base es la amplitud del movimiento de la oposición del pulgar, ya que es importante que el pulgar esté angularmente bien posicionado.

5.5.1 Movimientos de abducción y aducción

La abducción es definida como un movimiento en una junta que aleja una parte de un cuerpo de la línea media del mismo, mientras que el movimiento de aducción es lo contrario a la abducción, es decir, es un movimiento que acerca una parte del cuerpo a su línea media [40].



Figura 34. La imagen ejemplifica el dedo índice realizando el movimiento de abducción – aducción, las líneas punteadas marcan los límites de amplitud del movimiento y la línea media del dedo. [10]

Para el diseño de la base se tomó en cuenta una amplitud angular de 30° para los movimientos de abducción y aducción [Tabla 1 capítulo 6.2.1], este parámetro de diseño fue decidido con base en el dedo índice, debido que después del pulgar es el dedo con mayor amplitud de movimiento en sentido lateral.

5.5.2 Oposición del pulgar

La oposición del pulgar es la facultad para desplazar la yema del pulgar para contactar con él el extremo superior opuesto de la palma y las yemas del resto de los cuatro dedos para realizar lo que se ha venido considerando pinza pulgodigital, este movimiento representa lo esencial del valor funcional de la mano [10].

Para el movimiento oposición, el pulgar hace especial uso de la capacidad de flexión. Si consideramos al pulgar en extensión como posición inicial y este se va flexionando, se puede observar cómo se posiciona sobre el extremo superior opuesto de la palma llegando a un estado de hiperflexión [Figura 35]. Al hacer esta transición de movimiento, el pulgar hace un recorrido angular de 120° como máximo.

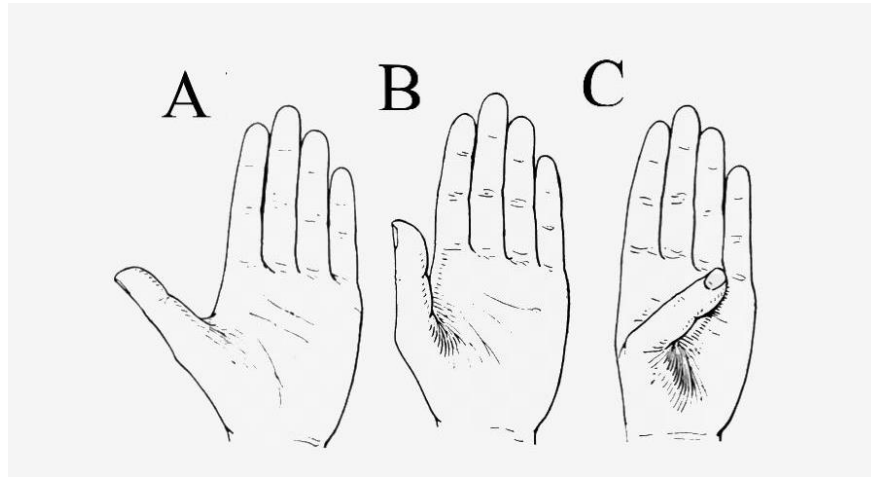


Figura 35. A) Pulgar en extensión. B) Pulgar en flexión. C)Pulgar en Hiperflexión.

Cuando se llega a la posición de hiperflexión el recorrido angular máximo de 120° fue realizado por la punta de la falange distal, sin embargo, esta no realiza ningún movimiento, este recorrido angular se realiza gracias a las aportaciones angulares del metacarpo y la falange proximal del dedo pulgar, ya que el metacarpo realiza un recorrido de aproximadamente 50° , mientras que la falange proximal realiza un recorrido de entre 60° a 70° .

5.5.3 Soporte del 2º al 5º metacarpo

Para diseñar el soporte de un dedo se utilizará su metacarpo; el metacarpo de cada dedo tiene una rueda con un orificio por el que atraviesa un eje que permite el giro del metacarpo en el movimiento de flexión y extensión del dedo [Figura 36].

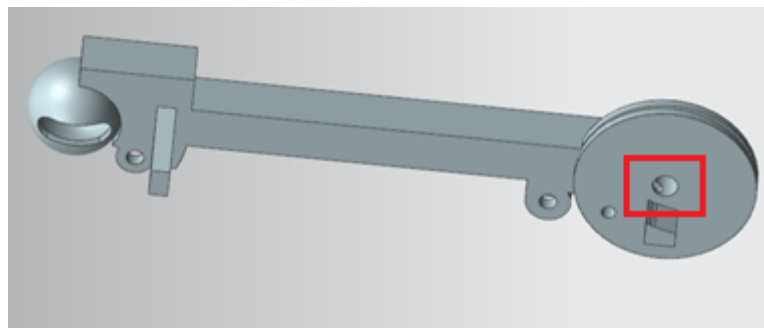


Figura 36. Imagen del metacarpo de un dedo en el que se observa dentro de un rectángulo rojo el orificio por donde pasará el eje que permite el giro del metacarpo en el movimiento de flexión y extensión del dedo.

Este eje anteriormente mencionado, será sostenido por la base del dedo por medio de dos soportes perpendiculares a una base rectangular [Figura 37] con seis perforaciones correspondientes a los orificios necesarios para que los tendones del dedo atraviesen la base y al mismo tiempo sirvan de guía para los mismo [Figura 38].

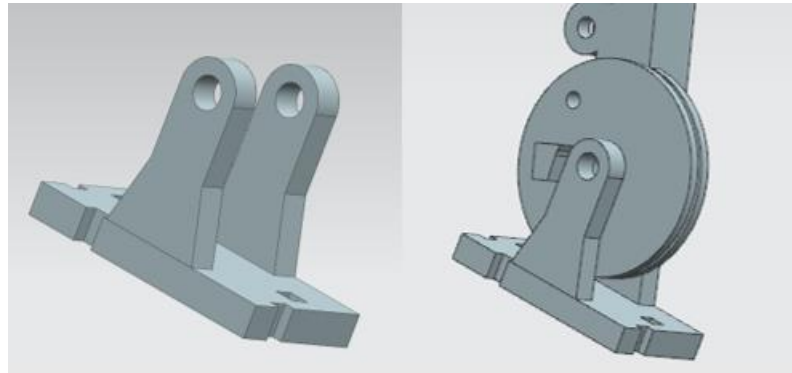


Figura 37. Del lado izquierdo se observa el soporte del dedo en vista isométrica, donde se ven los dos postes con el orificio para el eje a la altura correcta. Del lado derecho se observa la rueda del metacarpo ensamblada en el soporte haciendo coincidir el eje.

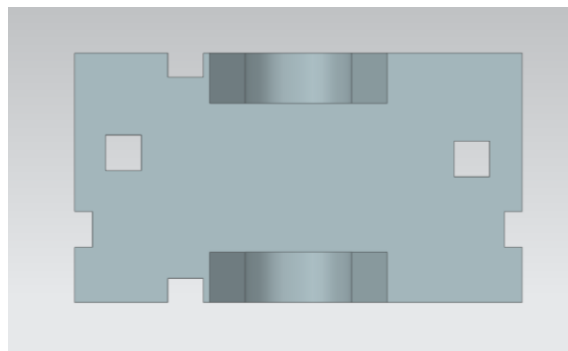


Figura 38. Vista superior del soporte del dedo, donde se aprecian los seis orificios por los que pasan los tendones.

5.5.4 Soporte del 1^{er} metacarpo

Para el primer metacarpiano también se tiene una rueda en el extremo inferior del metacarpo ya que este fue escalado a partir del dedo base, sin embargo, se le hizo una modificación a la rueda para que esta no girara alrededor de un eje. Esta modificación consistió en un segundo orificio que nos ayudaría a fijar el metacarpo a los soportes [Figura 39].

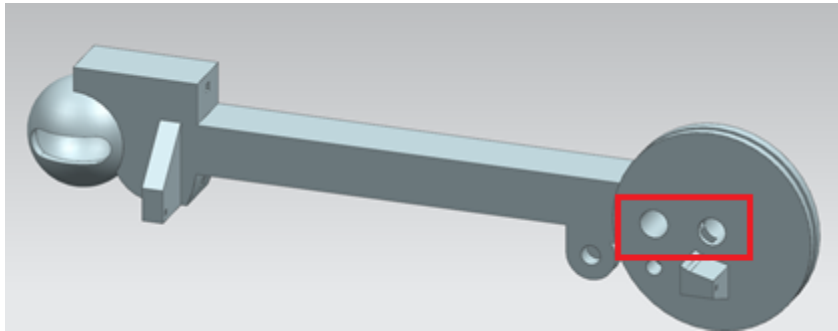


Figura 39. Metacarpo del dedo pulgar con la modificación de un segundo agujero para evitar la rotación que se tiene en los metacarpos restantes (2° al 5°).

Esta modificación fue realizada debido a que el soporte para el dedo pulgar se propuso como una esfera a la que se encuentran unidos dos soportes que servirán para que el metacarpo quede fijo [Figura 40]. Esta decisión se tomó con la intención de favorecer el movimiento del metacarpo al ensamblarlo con la base final de la mano debido a que, como se mencionó anteriormente, el primer metacarpo tiene una movilidad angular mayor a los demás.

En adición a la base esférica del soporte para el dedo pulgar, podemos agregar que esta no tiene perforaciones para que pasen los tendones, ya que estas perforaciones guías serán colocadas en la base final de la mano para evitar que interfieran principalmente con el movimiento del metacarpo.

También es importante mencionar que esta junta esférica sigue respetando las simplificaciones mencionadas en el capítulo 6.2.2, esto quiere decir que el movimiento que amplía la abducción del pulgar fue descartado. Aunque específicamente en este dedo ese movimiento es parte importante de su motricidad, para los movimientos de sujeción planteados el único movimiento indispensable es el movimiento de flexión-extensión.

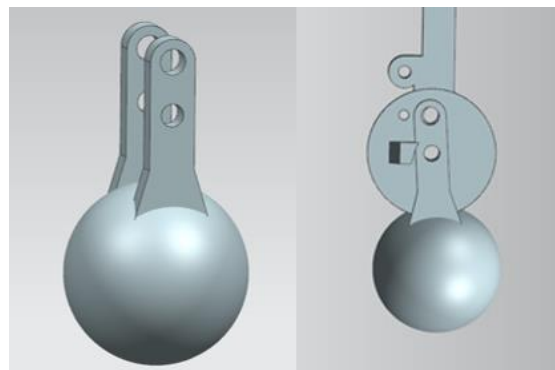


Figura 40. Del lado izquierdo se observa el soporte del dedo, con los dos postes sobre la base esférica y los dos orificios que sirven para fijar la rueda del metacarpo para impedir el giro. Del lado derecho se observa la rueda del metacarpo ensamblada en el soporte.

5.5.5 Base final de la mano

Una vez teniendo los soportes con las características necesarias para cada dedo, el siguiente paso fue encontrar la manera de juntarlos de forma que sigan respetando el espacio y la movilidad de cada uno de los dedos de la manera más apegada a la disposición de la mano humana.

Para esto se tomó en cuenta que el movimiento de abducción y aducción es de 30 grados, ± 15 grados partiendo del eje central, por lo que es necesario tener una separación de 30 grados entre cada soporte del 2° al 5° metacarpo.

Ahora bien, para 1^{er} metacarpo se necesitó hacer un acoplamiento para el soporte esférico del pulgar, convirtiéndola en una junta esférica restringida con la ayuda de un carril que limita los grados de libertad del soporte permitiendo únicamente el movimiento de extensión y flexión del pulgar, ya que es el movimiento más relevante para la prensión de objetos.

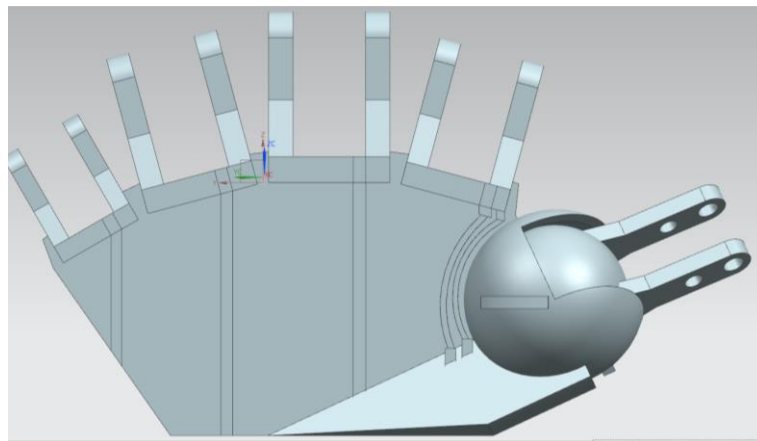


Figura 41. Disposición de los soportes del 1er al 5° metacarpo.

Otro de los aspectos importantes de la base final de la mano son los canales guía por los que salen los tendones de los dedos, estos canales fueron hechos directamente en la misma disposición del soporte de cada metacarpo atravesando la base completa, a excepción del pulgar, para guiar los tendones del pulgar se diseñaron guías externas en una especie de pestanas alrededor de la cavidad esférica que alberga el soporte del 1^{er} metacarpo.

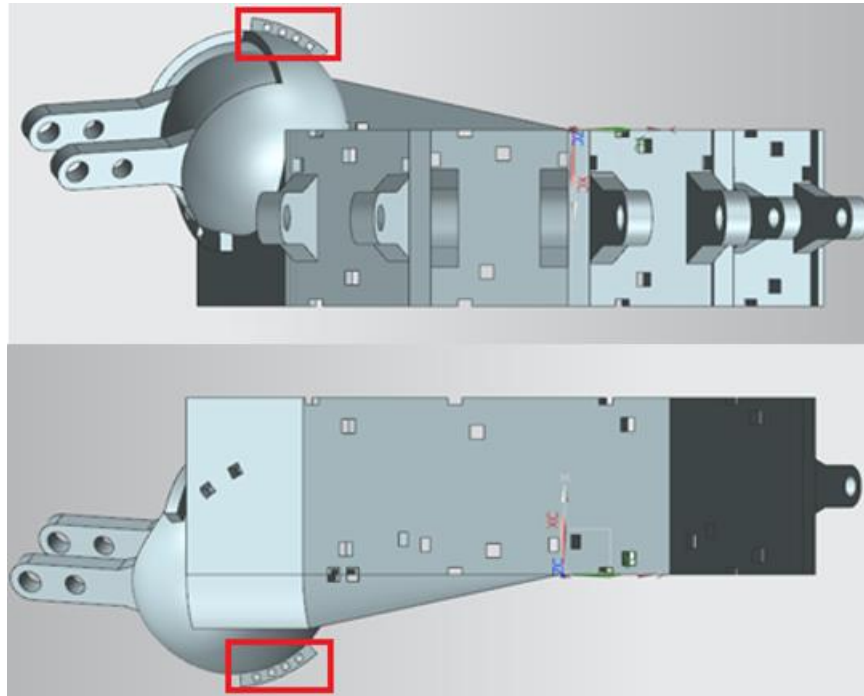


Figura 42. Imagen superior e inferior de la base de los dedos, donde se observan las guías de los tendones de cada dedo. El contenido en marcado en los rectángulos rojos corresponde a las guías externas para los tendones del dedo pulgar.

Finalmente, se muestra a continuación el resultado final del ensamble de cada uno de los dedos acoplados en la base final de la mano.

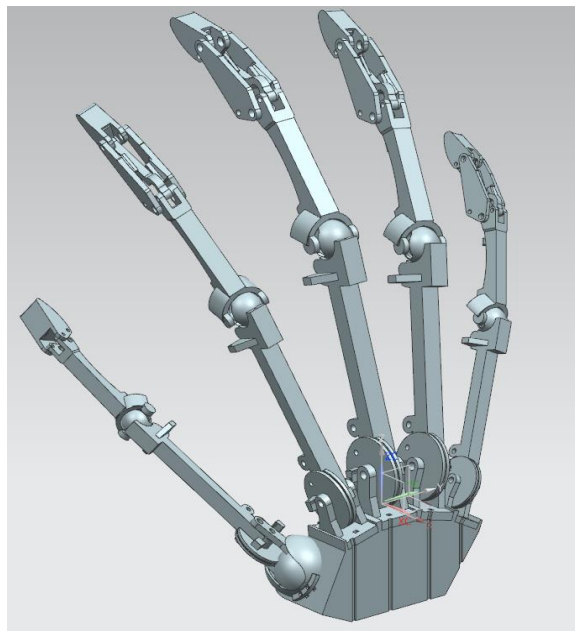


Figura 43. Vista isométrica del ensamble completo de la mano mecatrónica antropomórfica.

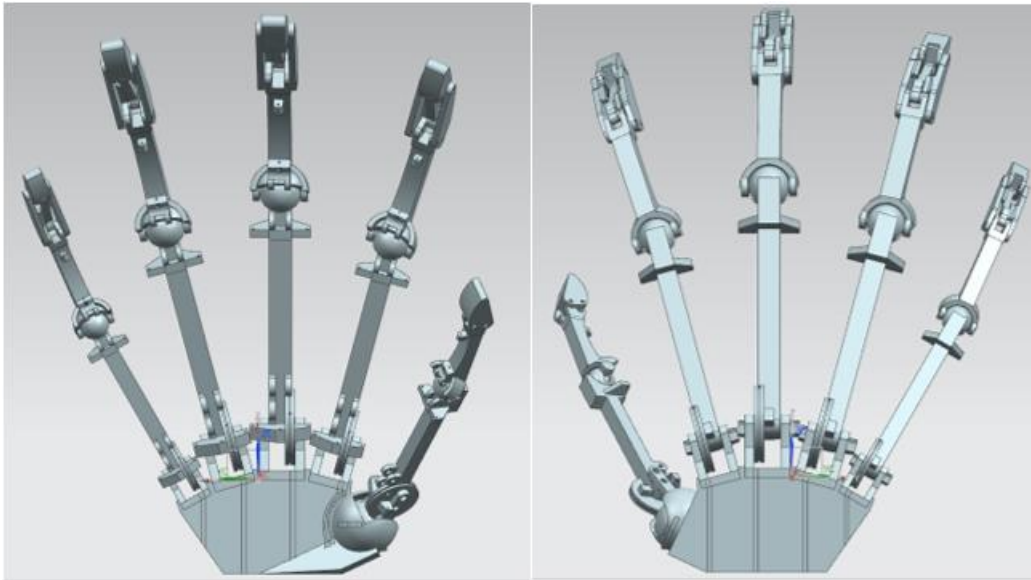


Figura 44. Vista frontal y vista trasera del ensamble completo de la mano mecánica antropomórfica.

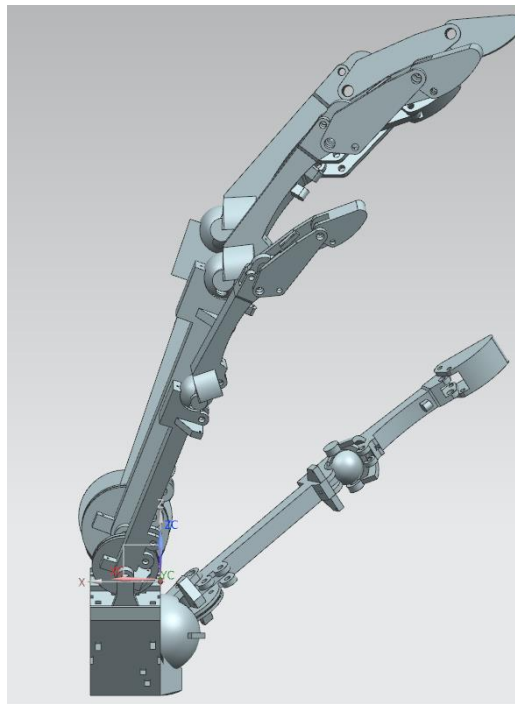


Figura 45. Vista lateral del ensamble completo de la mano mecánica antropomórfica.

Los planos de las bases individuales (soporte del 1er metacarpo y soporte del 2° al 5° metacarpo), así como la unión de estas, se encuentran disponibles en el Apéndice D. Planos de la base de la mano

5.6 Diseño de la base para los motores

Una vez seleccionada la forma de actuación transmisión de la mano mecatrónica se notó la necesidad de diseñar una base en la que se pudieran montar todos los actuadores. Del dedo antropomórfico en el que se basa nuestro diseño de mano se puede apreciar la configuración de sus actuadores [Figura 46], y la disposición de los tendones con respecto al motor al que van dirigidos y el lugar en el que están fijos en el dedo. Esta disposición logra que los tendones usados para la transmisión no choquen entre sí, eliminando la posibilidad de que estos se enreden e impidan el movimiento del dedo.



Figura 46. Se muestra la disposición de los tendones en la base de los actuadores, se puede observar que en la disposición original los tendones no se tocan entre sí, impidiendo interferencias.

El principal reto de diseño de la base de los actuadores fue conseguir un espacio para todos los motores sin que fuera excesivamente grande a comparación de la mano, y disminuyendo las distancias que tienen que recorrer los tendones desde sus respectivos actuadores hacia su lugar fijo en los eslabones de los dedos.

Se optó por conservar la configuración del sistema de actuación-transmisión del dedo meñique visto anteriormente [Figura 46], por lo que se multiplicó este sistema cinco veces para tener la transmisión-actuación completa de la mano [Figura 47].

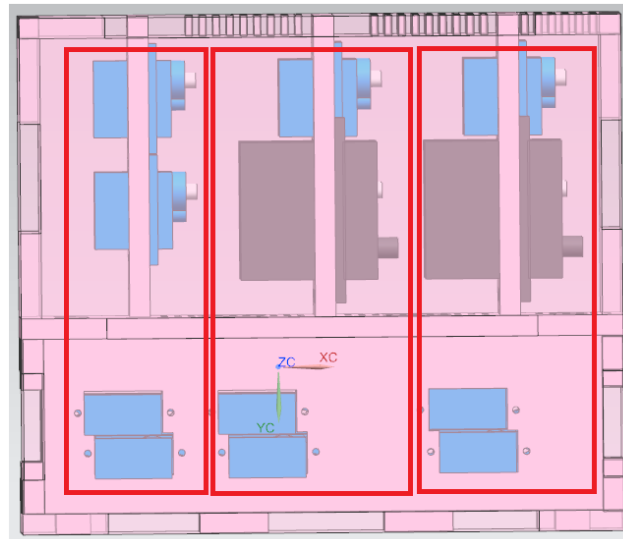


Figura 47. Replica de la disposición de los tendones original.

Aunque al hacer esto se corría el riesgo de generar una base excesivamente grande, para solventar este problema se eligió tener una base en dos plantas [Figura 48], una inferior y una superior, de tal modo que la base puede tener una forma cuadrada aproximadamente del tamaño de la mano mecatrónica.



Figura 48. Muestra de los dos pisos en los que se encuentran los actuadores.

Las cinco configuraciones de los actuadores dispuestas en la base se pueden observar en la Figura 49.

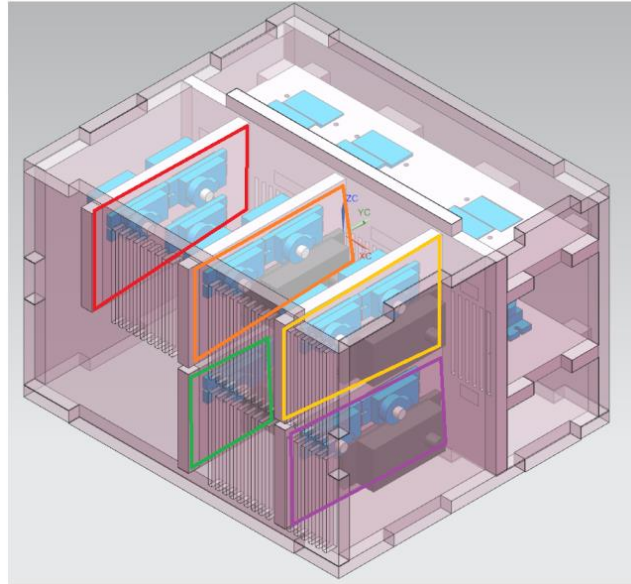


Figura 49. En esta foto se aprecia mejor la disposición de los 25 actuadores, repartidos de la misma forma que el sistema de actuación original, pero multiplicado varias veces.

La zona en la que se coloca la mano mecatrónica se puede observar en la Figura 50, y obedece a la orientación del dedo meñique de la tesis original [Figura 46].

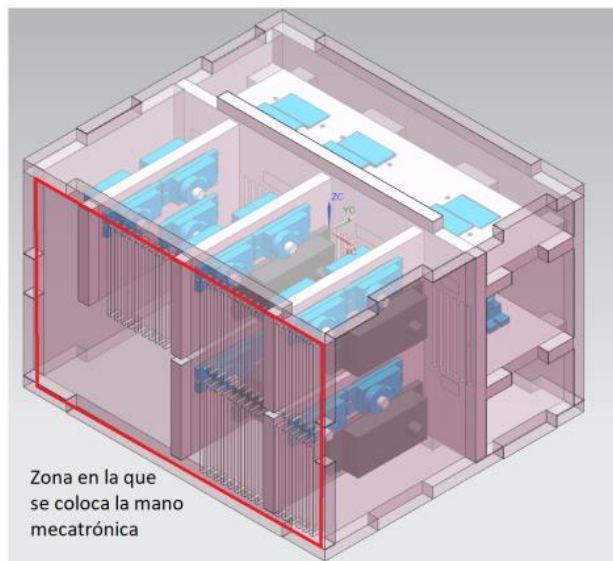


Figura 50. Zona en la que se coloca la mano mecatrónica.

Ya que esta configuración está dada para que los tendones no se encuentren tan lejos de sus actuadores – articulaciones, los tendones tienen que cruzar por la estructura, por esta razón se diseñaron rendijas para poder cruzar los tendones [Figura 51].

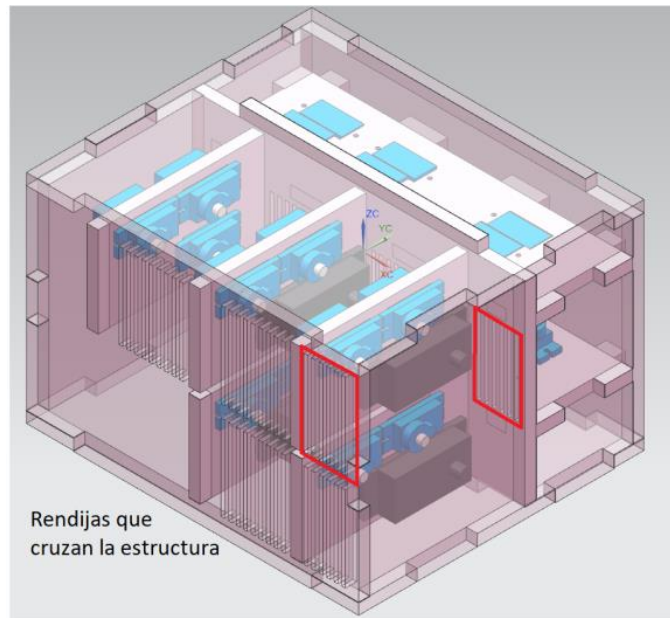


Figura 51. Las rendijas utilizadas para pasar los tendones, puestas sobre dos planchas de acrílico, de esta forma los tendones pueden llegar a todos los lados de la base sin interferirse entre sí.

El tamaño de la estructura no es muy grande con respecto a la mano mecatrónica. La configuración final de la mano montada sobre la base se ve en la Figura 52.

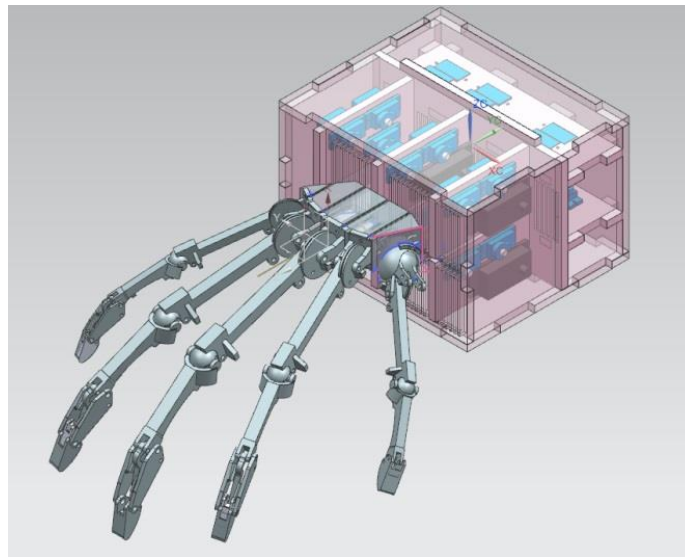


Figura 52. Ensemble de ambas estructuras, se puede observar que el tamaño de la base de los actuadores no es exagerado respecto al de la mano mecatrónica, lo que indica que se logró el objetivo de no tener una base muy grande respecto a la mano mecatrónica.

Esta estructura, unida a la base de la mano, logra que los tendones no se enreden entre sí, ni se afecten de tal forma que la actuación-transmisión puede hacerse correctamente en toda la mano. El tamaño y la disposición de la estructura también logra el cometido de no ser estorbosa a la mano y que los tendones no se estiren demasiado. Los planos de esta base pueden verse en el Apéndice E. Planos de la base de los motores

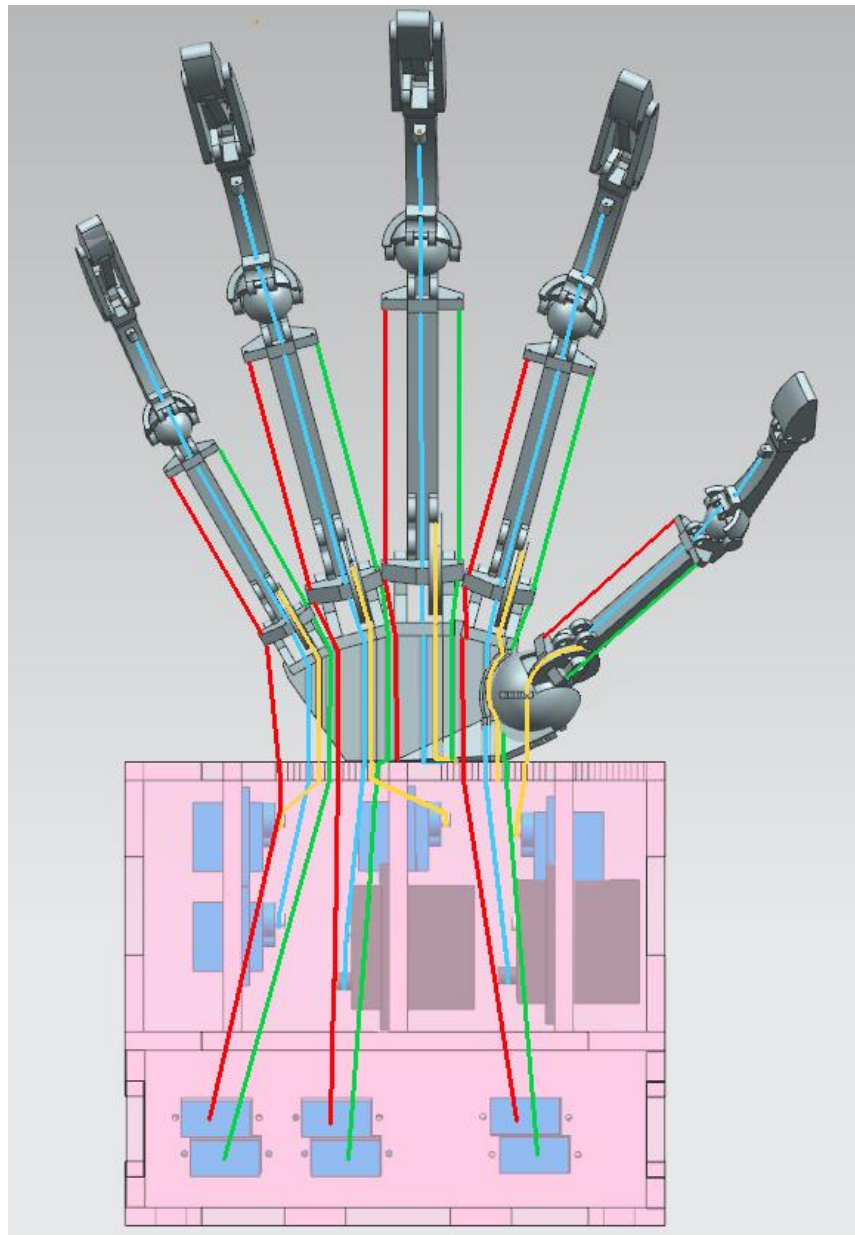


Figura 53. Foto de la mano mecatrónica donde se puede observar la disposición de los tendones desde los eslabones hasta la base.

5.7 Control de los motores

Para controlar el total de 25 motores se utilizaron dos tarjetas PCA9685 uniéndolas al cambiar la dirección de la segunda tarjeta, esto se hace soldando alguno de los puentes que la placa ya te proporciona para cambiar su dirección convirtiendo los ceros en unos.

Antes de empezar a controlar los motores se necesitó conocer la frecuencia a la que el servomotor opera y también hacer un barrido para conocer el ancho de pulso correspondiente a la posición de 0° y de 180° para cada tipo de servomotor.

Tanto el MicroServo SG90 como el servomotor HD 1051MG pueden operar a una frecuencia de 40 Hz, sin embargo, el intervalo de ancho de pulso en el que operan es diferente; el MicroServo SG90 opera en un intervalo de ancho de pulso de ente 90 y 387, mientras que el servomotor HD 1051MG opera entre 105 y 402, siendo los límites de operación las posiciones correspondientes a 0° y 180° respectivamente.

Una vez encontrado su intervalo de operación se programó un método en el que se realizaba un mapeo donde se ingresaba la posición a en grados a la que se deseaba ir para cada uno de los servomotores [Apéndice F. Métodos para obtener como salida la posición deseada en grados usando el controlador PCA9685]

En cada método la variable `val1` obtiene el ancho de pulso para la posición `ang0/ang1`, la cual es la posición deseada, mediante un mapeo realizado entre el rango de operación en grados y el de ancho de pulso. La variable `val1` pasa a la función `servos/servos1.setPWM` donde la letra `n/m` indican en que puerto de la tarjeta se encuentra conectado ese servo motor y el ángulo en forma de ancho de pulso al que tienen que moverse.

Empleando los métodos mencionados anteriormente, se hicieron métodos secundarios para cada uno de los dedos según el puerto de la tarjeta con la que se controla cada una de sus falanges y la posición que se quiere obtener como salida [Apéndice G. Métodos para controlar las falanges de cada dedo según el puerto y una posición de entrada].

6. Diseño del guante para el sensado de los movimientos de la mano humana

“El tacto tiene memoria.”

-John Keats-

El principal eje de diseño del guante fue la comodidad al momento de realizar el sensado en las pruebas que se piensan hacer en un futuro. Esto permitirá que los sujetos de pruebas puedan mover su mano con naturalidad, y a su vez se tendrán datos más confiables sobre los movimientos intuitivos de las personas. Por tanto, la selección de materiales, y sensores giró en torno a conseguir un guante cómodo y preciso, el método de selección será el mismo que se mencionó en el capítulo 6.2.4.

6.1 Puntos principales de la mano para la obtención de información

El propósito principal del guante de sensado es obtener la información suficiente para poder crear una ecuación que contenga los movimientos de sujeción intuitivos de la mano humana. Debido a esto, el guante es un pilar fundamental en la investigación en la que se piensa usar el banco de pruebas.

Los guantes han sido usados para obtener información del movimiento de manos humanas, en aplicaciones que varían desde juguetes hasta manipulación, por lo que no es absurdo pensar en un guante para obtener mediciones del movimiento de una mano humana, sin embargo, en el diseño de estos guantes los puntos donde se obtiene la información y los sensores utilizados varían en función de la aplicación que se le quiera dar [14].

El objetivo final de este banco de pruebas será estudiar los movimientos de las manos humanas, enfocándonos en sujeción.

Debido a que la mano mecatrónica fue desarrollada en primer lugar, las restricciones de movimiento de esta se toman como base para medir el mínimo de variables que debe medir el guante de sensado.

6.1.1 Movimientos principales de la mano humana

Basándonos en el movimiento de abducción-aducción que puede lograr la mano mecatrónica, el primer punto de interés es el ángulo que se forma entre las falanges proximales de cada dedo [Figura 54].

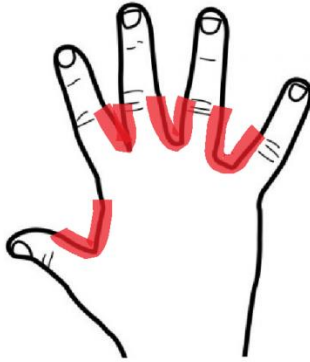


Figura 54. Puntos donde se puede obtener las lecturas para los movimientos de abducción-aducción.

Doblar los dedos es otro movimiento que la mano mecatrónica es capaz de reproducir, pero con cierta restricción.

Para empezar, en ángulo entre la falange media y proximal es un movimiento que puede ejecutar la mano mecatrónica, pero el movimiento de la falange distal respecto a la media está acoplado, inclusive en el dedo pulgar, por lo que bastará con medir el ángulo entre las primeras falanges [Figura 55].

La naturalidad de este movimiento en específico se basa completamente en la acción del acoplador de la mano mecatrónica.

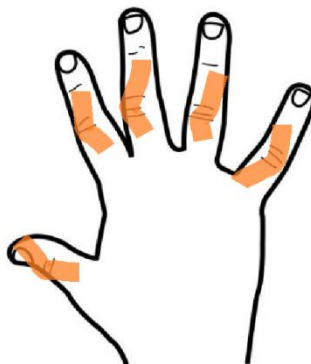


Figura 55. Puntos donde se puede medir la flexión-extensión de los dedos.

El movimiento de la falange distal respecto al metacarpo si se logra de forma independiente, en la mano mecatrónica, por lo que los ángulos de este también deberán ser medidos y registrados en el guante para obtener el movimiento completo [Figura 56].

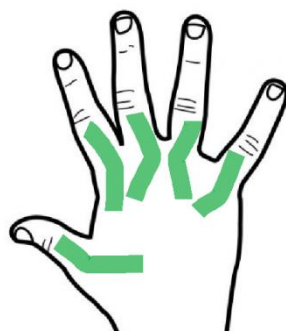


Figura 56. Puntos donde se pueden obtener las lecturas del movimiento de flexión-extensión del metacarpo-falange proximal.

Pese a que estos tres movimientos son necesarios para obtener las prensiones vistas en el capítulo (movimientos de sujeción de la mano humana), el movimiento de la falange medial respecto de la proximal es de nuestro principal interés, pues las sujeciones en las que se quieren basar los experimentos es más importante el movimiento de estas falanges que los demás.

6.2 Diseño del guante de sensado

Para un modelo inicial del diseño del guante se pensó en conseguir un guante de algodón y sobre este coser los sensores y el circuito usando un cable o alambre, sin embargo, los alambres suelen ser poco flexibles y aunque los cables tienen una buena flexibilidad, son un poco más estorbosos. El esquema de conexión del guante puede verse en: Apéndice H. Posición de los sensores en el guante de sensado

Debido a esto se optó por usar bobina de hilo conductor para realizar el circuito eléctrico que va sobre el guante, esto da varias ventajas, pues el hilo conductor es flexible y poco estorbo [Tabla 7].

Tabla 7. Tabla de comparación de las ventajas y desventajas de los materiales para realizar el circuito sobre el guante.

Criterios de Selección	Concepto		
	Cable	Alambre	Hilo conductor
Guante			
Flexibilidad	SI	SI	SI
Estorbo	SI	SI	NO
Precio	Bajo	Bajo	Alto
Lo afecta la tela	No	No	Si

La única desventaja del hilo apreciable fue que hacía entrar en corto al circuito si sus hebras se tocaban entre sí, esto y la limitación de espacio en el guante hizo que se cambiara la tela y el diseño del guante.

La tela elegida tiene poco porcentaje de algodón en su configuración, por lo que no crea hebras capaces de iniciar cortos en el circuito. Sin embargo, esto quita al guante la posibilidad de estirarse, por lo que los sujetos de pruebas deberán tener manos de tamaños similares a la hora de realizar los experimentos.

El diseño del guante también fue cambiado de un guante convencional un guante incompleto [Figura 57], es decir, no cubre por completo la mano de los sujetos de pruebas, sin embargo, tiene el espacio suficiente para alojar los circuitos. Este diseño también aporta comodidad a la hora de realizar las pruebas, pues la rigidez de la tela no se nota porque va simplemente encima de los dedos de las personas.



Figura 57. Fotografía del guante puesto en un sujeto de prueba, se pueden observar los sensores y el hilo conductivo formando parte del circuito.

La forma en que el guante se mantiene pegado a los dedos para que estos realicen el movimiento es mediante pedazos de tela que sujetan al guante en su lugar, una vez más, esto permite que el guante se sienta poco a la hora de realizar movimientos y a su vez permite que los sensores capten de forma fiel los movimientos de las personas.

Aunque el movimiento que se medirá principalmente es el de la falange media, otros sensores pueden ser agregados en un futuro, de tal forma que el movimiento de la mano humana sea captado totalmente logrando un estudio más completo.

El diseño de este guante también puede responder a esta necesidad, puesto que se puede añadir un guante por debajo con otros sensores necesarios para estos movimientos, de tal forma que estos no se estorben entre sí, no se agreguen cortos que puedan quitar la utilidad al guante y la comodidad no sea desechada.

6.3 Tipo de sensado

Los guantes de sensado que suelen usarse como dispositivos de entrada, incorporan una serie de sensores que permiten determinar el grado de flexión y abducción entre los dedos [41].

El desarrollo de este tipo de dispositivos ha pasado por varios tipos de sensores, desde cámaras y análisis de siluetas [42] , marcadores reflejantes de luz infrarroja [43], mediante elementos magnéticos [44]sonido de alta frecuencia [45], mediante sensores de flexibilidad [45], acelerómetros [46], etcétera; por lo que existen diversas soluciones de sensado para obtener la información necesaria de acuerdo con la aplicación que se le va a dar.

Se podría considerar que el tipo de sensores en los que se pueden apoyar estos guantes son:

- Ópticos: Cámaras, Fibra óptica, Sensores optoelectrónicos o Infrarrojos.
- Magnéticos: De Efecto Hall.
- Eléctricos: Potenciómetros, Piezoeléctricos, Acelerómetros.
- Híbridos: Unión de las anteriores.

Debido a la aplicación que se le dará al guante, el sensado se enfocará en el movimiento de flexión-extensión, y la abducción será descartada para ser analizada en un futuro.

Entre sensores que se planteó usar para este propósito están los sensores infrarrojos, giroscopios o acelerómetros, cuyos criterios a analizar se pueden ver en la matriz de selección:

Tabla 8. Tabla de comparación entre los sensores seleccionados para medir los movimientos de flexión-extensión de los dedos.

Criterios de Selección.	Conceptos.		
	Infrarrojo	Giroscopio	Acelerómetro
Guante			
Respuesta en un corto lapso de tiempo (ms).	-	0	0
Censado y reproducción de movimiento precisos, NO exactos	+	-	-
Facilidad de instalación en el guante	+	-	-
No estorba a los movimientos de la mano humana	+	0	0
Suma +	3	0	0
Suma 0	0	0	0
Suma -	1	2	2
Evaluación Neta	2	-2	-2
Lugar	1	2	2
¿Continuar?	Si	No	No

El resultado de la matriz de selección según los criterios propuestos fue el infrarrojo. Este sensor cuenta con un componente transmisión de luz (led infrarrojo) y un receptor (transistor fotosensible) que varía su resistencia de acuerdo a la cantidad de luz que le llega. Las limitaciones de este sensor se ven en el rango de grados en los que se ha visto que funciona correctamente [14].

El circuito que se tiene planteado es un convertidor de corriente a voltaje como se observa en la Figura 58.

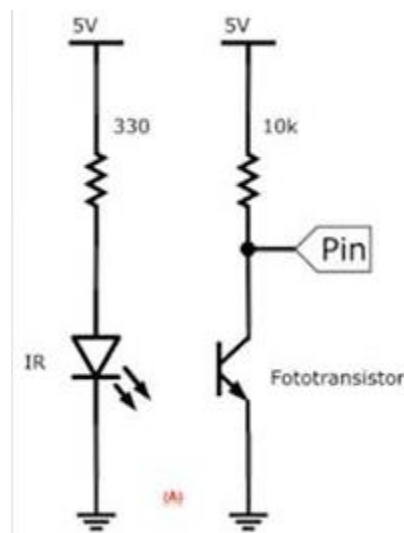


Figura 58. Circuito para alambrear los sensores infrarrojos sobre el guante.

Los datos que se obtendrán de este circuito, por tanto, están determinadas por dos variables: la distancia focal y el ángulo de los ejes focales. [Figura 59].

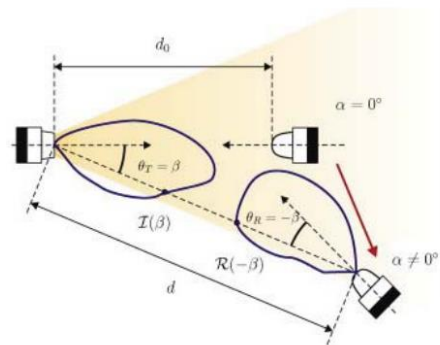


Figura 59. Imagen que ilustra el cambio de ambas variables, obtenida de la tesis [14]

La distancia que tienen los sensores en el guante cuando las articulaciones están sin flexión alguna, será “cero”, pues tras una serie de experimentos se determinó que en esta posición la repetibilidad de los experimentos y los datos que arrojaban los sensores eran más constantes.



Figura 60. Fotografía del guante de sensado, dentro del marco rojo se puede observar que la distancia entre los sensores es prácticamente de cero.

Estos sensores son colocados en el guante de tal forma que pueden medir la flexión de los dedos de la falange media respecto a la proximal.



Figura 61. Fotografía del guante de sensado donde se ilustra el ángulo que se forma entre la falange proximal y media correspondiente al ángulo que puede medir por medio de los sensores.

Para lograr que los sensores se deslicen sobre una superficie que no sea la tela se optó por poner termofit debajo de estos y ajustarlos, de este modo las pruebas tienen mejores resultados y la comodidad al usar el guante no se ve afectada.



Figura 62. Sensores recubiertos con termofit. El termofit se ajustó a los sensores, al no ser estorboso no se nota a la hora de doblar la mano y logra que el guante cuente con mayor exactitud.

6.4 Caracterización del movimiento

La caracterización del movimiento se hizo mediante un experimento en el que, con el guante puesto, los dedos se posicionaron en varios ángulos variando los ejes focales entre los sensores, y se tomaron los datos [Figura 63].

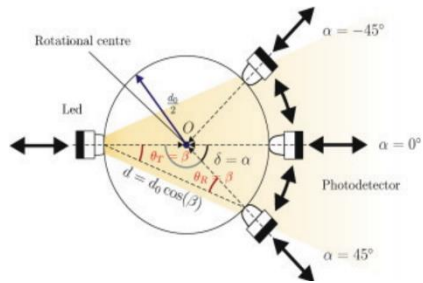


Figura 63. Imagen que ilustra el cambio de ángulo que tiene el sensor con respecto a la luz debido al movimiento que tienen estos sensores entre sí. [14]

Para el propósito de este experimento se diseñaron unos moldes sobre los que se coloca el dedo [Figura 64], con el fin de asegurar que la flexión de los dedos sea el ángulo correcto; asegurando la repetitividad de la posición del dedo a lo largo del experimento.

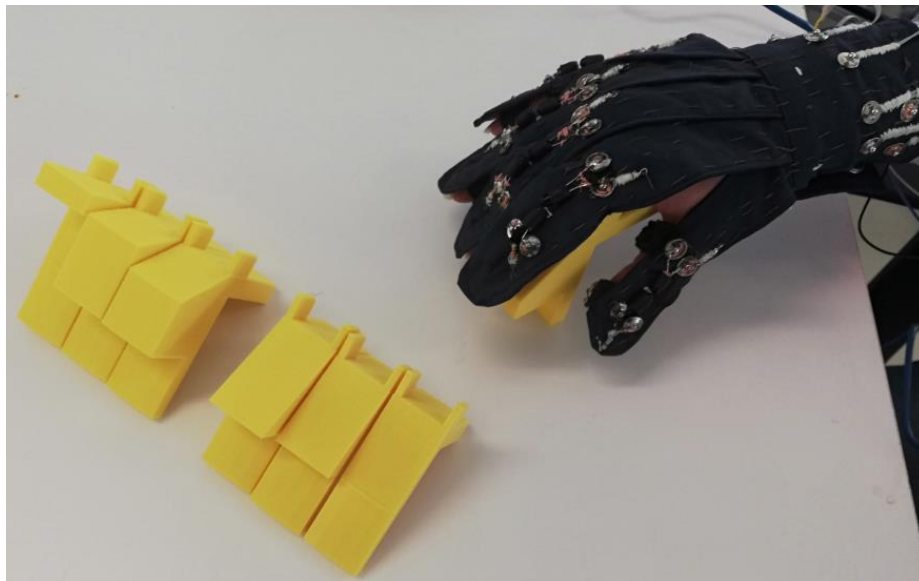
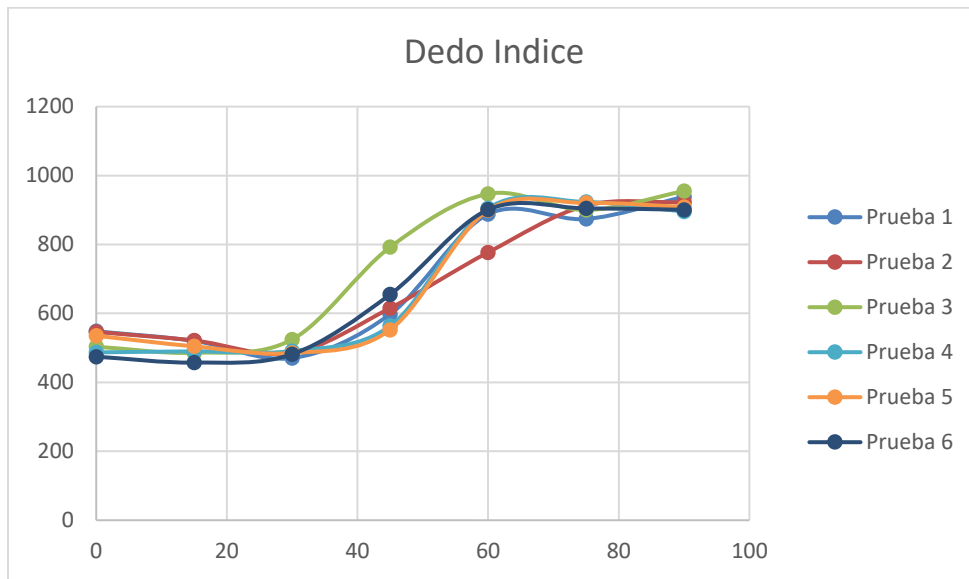


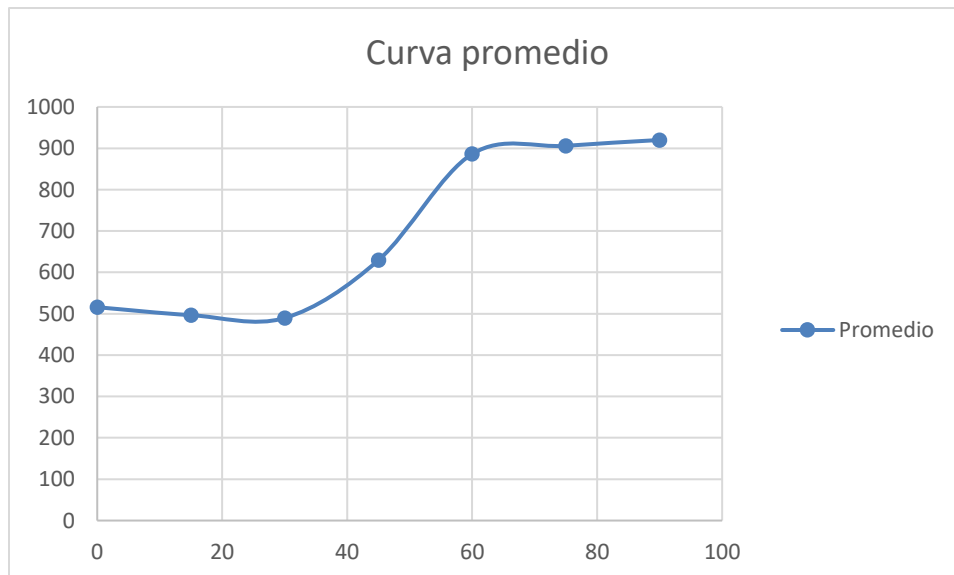
Figura 64. Fotografía dónde se usa uno de los moldes, se puede observar como el sujeto de pruebas usa el molde para fijar el ángulo de sus dedos. También se observan los otros moldes hechos, las variaciones de ángulo de estos es de 15°, y van desde los 0° hasta los 90°.

Tras el experimento, se obtuvieron las siguientes gráficas de los sensores [Grafica 1] y las ecuaciones que se obtienen de analizar esa gráfica. Se puede observar que la gráfica tiene una

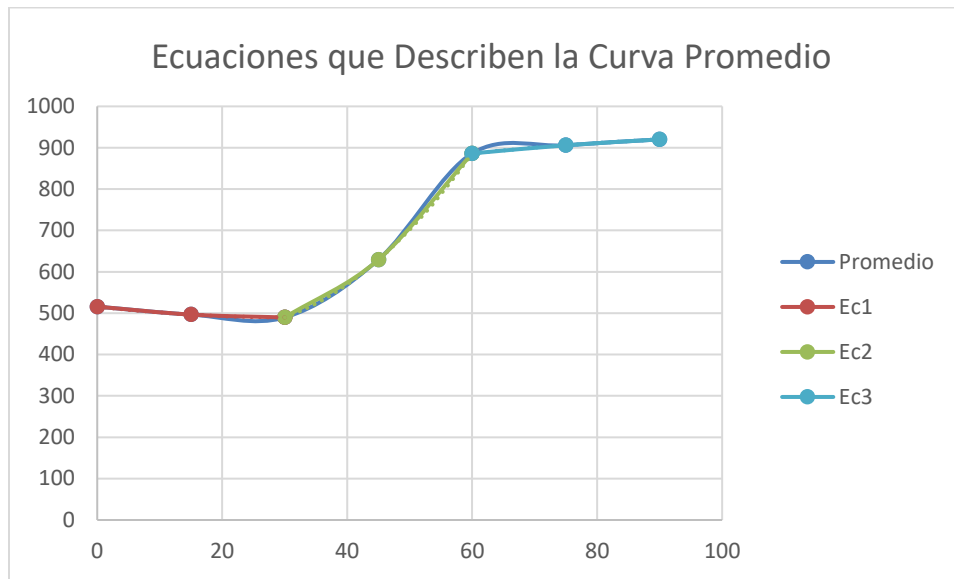
parte lineal en la que la ecuación es más sencilla, y dos partes en que el cambio entre los ángulos es prácticamente insignificante, por lo que se usa la ecuación de la parte de en medio para caracterizar todo el dedo. De esta forma se obtuvieron datos más precisos, aunque el rango de datos se vio reducido. Las gráficas de ambos sujetos de pruebas se pueden ver con más detalle en el Apéndice I Gráficas para la caracterización del movimiento



Gráfica 1. Gráfica de tendencia de todas las pruebas hechas en los dedos.



Gráfica 2. Gráfica promedio de la tendencia de las pruebas.



Gráfica 3. Grafica de tendencias. Para analizar la curva se dividió la curva en 3 segmentos.

$$y = 0.2599x^2 - 10.17x + 560.92$$

Ecuación 2. Ecuación de la línea de tendencia color verde.

Despejando la X para obtener la respuesta en grados:

$$x = \frac{10.17 \pm \sqrt{1.096 y - 479.7035}}{0.5198}$$

Ecuación 3. Despeje de la ecuación 2 para obtener los grados.

7. Pruebas de los subsistemas

“La creatividad te permite cometer errores. El diseño es saber cuáles guardar.”

-Scott Adams-

7.1 Reproducción de los movimientos

Lo más importante a probar en la mano mecatrónica antropomórfica es su antropometría y su motricidad, específicamente en los movimientos de prensión tipo pinza mencionados en el capítulo 4.1.1; esto aunado al hecho de su adaptabilidad gracias a los arcos flexibles con los que fue diseñada.

7.1.1 Pruebas Antropométricas

Aunque la mano mecatrónica antropomórfica fue diseñada teóricamente de manera que fuera antropométricamente correcta en relación con la mano humana, es necesario comprobar que realmente posee este atributo. La manera más rápida y directa de hacer esto es reproduciendo posiciones de la mano humana que muestran la armonía existente entre cada uno de los dedos.

Las posiciones armoniosas de la mano ya fueron mostradas en el capítulo 6.1.1 pero sin dicha etiqueta.

Para comenzar tenemos la Figura 65, esta figura es la de mayor importancia, ya que la distribución de los dedos forma espirales que convergen en un punto focal, una mano con una arquitectura armoniosa cumple con la formación de estos arcos.

En la Figura 66, se observa a la mano mecatrónica antropomórfica replicando la posición de la Figura 65 desde una vista lateral ya que, en esta vista es donde mejor se observa la formación de los espirales.

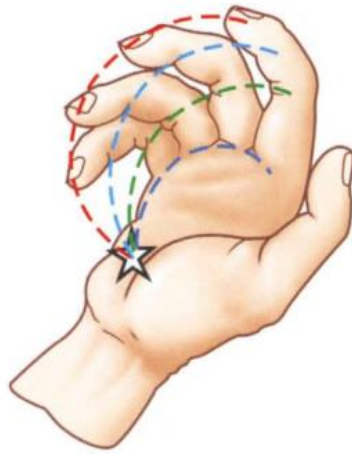


Figura 65. Posición en espiral las articulaciones homólogas convergiendo en un punto focal. [10]



Figura 66. Vista lateral de la mano mecatrónica donde se observan los espirales que convergen en un punto.

La segunda posición, es la posición empleada para tomar la medida de una palma [Figura 67], esta posición es meramente para ver la amplitud de la mano, ya que en esta posición los dedos se encuentran en su máxima separación.

En la Figura 68 podemos observar a la mano mecatrónica antropomórfica desde vista superior tomando la posición de máxima separación de los dedos.



Figura 67. Máxima separación de los dedos. [10]

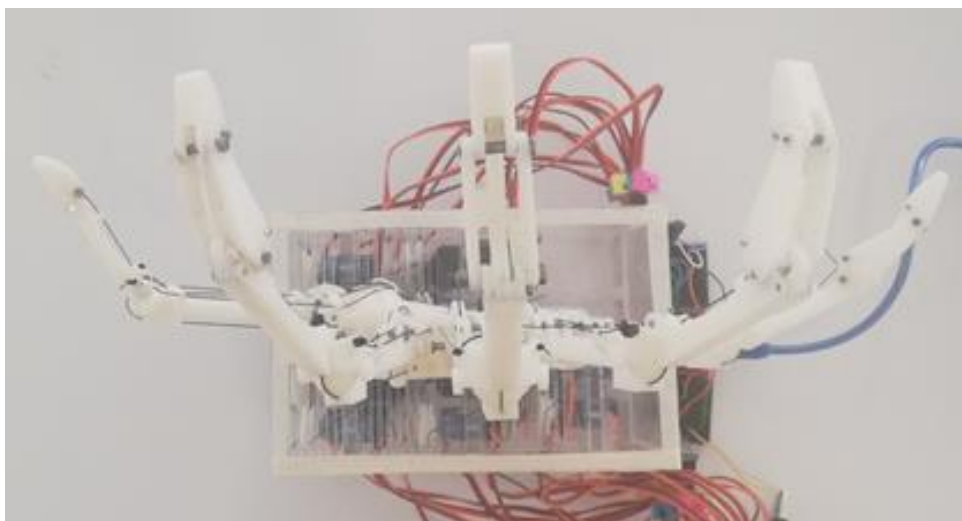


Figura 68. Vista superior de la mano mecatrónica antropomórfica en posición de la máxima separación de los dedos.

7.1.2 Pruebas de motricidad en prensiones tipo pinza

La mano mecatrónica antropomórfica tiene como principal propósito servir para el estudio de la intuición del movimiento de sujeción de la mano humana, por lo tanto, es importante probar que sirve para el fin que fue hecha. El tipo de sujeción específico para el que fue fabricada y diseñada es la prensión tipo pinza.

La prensión tipo pinza tiene tres subtipos, por lo que las pruebas consistieron en realizar la sujeción de distintos objetos con estos subtipos para comprobar la capacidad de la mano mecatrónica antropomórfica no solo de sujetar los objetos, sino también su capacidad de repetitividad en los movimientos de sujeción propuestos.

1. Prensión digital.

La prensión digital es una prensión que implica la sujeción de un objeto involucrando siempre al dedo pulgar y a uno o más de los cuatro dedos restantes.

Como primera prueba de prensión digital, se escogió la sujeción bidigital (dedo pulgar y dedo índice) de un objeto, en este caso un huevo [Figura 69]. Esta sujeción de objetos se escogió debido a que es un tipo de sujeción que requiere de un alto grado precisión.

Para realizar la prueba con la mano mecatrónica antropomórfica se utilizó un pequeño huevo de unicel [Figura 70].



Figura 69. Sujeción bidigital de un huevo.



Figura 70. Vista frontal de la mano mecatrónica antropomórfica realizando la sujeción bidigital de un huevo de unicel.

Para la segunda prueba de prensión digital se escogió la sujeción pluridigital de un objeto, en este caso una pequeña esfera. La sujeción se lleva a cabo con tres dedos, pulgar, índice y medio [Figura 71].

Al igual que con la prueba anterior, el objeto con el que la mano mecatrónica antropomórfica realizó la prueba fue una esfera de unicel [Figura 72].



Figura 71. Sujeción pluridigital de tres dedos de una esfera. [10]

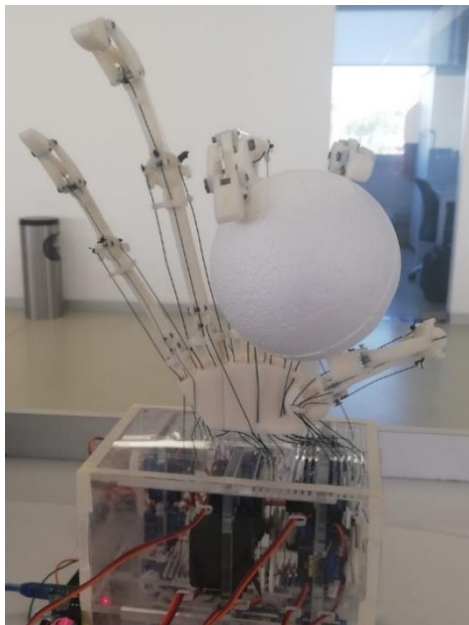


Figura 72. Vista frontal de la mano mecatrónica antropomórfica realizando la sujeción pluridigital de tres dedos de un objeto esférico.

2. Prensión Palmar.

La prensión palmar es un subtipo de sujeción que involucra, además de los dedos, la palma de la mano. Este tipo de prensión es utilizada, generalmente, para sujetar objetos voluminosos.

La prueba mas fiel para este tipo de prension es la sujecion de una esfera con la totalidad de los dedos y la palma de la mano [Figura 73].

Esta prueba fue realizada por la mano mecatronica antropomorfica con una esfera de unicel de mucho mayor tamaño que la utilizada en la prueba de prensión pluridigital [Figura 74], debido a que se buscaba la utilización de la palma de la mano, es decir, emplear los metacarpos de todos los dedos para lograr la correcta sujeción de la esfera.



Figura 73. Sujeción palmar de una esfera. [10]

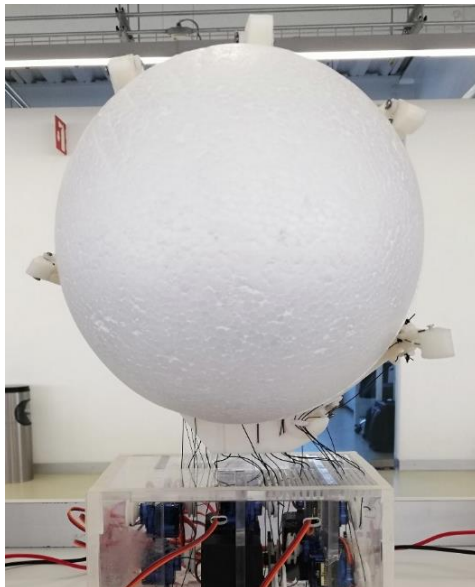


Figura 74. Vista frontal de la mano mecatrónica antropomórfica realizando la sujeción palmar de una esfera de unicel.

Otra prueba importante para comprobar la presión palmar es la sujeción de objetos cilíndricos, esta sujeción puede involucrar o no el uso del dedo pulgar [Figura 75].

En el caso de la mano mecatrónica antropomórfica se usó un cilindro de unicel [Figura 76], sin embargo, la sujeción palmar se hubiera apreciado más si se hubiera obtenido un cilindro con mayor diámetro.

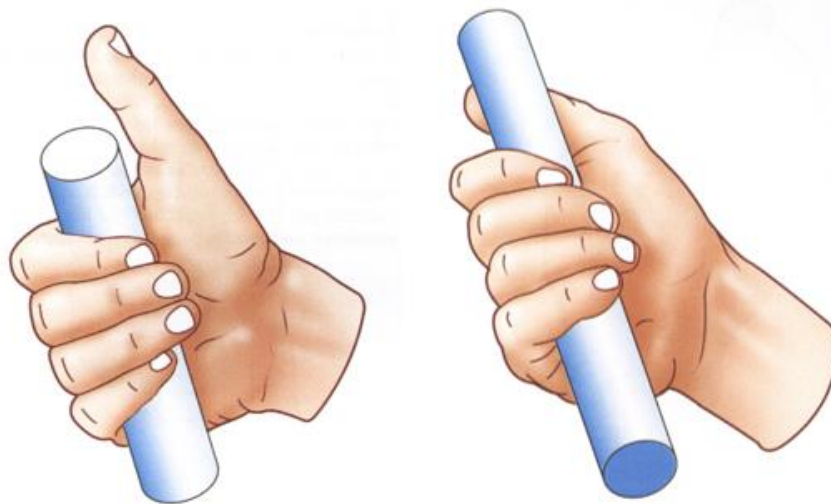


Figura 75. Sujeción palmar de objetos cilíndricos. [10]



Figura 76. Vista frontal de la mano mecatrónica antropomórfica haciendo la sujeción palmar de un cilindro.

7.1.3 Adaptabilidad

La adaptabilidad es una característica fundamental que debe comprobarse en la mano mecatrónica. Como se mencionó en capítulos anteriores, su diseño se basó en el empleo de arcos flexibles que permitían la sujeción de objetos con mayor naturalidad, ya que estos arcos facilitaban la adaptabilidad de la mano al objeto que se estuviera sujetando.

Las pruebas de adaptabilidad son más sencillas de realizar, puesto que la evidencia de esta característica se puede observar en las distintas posiciones de armonía de la mano y sujeción de objetos que ya se realizaron.

Empezando por las posiciones usadas para comprobar la antropometría, la posición donde se observan los espirales que convergen en un punto focal es la mejor posición que se tiene para hacer notar la existencia de los arcos flexibles; al tener una vista superior de esta posición [Figura 77] podemos observar el acoplamiento que tienen los metacarpos de cada dedo para dar paso a la presencia de los arcos flexibles.

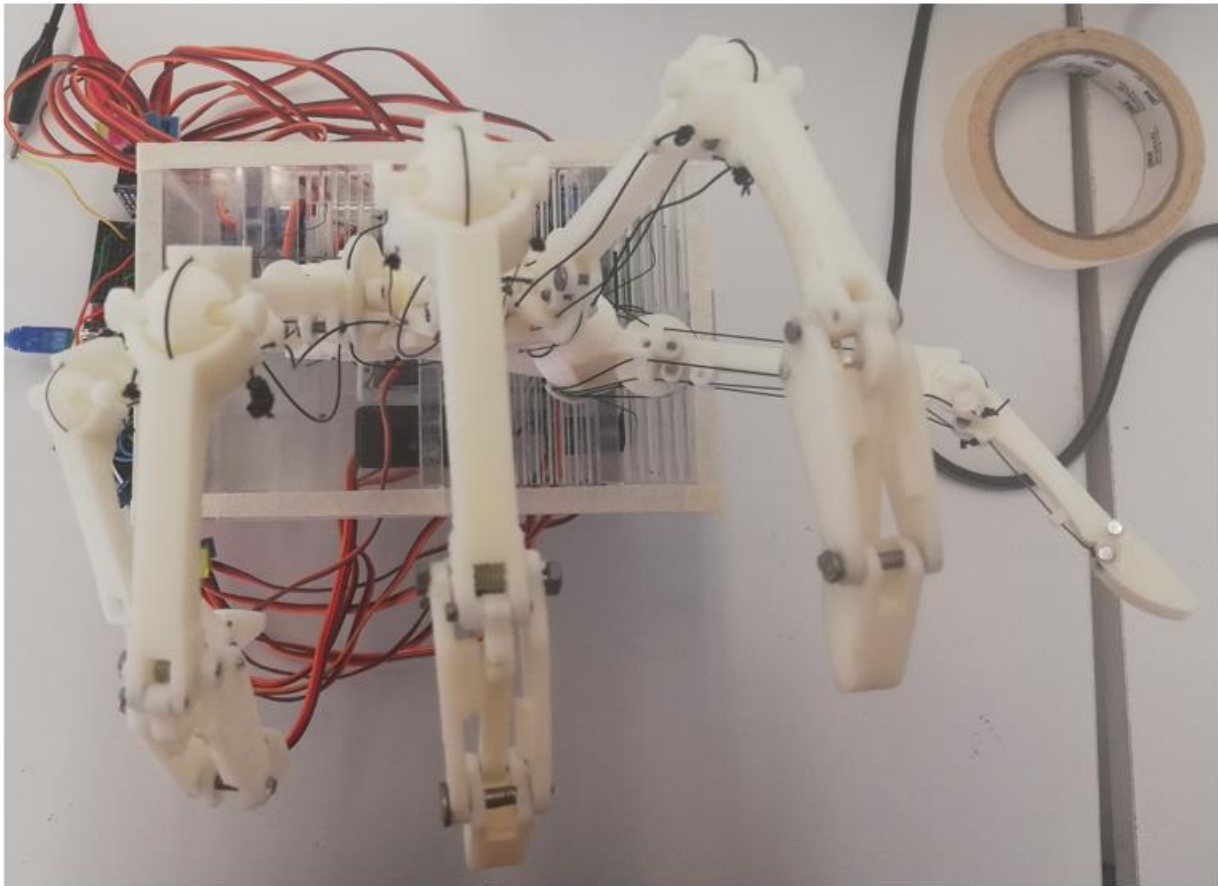


Figura 77. Vista superior de la posición armoniosa donde se forman los espirales que convergen en un punto focal.

Ahora bien, en las pruebas de presión también se hizo presente la adaptabilidad con la que está dotada la mano mecatrónica antropomórfica, específicamente en la sujeción palmar. Cuando se realizó la sujeción de una esfera con la totalidad de los dedos es esencial que la palma de la mano y los dedos puedan adaptarse a él para poder sujetarlo correctamente; igual que en el caso anterior esto es mayormente notorio al presentar una vista superior de la mano mecatrónica al realizar esta sujeción [Figura 78].

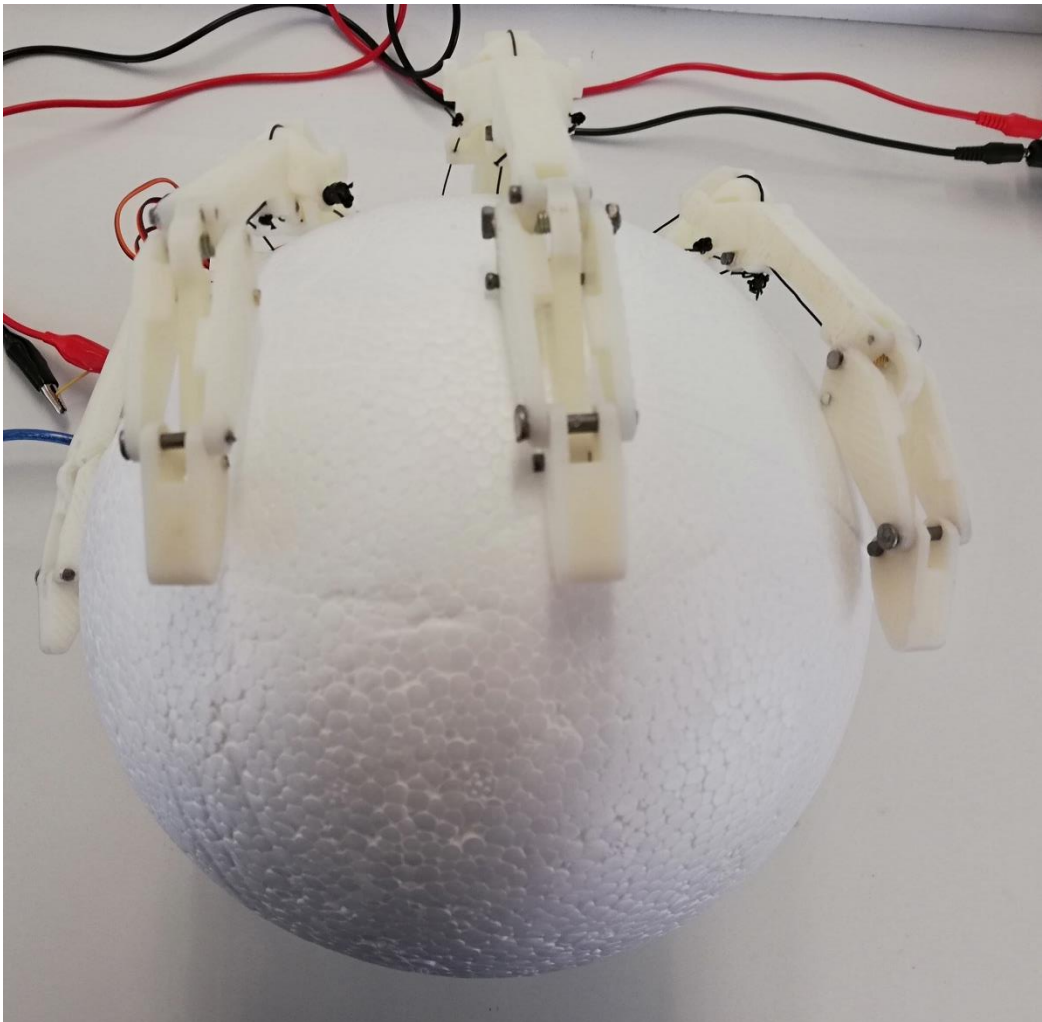


Figura 78. Vista superior de la sujeción palmar de una esfera.

Por último, para mostrar que no es necesario implementar objetos con superficies regulares, o lisas, se realizó la sujeción de un objeto con una superficie irregular [Figura 79].

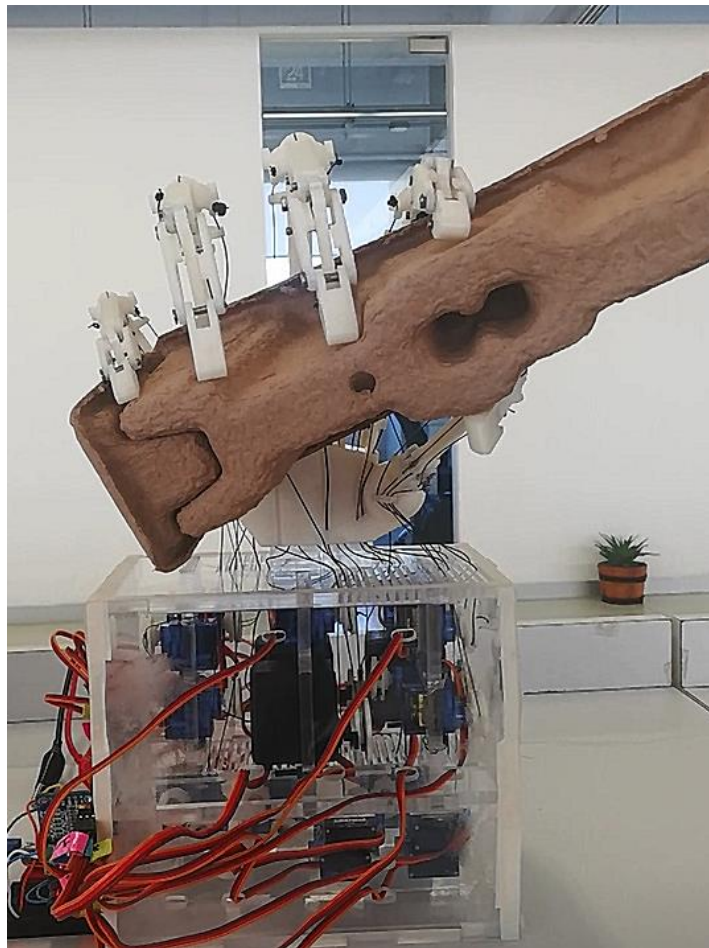


Figura 79. Sujeción palmar de un objeto con superficie irregular.

7.2 Sensado de los movimientos

Las pruebas para validar el guante se basan en la capacidad de este para medir los movimientos de la mano y en la comodidad que se tenga usándolo mientras se sostienen objetos. Como se dijo anteriormente, el movimiento que será sentido principalmente es el de flexión-extensión de los dedos debido a que es el más significativo en las pruebas de sujeción que se realizarán en un futuro.

La mano humana puede adoptar varias configuraciones, sin embargo, los movimientos que más nos interesan para que sean registrados en el guante son los de sujeción, en especial los que puede lograr la mano mecatrónica antropomórfica.

Una de las principales ventajas de esta es la capacidad de tomar objetos grandes, esto ya fue validado en el capítulo anterior, por lo que el guante debe ser capaz de tomar lecturas de este movimiento [Figura 80].



Figura 80. Sujeto de pruebas sosteniendo una pelota de grandes proporciones con respecto a su mano con el guante puesto.

Como puede verse, al momento de tomar una pelota de esas proporciones la palma humana se adapta a la forma [Figura 81], sin embargo, el movimiento de la palma no puede ser medido por nuestros sensores, de tal forma que al enfocarnos en los movimientos de flexión-extensión de los dedos se logra obtener esta sujeción.



Figura 81. Mano sosteniendo una pelota vista lateralmente. Se comprueba que el ángulo que más cambia es el de la falange media-proximal, el cual está señalado por el ángulo marcado con color rosa, este ángulo es el más importante para el movimiento de flexión, mientras que, el ángulo marcado con azul, no se puede medir por el guante, pero por su magnitud puede ser despreciado.

Otro movimiento hecho por la mano mecatrónica antropomórfica es el de sujeción con dos dedos. En este caso tanto la mano mecatrónica antropomórfica como el sujeto de pruebas sujetaron un huevo pequeño [Figura 82].



Figura 82. Sujeto de prueba sosteniendo un huevo. Los cambios de grado son nuevamente medibles por el guante de sensado y los ángulos con mayor cambio en este movimiento de sujeción se pueden apreciar en la imagen.

El movimiento al tomar un cilindro también fue hecho por el sujeto de pruebas, por lo que también se observó que el cambio más significativo era en los puntos que puede medir el guante de sensado [Figura 83].



Figura 83. Sujeto de pruebas sosteniendo un cilindro. Se puede observar también el ángulo más significativo para este movimiento, es importante mencionar que los sensores también pueden medir este cambio significativo al realizar este movimiento de sujeción.

Al realizar estos pequeños experimentos se pudo observar que, en efecto, los ángulos más significativos eran obtenibles con el guante de sensado. También se preguntó a los sujetos de prueba acerca de las molestias al usar el guante y tomar objetos, estas se reportaron como insignificantes.

Esto es importante, puesto que corrobora que los movimientos a ser estudiados en un futuro se pueden medir con el guante sin perder una gran parte de la información, y por tanto las pruebas para el comportamiento de los sensores logran identificar si el guante tiene un buen funcionamiento o no.

7.2.1 Calibración

Los sensores del guante ya fueron estudiados, sus características y forma de estudio se pueden ver en el capítulo 7. De estas pruebas el resultado fue una ecuación, y por tanto las pruebas para validar el guante de sensado se harán a partir de la ecuación obtenida anteriormente.

Para las pruebas que se realizaron se contó con el apoyo de dos sujetos de prueba, con las características necesarias para usar el guante vistas en el capítulo 7, en las que se incluye el tamaño de las manos de los sujetos de prueba. Aunque ambas personas tenían manos pequeñas y compatibles con el subsistema, sus medidas no eran exactamente iguales, por esta razón se calculó la variación entre sí para ver de qué forma respondía la ecuación usada. [Figura 84]



Figura 84. Variación de tamaño del 5% entre las manos de los sujetos de pruebas.

Si bien, se ha visto que la calibración de este tipo de dispositivos es importante para lograr resultados certeros, la calibración de este sistema fue hecha de forma matemática mediante software. Esta calibración se hizo a partir de la ecuación antes mencionada. Esto podría limitar un poco las pruebas debido a los tamaños y forma de sujeción de cada persona, por lo que se tendrían que buscar sujetos de pruebas con características similares.

Para nuestro estudio las lecturas respondían bien ante la aplicación de esta ecuación al ser probados. Esto puede ser explicado por la similitud entre antropometría de ambos sujetos de pruebas, pues el porcentaje de diferencia entre ambas manos era de: 5%, esta pequeña variación y la forma de sujeción si arrojó resultados diferentes, aunque pudo verse que la ecuación funcionó en ambos sujetos de pruebas.

7.2.2 Prueba: Comprobación de ángulos

Las pruebas hechas al guante consisten en medir el movimiento de los dedos a partir de la ecuación 3.

Esta fue insertada en un programa (Apéndice J. Programa para las pruebas del guante de sensado: grados), el programa a su vez mide los datos de los sensores y mediante la ecuación los transforma a grados. Aunque el programa no es completamente preciso, se tiene la repetición suficiente para saber en qué ángulo aproximado está el dedo humano, de esta forma se tiene un estudio bastante certero de los movimientos del dedo.

Para este experimento, también se hizo uso de los moldes que se usaron para calibrar el guante, de esta forma se puede tener seguridad de que los dedos están en la posición correcta, y por tanto, la validación del guante es más segura [Figura 85].



Figura 85. Mano de sujeto de prueba con el guante puesto usando los moldes para calibrar.

7.2.3 Prueba Flexión-Extensión

Otra prueba hecha para validar el guante consistió en adaptar esa ecuación y hacer que el programa supiera si el dedo estaba siendo flexionado, extendido o estático: Apéndice K. Programa para las pruebas del guante: Reconocimiento

La ecuación usada para esto fue la misma que para la prueba anterior, sin embargo, el movimiento fue obtenido a través del incremento y decremento de sus ángulos [Figura 86].

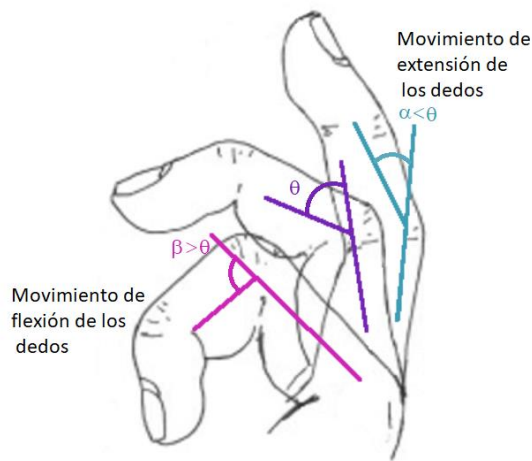


Figura 86. La diferencia de los ángulos fue obtenida mediante su posición inmediata anterior, de esta forma si el ángulo era más grande se puede ver que los dedos se flexionan, y que, si es más pequeña, se extienden.

Para esta prueba no hizo falta que se tuvieran los moldes de ángulos, simplemente el sujeto de pruebas se ponía el guante y movía sus dedos de tal forma que se realizaba el movimiento de flexión y extensión.

8. Resultados

“El éxito es una ciencia; Si tienes las condiciones, obtienes los resultados.”

-Oscar Wilde-

8.1 Resultados de la mano mecatrónica antropomórfica

Para tener una vista particular de los objetivos logrados con la mano mecatrónica antropomórfica, se revisarán los resultados por cada una de las pruebas realizadas y finalmente se mostrará un panorama general de estos.

1. Antropometría.

Dentro de las pruebas realizadas para comprobar la antropometría de la mano mecatrónica antropomórfica, se plantearon posiciones que confirmaran la armonía de la mano, esta armonía se comprobó con satisfacción en los dedos del índice al meñique, esto nos indica que en cuanto a medidas y escalas las falanges de los dedos están correctamente diseñados. Sin embargo, en el dedo pulgar, aunque se aprecia en armonía con los otros cuatro dedos, pudo estar mejor posicionado de no ser por la simplificación hecha en su junta CMC, ya que esta simplificación le quita amplitud al movimiento de abducción del dedo en general. En comparación con los cuatro dedos restantes, es el único dedo que tiene un rango de movimiento angular significativo en esta junta.

Por otro lado, al realizar la posición de separación máxima de los dedos, esta no se vio afectada con la simplificación en la junta CMC realizada en el pulgar, esto es debido que el movimiento de abducción en el pulgar es meramente significativo en dirección al dedo índice, en dirección contraria este tiene un rango de movimiento similar al de los otros dedos.

2. Prensión tipo pinza.

En los movimientos de prensión tipo pinza, debemos repartir los resultados en tres distintos, ya que son tres subtipos de prensión que se encuentran englobados en la prensión tipo pinza. Tomando en cuenta no solo la correcta realización de la prensión, sino también la repetitividad en esta.

Se hicieron 20 repeticiones de prensión por cada sujeción de objetos planteada en cada una de las pruebas.

El primer subtipo es la prensión digital, esta prensión fue realizada exitosamente en la totalidad de sus repeticiones, tanto en la sujeción del huevo como de la esfera pequeña utilizada en la prensión pluridigital.

El segundo es la prensión palmar, al igual que la anterior, se comprobó su repetitividad al lograr correctamente todas las repeticiones de la prueba, tanto con la esfera como con el cilindro.

El tercero es la prensión centrada, de este tipo de prensión no se realizaron pruebas puesto que emplea objetos de dimensiones angostas como un tenedor o una batuta, por poner un ejemplo. Estos objetos hubieran sido problemáticos de sostener debido a las dimensiones de la mano mecatrónica antropomórfica, esto no quiere decir que sus dimensiones no sean antropométricas ya que la **relación** existente entre las dimensiones de cada una de sus falanges corresponde a las de una mano humana; sin embargo, el dedo mecatrónico antropomórfico en el que se basó su diseño, y a partir del cual se escalan los demás dedos, no correspondía a las dimensiones falángicas de un dedo meñique, sino a las de un dedo índice, esto causó que el resultado final de la mano mecatrónica antropomórfica fuera una mano de mayor tamaño que el de una mano humana promedio.

A pesar de saberse este hecho, se continuó con su fabricación, puesto que al tener el escalamiento correcto la mano mecatrónica antropomórfica seguiría estando antropométricamente bien diseñada y podría conseguir de igual manera la sujeción de objetos de tamaños que no fueran tan angostos como los que se suelen sostener con la prensión centrada.

Un segundo argumento que se tomó para descartar este subtipo de prensión fue que, a diferencia de los otros dos subtipos que son sujeciones más generales, esta se utiliza para sujetar objetos en situaciones muy específicas.

3. Adaptabilidad.

En el aspecto de adaptabilidad, los resultados obtenidos fueron los deseados, el diseño de la mano mecatrónica antropomórfica cumple con esta característica de la mejor manera posible, logrando sostener objetos con superficies irregulares y superficies esféricas, cosa que en otros tipos de diseños de manos robóticas o antropomórficas es nulo o no se logra en su totalidad.

En general, los resultados obtenidos por la mano mecatrónica antropomórfica arrojan que puede realizar movimientos de prensión, que tiene la capacidad de adaptabilidad y que es antropométricamente correcta. Esto comprueba que podrá cumplir con su cometido de servir, en un futuro, como parte de un banco de pruebas para el estudio de la intuición de los movimientos de sujeción de la mano humana.

8.2 Resultados del guante de sensado

El guante se valida por dos motivos:

1. Comodidad.
2. Comportamiento ante el movimiento de las manos

La primera parte fue validada por los sujetos de pruebas, a quienes se preguntó la molestia que sentían al realizar los movimientos. La comodidad, por tanto, se midió de forma subjetiva por nuestros sujetos de pruebas.

Tabla 9. Molestias de los usuarios

Movimiento	Molestia
Extensión	Inexistente
Flexión	Solo al intentar movimientos de más de 90°

Se puede concluir que este guante es lo bastante cómodo para realizar los movimientos de sujeción planteados en el capítulo de pruebas.

1. Prueba ángulos

De las pruebas de verificación de ángulo se observaron varias cosas.

Primero, que el guante respondía bien con la ecuación planteada, pese a que esta corresponde a una parte de la curva total obtenida. Además, aunque la ecuación anterior fue hecha con un sujeto de prueba, la variación entre el error de ambos no es muy grande.

Pese a esto, la forma en que cada sujeto de prueba colocaba los dedos sobre los moldes era diferente, por lo que se conservó siempre el ángulo, aunque tal vez no la posición de los dedos.

De esto se puede asumir que se tendrían errores con respecto al ángulo que se debía medir, sin embargo, los errores no fueron muy altos.

Sujeto de pruebas 1:

Tabla 10. Sujeto 1: Prueba de ángulos.

Ángulo de la mano [°]	Valor mínimo leído [°]	Valor máximo leído [°]	Error %	
30	23	32	-30.43478261	6.25
45	45	47	0	4.25531915
60	58	61	-3.448275862	1.63934426
75	70	70	-7.142857143	-7.14285714
90	80	90	-12.5	0

Sujetos de pruebas 2:

Tabla 11. Sujeto 2: Prueba de ángulos.

Ángulo de la mano [°]	Valor mínimo leído [°]	Valor máximo leído [°]	Error %	
30	25	33	-20	9.09090909
45	41	47	-9.75609756	4.25531915
60	58	63	-3.44827586	4.76190476
75	70	80	-7.14285714	6.25
90	80	90	-12.5	0

De estos errores se puede observar que, si bien el guante no es exacto, su precisión es suficiente, pues estas pruebas constan de repetitividad en varios sujetos de pruebas, e incluso en los errores más grandes la diferencia real de la posición de la mano es pequeña.

2. Prueba flexión extensión

De la prueba de flexión-extensión, aunque la ecuación estaba caracterizando el movimiento a partir de los 30° y hasta los 90°, el programa fue capaz de deducir si la mano se encontraba en una posición estática, de flexión o de extensión. Esto posiblemente se debe a que los ángulos se conservan, aumentan o disminuyen respectivamente, aun cuando el valor numérico del ángulo no sea exacto.

Gracias a esto, se puede decir que mediante una combinación de los dos programas se puede tener una lectura de los movimientos de la mano bastante buena, y los errores que el guante pueda llegar

a tener a la hora de registrar los movimientos pueden ser subsanados mediante la intervención humana a la hora de filtrarlos.

Los errores que se tuvieron en estas pruebas se ven reflejados en las siguientes tablas:

Sujeto de pruebas 1:

Tabla 12. Sujeto 1: Reconocimiento de los movimientos.

Movimiento realizado	Aciertos de la mano	Fallos	Error %
Flexión	58	7	10.7692308
Extensión	54	11	16.9230769
Estático	62	3	4.61538462

Sujeto de pruebas 2:

Tabla 13. Sujeto 2: Reconocimiento de los movimientos.

Movimiento realizado	Aciertos de la mano	Fallos	Error %
Flexión	56	9	13.8461538
Extensión	53	12	18.4615385
Estático	63	4	5.97014925

En los resultados de ambas pruebas se comprueba que el guante es capaz de obtener mediciones sin un gran porcentaje de error, implicando que la repetitividad de los resultados obtenidos en las pruebas futuras será suficiente para obtener una ecuación confiable.

Si bien, en el futuro lo recomendable sería obtener un molde para que la calibración sea adaptable a más personas, y las ecuaciones sean más precisas. Además, mediante este tipo de calibración, los errores de ambas pruebas serían reducidos drásticamente.

9. Conclusiones

“La productividad nunca es un accidente. Siempre es el resultado de un compromiso con la excelencia, la planificación inteligente y el esfuerzo enfocado.”

-Paul J. Meyer-

En el desarrollo de este banco de pruebas se tomaron en cuenta dos factores esenciales para cada uno de los subsistemas, estos son: diseño y funcionalidad.

En el caso del guante de sensado, se buscaba que este fuera ergonómico mientras realizaba su principal función, sensar los movimientos de flexión y extensión de los dedos de la mano humana. Este subsistema cumplió la parte ergonómica sin ningún problema ya que, su diseño no interfiere con los movimientos estudiados al no tener material en la parte interna de la mano, exceptuando unas pequeñas pestañas que mantienen el guante ajustado a los dedos, esto permite la libertad de realizar la flexión y extensión de los dedos prácticamente sin limitantes. Otro gran aporte a su ergonomía es el circuito que conecta los sensores al microprocesador para procesar las señales analógicas, puesto que este circuito fue hecho mediante bobinas de hilo conductor, lo que permitió que los usuarios no sintieran tosco el uso de esta herramienta de sensado, caso contrario a los guantes que utilizan cables o alambre para enviar las señales analógicas de los sensores. Esto indica que los materiales utilizados para su fabricación podrían seguirse implementando en un futuro para conservar la ergonomía que este guante ofrece.

Por la parte de la funcionalidad, el guante cumple aceptablemente su tarea, gracias a su sensado se pudo obtener la tendencia del movimiento de flexión y extensión de un dedo para después encontrar la ecuación que lo describiera, aunque cabe mencionar que esta ecuación no describe por completo el movimiento, sino que tiene una ventana de medición de 30° a 90°; esta limitante se presenta por el tipo de sensor que se utilizó, sin embargo, esto no interfirió con la capacidad del guante para identificar los movimientos de flexión y extensión, aunque se podrían realizar bastantes mejoras para que los resultados obtenidos sean más fieles a los movimientos de los usuarios, esto podría mejorarse al cambiar el tipo de sensor e incluso al agregar más sensores al diseño del guante en los puntos que se vieron que son de interés para el estudio de los movimientos de la mano humana.

En cuanto a la mano mecatrónica antropomórfica, en su diseño se implementaron arcos flexibles para lograr una mayor adaptabilidad en el agarre o prensión de objetos esféricos y amorfos, característica de la cual carecen otros diseños de manos mecatrónicas o robóticas, y la cual tiene gran importancia para la aplicación a la que está destinada. Esto se logra gracias el diseño y planteamiento de los eslabones que simulan las falanges, presentados por el dedo original, y que aportan la capacidad de ejecutar los movimientos con mayor naturalidad que otros diseños.

Otra parte importante del diseño es la base de la mano mecatrónica antropomórfica, ya que esta acopla todos los dedos con el espaciamiento necesario para permitir su libre movimiento y a su vez, los mantiene en la posición adecuada y permite el paso de los tendones a través de ella. Por otro lado, se podría realizar alguna modificación a la base de los actuadores con el fin de poder ser adaptada a algún brazo robótico.

En cuanto al funcionamiento de la mano, podemos decir que la ejecución de los movimientos de prensión son correctamente realizados, a pesar de que se tienen ciertas simplificaciones en las juntas de los eslabones, estas fueron hechas para simplificar su construcción sin afectar su motricidad, sin embargo, los actuadores implementados no logran el cierre completo (formación del puño) de la mano, esto es posible solucionarlo remplazando los actuadores por otros que tengan un mayor par motor; a pesar de tener esta limitante, los movimientos de prensión realizados por la mano mecatrónica antropomórfica durante las pruebas no se vieron perjudicados.

Por lo anterior dicho, se puede concluir que ambos subsistemas cuentan con los requisitos necesarios para ser usados en un futuro como un banco de pruebas para el estudio de la intuición de los movimientos de sujeción de la mano humana, sin embargo, para ambos existen mejoras que podrían realizarse en un futuro.

10. Referencias

- [1] A. Jiménez-González, J. R. M. De Dios, A. De San Bernabé, G. Núñez, and A. Ollero, “Un banco de pruebas remoto para experimentación en robótica ubicua,” *RIAI - Rev. Iberoam. Autom. e Inform. Ind.*, vol. 11, no. 1, pp. 68–79, 2014.
- [2] J.-C. Latombe, *Robot motion planning*. Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [3] A. Meystel, *Autonomous Mobile Robots*. WORLD SCIENTIFIC, 1991.
- [4] J. A. M. Dorantes, “Control de robots mediante la aplicación de redes neuronales artificiales programadas en VHDL,” Universidad Nacional Autónoma de México, 2010.
- [5] R. Frantz, “Herbert Simon. Artificial intelligence as a framework for understanding intuition,” *J. Econ. Psychol.*, vol. 24, no. 2, pp. 265–277, 2003.
- [6] C. Betsch, T. Betsch, and H. Plessner, *Intuition in judgment and decision making*. .
- [7] J. Dundas and D. Chik, “Implementing Human-like Intuition Mechanism in Artificial Intelligence,” 2011.
- [8] W. Tao and P. He, “Intuitive learning and artificial intuition networks,” *ETT 2009 - 2009 2nd Int. Conf. Educ. Technol. Train.*, pp. 297–300, 2009.
- [9] N. Palastanga, D. Field, and R. Soames, *Anatomía y movimiento humano : estructura y funcionamiento*. Editorial Paidotribo, 2000.
- [10] A. I. Kapadji, *Fisiología articular*, 6°. 2010.
- [11] J. Fischer, N. W. Thompson, and J. W. K. Harrison, “The prehensile movements of the human hand,” *Class. Pap. Orthop.*, pp. 343–345, 2014.
- [12] P. Escalona D’A., J. Naranjo O., V. Lagos S., and F. Solís F., “Parámetros de normalidad en fuerzas de prensión de mano en sujetos de ambos sexos de 7 a 17 años de edad,” *Rev. Chil. Pediatr.*, vol. 80, no. 5, pp. 435–443, 2009.
- [13] J. Butterfnr, M. Fischer, M. Grebenstein, S. Haidacher, G. Hirzinger, and J. Butterfass, “Design and experiences with DLR hand II,” *Autom. Congr. 2004. Proceedings. World*, vol. 15, pp. 105–110, 2004.
- [14] V. G. Arnez Paniagua, “Instrumentación de un guante y adquisición de datos de la postura de la mano humana para la teleoperación,” Universidad Nacional Autónoma de México, 2012.
- [15] “Products – Shadow Robot Company.” [Online]. Available: <http://www.shadowrobot.com/products/>. [Accessed: 08-Nov-2018].
- [16] Lucian and K. Jacobitz, “Luciani Samosatensis Opera, Vol III,” pp. 782–787, 1896.
- [17] L. Dipietro, A. M. Sabatini, S. Member, and P. Dario, “A Survey of Glove-Based Systems and Their Applications,” vol. 38, no. 4, pp. 461–482, 2008.
- [18] Jwu-Sheng Hu, Jyun-Ji Wang, and Guan-Qun Sun, “The glove puppet robot: X-puppet,” in *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2008, pp. 4145–4146.
- [19] F. A. Korona and D. L. Akin, “Evaluation of a Hybrid Elastic EVA Glove,” *SAE Tech. Pap.*, vol. 2002-01-23, 2002.
- [20] M. R. Huertas, J. R. M. Romero, and H. A. M. Venegas, “A Robotic Arm Telemanipulated through a Digital Glove,” in *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA 2007)*, 2007, pp. 470–475.
- [21] S. Mascaro and H. H. Asada, “Hand-in-glove human-machine interface and interactive control: task process modeling using dual Petri nets,” in *Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.98CH36146)*, vol. 2, pp. 1289–1295.

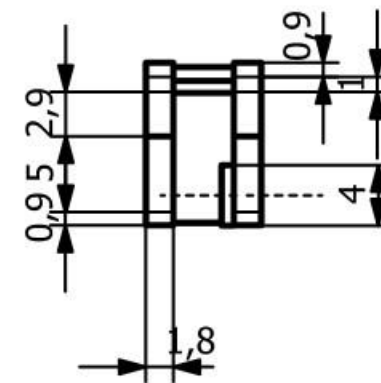
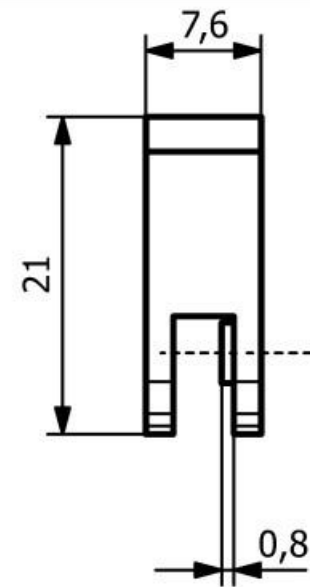
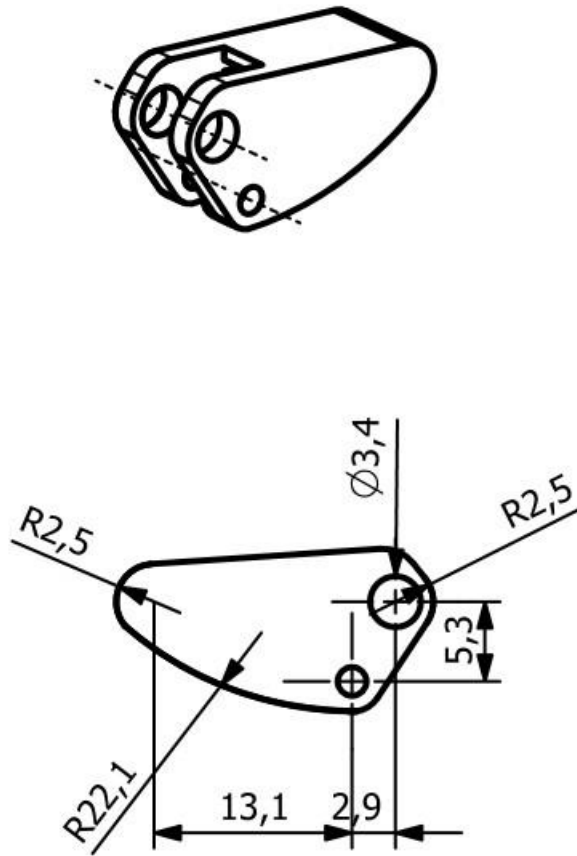
- [22] B. He, K. Wei, C. Fang, and T. Zhang, "A Research of Virtual Experiment in Physics Using Data Glove," in *2007 First IEEE International Symposium on Information Technologies and Applications in Education*, 2007, pp. 136–139.
- [23] Y. Lee, S. Min, H. Yang, and K. Jung, "Motion Sensitive Glove-Based Korean Fingerspelling Tutor," in *2007 International Conference on Convergence Information Technology (ICCIT 2007)*, 2007, pp. 1674–1677.
- [24] S. Sayeed, N. S. Kamel, and R. Besar, "Virtual reality based dynamic signature verification using data glove," in *2007 International Conference on Intelligent and Advanced Systems*, 2007, pp. 1260–1264.
- [25] Qing Chen, A. El-Sawah, C. Joslin, and N. D. Georganas, "A dynamic gesture interface for virtual environments based on hidden markov models," in *IREE International Worksho on Haptic Audio Visual Environments and their Applications, 2005.*, pp. 109–114.
- [26] P. E. Á. Hernández, "Actuacion de un dedo antropomórfico mecatrónico," Universidad Nacional Autónoma de México, 2012.
- [27] E. A. Pró, *Anatomía clínica*. Panamericana, 2014.
- [28] M. Latarjet and A. Ruiz Liard, "Anatomía Humana," 2010. [Online]. Available: <https://www-medicapanamericana-com.pbidi.unam.mx:2443/VisorEbookV2/Ebook/9786079356576?token=09c4fe93-f072-4164-9cbb-18dc49238479&fbclid=IwAROKJDEwerPPuWejnz4JV92Kib5PddDjBmrXYsvE-ZFPnOYLyUvCO8Cx68I#%257B%2522Pagina%2522:%2522PORTADA%2522,%2522Vista%2522:%2522Indice%2522,%2525>. [Accessed: 05-Mar-2019].
- [29] J. E. Sirvent Belando and R. P. Garrido Chamorro, *Valoración antropométrica de la composición corporal cineantropometría*. Publicaciones de la Universidad de Alicante, 2009.
- [30] Julio César Díaz Montes and J. M. D. González, "Mecanismos De Transmisión Y Actuadores Utilizados En Prótesis De Mano," *Memorias del XV Congr. Int. Anu. la SOMIM*, vol. 1, p. 14, 2009.
- [31] M. C. Carrozza, G. Cappiello, S. Micera, B. B. Edin, L. Beccai, and C. Cipriani, "Design of a cybernetic hand for perception and action," *Biol. Cybern.*, vol. 95, no. 6, pp. 629–644, Dec. 2006.
- [32] T. Mouri, H. Kawasaki, K. Yoshikawa, J. Takai, and S. Ito, "Anthropomorphic Robot Hand : Gifu Hand III." 2002.
- [33] J. L. Pons *et al.*, "The MANUS-HAND Dextrous Robotics Upper Limb Prosthesis: Mechanical and Manipulation Aspects," *Auton. Robots*, vol. 16, no. 2, pp. 143–163, Mar. 2004.
- [34] F. Montagnani, G. Smit, M. Controzzi, C. Cipriani, and D. H. Plettenburg, "A passive wrist with switchable stiffness for a body-powered hydraulically actuated hand prosthesis," *IEEE Int. Conf. Rehabil. Robot.*, pp. 1197–1202, 2017.
- [35] L. B. German, "Manipulador antropomórfico teleoperado II," Universidad Nacional Autónoma de México, 2001.
- [36] C. Augusto Quinayás-Burgos, M. Muñoz-Añasco, Ó. Andrés Vivas-Albán, and C. Alberto Gaviria-López, "Diseño y construcción de la prótesis robótica de mano UC-1," vol. 14, no. 2, pp. 223–237, 2010.
- [37] S. Almécija, J. B. Smaers, and W. L. Jungers, "The evolution of human and ape hand proportions," *Nat. Commun.*, vol. 6, no. 1, p. 7717, Dec. 2015.
- [38] C. Augusto, Q. Burgos, T. De Maestría, O. Andrés, and V. Albán, "DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA PROTESIS ROBOTICA DE MANO FUNCIONAL ADAPTADA A VARIOS AGARRES."
- [39] Contreras Ramón, "Pulgar oponible," 2013. [Online]. Available: <https://biologia.laguia2000.com/evolucion/pulgar-oponible>. [Accessed: 09-Nov-2018].
- [40] J. E. Muscolino, *Kinesiology : the skeletal system and muscle function*. .
- [41] J. Martínez, J. P. Molina, A. S. García, and D. Martínez, "Desarrollo de un Guante de Datos con Retorno Háptico Vibrotáctil Basado en Arduino," pp. 1–10.
- [42] S. Y. Jung, S. K. Kang, M. J. Lee, and I. Moon, "Design of robotic hand with tendon-driven three fingers," *ICCAS 2007 -*

Int. Conf. Control. Autom. Syst., pp. 83–86, 2007.

- [43] “Motion Capture Systems | VICON.” [Online]. Available: <https://www.vicon.com/>. [Accessed: 05-Mar-2019].
- [44] “Polhemus is the premier precision motion tracking company.” [Online]. Available: <https://polhemus.com/>. [Accessed: 05-Mar-2019].
- [45] Narhan Chandler, “How the Nintendo Power Glove Worked | HowStuffWorks,” 2015. [Online]. Available: <https://electronics.howstuffworks.com/nintendo-power-glove.htm>. [Accessed: 05-Mar-2019].
- [46] “Home - Anthrotronix.” [Online]. Available: <http://www.anthrotronix.com/>. [Accessed: 05-Mar-2019].

Apéndices

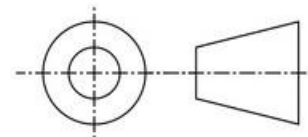
Apéndice A. Planos de los eslabones de un dedo



Diseño y construcción de un banco de pruebas para el estudio de la intuición del movimiento de sujeción de la mano humana.

Dibujo No. : 1

Mano Mecatrónica antropomórfica.



Dibujó: Sandoval E.
Vielma M.

Conjunto:
Dedo Meñique

Tamaño:
A4

Revisó: González V.

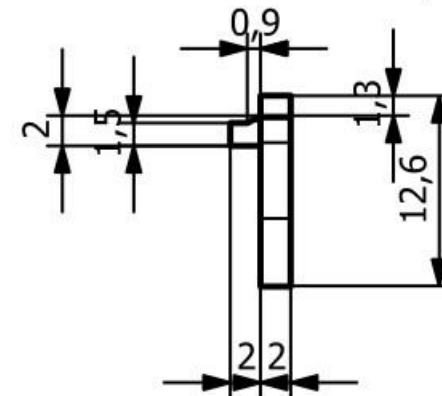
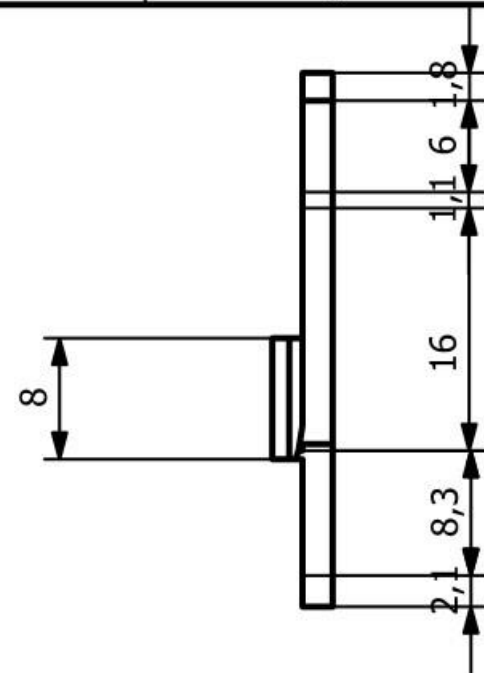
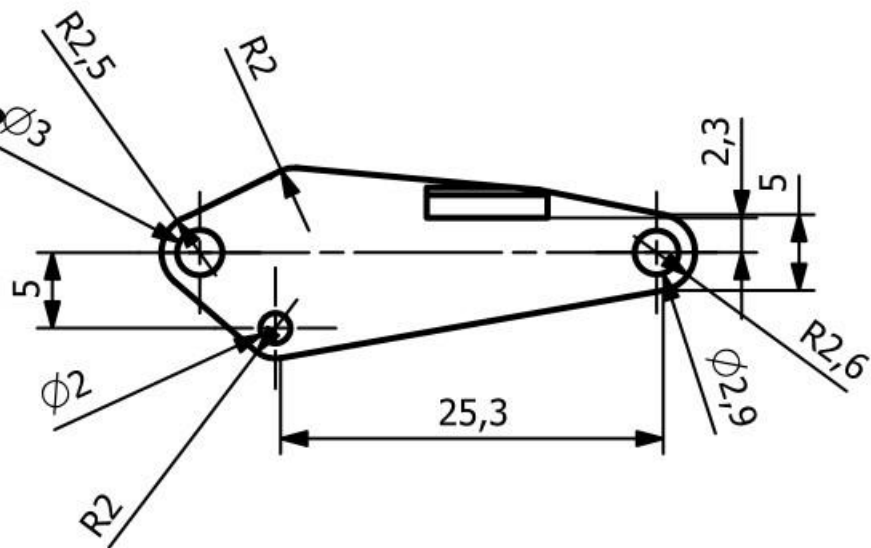
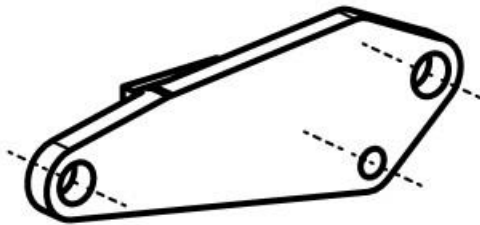
Pieza: Falange Distal

Escala:
2:1

Aprobó: González V.

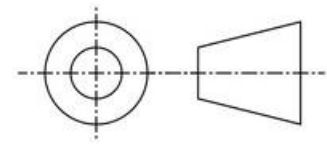
Unidades: mm

Hoja: 1 de 1

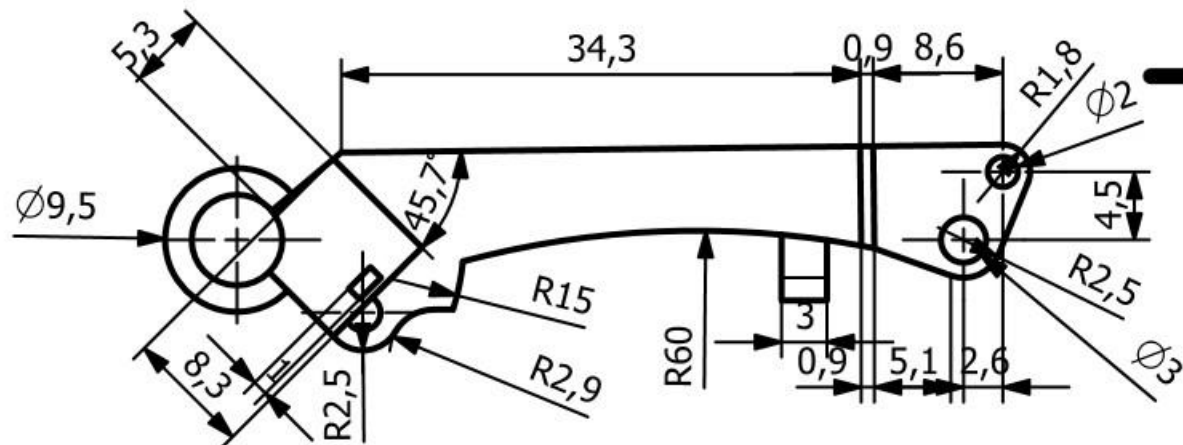
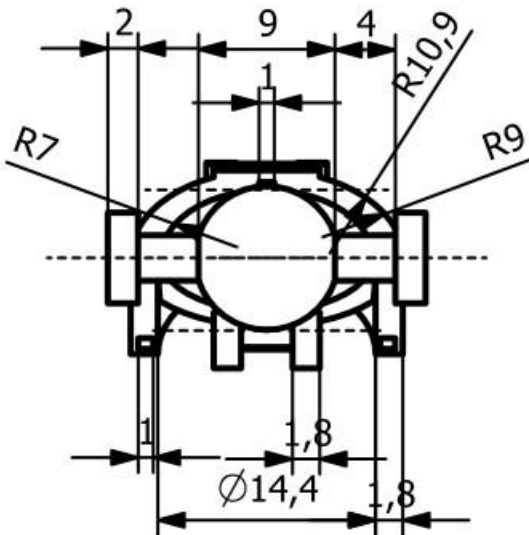
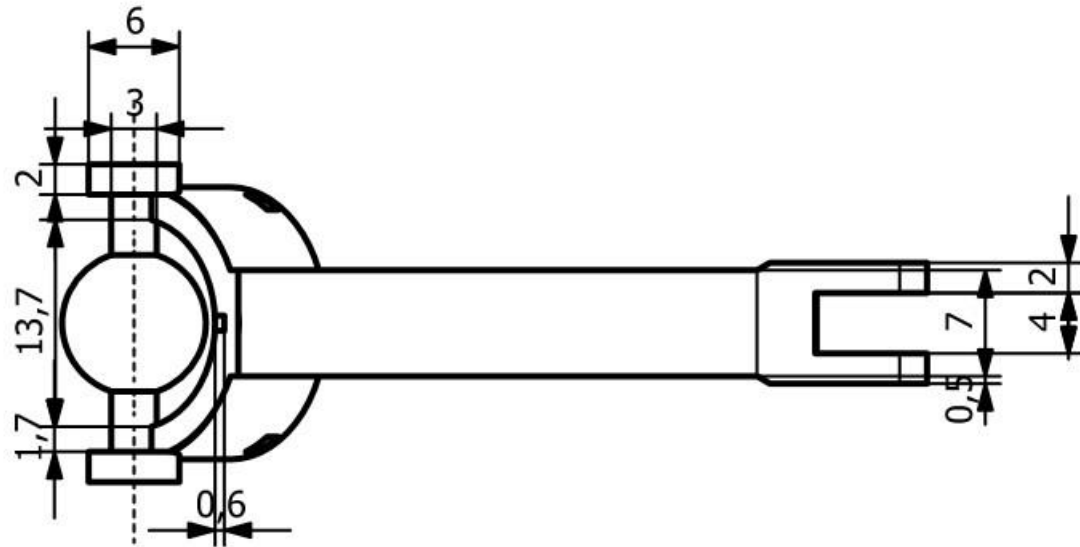
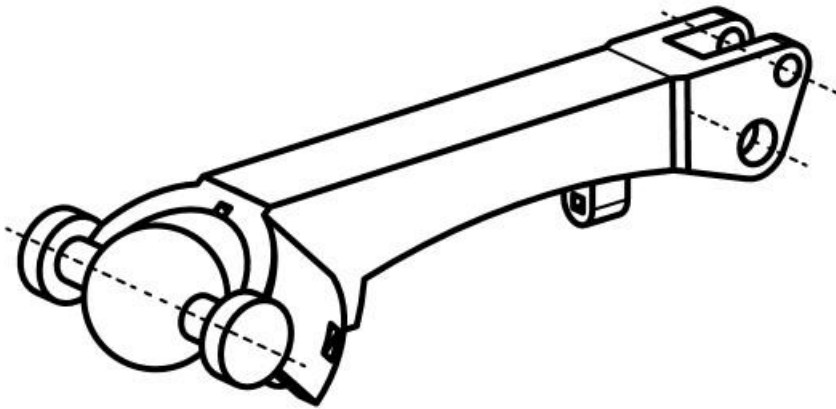


Diseño y construcción de un banco de pruebas para el estudio de la intuición del movimiento de sujeción de la mano humana.

Dibujo No. : 1 *Mano Mecatrónica antropomórfica.*



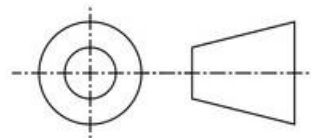
Dibujó: Sandoval E. Vielma M.	Conjunto: Dedo Meñique	Tamaño: A4
Revisó: González V.	Pieza: Falange Media	Escala: 1:1
Aprobó: González V.	Unidades: mm	Hoja: 1 de 1



Diseño y construcción de un banco de pruebas para el estudio de la intuición del movimiento de sujeción de la mano humana.

Dibujo No. : 1

Mano Mecatrónica antropomórfica.



Dibujó: Sandoval E.
Vielma M.

Conjunto:
Dedo Meñique

Tamaño:
A4

Revisó: González V.

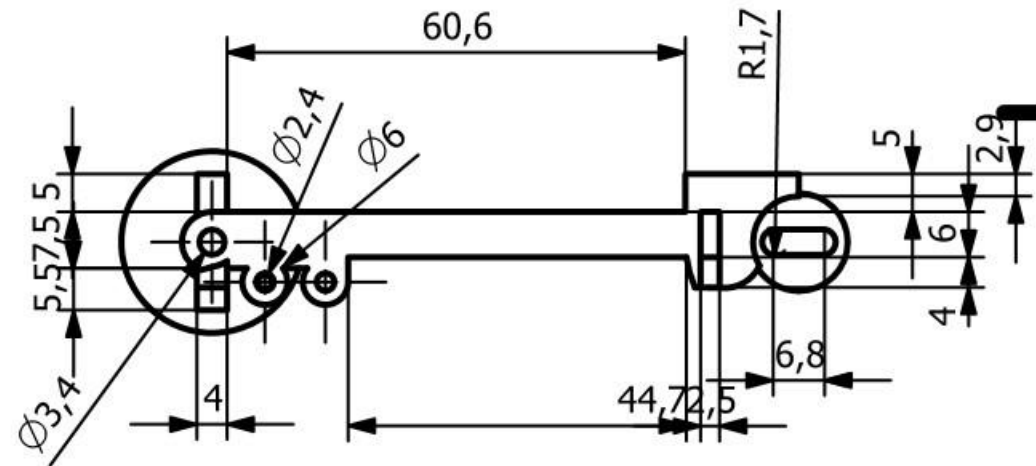
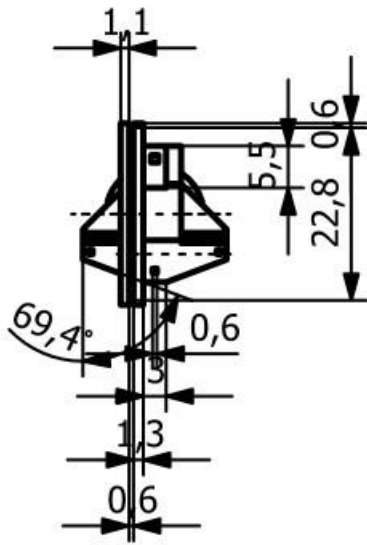
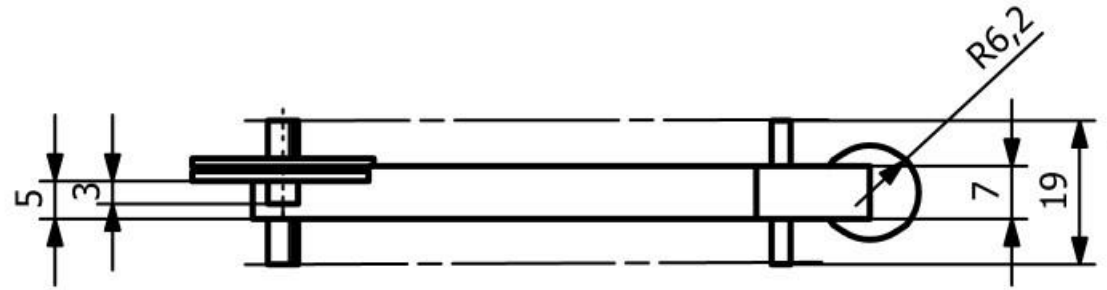
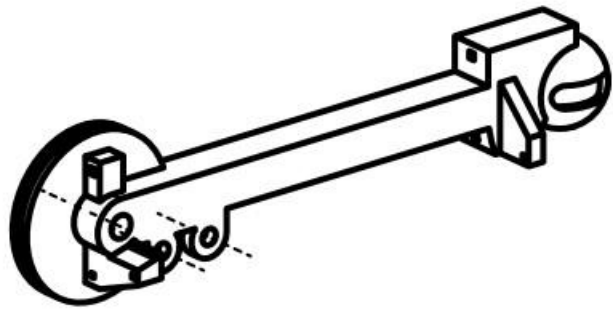
Pieza: Falange
Proximal

Escala:
2:1

Aprobó: González V.

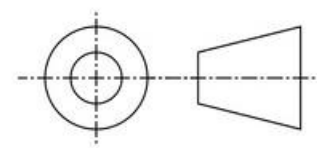
Unidades: mm

Hoja: 1 de 1



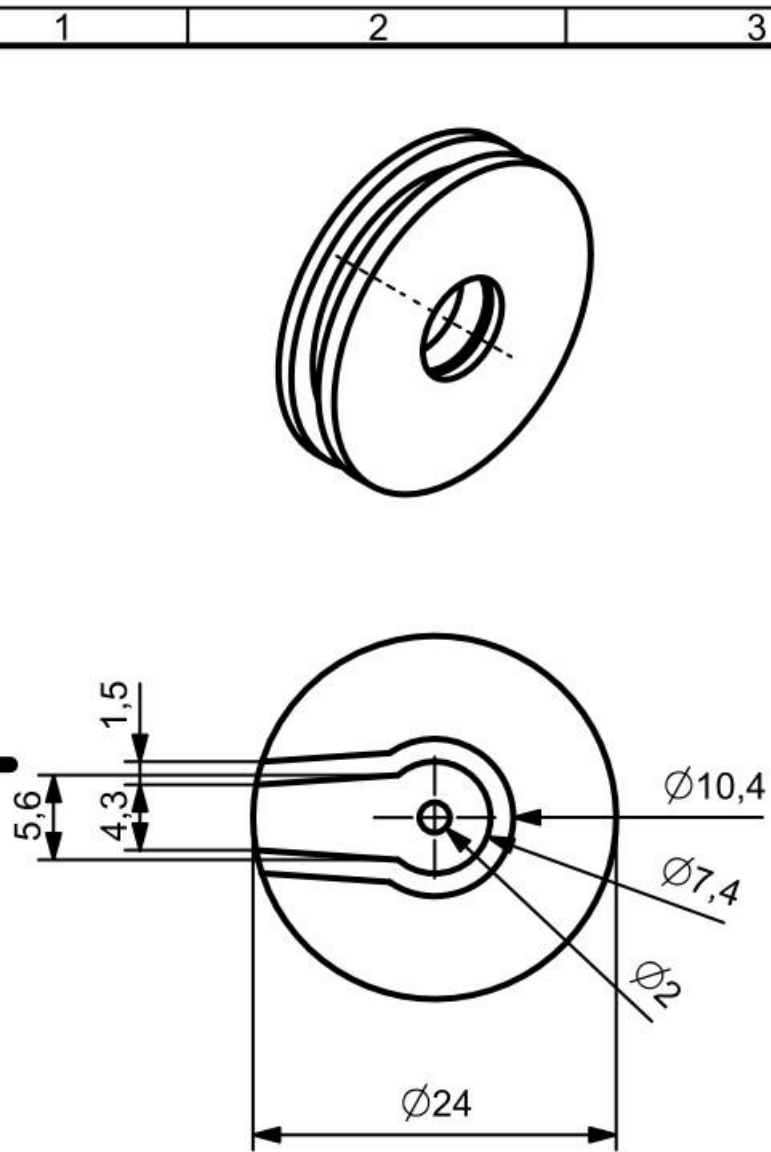
Diseño y construcción de un banco de pruebas para el estudio de la intuición del movimiento de sujeción de la mano humana.

Dibujo No. : 1 *Mano Mecatrónica antropomórfica.*

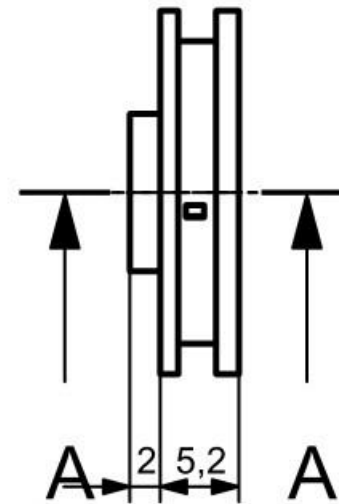
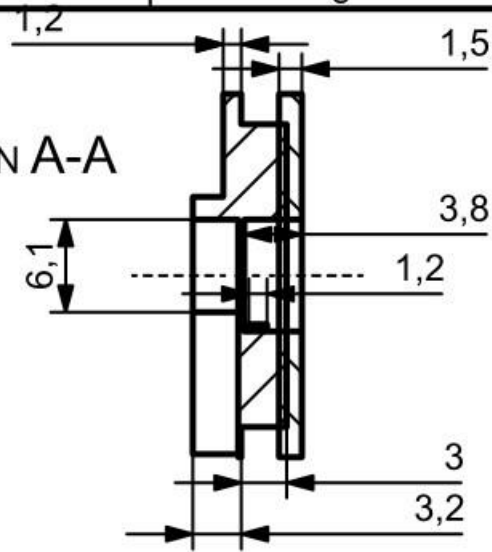


Dibujó: Sandoval E. Vielma M.	Conjunto: Dedo Meñique	Tamaño: A4
Revisó: González V.	Pieza: Metacarpo	Escala: 1:1
Aprobó: González V.	Unidades: mm	Hoja: 1 de 1

Apéndice B. Planos de las poleas



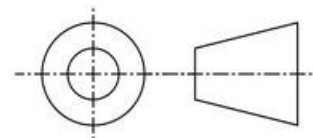
SECTION A-A



Diseño y construcción de nun banco de pruebas para el estudio de la intuición del movimiento de sujeción de la mano humana.

Dibujo No. : 1

Mano Mecatrónica antropomórfica.



Dibujó: Sandoval E.
Vielma M.

Conjunto:
Poleas

Tamaño:
A4

Revisó: González V.

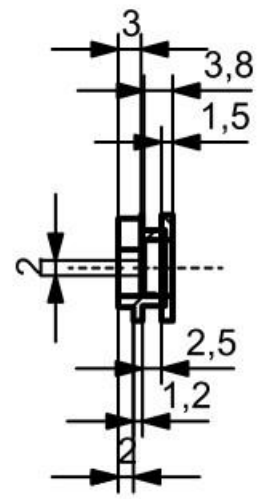
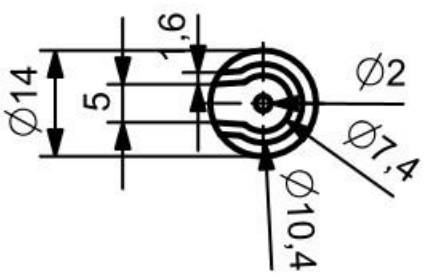
Pieza: Polea 1

Escala:
1:1

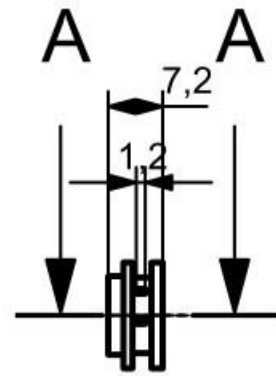
Aprobó: González V.

Unidades: mm

Hoja: 1 de 1

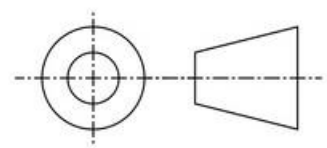


SECTION A-A

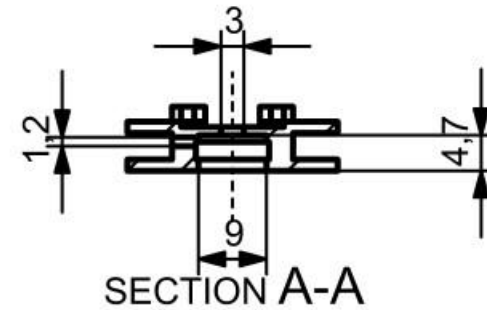
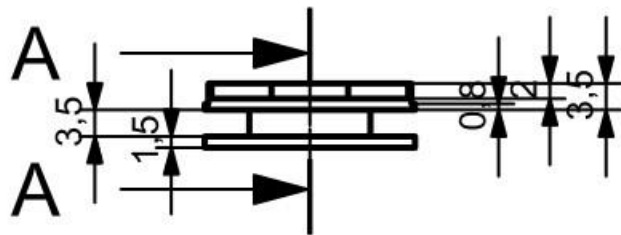
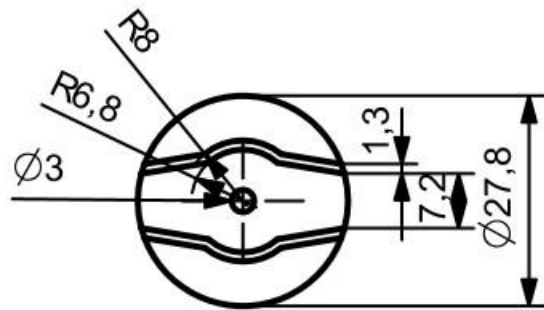


Diseño y construcción de un banco de pruebas para el estudio de la intuición del movimiento de sujeción de la mano humana.

Dibujo No. : 1 *Mano Mecatrónica antropomórfica.*



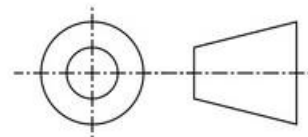
Dibujó: Sandoval E. Vielma M.	Conjunto: Poleas	Tamaño: A4
Revisó: González V.	Pieza: Polea 2	Escala: 1:1
Aprobó: González V.	Unidades: mm	Hoja: 1 de 1



Diseño y construcción de un banco de pruebas para el estudio de la intuición del movimiento de sujeción de la mano humana.

Dibujo No. : 1

Mano Mecatrónica antropomórfica.



Dibujó: Sandoval E.
Vielma M.

Conjunto: Poleas

Tamaño:
A4

Revisó: González V.

Pieza: Polea 3

Escala:
1:1

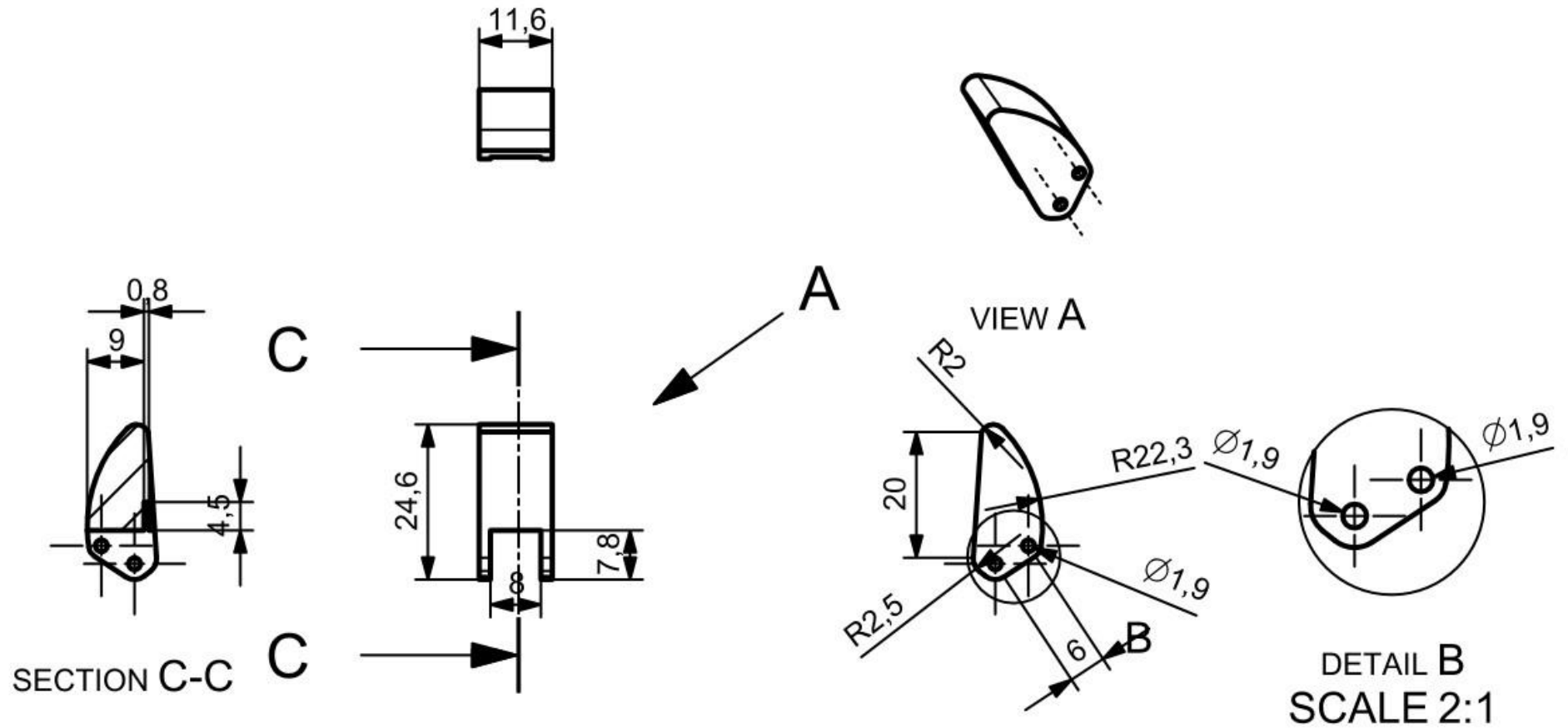
Aprobó: González V.

Unidades: mm

Hoja: 1 de 1

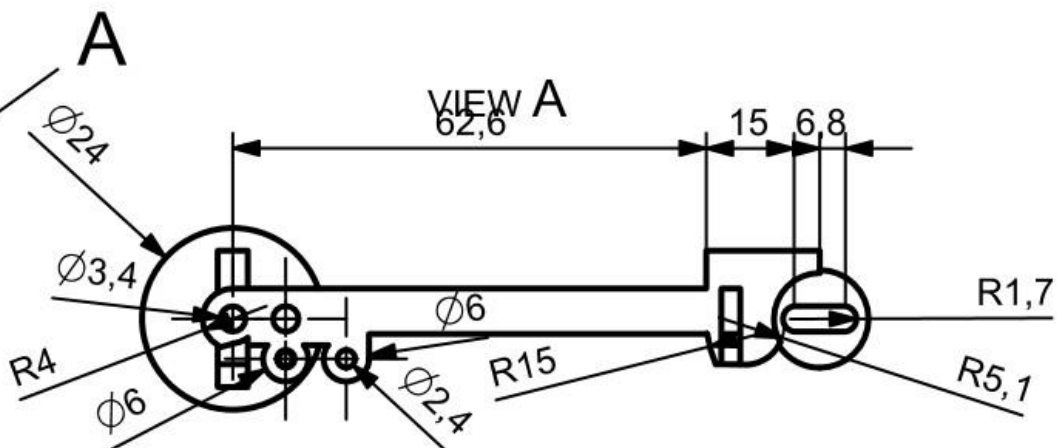
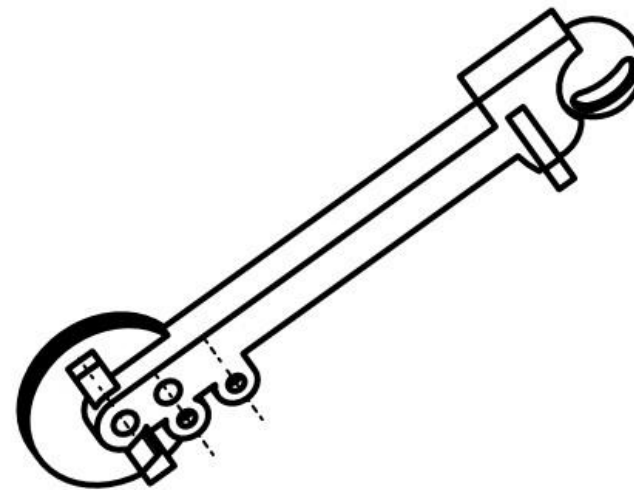
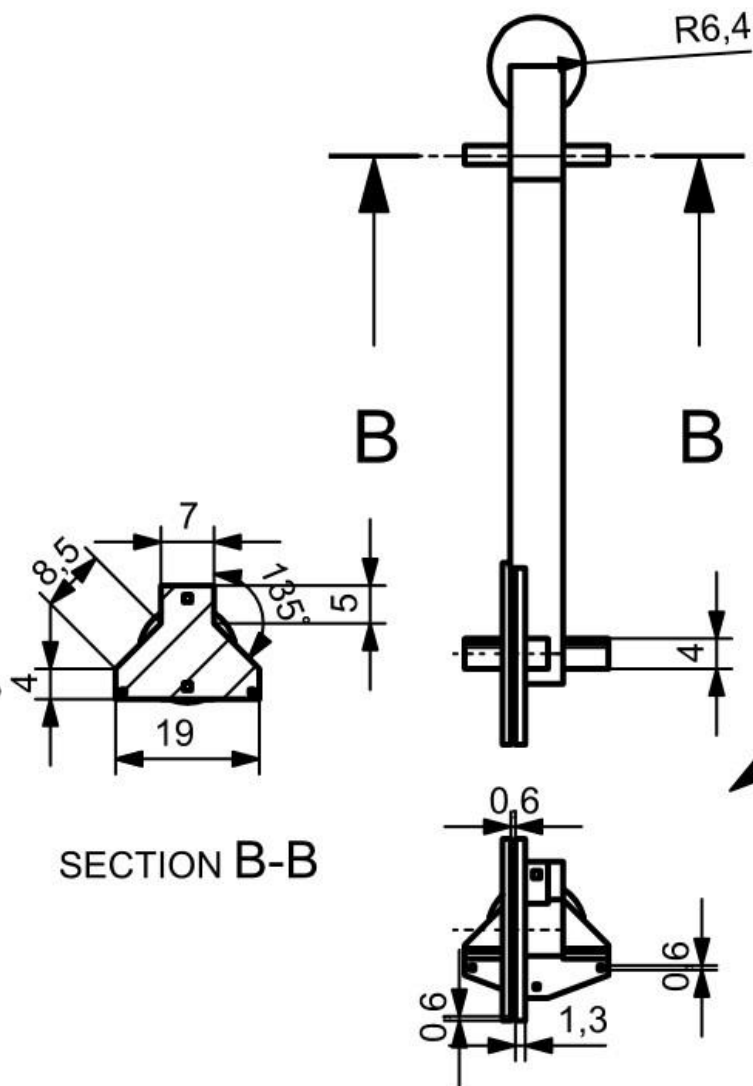
A4

Apéndice C. Planos del pulgar



Diseño y construcción de un banco de pruebas para el estudio de la intuición del movimiento de sujeción de la mano humana.

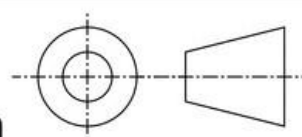
Dibujo No. : 1	<i>Mano Mecatrónica antropomórfica.</i>		
	Dibujó: Sandoval E. Vielma M.	Conjunto: Dedo Pulgar	Tamaño: A4
	Revisó: González V.	Pieza: Falange Distal	Escala: 1:1
	Aprobó: González V.	Unidades: mm	Hoja: 1 de 1



Diseño y construcción de nun banco de pruebas para el estudio de la intuición del movimiento de sujeción de la mano humana.

Dibujo No.
: 1

Mano Mecatrónica antropomórfica.



Dibujó: Sandoval E.
Vielma M.

Conjunto:
Dedo Pulgar

Tamaño: A4

Revisó: González V.

Pieza: Metacarpo

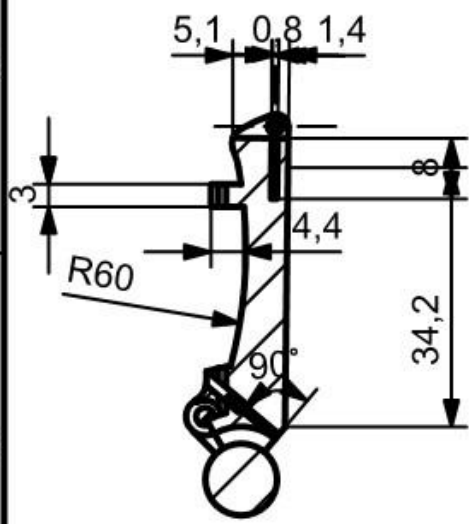
Escala: 1:1

Aprobó: González V.

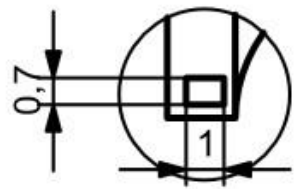
Unidades: mm

Hoja: 1 de 1

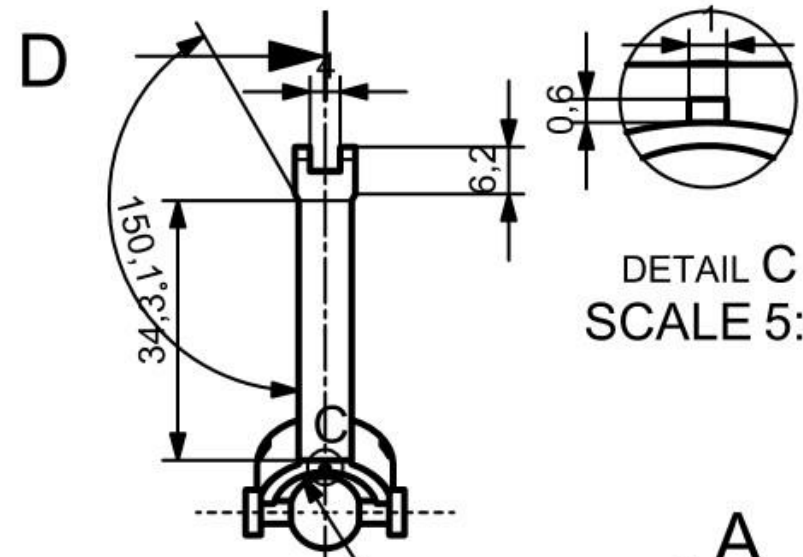
A4



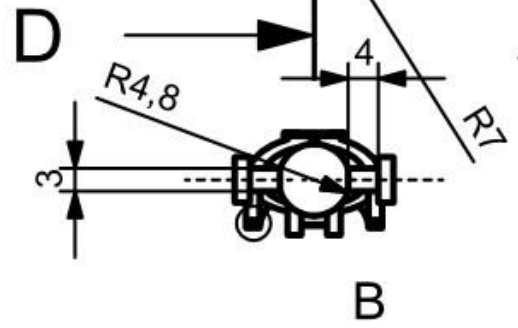
SECTION D-D



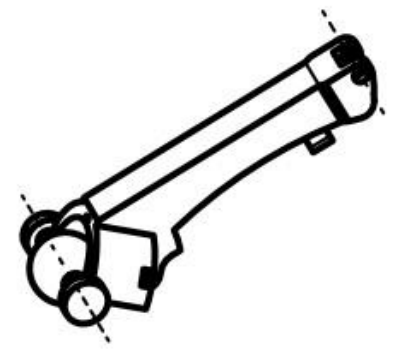
DETAIL B
SCALE 5:1



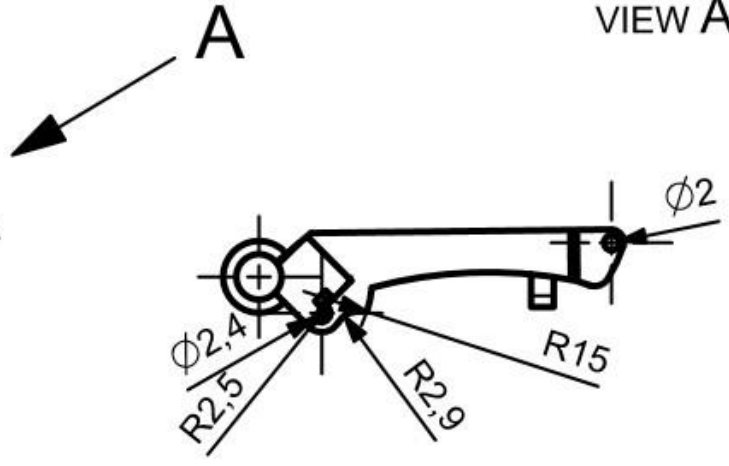
DETAIL C
SCALE 5:1



B



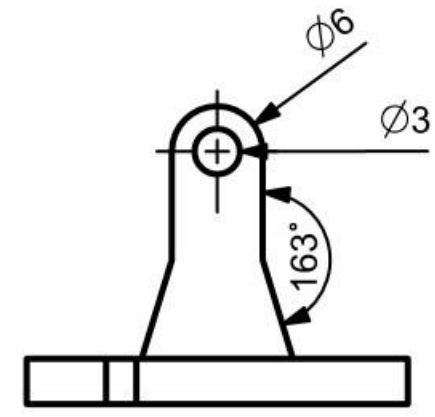
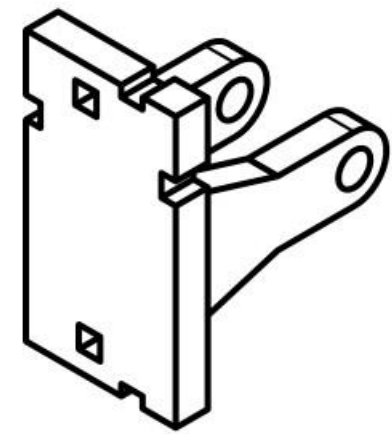
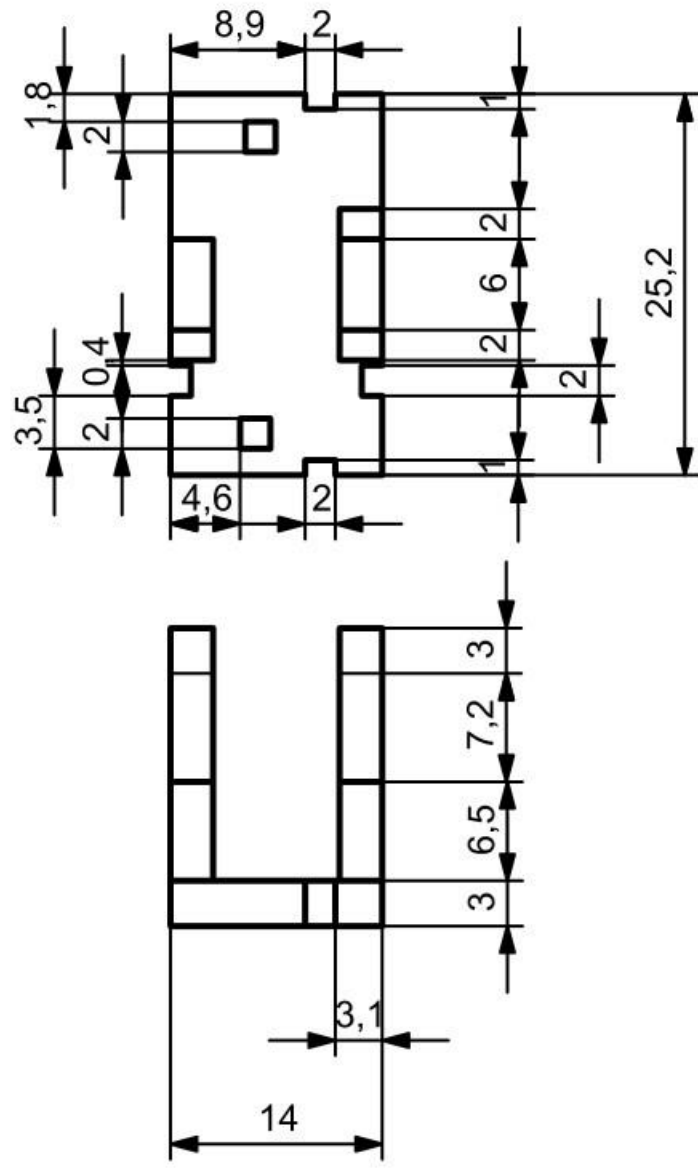
VIEW A



Diseño y construcción de un banco de pruebas para el estudio de la intuición del movimiento de sujeción de la mano humana.

Dibujo No. : 1	<i>Mano Mecatrónica antropomórfica.</i>		
	Dibujó: Sandoval E. Vielma M.	Conjunto: Dedo Pulgar	Tamaño: A4
	Revisó: González V.	Pieza: Falange Proximal	Escala: 1:1
	Aprobó: González V.	Unidades: mm	Hoja: 1 de 1

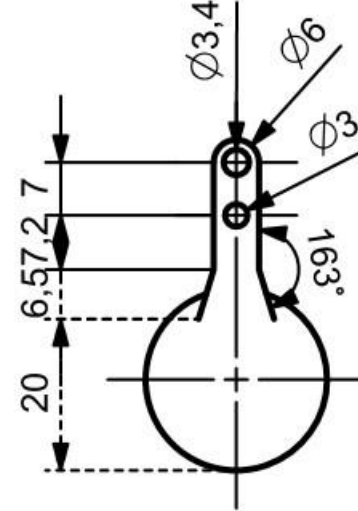
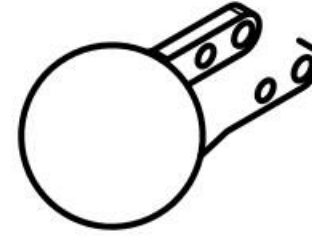
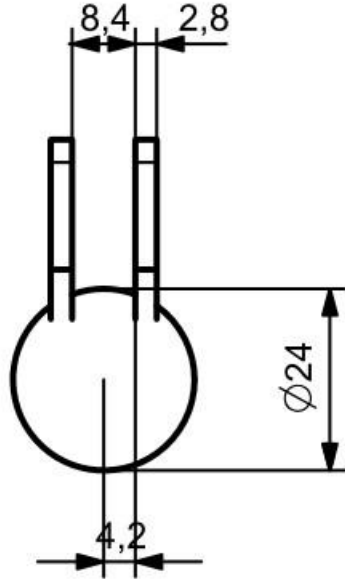
Apéndice D. Planos de la base de la mano



Diseño y construcción de nun banco de pruebas para el estudio de la intuición del movimiento de sujeción de la mano humana.

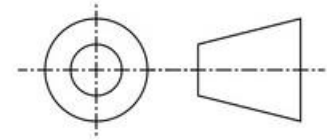
Dibujo No. : 1 *Mano Mecatrónica antropomórfica.*

	Dibujó: Sandoval E. Vielma M.	Conjunto: Base de la mano	Tamaño: A4
	Revisó: González V.	Pieza: Base del meñique	Escala: 2:1
	Aprobó: González V.	Unidades: mm	Hoja: 1 de 1

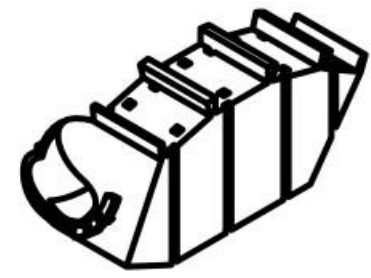
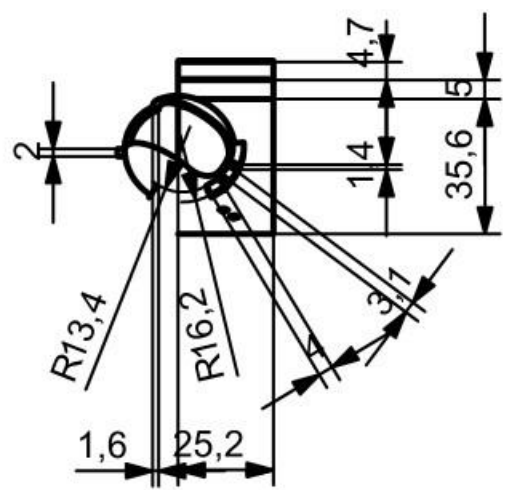
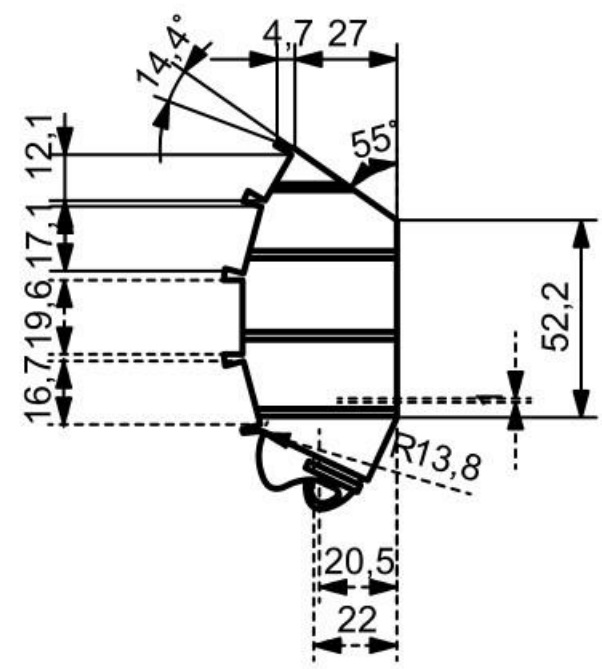
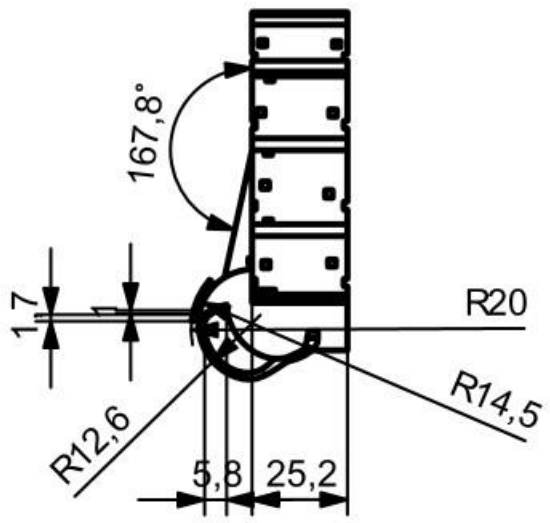


Diseño y construcción de un banco de pruebas para el estudio de la intuición del movimiento de sujeción de la mano humana.

Dibujo No. : 1 *Mano Mecatrónica antropomórfica.*

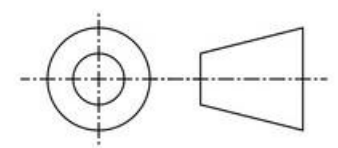


Dibujó: Sandoval E. Vielma M.	Conjunto: Base de la mano	Tamaño: A4
Revisó: González V.	Pieza: Base del pulgar	Escala: 1:1
Aprobó: González V.	Unidades: mm	Hoja: 1 de 1



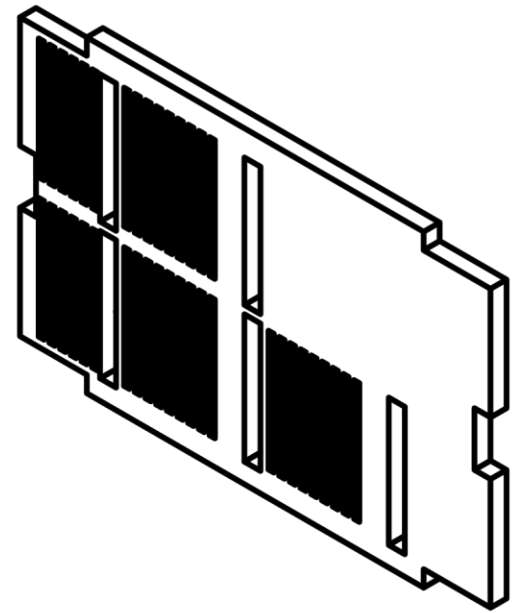
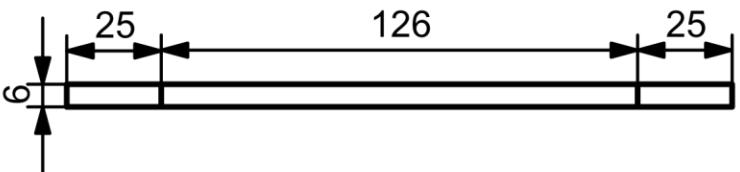
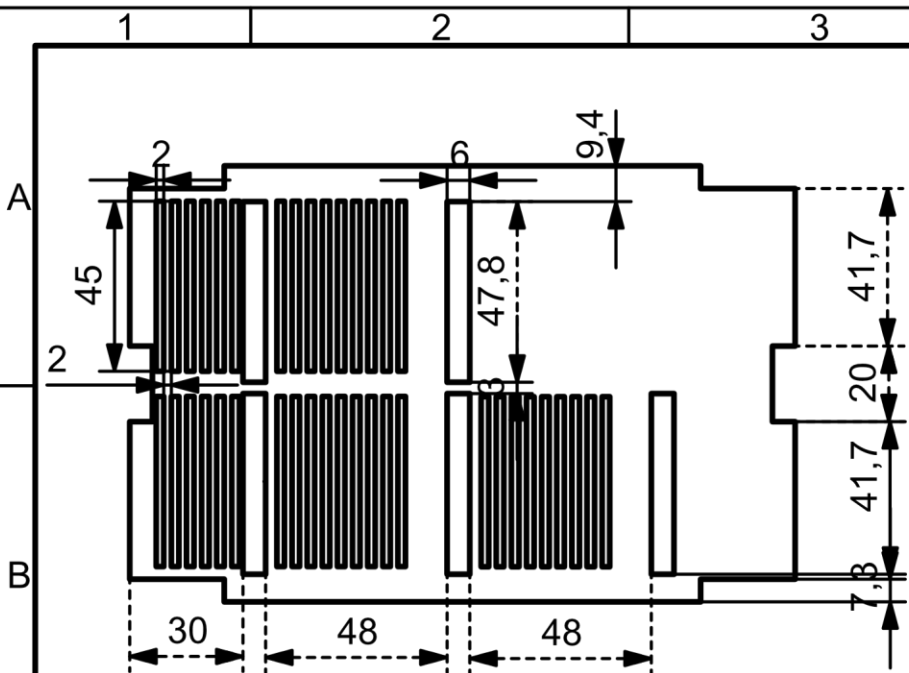
Diseño y construcción de un banco de pruebas para el estudio de la intuición del movimiento de sujeción de la mano humana.

Dibujo No. : 1 *Mano Mecatrónica antropomórfica.*

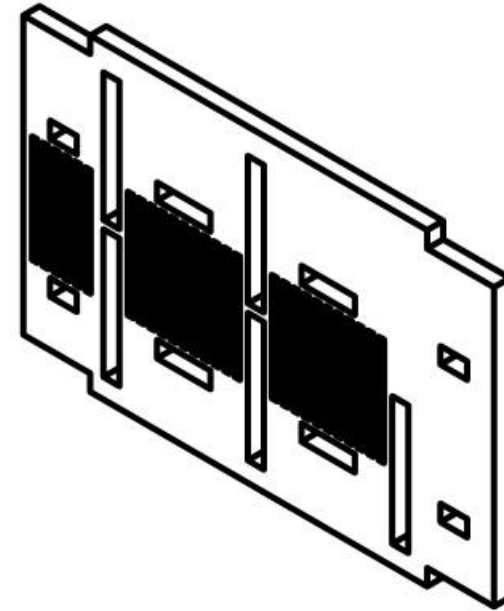
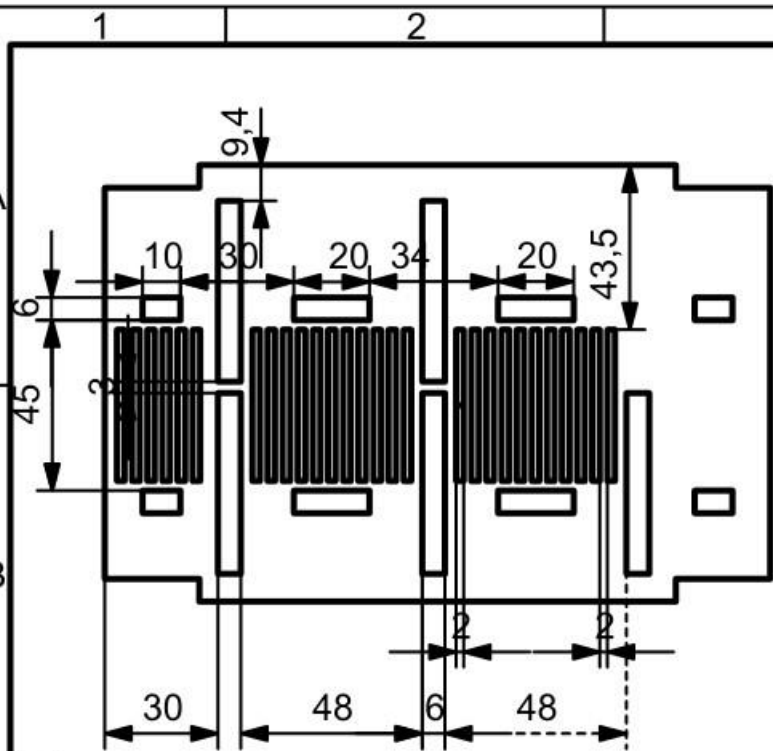


Dibujó: Sandoval E. Vielma M.	Conjunto: Base de la mano	Tamaño: A4
Revisó: González V.	Pieza: Unión de las bases individuales	Escala: 1:2
Aprobó: González V.	Unidades: mm	Hoja: 1 de 1

Apéndice E. Planos de la base de los motores

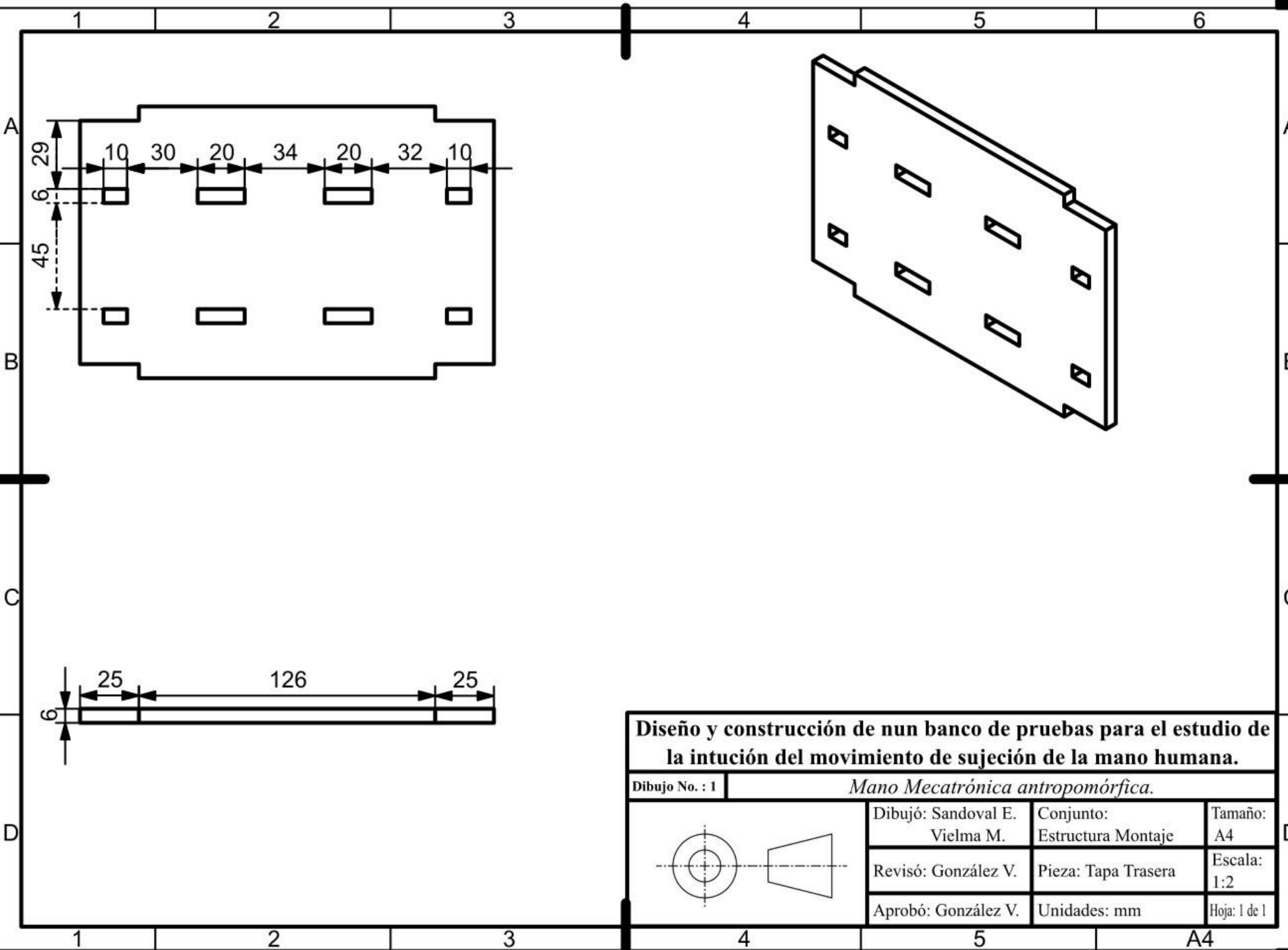


Diseño y construcción de un banco de pruebas para el estudio de la intuición del movimiento de sujeción de la mano humana.			
Dibujo No. : 1	<i>Mano Mecatrónica antropomórfica.</i>		
100	Dibujó: Sandoval E. Vielma M.	Conjunto: Estructura Montaje	Tamaño: A4
	Revisó: González V.	Pieza: Frente	Escala: 1:2
	Aprobó: González V.	Unidades: mm	Hoja: 1 de 1



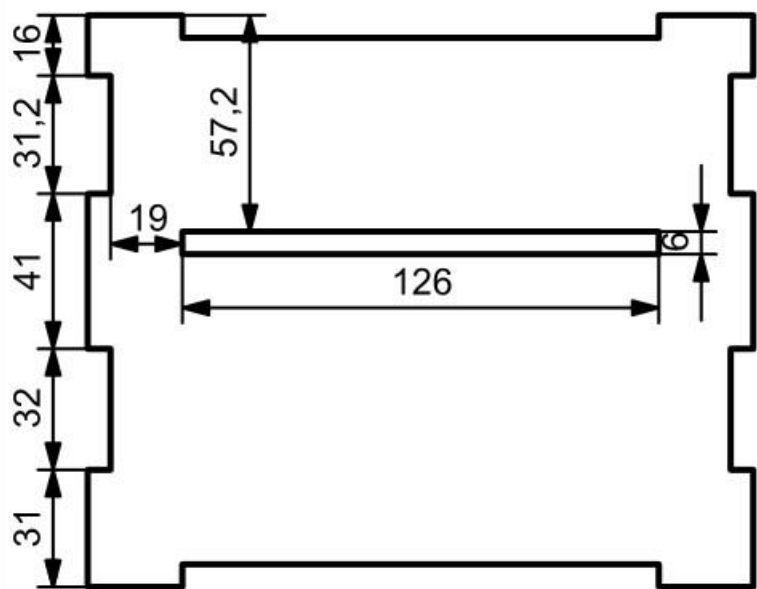
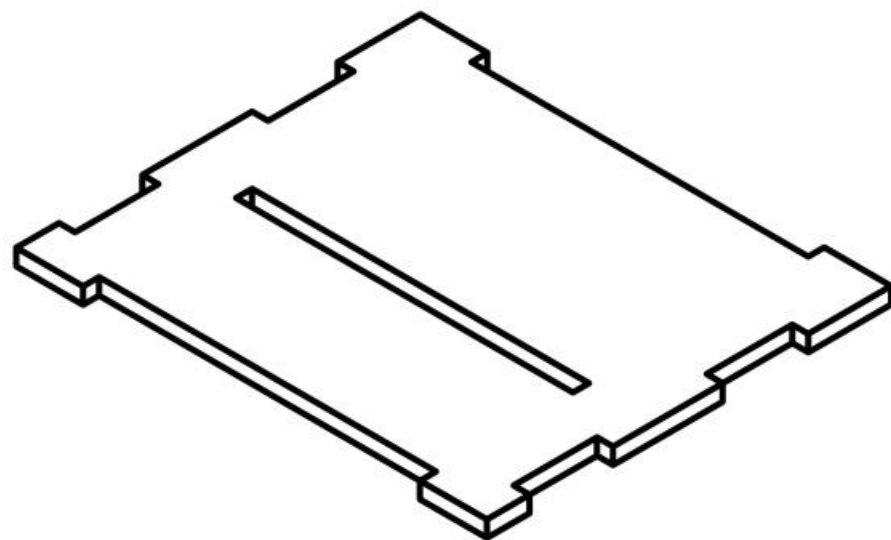
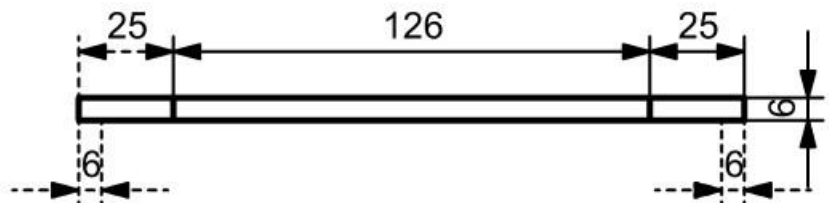
Diseño y construcción de un banco de pruebas para el estudio de la intuición del movimiento de sujeción de la mano humana.

Dibujo No. : 1	<i>Mano Mecatrónica antropomórfica.</i>		
	Dibujó: Sandoval E. Vielma M.	Conjunto: Estructura: Montaje	Tamaño: A4
	Revisó: González V.	Pieza: Medio	Escala: 1:2
	Aprobó: González V.	Unidades: mm	Hoja: 1 de 1



Diseño y construcción de un banco de pruebas para el estudio de la intuición del movimiento de sujeción de la mano humana.

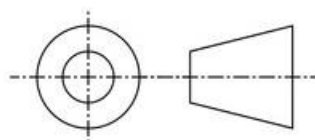
Dibujo No. : 1	<i>Mano Mecatrónica antropomórfica.</i>		
	Dibujó: Sandoval E. Vielma M.	Conjunto: Estructura Montaje	Tamaño: A4
	Revisó: González V.	Pieza: Tapa Trasera	Escala: 1:2
	Aprobó: González V.	Unidades: mm	Hoja: 1 de 1



Diseño y construcción de un banco de pruebas para el estudio de la intuición del movimiento de sujeción de la mano humana.

Dibujo No. : 1

Mano Mecatrónica antropomórfica.



Dibujó: Sandoval E.
Vielma M.

Conjunto:
Estructura Montaje

Tamaño:
A4

Revisó: González V.

Pieza: Tapas arriba y
abajo

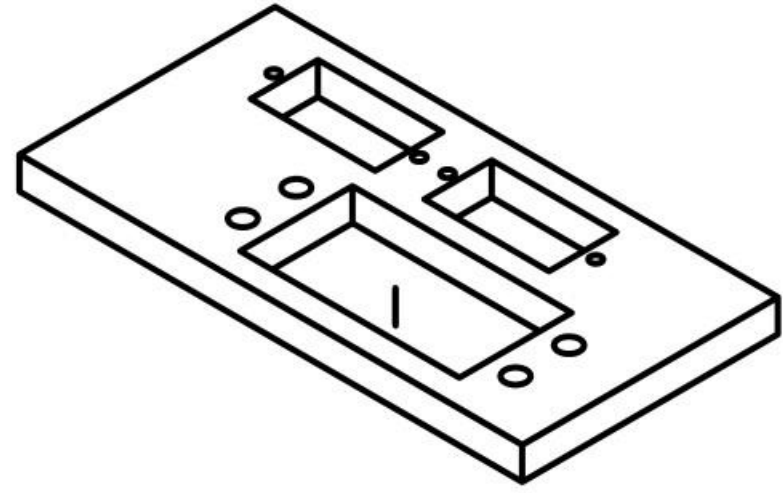
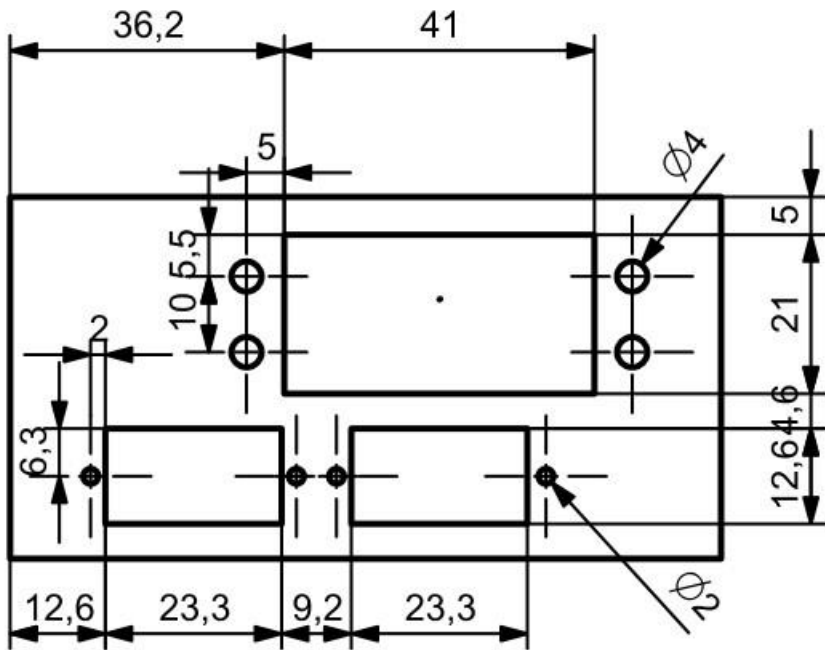
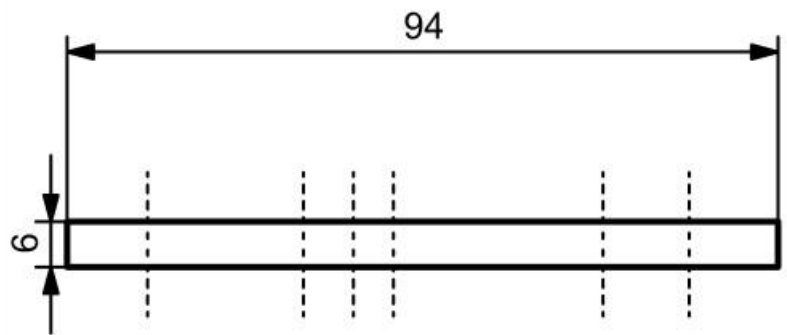
Escala:
1:2

Aprobó: González V.

Unidades: mm

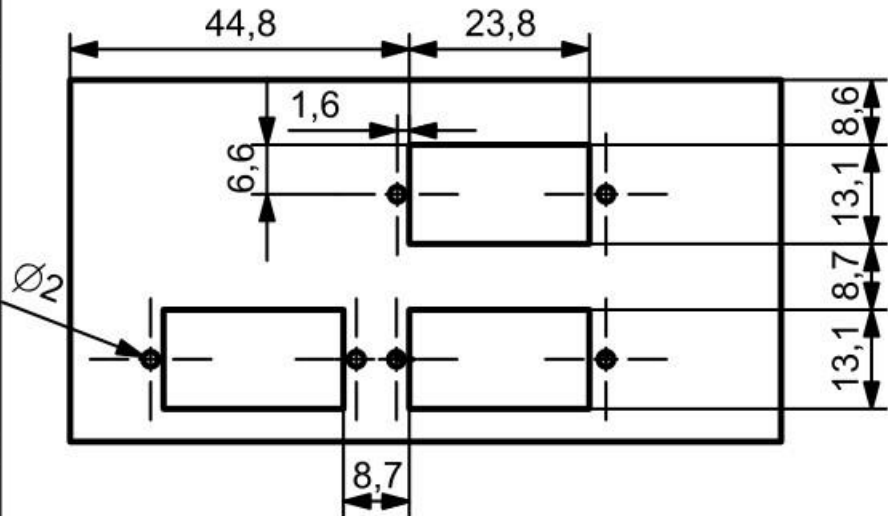
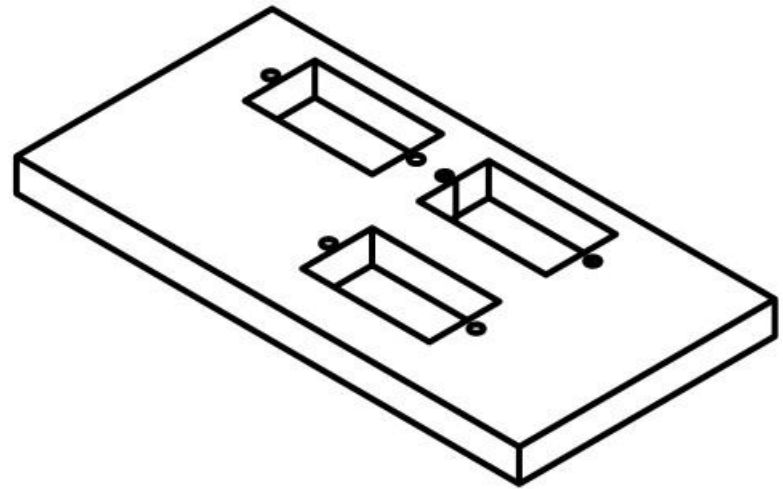
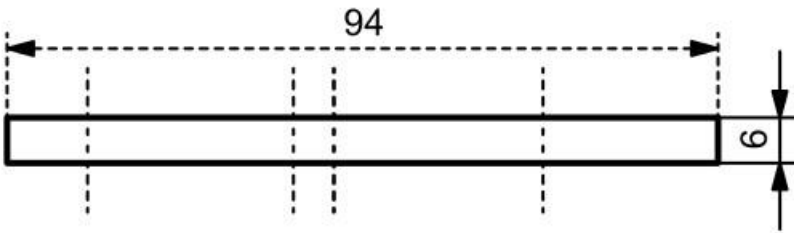
Hoja: 1 de 1

A4



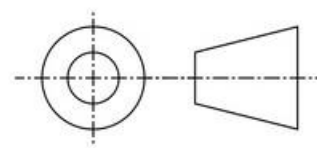
Diseño y construcción de un banco de pruebas para el estudio de la intuición del movimiento de sujeción de la mano humana.

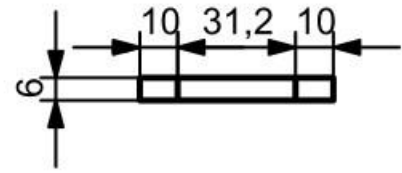
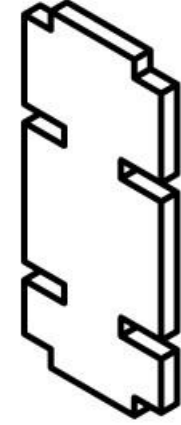
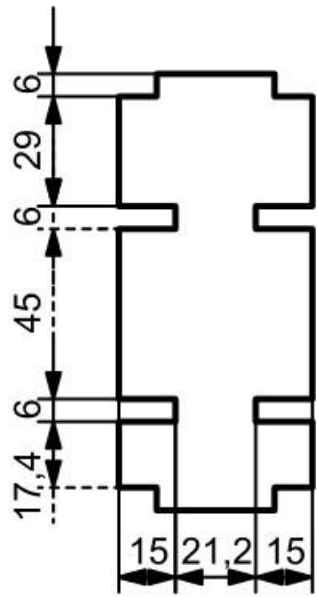
Dibujo No. : 1	<i>Mano Mecatrónica antropomórfica.</i>		
	Dibujó: Sandoval E. Vielma M.	Conjunto: Estructura Montaje	Tamaño: A4
	Revisó: González V.	Pieza: Montaje motor 2	Escala: 1:1
	Aprobó: González V.	Unidades: mm	Hoja: 1 de 1



Diseño y construcción de un banco de pruebas para el estudio de la intuición del movimiento de sujeción de la mano humana.

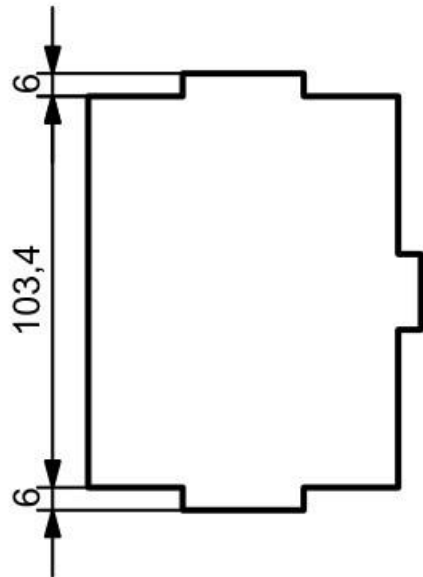
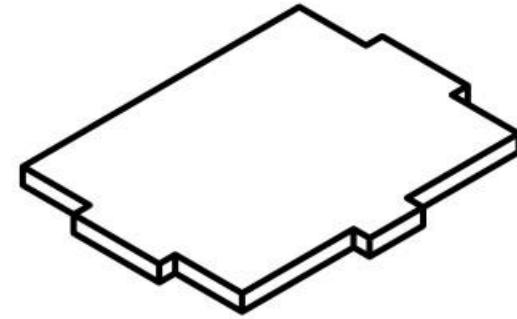
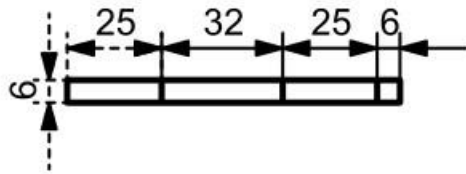
Dibujo No. : 1	<i>Mano Mecatrónica antropomórfica.</i>	
Dibujó: Sandoval E. Vielma M.	Conjunto: Estructura montaje	Tamaño: A4
Revisó: González V.	Pieza: Montaje motores 1	Escala: 1:1
Aprobó: González V.	Unidades: mm	Hoja: 1 de 1





Diseño y construcción de un banco de pruebas para el estudio de la intuición del movimiento de sujeción de la mano humana.

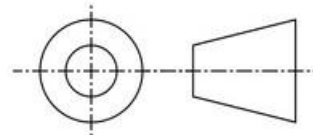
Dibujo No. : 1	<i>Mano Mecatrónica antropomórfica.</i>		
	Dibujó: Sandoval E. Vielma M.	Conjunto: Estructura Montaje	Tamaño: A4
	Revisó: González V.	Pieza: Lateral 2	Escala: 1:2
	Aprobó: González V.	Unidades: mm	Hoja: 1 de 1



Diseño y construcción de un banco de pruebas para el estudio de la intuición del movimiento de sujeción de la mano humana.

Dibujo No. : 1

Mano Mecatrónica antropomórfica.



Dibujó: Sandoval E.
Vielma M.

Conjunto:
Estructura Montaje

Tamaño:
A4

Revisó: González V.

Pieza: Lateral 1

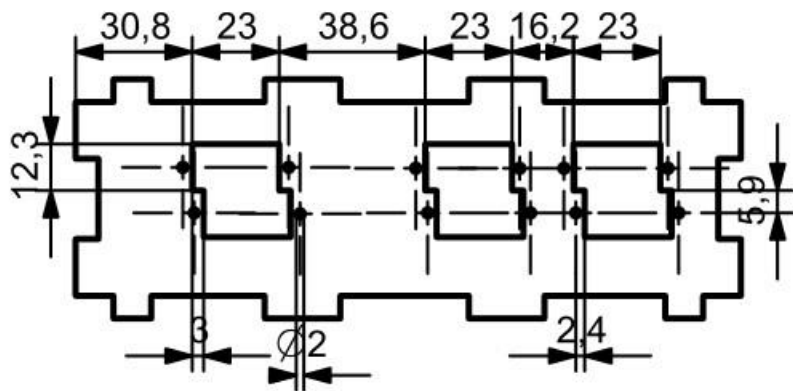
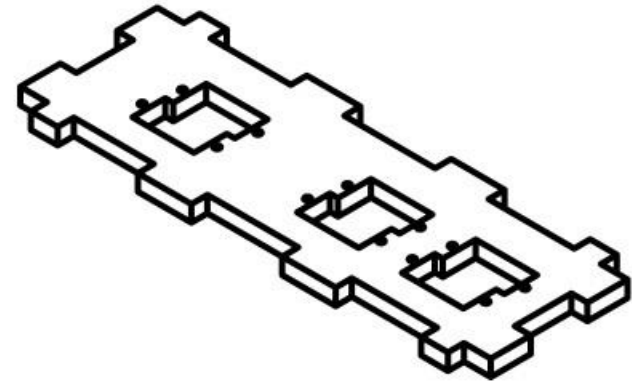
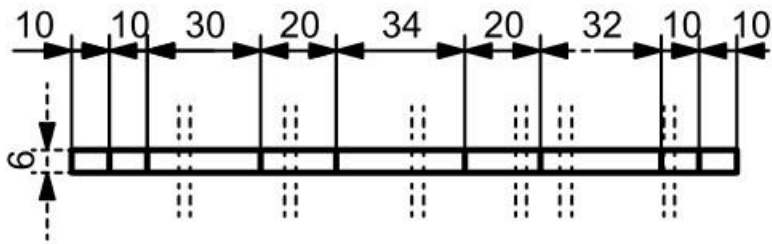
Escala:
1:2

Aprobó: González V.

Unidades: mm

Hoja: 1 de 1

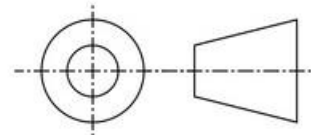
A4



Diseño y construcción de un banco de pruebas para el estudio de la intuición del movimiento de sujeción de la mano humana.

Dibujo No. : 1

Mano Mecatrónica antropomórfica.



Dibujó: Sandoval E.
Vielma M.

Conjunto:
Estructura Montaje

Tamaño:
A4

Revisó: González V.

Pieza: Montaje
motores 3

Escala:
1:1

Aprobó: González V.

Unidades: mm

Hoja: 1 de 1

1

2

3

4

5

A4

Apéndice F. Métodos para obtener como salida la posición deseada en grados usando el controlador PCA9685

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_PWMServoDriver.h>

Adafruit_PWMServoDriver servos = Adafruit_PWMServoDriver(0x41);
Adafruit_PWMServoDriver servos1 = Adafruit_PWMServoDriver(0x40);

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:

  servos.begin();
  servos.setPWMPFreq(40);
  servos1.begin();
  servos1.setPWMPFreq(40);
  Serial.begin(9600);
}

void ServoA(uint8_t n, int ang0) {
  int val0;
  val0=map(ang0, 0, 180, 90, 387);
  Serial.println(val0);
  servos.setPWM(n, 0, val0);
}

void ServoN(uint8_t m, int ang1) {
  int val1;
  val1=map(ang1, 0, 180, 105, 402);
  Serial.println(val1);
  servos1.setPWM(m, 0, val1);
}
```

Apéndice G. Métodos para controlar las falanges de cada dedo según el puerto y una posición de entrada

```
void Menique(int k, int l, int m, int n, int o){
    ServoA1(15,k);
    ServoN1(14,l);
    ServoA1(13,m);
    ServoA1(12,n);
    ServoA1(11,o);
}
```

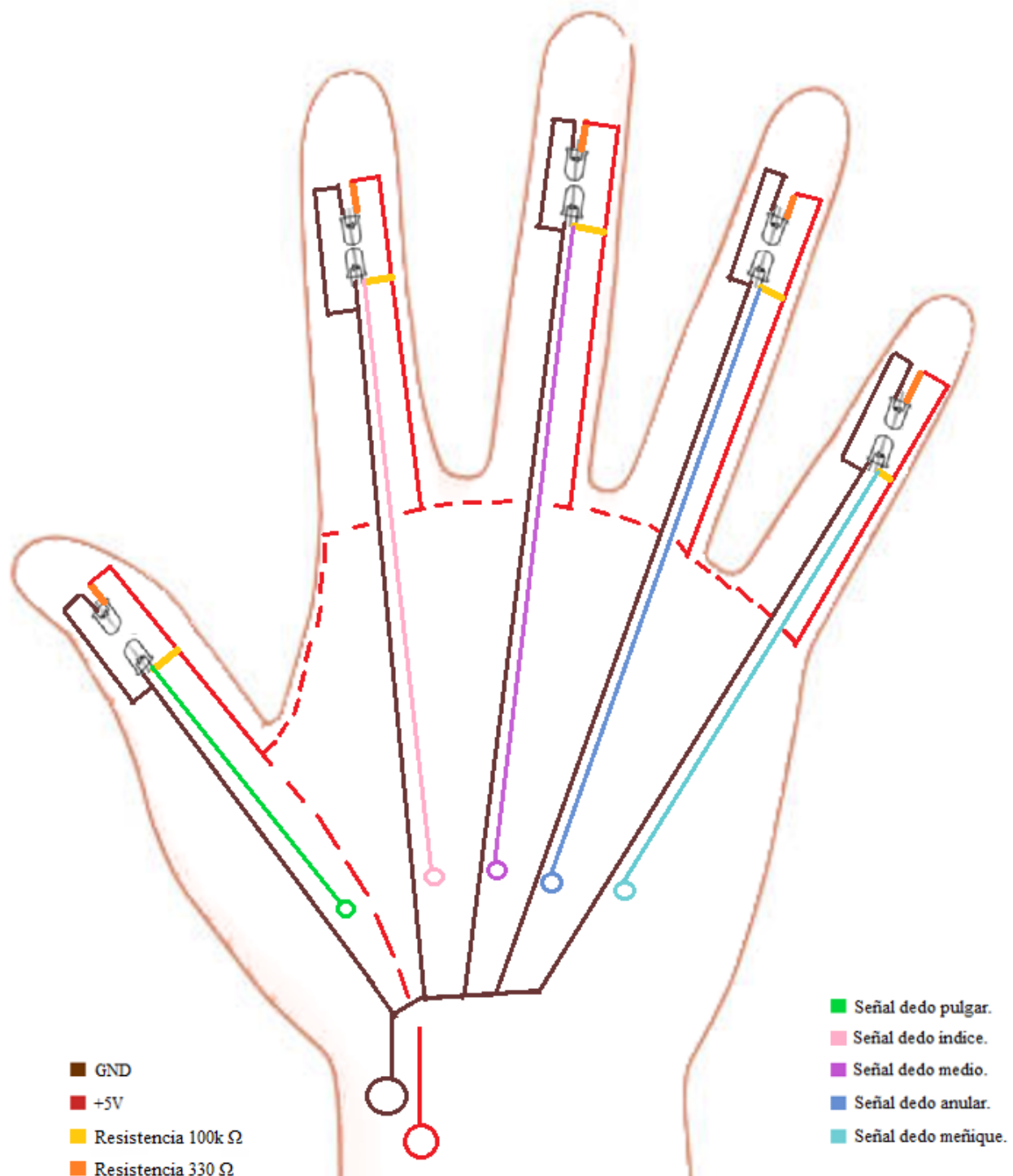
```
void Anular(int f, int g, int h, int i, int j){
    ServoA1(10,f);
    ServoN1(9,g);
    ServoA1(8,h);
    ServoA1(7,i);
    ServoA1(6,j);
}
```

```
void Medio(int a, int b, int c, int d, int e){
    ServoA(15,a);
    ServoN(14,b);
    ServoA(13,c);
    ServoA(12,d);
    ServoA(11,e);
}
```

```
void Indice(int p, int q, int r, int s, int t){
    ServoA1(5,p);
    ServoN1(4,q);
    ServoA1(3,r);
    ServoA1(2,s);
    ServoA1(1,t);
}
```

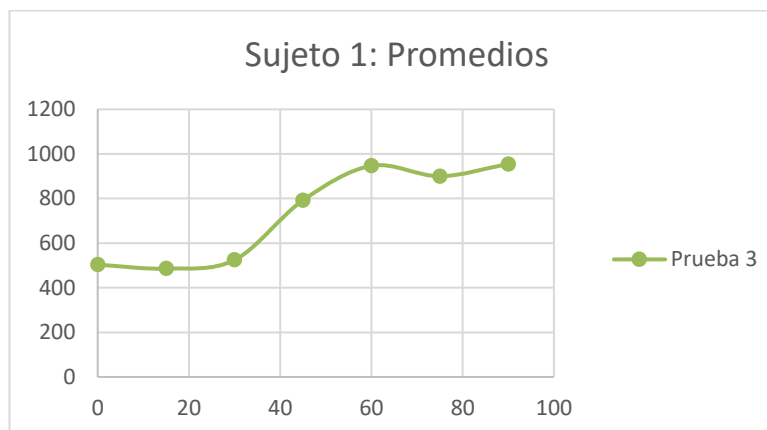
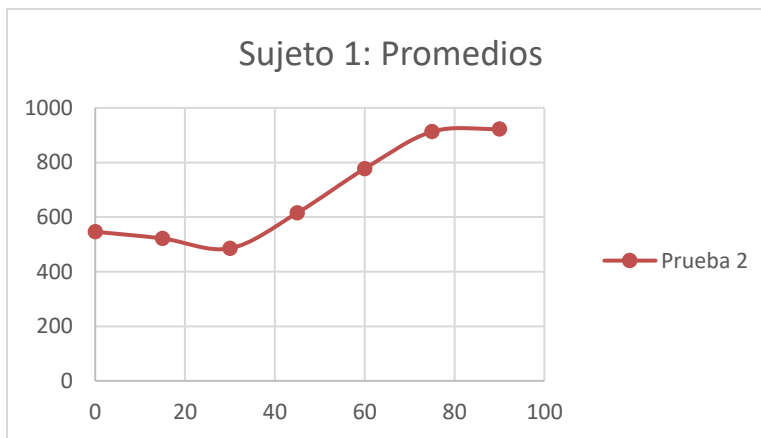
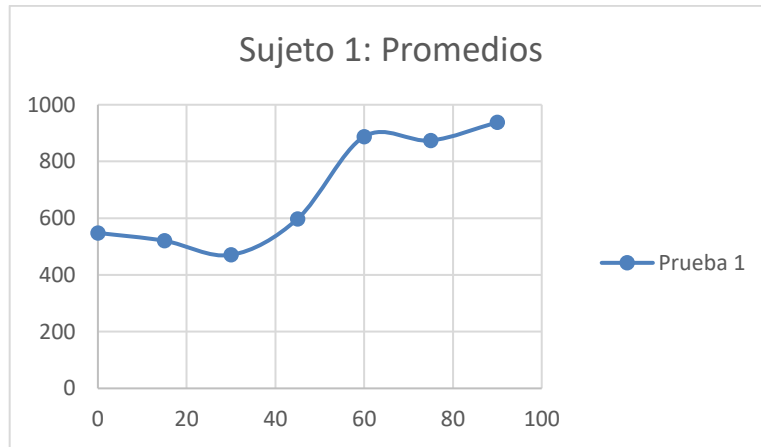
```
void Pulgar(int u, int v, int w, int x, int y){
    ServoA(10,u);
    ServoN(9,v);
    ServoA(8,w);
    ServoA(7,x);
    ServoA(6,y);
}
```

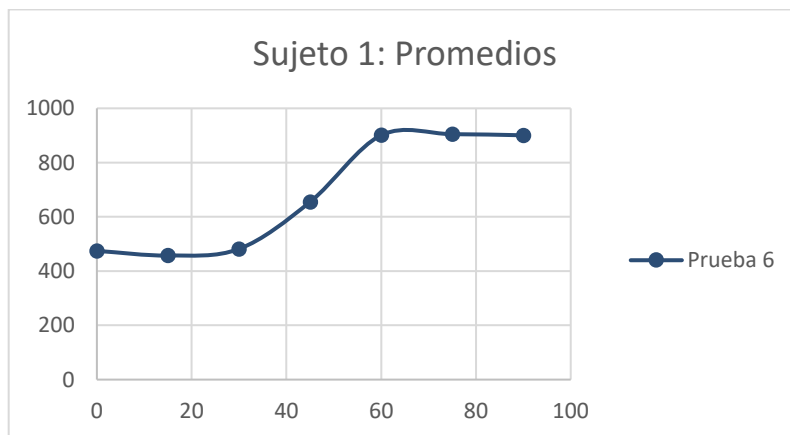
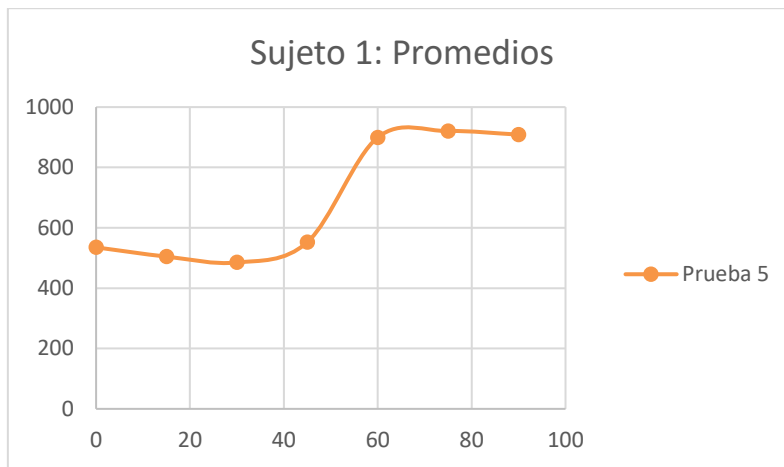
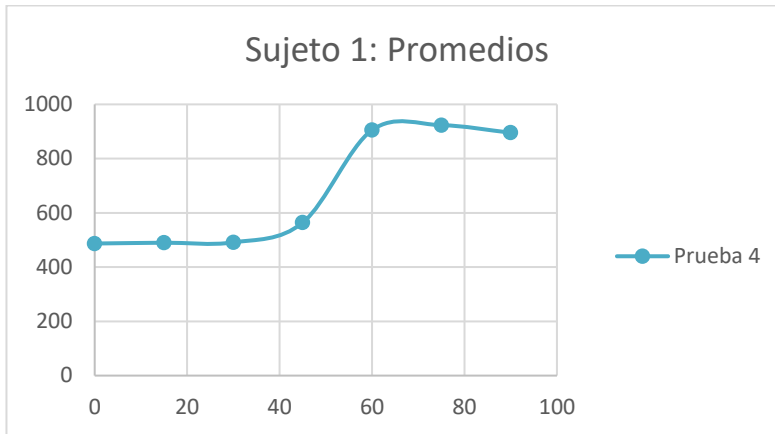
Apéndice H. Posición de los sensores en el guante de sensado



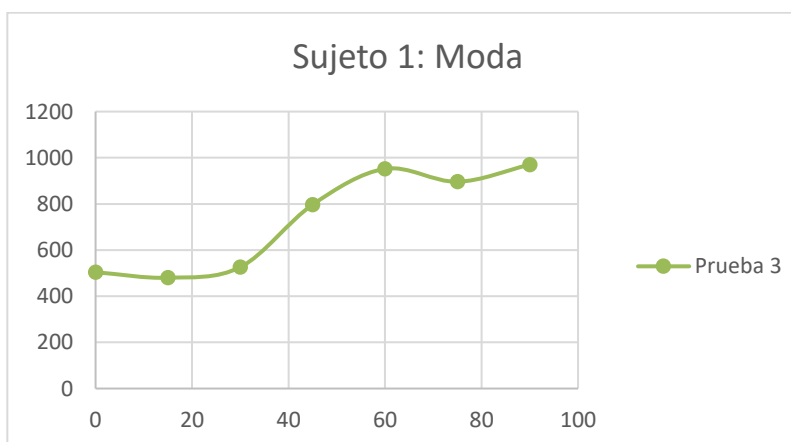
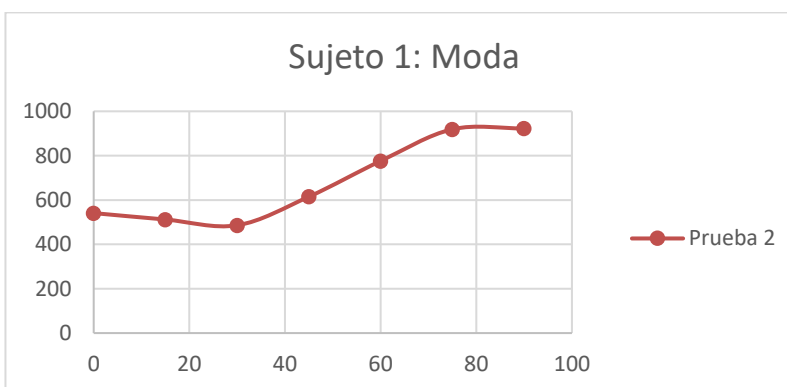
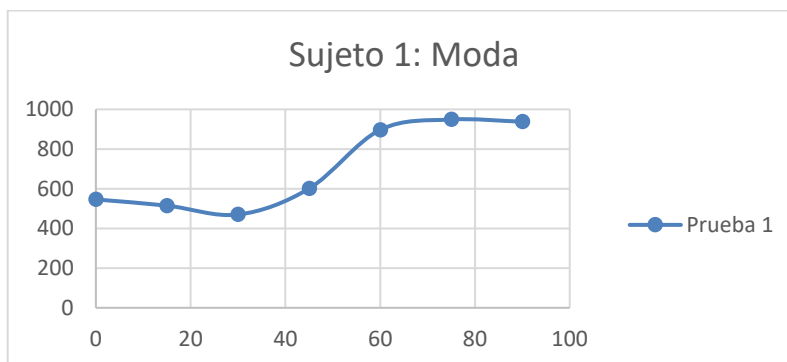
Apéndice I Gráficas para la caracterización del movimiento

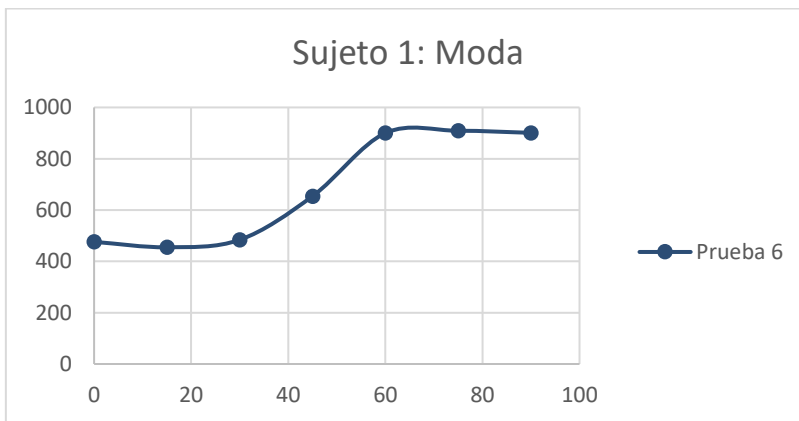
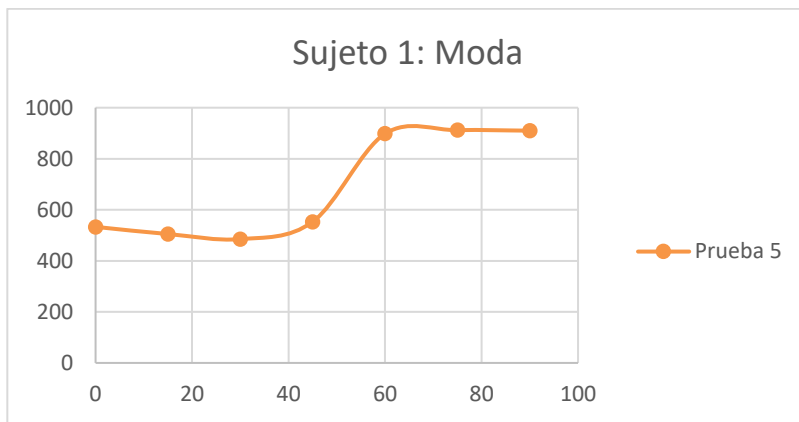
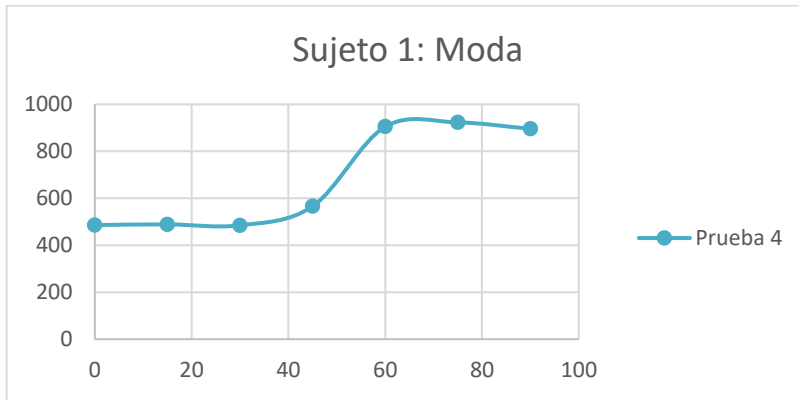
1. Sujeto 1: Promedios.



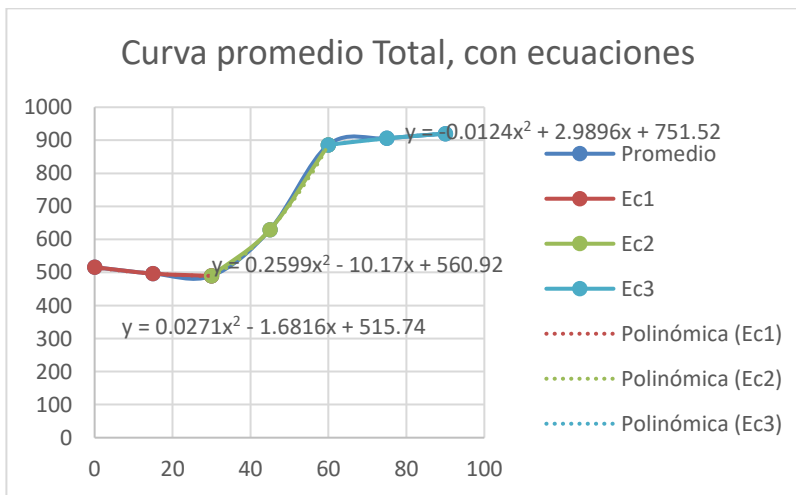
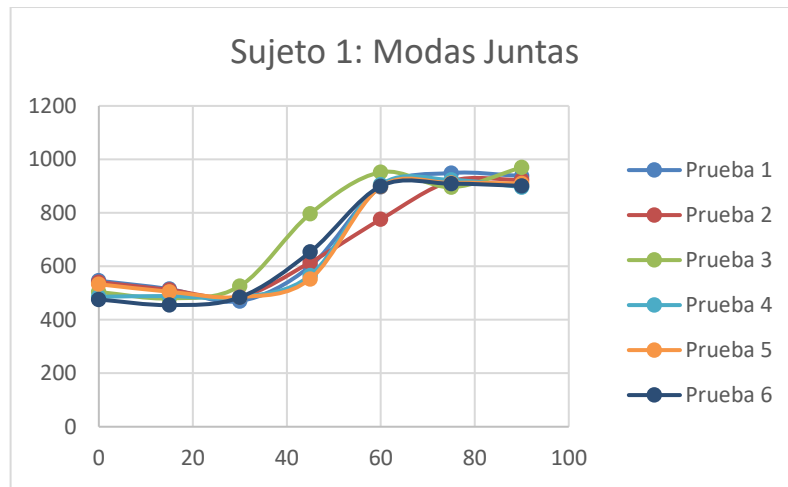
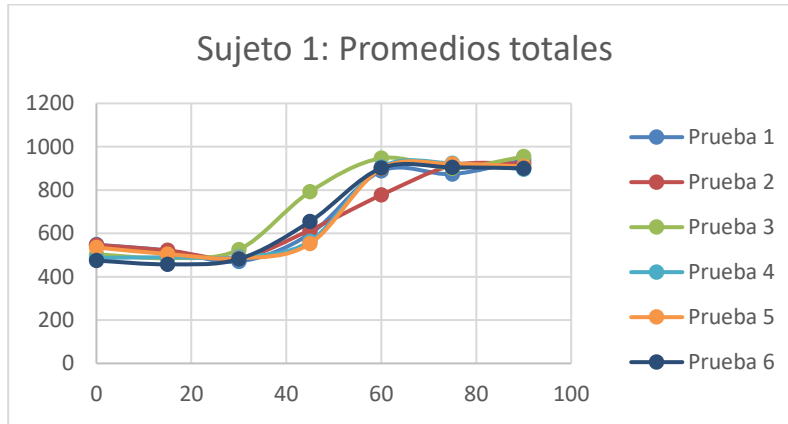


2. Sujeto 1: Moda.

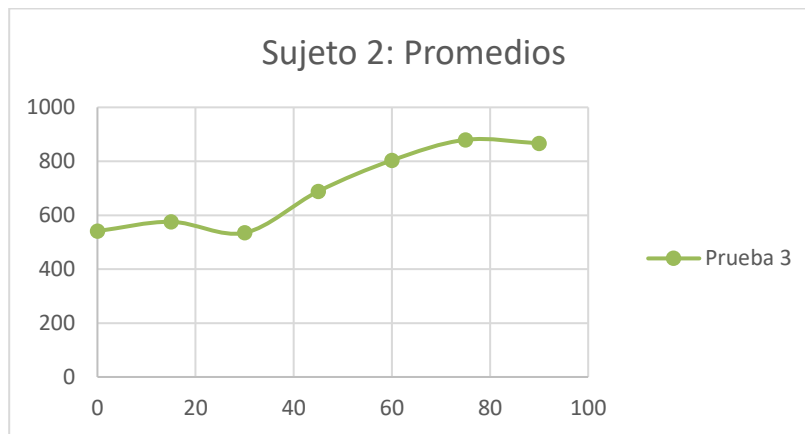
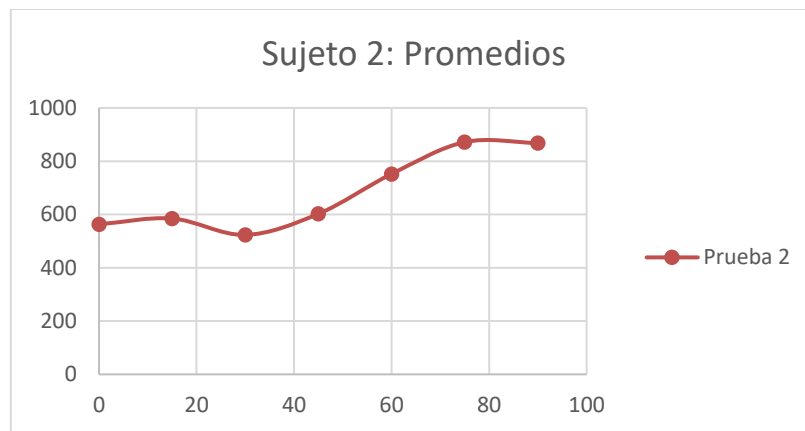
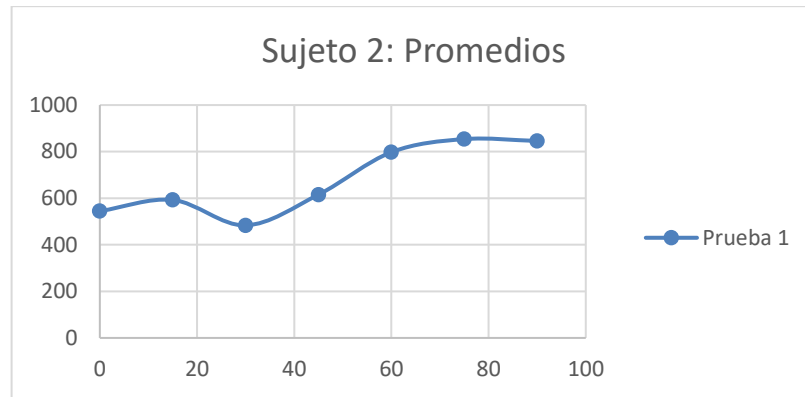


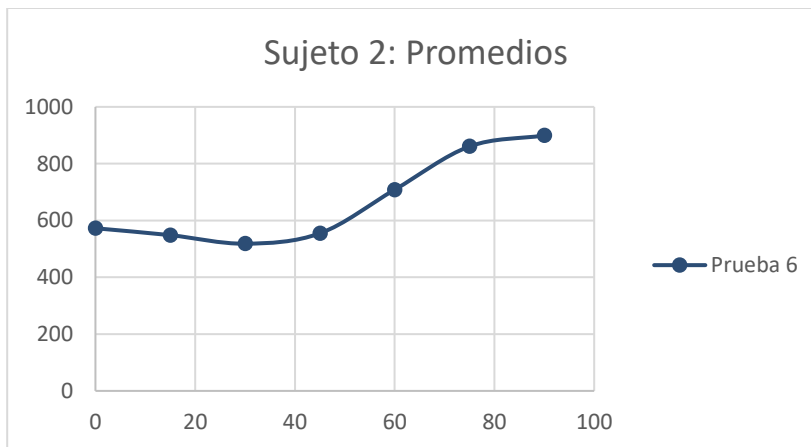
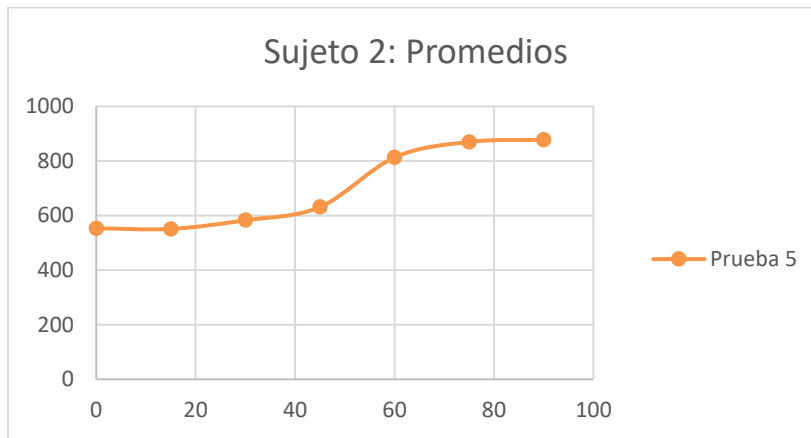
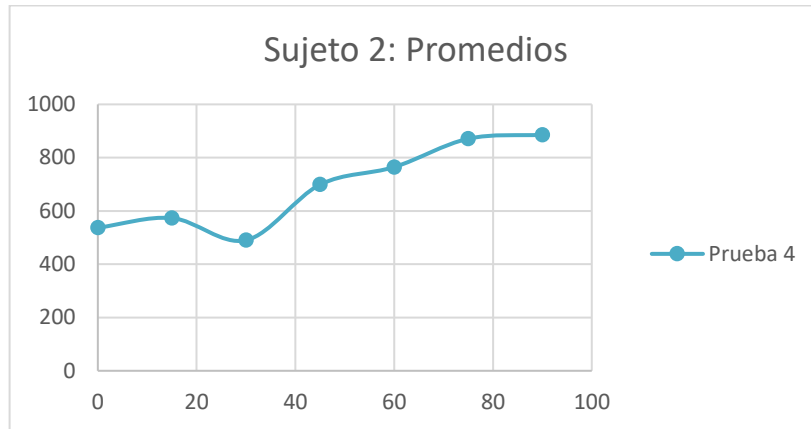


3. Sujeto 1: Totales.

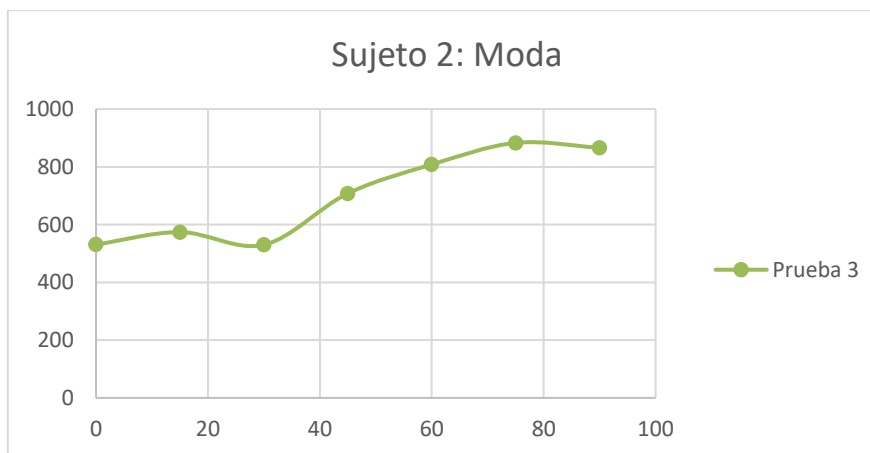
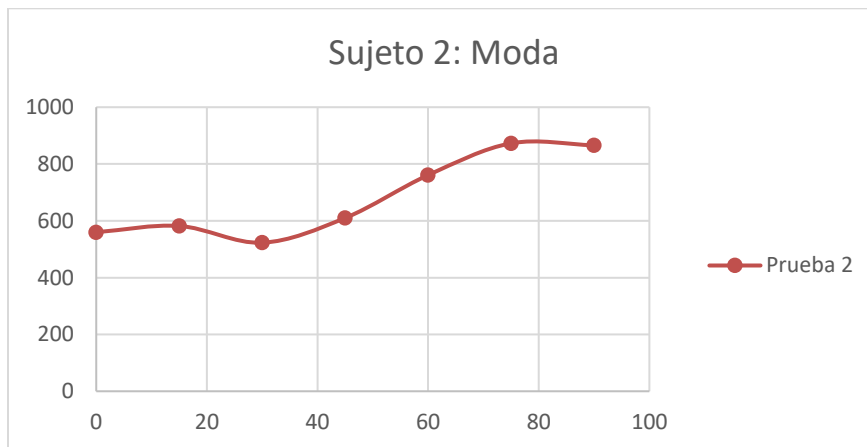
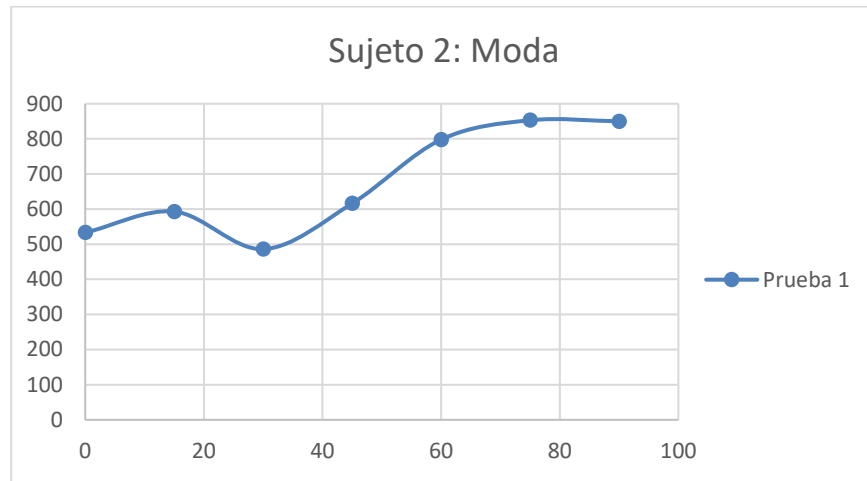


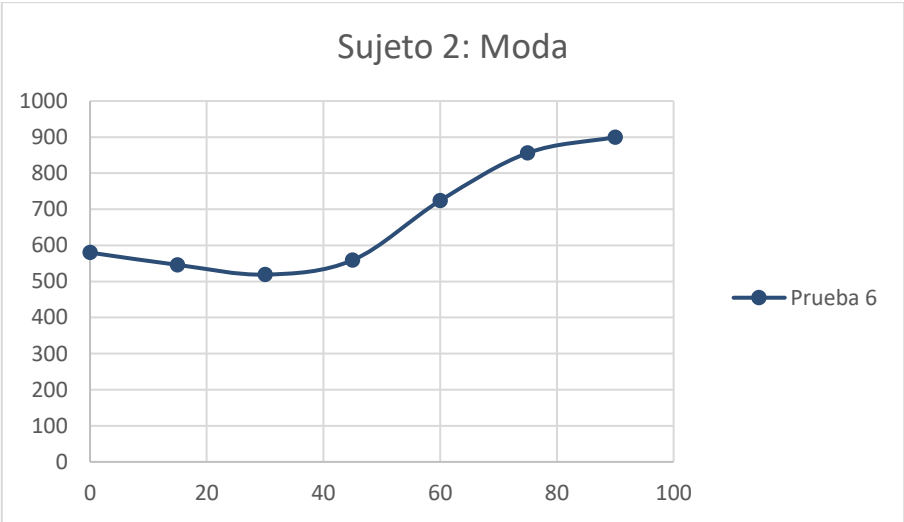
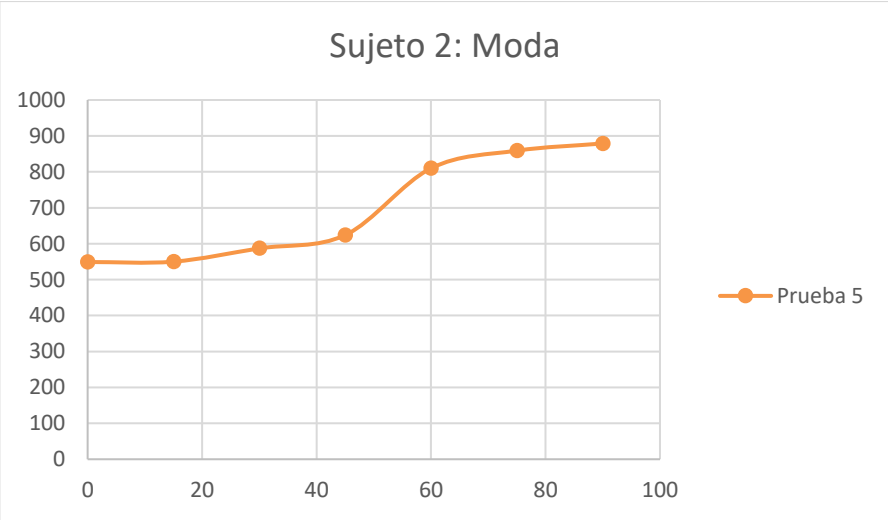
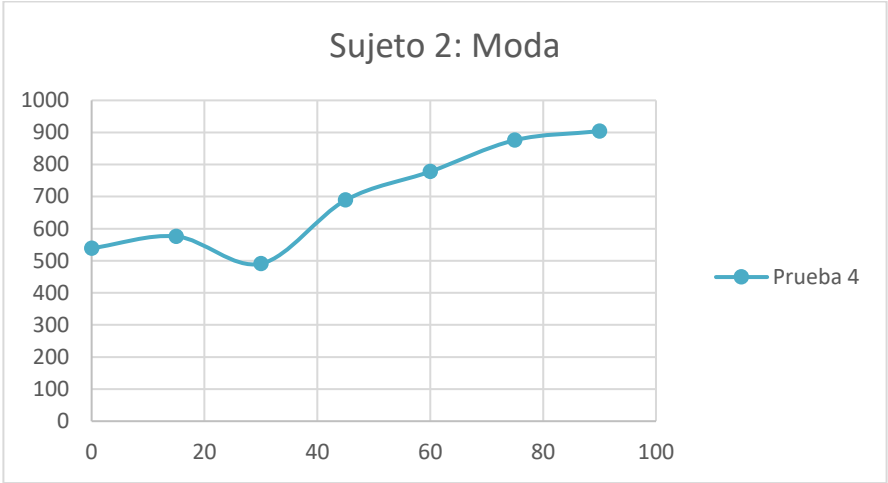
4. Sujeto 2: Promedios.



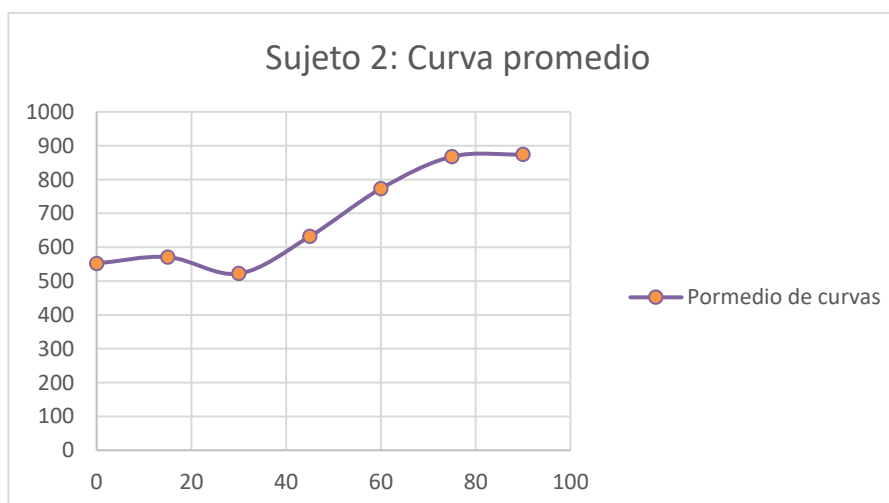
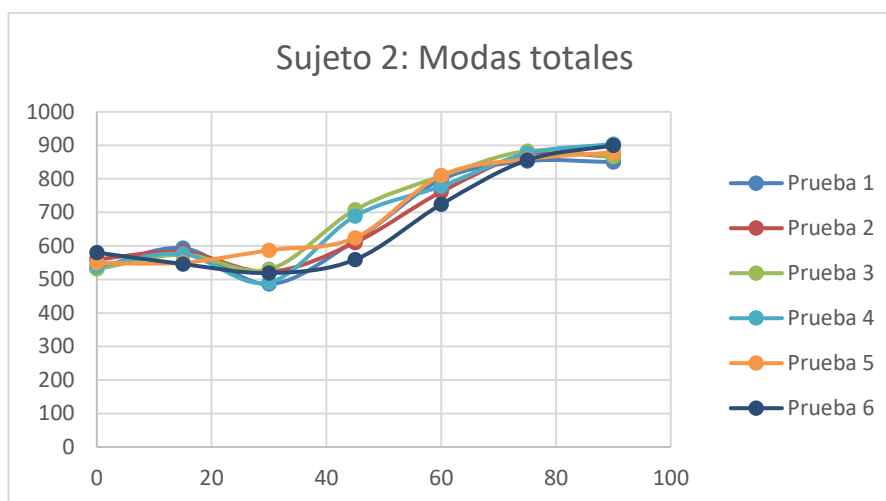
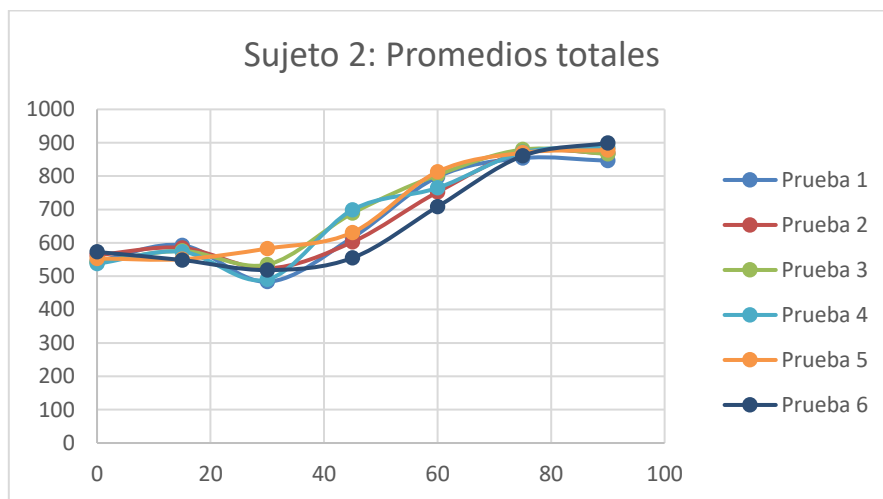


5. Sujeto 2: Moda.





6. Sujeto 2: Totales.



Apéndice J. Programa para las pruebas del guante de sensado: grados

```
int SensorP = A0;

int y;
int x;
int xa;
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  pinMode(SensorP, INPUT);
  Serial.begin(9600);
  x = 0;
  xa=-1;
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:

  y = analogRead(SensorP);
  if (y > 150 && y < 890) {
    if (xa <= x ) {
      Serial.println("Subiendo");
      if (x > 30) {
        xa = x;
        x = ((-15.938 + sqrt(287.5494 - 0.3224 * y)) / (-0.1612));
        Serial.print(x);
        Serial.print(",");
        Serial.println(y);
        delay(250);
      }
      if (x <= 30) {
        xa = x;
        x = (-3.522 - sqrt(344.94 - 0.6024 * y)) / (-0.3012);
        Serial.print(x);
        Serial.print(",");
        Serial.println(y);
        delay(250);
      }
    }
    if (xa > x){
      Serial.println("Bajando");
      if (x > 35) {
        xa = x;
        x = ((-15.938 + sqrt(287.5494 - 0.3224 * y)) / (-0.1612));
        Serial.print(x);
        Serial.print(",");
        Serial.println(y);
        delay(250);
      }
      if (35>= x) {
        xa = x;
        x = (-3.522 - sqrt(344.94 - 0.6024 * y)) / (-0.3012);
        Serial.print(x);
        Serial.print(",");
        Serial.println(y);
        delay(250);
      }
    }
  }
}
```

Apéndice K. Programa para las pruebas del guante: Reconocimiento

```
int SensorP = A0;

int y;
int x1;
int x2;
int x;
int xa;
int var;
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  pinMode(SensorP, INPUT);
  Serial.begin(9600);
  x = 30;
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:

  y = analogRead(SensorP);
  if (y > 200) {

    if (x < 30 or x > 60)
    {

      if (x>60)
      {
        xa=x;
        x=map(x, 61, 64, 61, 90);
        //Serial.print(" Mapenando ");
        //Serial.println(x);
        ec2(y);
      }
      else{
        x=xa;
        Serial.print("Fuera de rango ");
        //Serial.println(x);

      }
    }
    else
    {
      xa = x;
      ec2(y);
      // Serial.print("En rango ");
      //Serial.println(x);
    }

    if (xa<x){
      Serial.print(x);
      Serial.println(" Movimiento de Extensión");
    }
    else{
      Serial.print(x);
      Serial.println(" Estatico");
    }
    delay(100);
  }
}

void ec2(float b) {

  x = (10.17 + sqrt((1.096 * b) - 479.7035)) / 0.5198;

}
```

Índice de figuras

Figura 1. Mano humana ejecutando la acción de coger un objeto. Se observa la elongación de los dedos largos por acción de los músculos extensores.[10]	7
Figura 2. Zonas de mayor importancia en la mano humana: I) Zona del pulgar, II) Zona de las pinzas y III) Zona de los alcances.[10]	8
Figura 3. Ejemplos de prensas bidigitales. [10].....	9
Figura 4. Ejemplos de prensas pluridigitales. [10]	9
Figura 5. Ejemplos de prensas digitopalmares. [10]	10
Figura 6. Ejemplos de presión palmar. [10]	10
Figura 7. Ejemplos de prensas centradas. [10]	11
Figura 8. Shadow Dexterous Hand.....	13
Figura 9. Movimiento de sujeción.....	13
Figura 10. Ejemplos de otros guantes de sensado utilizado en diversos ámbitos.....	14
Figura 11. Mano representando los puntos de interés en la formación de los arcos flexibles.[10]	16
Figura 12. Vista de los arcos de oposición al pulgar.[10]	16
Figura 13. Arco de oposición pulgar meñique.[10].....	17
Figura 14. Máxima separación de los dedos [10].....	18
Figura 15. Posición en espiral las articulaciones homologas convergiendo en un punto focal.[10]	18
Figura 16. Esquema de los huesos de la mano humana [27].....	19
Figura 17. Dedo en posición equi-angular [26].....	20
Figura 18. Relación entre las longitudes de las falanges de un dedo humano [26].....	20
Figura 19. Falanges de un dedo humano en posición de extensión, así como centros y ejes de rotación en cada articulación [26].....	21
Figura 20. Articulación CMC, ejes y rotaciones [26].....	22
Figura 21. Articulación MCP, ejes y rotaciones [26].....	22
Figura 22. Articulación PIP y DIP, ejes y rotaciones [26].	23
Figura 23. I) Grados de libertad en las articulaciones del dedo meñique sin modificaciones, II) grados de libertad aplicando las simplificaciones propuestas. [26]	24
Figura 24. a) CyberHand, desarrollada en laScuola Superiore Sant’Anna. b) DLR Hand II, del Centro Alemán de Investigaciones Aeroespaciales. c) Gifu Hand III, e la Universidad de Gifu en Japón. d) MANUS Hand, fue desarrollada como mano robótica antropomórfica.	27
Figura 25. A la izquierda, Ambidextrous Robot Hand actuada por un musculo artificial neumatico [Articulo 6]. A la derecha, una muñeca hidráulica integrada con la Delft Cylinder Hand [34].....	27
Figura 26. La pieza color blanca corresponde al brazo del MicroServo SG90 y la pieza negra corresponde al brazo del Servomotor HD1501MG.	31
Figura 27. Vista isométrica, superior y lateral de las poleas diseñadas. La polea 1, 2 y 3 respectivamente. 31	
Figura 28. Distribución de los tendones en un dedo enumerados del 1 al 5: 1) Ligero movimiento de flexión y extensión del metacarpo. 2) Movimiento de extensión del dedo. 3/4) Movimiento de abducción y aducción. 5) Movimiento de flexión.	32
Figura 29. Mano robótica adaptando diversas configuraciones.	33

Figura 30. Movimientos que puede realizar el pulgar: abducción-extensión, aducción, oposición, reposición.	34
Figura 31. Tipo de prensiones que se realizan principalmente por la participación del pulgar.....	35
Figura 32. Dedo pulgar diseñado en NX, se puede observar los tres elementos, la falange distal y proximal sin que exista una media, y el metacarpo.	35
Figura 33. Acercamiento a la falange distal, donde se puede observar la adaptación que se hizo para que el resorte entre en entre las dos falanges y se pueda regresar el dedo a su posición inicial sin necesidad de insertar un acoplador.	36
Figura 34. La imagen ejemplifica el dedo índice realizando el movimiento de abducción – aducción, las líneas punteadas marcan los límites de amplitud del movimiento y la línea media del dedo. [10].....	37
Figura 35. A) Pulgar en extensión. B) Pulgar en flexión. C)Pulgar en Hiperflexión.	38
Figura 36. Imagen del metacarpo de un dedo en el que se observa dentro de un rectangulo rojo el orificio por donde pasará el eje que permite el giro del metcarpo en el movimiento de flexión y extension del dedo.	38
Figura 37. Del lado izquierdo se observa el soporte del dedo en vista isometrica, donde se ven los dos postes con el orificio para el eje a la altura correcta. Del lado derecho se observa la rueda del metcarpo ensamblada en el soporte haciendo conincidir el eje.....	39
Figura 38. Vista superior del soporte del dedo, donde se aprecian los seis orificios por los que pasan los tendones.....	39
Figura 39. Metacarpo del dedo pulgar con la modificación de un segundo agujero para evitar la rotación que se tiene en los metacarpos restantes (2° al 5°).	40
Figura 40. Del lado izquierdo se observa el soporte del dedo, con los dos postes sobre la base esferica y los dos orificios que sirven para fijar la rueda del metacarpo para impedir el giero. Del lado derecho se observa la rueda del metcarpo ensamblada en el soporte.	40
Figura 41. Disposición de los soportes del 1er al 5° metacarpo.	41
Figura 42. Imagen superior e inferior de la base de los dedos, donde se observan las guías de los tendones de cada dedo. El contenido en marcado en los rectángulos rojos corresponde a las guías externas para los tendones del dedo pulgar.	42
Figura 43. Vista isometrica del ensamble completo de la mano mecatrónica antropomórfica.	42
Figura 44. Vistra frontal y vista trasera del ensamble completo de la mano mecatrónica antropomorfica..	43
Figura 45. Vista lateral del ensamble completo de la mano mecatrónica antropomórfica.	43
Figura 46. Se muestra la disposición de los tendones en la base de los actuadores, se puede observar que en la disposición original los tendones no se tocan entre sí, impidiendo interferencias.	44
Figura 47. Replica de la disposición de los tendones original.....	45
Figura 48. Muestra de los dos pisos en los que se encuentran los actuadores.....	45
Figura 49. En esta foto se aprecia mejor la disposición de los 25 actuadores, repartidos de la misma forma que el sistema de actuación original, pero multiplicado varias veces.	46
Figura 50. Zona en la que se coloca la mano mecatrónica.	46
Figura 51. Las rendijas utilizadas para pasar los tendones, puestas sobre dos planchas de acrílico, de esta forma los tendones pueden llegar a todos los lados de la base sin interferirse entre si.	47
Figura 52. Ensamble de ambas estructuras, se puede observar que el tamaño de la base de los actuadores no es exagerado respecto al de la mano mecatrónica, lo que indica que se logró el objetivo de no tener una base muy grande respecto a la mano mecatrónica.....	47

Figura 53. Foto de la mano mecatrónica donde se puede observar la disposición de los tendones desde los eslabones hasta la base.	48
Figura 54. Puntos donde se puede obtener las lecturas para los movimientos de abducción-aducción.	51
Figura 55. Puntos donde se puede medir la flexión-extensión de los dedos.	51
Figura 56. Puntos donde se pueden obtener las lecturas del movimiento de flexión-extensión del metacarpo-falange proximal.	52
Figura 57. Fotografía del guante puesto en un sujeto de prueba, se pueden observar los sensores y el hilo conductivo formando parte del circuito.	53
Figura 58. Circuito para alambrar los sensores infrarrojos sobre el guante.	55
Figura 59. Imagen que ilustra el cambio de ambas variables, obtenida de la tesis [14].	56
Figura 60. Fotografía del guante de sensado, dentro del marco rojo se puede observar que la distancia entre los sensores es prácticamente de cero.	56
Figura 61. Fotografía del guante de sensado donde se ilustra el ángulo que se forma entre la falange proximal y media correspondiente al ángulo que puede medir por medio de los sensores.	57
Figura 62. Sensores recubiertos con termofit. El termofit se ajustó a los sensores, al no ser estorboso no se nota a la hora de doblar la mano y logra que el guante cuente con mayor exactitud.	57
Figura 63. Imagen que ilustra el cambio de ángulo que tiene el sensor con respecto a la luz debido al movimiento que tienen estos sensores entre sí. [14]	58
Figura 64. Fotografía dónde se usa uno de los moldes, se puede observar como el sujeto de pruebas usa el molde para fijar el ángulo de sus dedos. También se observan los otros moldes hechos, las variaciones de ángulo de estos es de 15°, y van desde los 0° hasta los 90°.	58
Figura 65. Posición en espiral las articulaciones homologas convergiendo en un punto focal. [10]	62
Figura 66. Vista lateral de la mano mecatrónica donde se observan los espirales que convergen en un punto.	62
Figura 67. Máxima separación de los dedos.[10].....	63
Figura 68. Vista superior de la mano mecatrónica antropomórfica en posición de la máxima separación de los dedos.	63
Figura 69. Sujeción bidigital de un huevo.	64
Figura 70. Vista frontal de la mano mecatrónica antropomórfica realizando la sujeción bidigital de un huevo de unicel.	64
Figura 71. Sujeción pluridigital de tres dedos de una esfera. [10]	65
Figura 72. Vista fronta de la mano mecatronica antropomorfica realizando la sujeción pluridigital de tres dedos de un objeto esferico.	65
Figura 73. Sujecion palmar de una esfera. [10].....	66
Figura 74. Vista frontal de la mano mecatronica antropomorfica realizando la sujecion palmar de una esfera de unicel.	66
Figura 75. Sujeción palmar de objetos cilíndricos.[10].....	67
Figura 76. Vista frontal de la mano mecatrónica antropomórfica haciendo la sujeción palmar de un cilindro.	67
Figura 77. Vista superior de la posición armoniosa donde se forman los espirales que convergen en un punto focal.	68
Figura 78. Vista superior de la sujeción palmar de una esfera.	69
Figura 79. Sujeción palmar de un objeto con superficie irregular.	70

Figura 80. Sujeto de pruebas sosteniendo una pelota de grandes proporciones con respecto a su mano con el guante puesto.....	71
Figura 81. Mano sosteniendo una pelota vista lateralmente. Se comprueba que el ángulo que más cambia es el de la falange media-proximal, el cual está señalado por el ángulo marcado con color rosa, este ángulo es el más importante para el movimiento de flexión, mientras que, el ángulo marcado con azul, no se puede medir por el guante, pero por su magnitud puede ser despreciado.....	71
Figura 82. Sujeto de prueba sosteniendo un huevo. Los cambios de grado son nuevamente medibles por el guante de sensado y los ángulos con mayor cambio en este movimiento de sujeción se pueden apreciar en la imagen.	72
Figura 83. Sujeto de pruebas sosteniendo un cilindro. Se puede observar también el ángulo más significativo para este movimiento, es importante mencionar que los sensores también pueden medir este cambio significativo al realizar este movimiento de sujeción.....	72
Figura 84. Variación de tamaño del 5% entre las manos de los sujetos de pruebas.....	73
Figura 85. Mano de sujeto de prueba con el guante puesto usando los moldes para calibrar.	74
Figura 86. La diferencia de los ángulos fue obtenida mediante su posición inmediata anterior, de esta forma si el ángulo era más grande se puede ver que los dedos se flexionan, y que si es más pequeña, se extienden.	75

Índice de Tablas

Tabla 1. Rangos de movimiento por articulación.[26]	23
Tabla 2. Medidas longitudinales de los eslabones.....	25
Tabla 3. Estudio antropométrico de la mano por Garrett [29]	25
Tabla 4. Medidas de las falanges de cada uno de los dedos de la mano mecatrónica antropomórfica después de escalar el dedo meñique siguiendo la propuesta de proporción de Garrett.....	26
Tabla 5. Matriz de selección para tipo de actuación.....	29
Tabla 6. Matriz de selección para tipo de transmisión.	30
Tabla 7. Tabla de comparación de las ventajas y desventajas de los materiales para realizar el circuito sobre el guante.	52
Tabla 8. Tabla de comparación entre los sensores seleccionados para medir los movimientos de flexión-extensión de los dedos.....	55
Tabla 9. Molestias de los usuarios.....	78
Tabla 10. Sujeto 1: Prueba de ángulos.	79
Tabla 11. Sujeto 2: Prueba de ángulos.	79
Tabla 12. Sujeto 1: Reconocimiento de los movimientos.	80
Tabla 13. Sujeto 2: Reconocimiento de los movimientos.	80

Índice de Gráficas

Gráfica 1. Gráfica de tendencia de todas las pruebas hechas en los dedos.	59
Gráfica 2. Gráfica promedio de la tendencia de las pruebas.	59
Gráfica 3. Grafica de tendencias. Para analizar la curva se dividió la curva en 3 segmentos.	60