

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Optimización del funcionamiento de la mano robótica
biomimética**

Trabajo de graduación presentado por Mariandrée Rivera Fernández
para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2023

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Optimización del funcionamiento de la mano robótica
biomimética**

Trabajo de graduación presentado por Mariandrée Rivera Fernández
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2023


Vo.Bo.:

(f) 
Ing. Kurt Kellner

Tribunal Examinador:

(f) 
Ing. Kurt Kellner

(f) 
M. Sc. Carlos Esquit

(f) 
MAEB. Pablo Mazariegos

Fecha de aprobación: Guatemala, 7 de enero de 2023.

Este trabajo de graduación nace a partir de proponerme desarrollar la segunda etapa de la prótesis biomimética que se inició en el 2021 con el diseño mecánico, en la Universidad del Valle de Guatemala. Con esta prótesis se buscó darle un giro nuevo a como se desarrollan las prótesis de extremidades superiores, tomando como idea la manera que lo realizan en países de primer mundo, permitiendo demostrar que en Guatemala somos capaces de también poder hacerlo.

Agradezco a Dios y a la Virgen María. También a mis padres, abuelos, padrinos y a mi Russo, que me apoyaron en todas las etapas y aspectos de mi vida. Agradezco a la Universidad del Valle de Guatemala, a los docentes que me compartieron sus conocimientos y experiencias, ayudándome a salir al mundo preparada a enfrentar los siguientes retos que vendrán. Agradezco a mi asesor de Trabajo de Graduación, Kurt Kellner, por el apoyo y conocimientos compartidos permitiéndome hacer un mejor trabajo.

Por último quiero agradecer a mis colegas mecatrónicos que me apoyaron en estos 5 años, de los cuales aprendí muchísimo y que espero encontrarme en un futuro. Igualmente a mis amigos con quienes compartí momentos alegres y algunos no tanto, pero que sin duda formarán parte de mis recuerdos en la Universidad.

Prefacio	v
Lista de figuras	xii
Lista de cuadros	xiii
Resumen	xv
Abstract	xvii
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
2.1. Diseño de mano y muñeca animatrónica antropomórfica fase 3, Omar Gálvez	3
2.2. Diseño y fabricación de mano robótica biomimética para prótesis, Josué Asturias	4
2.3. Diseño de prótesis "Cyborg Beast", Universidad de Creighton, EEUU	5
2.4. Diseño y fabricación de un banco de pruebas de fatiga de piezas impresas en 3D, Stalyn Malevé	6
3. Justificación	9
4. Objetivos	11
4.1. Objetivo general	11
4.2. Objetivos específicos	11
5. Alcance	13
6. Marco teórico	15
6.1. Biomimética	15
6.2. Anatomía de la mano humana	15
6.3. Morfología de la mano	16
6.3.1. Metacarpo y carpo:	16
6.3.2. Falanges:	17
6.3.3. Articulaciones y ligamentos:	17

6.3.4.	Sistemas de poleas:	20
6.3.5.	Tendones flexores:	21
6.3.6.	Tendones extensor:	22
6.4.	Movimiento de la mano	25
6.5.	Fabricación digital	26
6.6.	Pruebas mecánicas	28
6.6.1.	Ensayo de fatiga:	28
6.6.2.	Ensayo de esfuerzos:	28
6.6.3.	Ensayo de repetibilidad:	29
7.	Implementación de movimientos mecánicos	31
7.1.	Realización del ruteo de mano completa	31
7.2.	Creación de sistema <i>Quick-Link</i>	32
7.2.1.	Diseño de base motores	32
7.2.2.	Diseño para acople rápido	34
7.2.3.	Distribución de poleas	36
8.	Diseño de controlador sencillo	41
8.1.	Parámetros para los motores	41
8.2.	Programación de movimientos	42
8.2.1.	Programación en Arduino	43
8.2.2.	Programación en Python	45
9.	Pruebas mecánicas realizadas	47
9.1.	Realización de pruebas mecánicas	48
9.2.	Resultados obtenidos	51
9.2.1.	Análisis dedo pulgar (I)	51
9.2.2.	Análisis dedo índice (II)	61
9.2.3.	Análisis dedo medio (III)	67
9.2.4.	Análisis dedo anular (IV)	73
9.2.5.	Análisis dedo meñique (V)	79
9.2.6.	Tabla de porcetaje de elongacion	85
9.2.7.	Discusión de resultados obtenidos de las pruebas:	85
10.	Conclusiones	87
11.	Recomendaciones	89
12.	Bibliografía	91
13.	Anexos	93
13.1.	Diseño mecánico	93
13.2.	Código implementación	93
13.3.	Documentación	93
13.4.	Evidencia pruebas mecánicas	94
14.	Glosario	95

Lista de figuras

1.	Mano animatrónica realizada por Omar Gálvez, año 2020.	4
2.	Mano biomimética realizada por Josué Asturias, año 2021.	5
3.	Diseño de la mano realizada por la universidad de Creighton,2015).	6
4.	Partes de la palma de la mano	16
5.	Posición de las falanges[9]	17
6.	Articulaciones y ligamentos de la mano[9]	17
7.	Articulaciones MCP[9]	18
8.	Articulaciones tipo PIP[9]	19
9.	Ligamento tipo PIP[9]	19
10.	Polea tipo aponeurosis palmar [9]	20
11.	Poleas de los dedos [9]	21
12.	Poleas del pulgar [9]	21
13.	Principales flextores de la mano[9]	22
14.	Retináculo extensor y los tendones que pasar por él.[9]	23
15.	Funcionamiento de los tendones extensores.[12]	24
16.	Bandas sagitales y el injerto central en el tendón.[12]	24
17.	Músculos y bandas que se accionan al flexionar y extender el dedo.[12]	25
18.	Movimientos de la mano dedos[13]	25
19.	Ejemplo de programa CAD	26
20.	Ejemplo de programa CAE	27
21.	Ejemplo de programa CAM	27
22.	Ejemplo de gráfica de ensayo de fatiga,[15]	28
23.	Ejemplo de gráfica de ensayo de esfuerzos,[16]	29
24.	Ejemplo de gráfica de ensayo de repetibilidad,[17]	29
25.	Mano con todos los tendones ruteados	31
26.	Sujetador con el motor	32
27.	Primer diseño para base del motor para los tendones	33
28.	Segunda y tercera iteraciones para la base de los motores	33
29.	Iteración final del diseño de las bases de los motores	34
30.	CAD de la polea para los motores	34
31.	CAD de la polea para los hilos	35

32.	Iteraciones de impresión en 3D	35
33.	Ensamble de motor con las poleas para transmisión	36
34.	Diseño de poleas para transmisión	36
35.	Sistema transmisión de fuerza ensamblado	37
36.	Diseño CAD de “grapas”	37
37.	Colocación de las “grapas”	37
38.	Sistema de sujeción polea de hilo	38
39.	Distribución de las 25 poleas en base de mano.	38
40.	Diseño mecánico completo con <i>Quick-Link</i>	39
41.	Implementación física de los motores No. 1 y 2.	40
42.	Implementación física de los motores No. 3, 4 y 5.	40
43.	Interfaz gráfica del programador DPC-11	41
44.	Microcontrolador Arduino Uno	42
45.	Ejemplo de impresión realizada en TPE	47
46.	Posición de polea con hilo correcta	48
47.	Forma de tomar medidas para extensor	49
48.	Forma de tomar medidas para ligamento MCP	49
49.	Forma de tomar medidas para ligamento DIP	49
50.	Forma de tomar medidas para ligamento PIP	49
51.	Forma de tomar medidas para ligamento radial	50
52.	Forma de tomar medidas para ligamento de dedo 1 a dedo 2	50
53.	Forma de tomar medidas para ligamentos AOL y DRL	50
54.	Realización de prueba mecánica dedo índice (II)	50
55.	Ligamento extensor dedo I	51
56.	Gráfica de dispersión de largo y ancho, extensor dedo I	51
57.	Gráfica de barras largo, extensor dedo I	52
58.	Gráfica de barras ancho, extensor dedo I	52
59.	Ligamento MCP dedo I	52
60.	Gráfica de dispersión de largo y ancho, MCP dedo I	53
61.	Gráfica de barras largo, MCP dedo I	53
62.	Gráfica de barras ancho, MCP dedo I	53
63.	Ligamento PIP dedo I	54
64.	Gráfica de dispersión de largo y ancho, PIP dedo I	54
65.	Gráfica de barras largo, PIP dedo I	55
66.	Gráfica de barras ancho, PIP dedo I	55
67.	Ligamento radial dedo I	55
68.	Gráfica de dispersión de largo y ancho, ligamento radial	56
69.	Gráfica de barras largo, ligamento radial	56
70.	Gráfica de barras ancho, ligamento radial	57
71.	ligamento dedo I a dedo II	57
72.	Gráfica de dispersión de largo y ancho, ligamento 1 a 2	58
73.	Gráfica de barras largo, ligamento 1 a 2	58
74.	Gráfica de barras ancho, ligamento 1 a 2	58
75.	Ligamento AOL dedo I	59
76.	Gráfica de dispersión de largo y ancho, AOL I	59
77.	Gráfica de barras largo, AOL I	59

78.	Gráfica de barras ancho, AOL I	60
79.	Ligamento DRL dedo I	60
80.	Gráfica de dispersión largo y ancho, DRL dedo I	60
81.	Gráfica de barras largo, DRL dedo I	61
82.	Gráfica de barras ancho, DRL dedo I	61
83.	Ligamento extensor dedo II	61
84.	Gráfica de dispersión de largo y ancho, extensor dedo II	62
85.	Gráfica de barras largo, extensor dedo II	62
86.	Gráfica de barras ancho, extensor dedo II	62
87.	Ligamento MCP dedo II	63
88.	Gráfica de dispersión de largo y ancho, MCP dedo II	63
89.	Gráfica de barras largo, MCP dedo II	63
90.	Gráfica de barras ancho, MCP dedo II	64
91.	Ligamento PIP dedo II	64
92.	Gráfica de dispersión de largo y ancho, PIP dedo II	65
93.	Gráfica de barras largo, PIP dedo II	65
94.	Gráfica de barras ancho, PIP dedo II	65
95.	Ligamento DIP dedo II	66
96.	Gráfica de dispersión de largo y ancho, DIP dedo II	66
97.	Gráfica de barras largo, DIP dedo II	67
98.	Gráfica de barras ancho, DIP dedo II	67
99.	Ligamento extensor dedo III	67
100.	Gráfica de dispersión de largo y ancho, extensor dedo III	68
101.	Gráfica de barras largo, extensor dedo III	68
102.	Gráfica de barras ancho, extensor dedo III	68
103.	Ligamento MCP dedo III	69
104.	Gráfica de dispersión de largo y ancho, MCP dedo III	69
105.	Gráfica de barras largo, MCP dedo III	69
106.	Gráfica de barras ancho, MCP dedo III	70
107.	Ligamento PIP dedo III	70
108.	Gráfica de dispersión de largo y ancho, PIP dedo III	71
109.	Gráfica de barras largo, PIP dedo III	71
110.	Gráfica de barras ancho, PIP dedo III	71
111.	Ligamento DIP dedo III	72
112.	Gráfica de dispersión de largo y ancho, DIP dedo III	72
113.	Gráfica de barras largo, DIP dedo III	73
114.	Gráfica de barras ancho, DIP dedo III	73
115.	Ligamento extensor dedo IV	73
116.	Gráfica de dispersión de largo y ancho, extensor dedo IV	74
117.	Gráfica de barras largo, extensor dedo IV	74
118.	Gráfica de barras ancho, extensor dedo IV	74
119.	Ligamento MCP dedo IV	75
120.	Gráfica de dispersión de largo y ancho, MCP dedo IV	75
121.	Gráfica de barras largo, MCP dedo IV	76
122.	Gráfica de barras ancho, MCP dedo IV	76
123.	Ligamento PIP dedo IV	76
124.	Gráfica de dispersión de largo y ancho, PIP dedo IV	77
125.	Gráfica de barras largo, PIP dedo IV	77

126. Gráfica de barras ancho, PIP dedo IV	77
127. Ligamento DIP dedo IV	77
128. Gráfica de dispersión de largo y ancho, DIP dedo IV	78
129. Gráfica de barras largo, DIP dedo IV	78
130. Gráfica de barras ancho, DIP dedo IV	78
131. Ligamento extensor dedo V	79
132. Gráfica de dispersión de largo y ancho, extensor dedo V	79
133. Gráfica de barras largo, extensor dedo V	80
134. Gráfica de barras ancho, extensor dedo V	80
135. Ligamento MCP dedo V	80
136. Gráfica de dispersión de largo y ancho, MCP dedo V	81
137. Gráfica de barras largo, MCP dedo V	81
138. Gráfica de barras ancho, MCP dedo V	81
139. Ligamento PIP dedo V	82
140. Gráfica de dispersión de largo y ancho, PIP dedo V	82
141. Gráfica de barras largo, PIP dedo V	83
142. Gráfica de barras ancho, PIP dedo V	83
143. Ligamento DIP dedo V	83
144. Gráfica de dispersión de largo y ancho, DIP dedo V	84
145. Gráfica de barras largo, DIP dedo V	84
146. Gráfica de barras ancho, DIP dedo V	84
147. Porcentajes de elongación	85
148. Evidencia de elongación en DPC para el dedo II	94
149. Evidencia de elongación en MCP para el dedo III	94

Lista de cuadros

1.	Numeración de dedos en mano.	16
2.	Colores asignados para cada uno de los dedos.	39
3.	Parámetros limitantes de los motores.	42
4.	Parámetros tamaño de extensor 1	51
5.	Parámetros tamaño de MCP 1	52
6.	Parámetros tamaño de PIP 1	54
7.	Parámetros tamaño de ligamento radial	56
8.	Parámetros tamaño de ligamento 1 a 2	57
9.	Parámetros tamaño de AOL	59
10.	Parámetros tamaño de DRL	60
11.	Parámetros tamaño de extensor 2	62
12.	Parámetros tamaño de MCP 2	63
13.	Parámetros tamaño de PIP 2	64
14.	Parámetros tamaño de DIP 2	66
15.	Parámetros tamaño de extensor 3	68
16.	Parámetros tamaño de MCP 3	69
17.	Parámetros tamaño de PIP 3	70
18.	Parámetros tamaño de DIP 3	72
19.	Parámetros tamaño de extensor 4	74
20.	Parámetros tamaño de MPC 4	75
21.	Parámetros tamaño de PIP 4	76
22.	Parámetros tamaño de DIP 4	78
23.	Parámetros tamaño de extensor 5	79
24.	Parámetros tamaño de MCP 5	80
25.	Parámetros tamaño de PIP 5	82
26.	Parámetros tamaño de DIP 5	83

El objetivo de este proyecto fue optimizar el funcionamiento de la mano biomimética y realizar pruebas mecánicas para la misma. Para poder realizarlo, primero se debió conocer los antecedentes relacionados a este tipo de proyecto. Uno de ellos es una mano animatrónica que lleva años desarrollándose en la universidad, mientras que la otra es el diseño mecánico de la mano que se optimizó en este trabajo. Esta última, tiene un diseño biomimético, el cual busca imitar mecanismos de la naturaleza para ser aplicado en nuevas tecnología, como lo es está prótesis.

El alcance del proyecto en la fase anterior fue realizar el diseño mecánico, modelando cada uno de los huesos que forman nuestra mano, además de diseñar las articulaciones y algunos tendones principales, ya que este diseño no utiliza bisagras, como los otros. Para el movimiento se incluyó en el diseño de los dedos un canal donde pasa un hilo, buscando simular los tendones encargados de los movimientos de los mismos.

Ahora en la fase actual se buscó optimizar el funcionamiento de la mano, haciendo que cada uno de los dedos tenga movilidad con un juego de 5 motores, es importante tomar en cuenta que como cada dedo tiene distintas longitudes por lo que fue necesario hacer ajustes en la programación y los acoples. Al tener la funcionalidad completa, se buscó mejorar la manera de conectar los motores a cada dedo por medio de acoples de conexión rápida, de manera que fuera posible visualizar el movimiento de cada dedo realizando un cambio sencillo, entre los mecanismos. El diseño de estas piezas se realizó utilizando el diseño asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés), e impresión 3D, buscando poder realizar prototipos funcionales y que permitieran obtener la información para realizar mejoras en las iteraciones del diseño. Además se buscó que la mano tuviera los movimientos lo más naturales posibles.

The objective of this project was to optimize the functioning of the biomimetic hand and to perform mechanical tests for it. In order to be able to do this, it was first necessary to know what background there is related to this project. One of them is an animatronic hand that has been developed for years at the university, while the other is the mechanical design of the hand that was optimized in this work. The hand has a biomimetic design, which seeks to mimic mechanisms of nature to be applied in new technology, such as this prosthesis.

The goal of the project in the previous phase was to perform the mechanical design, modeling each of the bones that form our hand, in addition to designing the joints and some main tendons, since this design does not use hinges, like the others. For the movement we included in the design of the fingers a channel where a thread passes, seeking to simulate the tendons responsible for the movements of the fingers.

Now in the current phase, we were looking to optimize the functioning of the hand, making each of the fingers have mobility with a set of 5 motors, it is important to take into account that each finger has different lengths so it was necessary to make adjustments in the programming and couplings. Having the complete functionality, we improved the way to connect the motors to each finger by using quick connection couplings, so that it was possible to visualize the movement of each finger by making a simple change between the mechanisms. The design of these parts was done using computer aided design (CAD) and 3D printing in order to make functional prototypes and to obtain information to make improvements in the design iterations. In addition, the hand was designed to have the most natural movements possible

La idea de este proyecto fue darle seguimiento al desarrollo de nuevas formas para el desarrollo de prótesis de manos. El objetivo fue optimizar el funcionamiento de la prótesis biomimética y encontrar los límites mecánicos de los materiales utilizados para su creación, ya que en fases anteriores del proyecto solamente se realizó el diseño mecánico del mismo. En la Universidad del Valle de Guatemala anteriormente se han realizado manos animatrónicas donde solamente se implementaban los movimientos de flexión-extensión, mientras que este diseño también incluye los grados de libertad en los dedos de manera que se pueda realizar los movimientos de aducción-abducción.

Para lograrlo se necesitó tomar el diseño mecánico realizado en la fase anterior del proyecto, colocarle motores a cada uno de los “tendones” y realizar la programación necesaria para poder asegurar que cada motor se accionara de forma que los movimientos fueran lo más parecidos a una mano real. Cada dedo tiene 5 tendones encargados de permitir hacer los 4 movimientos. Los diferentes grupos de tendones de cada dedo fueron colocados alrededor de la mano, de manera que fuera posible realizar un cambio rápido entre los diferentes grupos, además de poder establecer en la computadora qué dedo se moverá, como y a qué velocidad. Por último se realizaron las pruebas mecánicas de los materiales empleados en la fabricación del prototipo de la mano para conocer cuáles son sus límites mecánicos de operación.

En este trabajo se muestra la investigación realizada para comprender los conceptos necesarios sobre la anatomía de una mano humana y como es el funcionamiento de los tendones humanos, para después poder implementarlo en la prótesis biomimética. Se explica el proceso de programación para cada uno de los dedos y sus movimientos, además, de las modificaciones realizadas al modelo para que este fuera 100 % funcional para cada una de las posiciones de los dedos.

Para conocer un poco de las prótesis, principalmente las autónomas se conoce registro desde 1600 donde se dice que el cirujano Francés Ambroise Paré, se ingenió una prótesis para las extremidades superiores, el movimiento se logró con el hombro, pero como era de hierro la prótesis era muy pesada, es por ello, que un colega de Paré, Lorrain, realizó mejoras utilizando cuero, papel y pegamento, en vez de hierro. Pasaron bastantes años, pues los investigadores se enfocaron más en las prótesis de piernas, por lo que hasta el año 1865, se inició ya a buscar realizar prótesis que utilizan materiales como aluminio o plástico. El momento cuando estas prótesis tomaron más auge fue después de la segunda guerra mundial cuando se creó la asociación estadounidense de ortoprótesis (AOPA, siglas en inglés), ya que habían muchos veteranos que se encuentran insatisfechos con cómo funcionaban las prótesis de ese momento, llegaron al punto que el gobierno, hizo que las industrias militares se dedicaran más en realizar mejoras en las prótesis, que en las armas. Gracias a esta asociación y la presión del gobierno estadounidense, es que se tienen los avances que se conocen actualmente donde tienen motores controlados con estímulos cerebrales y son muchísimo más livianas que la primera de hierro especialmente si hablamos de prótesis de mano, donde se necesita realizar movimientos precisos y complejos, además de que la prótesis debe de pesar lo menos posible [1] .

2.1. Diseño de mano y muñeca animatrónica antropomórfica fase 3, Omar Gálvez

La tesis realizada por Omar Gálvez en el año 2020, buscaba continuar con el desarrollo del Megaproyecto Animatronics, donde el aporte de Omar fue optimizar el diseño de la muñeca y antebrazo logrando que estas se movieran en conjunto de la mano. Ya que el proyecto en las fases anteriores tenía solamente movimiento en las falanges de los dedos.

Para lograr la optimización Omar, utilizó el software Fusion 360, en este realizó el diseño de los dedos, palma y antebrazo, para que fuera realista se utilizó proyección de imágenes

perpendiculares. Para el movimiento de los dedos, este proyecto tenía bisagras en las articulaciones y dos conductos en la parte frontal y dorsal, para poder doblar y estirar los dedos en las diferentes direcciones permitiendo que el movimiento fuera lo más real posible.

Para aumentar el movimiento de la muñeca se colocaron dos servomotores Dynamixel AX-12A ensamblados en configuración modular, con esto logró el movimiento de flexión, extensión, desviación cubital y radial, además del movimiento específico del antebrazo, supinación y pronación, esto con el motor anteriormente mencionado. Para el movimiento de las falanges, se realizó un mecanismo formado por poleas, cables y motores. El motor seleccionado fue el Dynamixel XL-320. El cable lo colocó en configuración bowden, usando teflón e hilo de pescar, esto para el movimiento de las falanges y el metacarpo del pulgar. (Figura No.1).

Entre las recomendaciones que colocó Omar, las más importantes son: implementar yemas a los dedos, de manera que la mano tenga más agarre para tener mejor control de los movimientos. Otra recomendación fue, utilizar los sensores de *Leap Motion* para eliminar puntos ciegos en el movimiento de la prótesis. Por último, realizar un diseño más compacto de manera de poder ser utilizado en una persona real y que este lo pueda probar [2].



Figura 1: Mano animatrónica realizada por Omar Gálvez, año 2020.

2.2. Diseño y fabricación de mano robótica biomimética para prótesis, Josué Asturias

En el año 2021, Josué Asturias realizó el diseño de las prótesis/manos animatronicas dándole un giro muy interesante pues el diseño se buscó realizarlo lo más real posible, para este diseño la parte estructural es la simulación de huesos reales y las uniones para el movimiento son bajo el principio de las articulaciones y tendones, todas siendo impresas en 3D, utilizando distintos materiales, como lo es el PET, PLA y Ninjaflex.

Para poder realizar el diseño de forma biomimética se necesitó primero hacer una investigación acerca de la anatomía y forma de funcionamiento de la mano humana. En este

proyecto se realizaron cuatro prototipos; dos para el dedo índice y dos para la mano completa, donde se realizaron varias iteraciones. Entre los objetivos de esta tesis estaba diseñar y empezar con el control de la mano, Josué le dio más enfoque a desarrollar el dedo índice y su movimiento.

En el caso del dedo índice se buscó que este tenga cinco grados de libertad; dos grados de libertad para el movimiento de flexión, y dos grados de libertad para el movimiento de abducción y aducción y el último grado de libertad será la extensión del dedo mismo. Por el tipo de material utilizado para los ligamentos la extensión tiene un componente pasivo. Para la fabricación de las partes se realizó impresión en 3D, donde para los huesos fue con materiales rígidos y para los ligamentos se utilizó un material flexible. Para el movimiento se utilizó poleas, hilo y motores, al igual que la mano de Omar Galvez. (Figura No.2).

Entre las recomendaciones que realizó Josué Asturias, encontramos que sugiere probar nuevos materiales para las partes rígidas del diseño, además de probar otros tipos de impresión en 3D como por ejemplo SLA o Polyjet. Por último, buscar la manera para reducir el tamaño del modelo a que sea del tamaño de una mano real promedio, para que pueda ser implementado en una persona que necesite de la prótesis.[3].



Figura 2: Mano biomimética realizada por Josué Asturias, año 2021.

2.3. Diseño de prótesis "Cyborg Beast", Universidad de Creighton, EEUU

En el año 2015 la universidad de Creighton diseñó una prótesis de mano para niños, utilizando el programa CAD, *blender*. La idea de este diseño era crear una prótesis funcional que pudiera ser impresa en 3D, realizando un diseño que pudiera ser adaptado y con un bajo costo de elaboración (50 dólares estadounidenses), recordando que los niños constantemente están creciendo y necesitan estar obteniendo nuevos diseños.

Esta prótesis está formada por las siguientes piezas principales; dedos con bisagras, palma rígida e hilo de pescar. Esta prótesis cuenta con solo dos movimientos, flexión o extensión de

los dedos de la mano. Para el accionamiento de la misma se debe hacer un giro de muñeca de entre 20 a 30 grados, haciendo que los dedos se cierren. Los materiales que se proponen para que sea impresa son PLA y ABS, materiales que son comercialmente conocidos.(Figura No.3).

Un dato interesante de este diseño es que por ser para niños, cada una de las manos se realizaba tomando medidas de la parte del cuerpo donde se instalaría la prótesis. Para la toma de medidas ellos contaban con 2 métodos, medidas físicas o fotografías. Después de varios diseños, concluyeron que no existía una diferencia significativa entre el ajuste de las manos de medidas físicas con las que se realizaban por medio de fotos, esto permitió que pudieran ayudar a más niños que necesiten una prótesis de este tipo.[4].



Figura 3: Diseño de la mano realizada por la universidad de Creighton,(2015).

2.4. Diseño y fabricación de un banco de pruebas de fatiga de piezas impresas en 3D, Stalyn Malevé

En el año 2019, Stalyn Malavé se dio a la tarea de realizar un banco de pruebas a la fatiga de piezas impresas en 3D. Para lograr esto, primero Stalyn realizó la aclaración que los principales filamentos utilizados en la impresión en 3D son PLA y ABS, de estos filamentos se utilizan de base para elaborar otros filamentos, con variaciones en sus propiedades. Hay filamentos que tienen acabados metálicos o de madera. Stalyn realizó una comparación entre las propiedades que tiene PLA y ABS, no con el fin de decir cuál material es mejor, sino que permitir conocer para qué aplicaciones cada material cumple más, a partir de sus propiedades y uso.

Es importante conocer las propiedades de cada uno de los materiales, para saber en qué condiciones es mejor cada material. En el factor de resistencia a la tracción, el PLA tiene un valor de 37 MPa, mientras que el ABS tiene una resistencia de 27 MPa. Para el alargamiento el PLA tiene un porcentaje de 6 %, mientras que el ABS tiene un valor de 3.5 %, entre otras.

Conociendo la naturaleza y propiedades de cada material, también se puede concluir que las impresiones en PLA no soportan caídas de la misma manera que el ABS, otro aspecto importante a tomar en cuenta es la temperatura, ya que el PLA a los 65 °C el material se empieza a deformar, mientras que el ABS lo hace a los 105 °C. Para realizar sus pruebas

utilizó el diseño de una probeta utilizando la norma ASTM D671, para poder establecer las condiciones y propiedades de los distintos materiales.

Stalyn en su trabajo llega a una conclusión, la cual es, el PLA es mejor utilizarlo cuando el interés de la pieza es la estética, mientras que el ABS es cuando se requiere que la pieza tenga resistencia. Además, de que aclara que tuvo una gran variación en los datos obtenidos porque al imprimir en 3D, hay muchos factores como es la temperatura de fundición del filamento, el precalentamiento de la mesa, el sentido de la impresión, la orientación de las capas con respecto a la sección transversal, la velocidad de avance del filamento, la velocidad de impresión, la estructura de impresión. Estos factores pueden hacer que una pieza tenga más o menos resistencia.

Las recomendaciones que hace Stalyn fueron las siguientes: Para la realización de las pruebas de fatiga y estrés de las piezas, colocar sensores electrónicos para detectar el desgaste o corte en el momento exacto que sucede no con aproximaciones humanas, que puede agregar factor de error al estudio. Otra recomendación es realizar las pruebas con condiciones controladas, principalmente la temperatura, pues este tipo de pruebas se ve muy afectada por la temperatura.[5].

La pérdida de una o varias extremidades puede llegar a ser difícil, ya que muchas veces va relacionado a una enfermedad como lo es el cáncer, diabetes o traumas graves por un accidente. En el caso de las extremidades superiores, esto es más impactante porque la calidad de vida de la persona se ve afectada inmediatamente, pues ahora la persona no podrá comer, escribir, peinarse, entre otras actividades cotidianas que se realizan. En la actualidad la mayoría de las prótesis tienen movimientos muy limitados, estas están diseñadas solamente para gestos simples como lo es el tomar objetos o estirar solamente un dedo, esto se debe a los elementos que forman la mano, pines y bisagras, lo que demuestra que la prótesis no se asemeja del todo a lo que puede realizar una mano real.

En la fase anterior se implementó la parte mecánica, pero el alcance de ese proyecto fue únicamente el dedo índice, a pesar de que se diseñó la mano completa no se realizaron pruebas con ella y tampoco se implementó electrónica o un sistema de control en el resto de dedos. Tampoco se tenían pruebas de movimiento y rango de operación de la mano. Por lo que fue necesario conocer el comportamiento de los materiales utilizados, realizándoles prueba mecánicas, debido a que la naturaleza del equipo es estar en constante movimiento y con carga variables, se buscó determinar el límite mecánico del mismo y el tiempo de vida útil que tienen los componentes (ciclos de funcionamiento), de manera que se pudiera prever que existan fallas graves en el diseño, donde se detectaron se realizó un rediseño para evitar que sucedieran. Esta fase del proyecto se hizo con el fin de poder darle vida a la mano biomimética y conocer los límites de operación que esta tiene.

4.1. Objetivo general

Optimizar el funcionamiento de la mano biomimética y realizar pruebas mecánicas para la mano.

4.2. Objetivos específicos

- Implementar los movimiento de flexión, extensión, abducción y aducción en cada uno de los dedos de la mano biomimética, por medio de motores.
- Diseñar un controlador sencillo para los actuadores de cada dedo.
- Realizar la prueba mecánica de la fatiga para los principales ligamentos de la mano.

El trabajo realizado en este proyecto consistió en la investigación sobre la anatomía de la mano humana, específicamente los músculos, tendones y articulaciones encargados de darle movilidad y estabilidad a una mano humana. Para después poder utilizar esta información para realizar la programación sencilla de los motores que están atados a las poleas de los “tendones”, hilos de cada dedo. Ya teniendo definidos todos los parámetros necesarios para los movimientos principales se procedió a realizar las pruebas mecánicas para conocer los límites de operación.

Se realizó la programación de los cuatro principales movimientos de cada dedo de una mano humana biomimética, flexión, extensión, aducción y abducción. También, se realizó la modificación al sistema de poleas de manera que permitiera tener los 25 “tendones” disponibles para realizar un cambio rápido entre los dedos. Igualmente, se programó el poder hacer pruebas sencillas, donde se estableciera el movimiento que se deseaba hacer, cuál era la velocidad y que dedo lo debía de realizar. Para terminar, se hicieron las pruebas mecánicas de repetitividad para cada uno de los dedos, buscando conocer los límites mecánicos de la mano y sus componentes.

6.1. Biomimética

La biomimética o biomímesis es la ciencia que estudia los mecanismos que están en la naturaleza de manera que puedan aprovecharlos para después hacer un aporte al desarrollo de proyectos. Este término se empezó a utilizar en el año 1969 por Otto H. Schmitt. Para poder entender mejor debemos comprender que *bios* significa vida y *mimesis* imitar. Muchas veces este tipo de diseño no es estético, sino que busca que sea práctico.

Con el paso de los años y la manera con la que la naturaleza ha ido evolucionando, ha permitido que a parte de los biólogos, también los ingenieros se interesen en ver qué modificaciones han ocurrido de evolución, para con eso realizar mejoras a sus diseños. Aunque no exista información escrita de que en la antigüedad se haya realizado esta práctica de tomar de inspiración de la naturaleza, se puede ver en muchos mecanismos como por ejemplo las tenazas, que pudieron ser tomadas a partir de la forma de los picos de las aves [6].

6.2. Anatomía de la mano humana

La mano humana es una de las herramientas más importantes para los seres humanos y una de las más complejas, ya que para lograr realizar todas las actividades que se pueden con ellas, esta tiene que ser un mecanismo complejo para lograr todas las configuraciones. Es por ello que es necesario estudiar la mano, principalmente la movilidad para poder replicarla de cierta manera en la prótesis. La mano humana está compuesta por diferentes huesos, músculos, y ligamentos, gracias al trabajo en conjunto se pueden realizar los movimientos.

En diferentes libros de anatomía, podemos encontrar que para explicar el funcionamiento de la mano, realizan la separación entre dedos (índice, medio, anular y meñique) y pulgar, ya que este último tiene un funcionamiento diferente al del resto. Para una comprensión futura, se establecerá una numeración, esta se encuentra en el Cuadro No. 1 [7].

Numeración	Nombre del dedo
I	Pulgar
II	Índice
III	Medio
IV	Anular
V	Meñique

Cuadro 1: Numeración de dedos en mano.

6.3. Morfología de la mano

Como para este proyecto, el principal interés es el movimiento de la mano. Nos enfocaremos en conocer más las partes que interactúan en el movimiento de la mano como tal, entre ellos encontramos los huesos metacarpo,carpo, falanges y articulaciones.

6.3.1. Metacarpo y carpo:

El metacarpo es la parte que une las falanges de cada dedo con el carpo, dando la forma de la parte media de la mano, es decir lo que conocemos como la palma. El carpo es un conjunto de pequeños huesos y articulaciones que están unidos a los huesos del radio y cúbito, este es el encargado de permitir muchos movimientos específicos de la muñeca, dando ese movimiento tan útil de mano, al momento de manipular instrumentos grandes [7].

Los huesos del carpo son ocho y se separan en dos grandes grupos. Los huesos de la fila proximal (cerca a la muñeca): escafoides, semilunar, piramidal y pisiforme. Y los huesos de la fila distal (cerca a los carpos): trapezio, trapezoide, grande, ganchoso.(Figura 4)

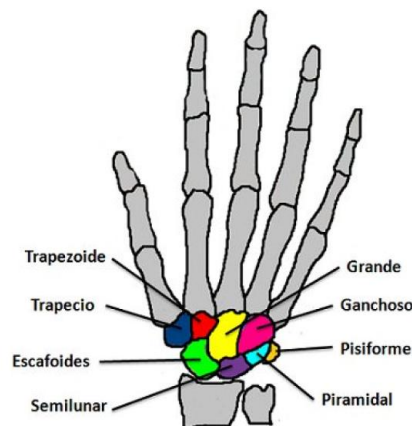


Figura 4: Partes de la palma de la mano

6.3.2. Falanges:

Luego de los huesos del metacarpo están las falanges. Las falanges son catorce huesos que se encuentran en cada uno de los dedos de cada mano. Cada dedo tiene tres falanges (distal, media y proximal), y el dedo pulgar por funcionar distinto solamente tiene dos falanges. (Figura 5) Las falanges proximales son las que se encuentran pegadas al metacarpo, las media como su nombre lo dice son las falanges de en medio de los dedos y por último las distales que son las que se encuentran en la punta del dedo [8].



Figura 5: Posición de las falanges[9]

6.3.3. Articulaciones y ligamentos:

Las articulaciones son las áreas donde se unen dos o más huesos y se necesita un movimiento o giro sobre ellas. La mayoría de las articulaciones son móviles y permiten movimiento, como lo es en el caso de la mano, donde por tener tanto huesos juntos es necesario tener articulaciones y ligamentos para poder realizar movimientos complejos, la mayoría de las uniones entre huesos son articulaciones flexibles, que permiten mover cada uno de los dedos por separado y en diferentes posiciones, según se necesite que este se encuentre. (Figura 6)[10].

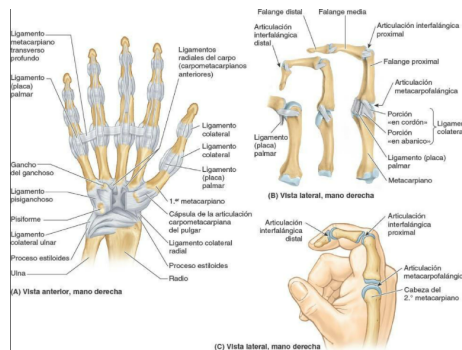


Figura 6: Articulaciones y ligamentos de la mano[9]

Las principales articulaciones y ligamentos que se utilizan para el movimiento de los dedos:

- **Articulación Metacarpofalángica (MCP) en pulgar:**

Las articulaciones metacarpofalángica, se encargan de unir el metacarpiano con su respectiva falange proximal. Esta articulación se clasifica como la articulación del elipsoide. La principal función es la flexión y extensión del dedo, aunque también aporta de pequeña manera en el movimiento de abducción-aducción. La estabilidad de esta articulación se debe a su cápsula, los ligamentos asociados, la estructura muscular y hasta cierto punto a forma del hueso(Figura 7) [9].

Los ligamentos asociados a la articulación MCP del pulgar son el ligamento palmar, este esta unido a la base de la falange proximal y en conjunto con los ligamentos colaterales hacen una forma de envoltura alrededor del hueso. El ligamento palmar contiene un sesamoideo radial y cubital. El segundo mencionado es el más grande entre los dos, nos ayuda como punto de inserción para la parte del aductor pollicis. Mientras que el sesamoideo radial nos ayuda con ser un punto de inserción para el flexor pollicis brevis. Los sesamoideos son los puntos de unión más fuertes para los tendones que solo el ligamento palmar, además que tienen mejor respuesta al ser sometidos a la compresión u otras fuerzas que puede sufrir al estar en movimiento la articulación [9].

Los ligamentos colaterales de la articulación MCP, se dividen en ligamento colateral accesorio y ligamento colateral propio. El ligamento colateral accesorio abarca el espacio entre el ligamento colateral propio y la placa palmar. Los ligamentos colaterales propios se tensan en flexión. Los accesorios se aflojan al momento de estar en flexión completa el dedo [9].

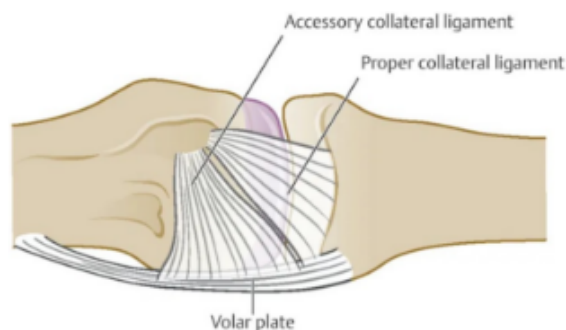


Figura 7: Articulaciones MCP[9]

- **Articulación Metacarpofalángica (MCP) dedos:**

Las articulaciones MCP de los dedos se asemejan mucho a las articulaciones MCP del pulgar, con la variación que los dedos tiene un rango mayor de abducción-aducción. Esto sucede porque la base de la falange proximal es mas pequeña, cóncava y con un eje transversal mas largo que el dedo pulgar. Cuando la articulación MCP esta totalmente flexionada, el movimiento de abducción-aducción no es posible, ya que la parte palmar del metacarpiano es relativamente plana y los ligamentos colaterales están en flexión total. De la misma manera que el dedo pulgar, los ligamentos colaterales accesorios, se encuentran flojos al momento de estar en el movimiento de la flexión[9].

- **Ligamentos Intermetacarpianos transversales (IML):**

Estos ligamentos son tres bandas fibrosas que se encuentran en los metacarpianos y que se unen a las placas palmares de los dedos índice al meñique. Su función es limitar que se separen los metacarpianos y dar estabilidad de la mano [9].

- **Articulación Interfalángica Proximal (PIP):**

La articulación PIP es de tipo bisagra, ya que solo permite el movimiento de la flexión y extensión. La estabilidad se asocia a la simetría y fuerza que tienen los ligamentos colaterales, la palma y la forma de las cabezas de las falanges (Figura 8)[9].

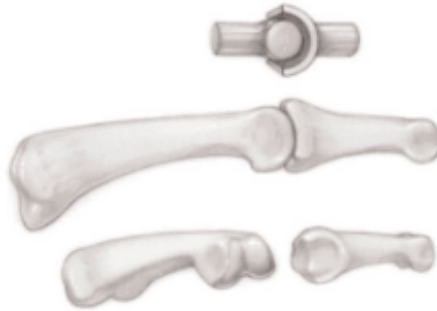


Figura 8: Articulaciones tipo PIP[9]

La placa palmar se adhiere a la vista palmar de la base de la falange media y falange proximal. La función de este ligamento es limitar la extensión de la articulación. Los ligamentos colaterales proximales, están divididos en propios y accesorios, como los MCP. Los ligamentos colaterales accesorios están entre los ligamentos colaterales propios y la placa palmar. Estos ligamentos tienen tensiones iguales en flexión y extensión. Con esta pareja de ligamentos se logra formar un ducto que se resiste a los desplazamientos de la articulación PIP(Figura 9) [9].

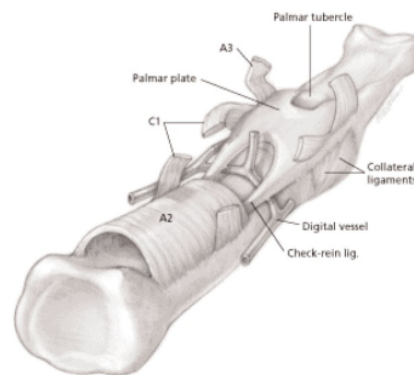


Figura 9: Ligamento tipo PIP[9]

- **Articulación Interfalángica Distal(DIP):**

La articulación DIP, es del mismo tipo que la PIP, que permite solamente extensión y flexión. Estructuralmente es similar a la PIP, con la única variación que tiene una hiper-extensión cuando la yema se apoya sobre alguna superficie [9].

- **Ligamento Retinacular Oblicuo (ORL):**

Este ligamento se encuentra en ambos lados del dedo. Su origen viene de la falange proximal externa, pasando por la parte distal, y costado de la falange, para terminar en la articulación DIP. Este ligamento al estar en flexión el DIP se tensa. Este ligamento no permite que exista una flexión o extensión del DIP pasivo, cuando se acciona la articulación PIP al estar en extensión. La única forma de accionar la flexión de la articulación DIP es cuando se flexiona la PIP [9].

6.3.4. Sistemas de poleas:

El sistema de poleas nos ayudará con la flexión de los dedos, este conjunto está conformado por poleas en la muñeca, la palma y dedos. La cavidad que se forma en la muñeca donde sucede toda la unión de todos los huesos, se conoce como el túnel del carpo, esta será la primera polea que nos ayudará a movilizar los tendones flexores. Luego la siguiente polea es a aponeurosis palmar, la cual está en la palma de la mano [9].

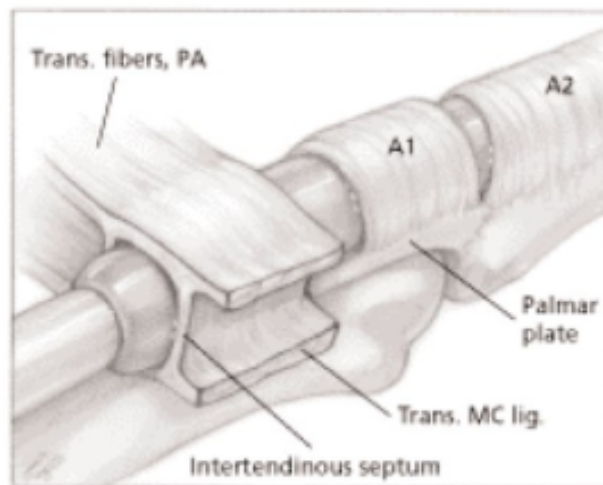


Figura 10: Polea tipo aponeurosis palmar [9]

Además se tienen los flexores digitales esos pasan a través de un juego de poleas, primero pasa por la polea transversal de la aponeurosis palmar, para luego, llegar al dedo donde están las poleas anulares y poleas fibrosas cruciformes, estas se encuentran a el lado palmar de las articulaciones PIP, MCP y DIP. Son cinco poleas anulares y tres cruciformes. Para poder saber de cual de las poleas anulares, se estableció un código utilizando la letra A, acompañada de un número. Siendo A1 la que esta en la falange proximal y A5 la que se encuentra en el distal. Para identificar las cruciformes, se utiliza la letra C, también acompañado de un número. A1 anular, se encuentra en la placa palmar de la articulación MCP, después esta la A2 que llega hasta la parte distal. donde se une a C1 que tiene forma de cruz como se puede ver en la Figura 11. En la placa palmar de la articulación PIP esta la polea A3, después encontramos la polea A4 en medio de la falange media y por último A5, que se encuentra en la articulación DIP. Entre las poleas A3 y A5, se encuentra C2. En la parte distal de A4 encontramos a C3, esta se encuentra en una posición similar a A2 con C1. Por

último encontramos a A5 con la articulación DIP. Todas las poleas de esta secuencia pueden soportar compresión, por lo que facilita el poder retraer el dedo [9].

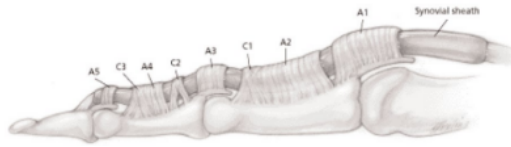


Figura 11: Poleas de los dedos [9]

Para el caso del dedo pulgar este cuenta solamente con tres poleas, dos anulares y una oblicua. A1 esta en la articulación MCP, después encontramos la polea oblicua, que inicia en la parte cubital de la falange proximal y finaliza en el lado radial de la misma falange. La parte proximal de la polea está asociada a la inserción del tendón adductor pollicis. Por último encontramos A2, esta está cerca del punto del flexor pollicis longus y la articulación PIP, del pulgar. (Figura 12)



Figura 12: Poleas del pulgar [9]

6.3.5. Tendones flexores:

Los tendones son las extensiones de los músculos, estos permiten que la mano se mueva, en las posiciones que indiquemos. En la mano hay 9 tendones externos que pasa a través del túnel del carpo. Los flexores digitorum superficialis y digitorum profundus se dirigen para los dedos, II,III,IV y V, mientras el flexor pollicis longus es que va hacia el dedo pulgar [9].

- **Flexor Pollicis Longus (FPL):**

Este es el tendón más radial, esto quiere decir que viene de los músculo del hueso del radio. Se sujeta de la base palmar de la falange distal del pulgar. La función de este es flexionar la articulación MCP y PIP del pulgar [9].

- **Flexor Digitorum Profundus(FDP):**

Este tendón pasa a través del túnel carpal, luego por la palma hasta que se inserta en la parte palmar de las falanges distales de cada uno de los dedos. La función de este es flexionar las articulaciones MCP, PIP y DIP de los dedos II, III, IV y V [9].

- **Flexor Digitorum Superficialis (FDS):**

El retináculo extensor es un conjunto de tendones se encuentran superficialmente, como su nombre lo dice, encima de los tendones FDP. El recorrido de este tendón inicia pasando por el túnel carpal, pasando por la palma, para dividirse en dos de manera que se inserta en los lados cubital y radial de las falanges medias de cada dedo. El FDP pasa a través de la división de este dedo, es por ellos que prácticamente están uno encima del otro. Esto es fácil de observar en la Figura 13. Como se puede observar la división sucede después de la articulación PIP. La función de este flexor es flexionar las articulaciones MCP y PIP de los dedos II, III,IV y V [9].



Figura 13: Principales flextores de la mano[9]

6.3.6. Tendones extensor:

Este conjunto de tendones extensores se encuentran en la muñeca, dedos y pulgar. Su recorrido en la mano inicia debajo del retináculo extensor, el cual tiene seis canales. Este retináculo tiene como función no permitir que los tendones extensores de la mano se arqueen en el área en la que se encuentra la muñeca (Figura 14). Cuando los tendones pasar a través de este, van envueltos en una vaina sinovial, que los protege[9] .

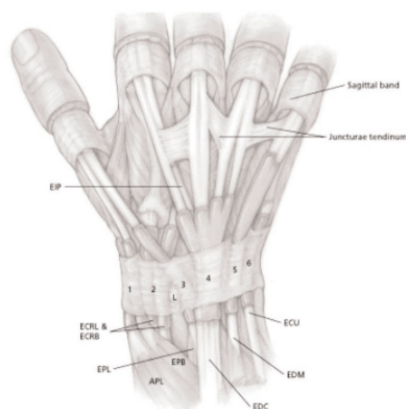


Figura 14: Retináculo extensor y los tendones que pasar por él.[9]

La mano cuenta con un conjunto de tendones que se encargan de extender los dedos y el pulgar. Este grupo lo forman los siguientes tendones:

- **Extensor Digitorum Communis (EDC):**

Este es un tendón que se ramifica y se dirige a los dedos II, III, IV y V.

- **Extensor Indicis Propius (EIP):**

Este es un tendón exclusivo del dedo índice, ya que este permite realizar movimientos y colocar el dedo índice en posiciones específicas para dar firmeza a los movimientos.

- **Extensor Digiti Minimi (EDM):**

Tendón que solamente se encuentra en el dedo meñique. Para lograr que los dedos se extiendan se requiere de más tendones que los que se necesita para la flexión de estos. Los extensores son un arreglo de tendones propios para los dedos índice y meñique, y resto de dedos. Según la investigación que realizaron James R. Doyle y Michael Botte con 43 cadáveres [9], el patrón de cómo están divididos los tendones extensores es el siguiente:

- El EIP se inserta desde el lado de cúbito al EDC para movilizar el dedo índice.
- Hay un EDC va solamente para el dedo índice, otro para el dedo medio.
- El dedo anular cuenta con una pareja de EDC.
- El dedo meñique no cuenta tendón EDC, pero tiene una pajora de EDM que se inserta en dos partes diferentes del dedo.

- **Expansión del extensor:**

Los tendones extensores de la mano, tiene una expansión, la cual se le llama expansión del extensor o capuchón exterior. La forma en que sucede la expansión es una aponeurosis triangular con la que el tendón EDC se inserta en las falanges proximales. Conforme el tendón va avanzando en el dedo y acercándose a los metacarpianos se van haciendo mas planos, hasta que se vuelven totalmente expansión de extensores logrando envolver las articulaciones MCP y la falange proximal. La capucha extensora

se extiende de forma distal hasta que llega a la falange media y se convierte en dos bandas laterales que se introducen en la falange distal [11].

La extensión contiene un componente activo que utiliza los músculos cercanos a la mano para lograr el movimiento, y un componente pasivo viscoelástico que se encarga de extender los dedos cuando hay ausencia de contracción muscular. Regresando a la parte activa la extensión necesita que se accionen los músculos extrínsecos e intrínsecos para que suceda el movimiento, mientras que para la flexión solo se requieren los extrínsecos (Figura 15) [12].

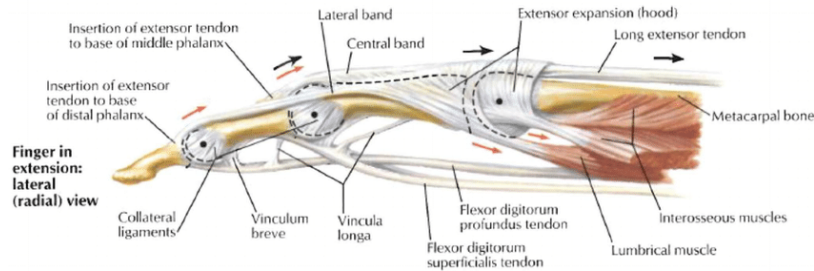


Figura 15: Funcionamiento de los tendones extensores.[12]

- **Banda sagitales:**

Esta banda envuelve la articulación MCP y se introduce en la placa palmar de esta misma articulación. La función de esta banda es centrar el extensor EDC (Figura 16). Esta banda cuenta con una injerto central, la cual se ubica en la base de la falange proximal. La banda sagital y el injerto tiene la función de limitar la hiperextensión del dedo [12].



Figura 16: Bandas sagitales y el injerto central en el tendón.[12]

- **Fibras transversales y oblicuas:**

La función de las fibras transversales es hacer flexionar la articulación MCP a través de la actividad que tienen los músculos interóseos. Mientras que la función de las fibras oblicuas es hacer la distribución de la tensión de los músculos interóseos y el extensor EDC [12].

- **Tendón central:**

Es la parte central de la expansión del extensor. Este se introduce en la falange media. Varias literaturas lo consideran como el extensor principal para la articulación PIP, además que por añadidura también extiende la articulación DIP en un solo movimiento, debido a la manera que están colocadas las fibras de la expansión del extensor [12].

- **Bandas laterales:**

Estas son las orillas de la expansión del extensor y no pueden ser accionados como tendones independientes. Estas bandas permiten que las articulaciones DIP y PIP se puedan accionar en conjunto y no solamente DIP. Otra función muy importante de estas bandas es que le dan estabilidad a las articulaciones al momento de que estas están flexionadas [12].

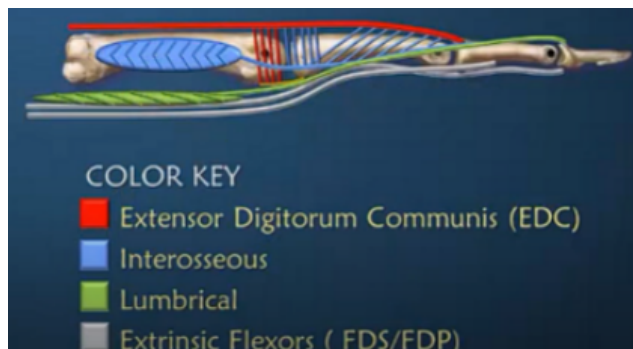


Figura 17: Músculos y bandas que se accionan al flexionar y extender el dedo.[12]

6.4. Movimiento de la mano

Los dedos de la mano en conjunto tienen cuatro movimientos característicos la flexión, extensión, abducción y aducción (Figura 18), estos los logran gracias a las articulaciones de bisagra y esféricas que tiene la mano [13].

- **Flexión:** Movimiento que consiste en doblar los dedos hacia la palma de la mano.
- **Extensión:** Movimiento que consiste en estirar los dedos contrario a la palma de la mano, movimiento contrario a la flexión.
- **Abducción:** Movimiento que aleja el dedo de la posición recta, en relación a los huesos de la palma. El movimiento es hacia los lados.
- **Aducción:** Movimiento de regresar a la posición recta el dedo, en relación a los huesos de la palma. Movimiento contrario al de abducción.

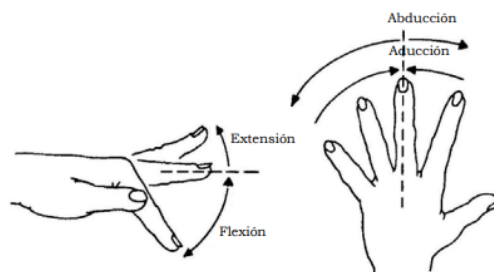


Figura 18: Movimientos de la mano dedos[13]

6.5. Fabricación digital

Primero debemos definir qué es el diseño y la fabricación digital. La fabricación digital, es el uso de sistemas integrados y asistidos por una computadora, para poder realizar piezas de forma autónoma. Estos sistemas son un conjunto de herramientas de simulación, visualización en 3D, análisis y control de maquinaria. El objetivo de utilizar fabricación digital es poder definir procesos de producción, al mismo tiempo que se realiza la fabricación del mismo [14].

En múltiples fuentes se menciona que la fabricación digital es la evolución de iniciativas de fabricación tales como:

- El diseño para la capacidad de fabricación (DFM, por las siglas en inglés).
- La fabricación integrada por ordenador (CIM, por las siglas en inglés).
- Fabricación de piezas flexibles.
- Fabricación optimizada.

Los pasos de la fabricación digital son: Una vez se tenga el concepto del objeto, las funciones que tiene que realizar y bosquejos del mismo. Ya se puede iniciar la fabricación digital con el uso de programas con funciones concretas para ello. Se enlistará algunas de ellas de manera de poder explicar en que consisten.

- **Diseño asistido por computadora (CAD):**

Este se utiliza para realizar el diseño geométrico del objeto; dependiendo de que programa se utilice se pueden generar modelos en 2D o en 3D. Al tener el modelo hecho se pueden realizar modificaciones y mejoras al mismo. Este programa es la base para la fabricación digital (Figura 19) [14].

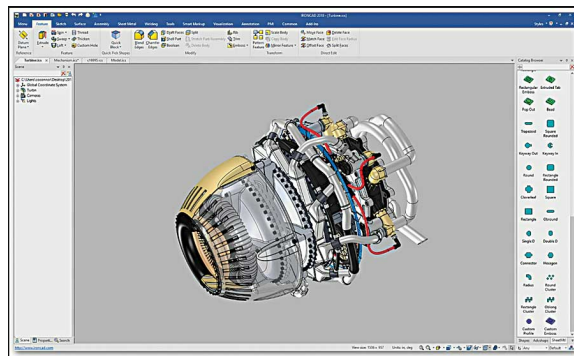


Figura 19: Ejemplo de programa CAD

- **Ingeniería asistida por computadora (CAE, por las siglas en inglés):**

Este tipo de software se utiliza después de tener el modelo por el programa CAD, para poder realizarle análisis de pruebas mecánicas simuladas, provocando que la pieza esta bajo ciertas condiciones que son ingresadas al programa. Los parámetros que regularmente se colocan son las fuerzas aplicadas, temperatura, presión y fricción entre piezas. Con dichos parámetros se puede tener conocimiento de como sera el desempeño de la pieza al ser fabricada, y tomar decisiones de si es necesario modificar la pieza o no (Figura 20) [14].

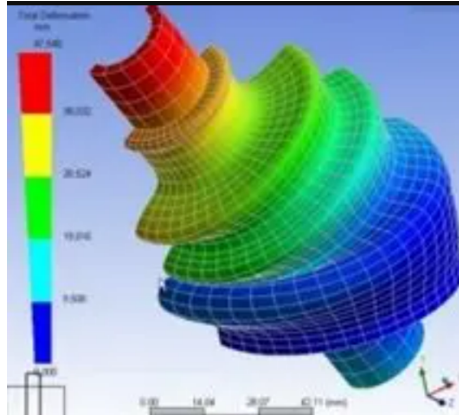


Figura 20: Ejemplo de programa CAE

- **Manufactura asistida por computadora (CAM, por las siglas en inglés):**

Este programa se utiliza para la simulación del maquinado o fabricación de las piezas a partir de la selección y dimensión del material que se utilizará, selección de la herramienta para maquinar, velocidad que se hará el proceso y las restricciones de fabricación. Algunos programas de este tipo, además de lo anteriormente mencionado, también sirven como asistencia de las líneas de producción y ensamblaje para lograr que el proceso sea óptimo. Este es la última parte de la fabricación física de las piezas (Figura 21) [14].

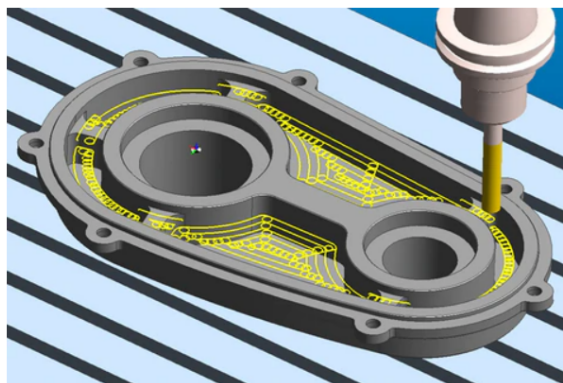


Figura 21: Ejemplo de programa CAM

6.6. Pruebas mecánicas

Las pruebas mecánicas son la manera de poder verificar que los materiales utilizados para la fabricación de un equipo sean los correctos y que cumpla las expectativas que se tienen respecto de él. Con estas pruebas se pueden tomar decisiones de si es necesario cambiar el diseño de una pieza, si es necesario cambiar el material utilizado o si tiene que ser ambos, para que este sí cumpla con las expectativas de uso.[15] Las principales pruebas que se realizan son las siguientes:

6.6.1. Ensayo de fatiga:

En el ensayo de fatiga, se somete la pieza a una carga cíclica con una frecuencia de ensayo determinada hasta que se provoque el fallo o deterioro de la pieza misma. El fallo del material en este ensayo, sucede al momento de estar debajo de los límites de la resistencia estática del material. Los resultados del ensayo de fatiga se presentan mediante el diagrama tensión-carga cíclica, donde se muestra el número de ciclos que se realizaron hasta la rotura de la pieza analizada.(Figura 22) Con este diagrama se puede determinar la vida útil de la pieza en ese material, parámetro que nos interesa en este proyecto [15] .

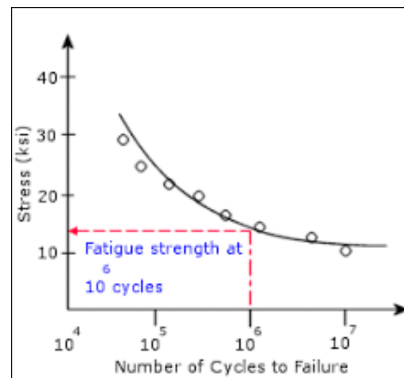


Figura 22: Ejemplo de gráfica de ensayo de fatiga,[15]

6.6.2. Ensayo de esfuerzos:

Este ensayo también es conocido como el ensayo de tracción, este consiste en someter el material a una fuerza de tracción, esta debe ser perpendicular a la pieza, en otras palabras, se le aplica una fuerza puntual perpendicular o varias fuerzas que busquen estirar el material. Mediante esta prueba podemos determinar como el material reaccionaria ante las fuerzas que se le apliquen. El dato que se toma de esta prueba es el alargamiento que sufre la pieza, para poder hacer la gráfica deformación-esfuerzo (Figura 23) [16].

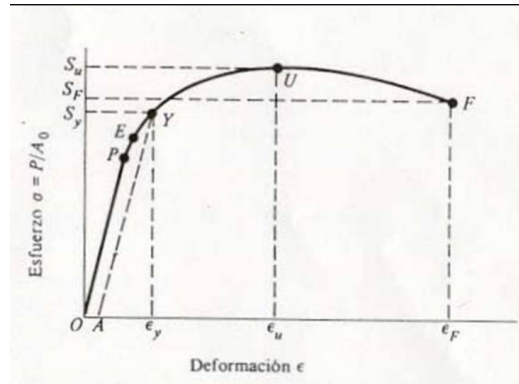


Figura 23: Ejemplo de gráfica de ensayo de esfuerzos,[16]

6.6.3. Ensayo de repetibilidad:

Este ensayo de repetibilidad y reproducibilidad de mediciones permite determinar que tanta variación tiene un proceso al realizarse en varias ocasiones, bajo las mismas circunstancias. El resultado de este ensayo es cuantitativo, por lo que se puede determinar mediante la dispersión característica de datos que tanto esta variando y así conocer si es necesario hacer una modificación mecánica o de control de manera que se logre homogeneizar el movimiento. Por el tipo de análisis realizado a los datos, la gráfica de respuesta será un diagrama con una línea de tendencia y dispersión de datos. (Figura 24)[17].

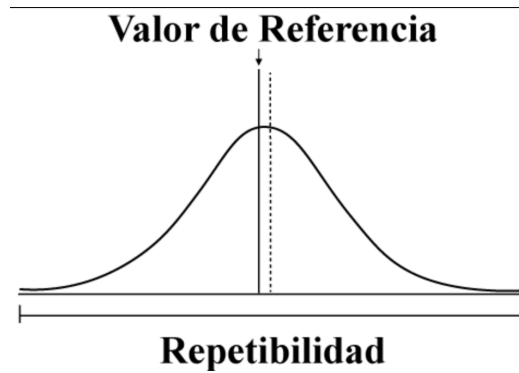


Figura 24: Ejemplo de gráfica de ensayo de repetibilidad,[17]

Implementación de movimientos mecánicos

La implementación de Movimientos mecánicos: a una prótesis es muy importante, principalmente está. Ya que para que la mano fuera funcional debía tener la posibilidad de realizar movimientos que permitieran colocar la mano en diferentes posiciones. Para este caso los dedos debían poder hacer flexión, extensión, aducción y abducción.

7.1. Realización del ruteo de mano completa

Con base en el diseño y desarrollo en la etapa anterior del proyecto, se procedió a colocar los diferentes “tendones” en cada uno de los dedos, para poder posteriormente accionar las poleas que se encuentran para cada uno de los motores, por medio del Ruteo: . El largo de cada hilo, se estableció con la distancia estimada que había hasta cada una de las sucesiones de las poleas.

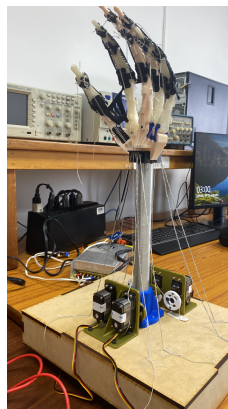


Figura 25: Mano con todos los tendones ruteados

7.2. Creación de sistema *Quick-Link*

De lo visualizado al tener todos los “tendones” de la mano ya en su posición y la dificultad para realizar los cambios de los hilos, se tomó la decisión que era necesario realizar un sistema que permitiera que de forma sencilla fuera posible cambiar el grupo de motores, entre el conjunto de poleas de cada dedo. La manera de implementarlo fue la siguiente.

7.2.1. Diseño de base motores

Para poder lograr el objetivo de hacer el cambio rápido, se busco la manera de poder trasladar los motores a sus diferentes posición en la base del proyecto, por lo que era necesario hacer un sujetador que estuviera en la posición y distancia necesaria para acoplarse a las poleas. Se tomaron medidas al motor para saber las dimensiones. De las pruebas iniciales de funcionamiento de los “tendones”, se sabe que los motores tienen que estar en una posición vertical para que el motor se pueda desplazar correctamente, como se visualiza en la siguiente imagen. (Figura 26)

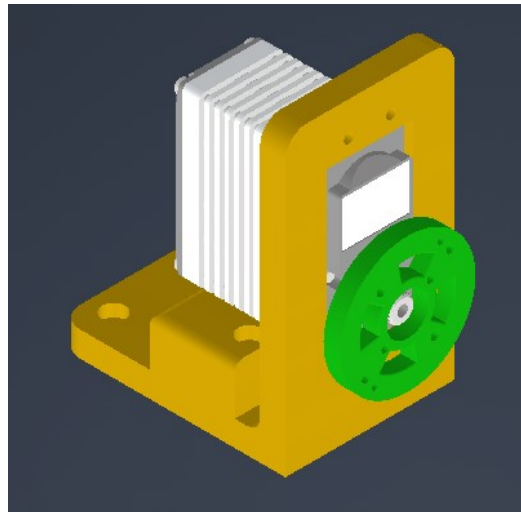


Figura 26: Sujetador con el motor

Ya que el motor cuenta en su diseño con agujeros se hizo un diseño que aproveche estos, principalmente los de la parte superior, buscando que el motor quede en un posición fija y no se mueva al tener que estar haciendo la fuerza necesaria para accionar el hilo al que este acoplado.

En la primera iteración, se notó que era necesario distanciar más el bloque de apoyo de la pared de sujeción, ya que el motor no podía colocarse correctamente para operar. (Figura 27)

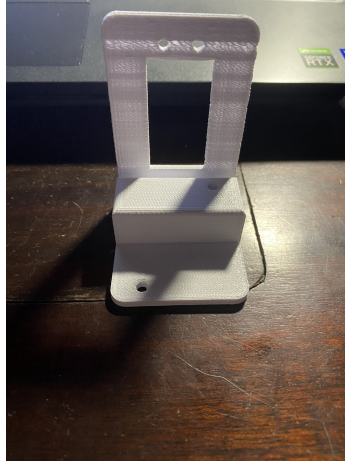


Figura 27: Primer diseño para base del motor para los tendones

Para las siguientes iteraciones se realizó la impresión de varios diseño buscando encontrar cual era el óptimo para operar en el proyecto. En la siguiente imagen se pueden apreciar las iteraciones, tomando la de la derecha como el tamaño definitivo para implementar en el proyecto, ya que está tenía la distancia y altura del bloque de soporte correcta. (Figura 28)

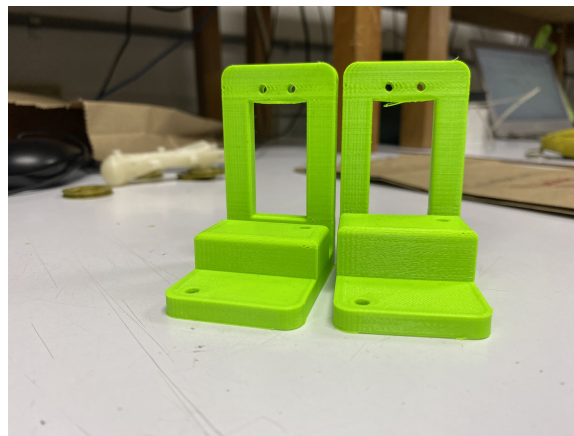


Figura 28: Segunda y tercera iteraciones para la base de los motores

Ya teniendo el diseño completo se notó que en la tercera iteración había un problema la pieza había sido impresa de forma lateral por lo que las fuerzas a las que estaría expuesta la pieza estaban en la misma dirección de impresión, cosa que se tenía que corregir para evitar contratiempos posteriores. Ya con esto se procedió a hacer la impresión de las otras cuatro bases.(Figura 29)

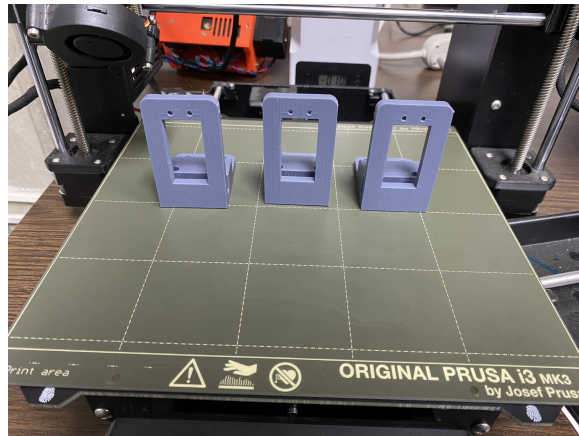


Figura 29: Iteración final del diseño de las bases de los motores

Al tener ya estas bases se decidió pasar a la siguiente etapa que era realizar el acople rápido entre motor y polea, y la distribución en la base del proyecto.

7.2.2. Diseño para acople rápido

Al indagar un poco sobre como poder hacer el acople rápido se llegó a la conclusión de que se debía tener una polea que ya tuviera el hilo, enhebrado. Para lograr esto, se realizaron dos tipos de poleas, unas que irían en los motores y otras colocadas en minisistemas con el hilo. Para después, poder colocarlas encontradas y que realizaran el movimiento en conjunto.

La polea para los motores, se diseño de manera que se pudiera acoplar a uno de los elementos que se colocan en la salida del motor. Se le agregaron cuatro agujeros que nos ayudarían a realizar el acople con la otra polea, a los agujeros que están en vertical se le colocaron clavos para que se pudiera insertar en la otra. (Figura 30)

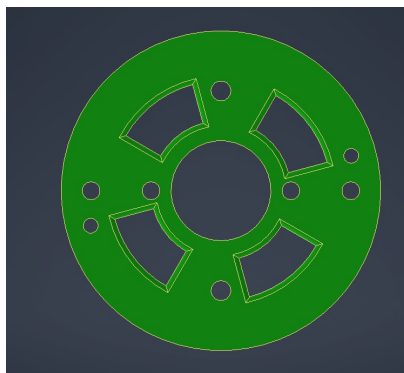


Figura 30: CAD de la polea para los motores

Ahora para la polea que va con los “tendones” se realizó el mismo diseño, solo que invirtiendo en cuales agujeros se colocarían los clavos para el acople. Además se aumentó el diámetro interno de la polea para poder colocar cojinetes que permitieran que el giro fuera

sin fricción y agrandar el surco donde debería ir el hilo para evitar que este se descarrile del sistema. (Figura 31)

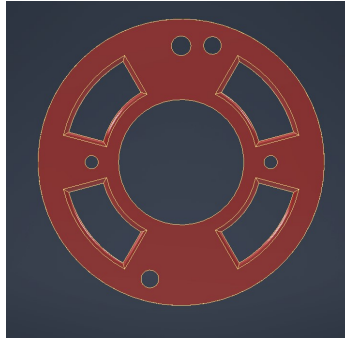


Figura 31: CAD de la polea para los hilos

Al realizar las impresiones 3D de las poleas, se notó un fenómeno muy interesante, las piezas tenían que ser impresas en las impresoras Prusa i3 MK3, ya que la precisión de estas permitía que el cojinete ingresara con un ajuste justo, mientras que las poleas impresas en la Ultimaker 3 tenían un variación en los agujeros que no permitía que se insertará el cojinete correctamente. En la siguiente imagen se puede apreciar donde la pieza azul fue impresa en la Ultimaker 3, mientras que la blanca y la verde fueron impresas en la Prusa i3 MK3. (Figura 32)



Figura 32: Iteraciones de impresión en 3D

Por último se unificaron todas las partes anteriormente mencionadas con el fin de lograr hacer un sistema de transmisión de potencia. Este sistema estaba formado por el motor con su polea y la polea con el respectivo hilo, posteriormente se explicará cómo se sujetó. (Figura 33)

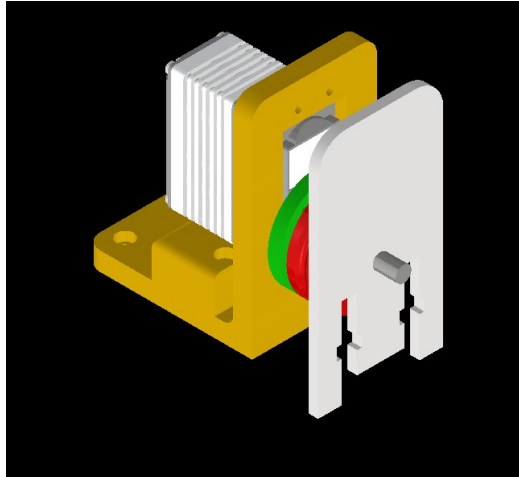


Figura 33: Ensamble de motor con las poleas para transmisión

7.2.3. Distribución de poleas

Buscando la manera de hacer que el diseño fuera amigable con el usuario, las poleas con los “tendones” se colocaron respetando cuál es el motor que los tienen que accionar y el dedo que deben mover, esto con la idea de que el usuario pueda saber a qué sistema de poleas tiene que colocar cada uno de los motores y poder realizar la prueba que desee.

Para poder hacer la implementación se requirió de diseñar dos sistemas, uno para colocar la polea con el hilo y uno de transmisión de fuerzas. Ya que por el diseño de la mano, la forma de transmitir la fuerza era necesario colocar poleas directamente abajo de la mano.

Este primero es el sistema de transmisión de potencia, el cual está formado por cinco poleas iguales, que se encarga de cambiar la dirección de la fuerza para permitir hacer la distribución que se discutirá posteriormente en este documento. (Figura 34)

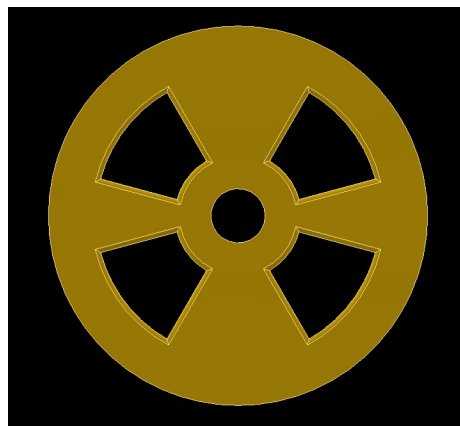


Figura 34: Diseño de poleas para transmisión

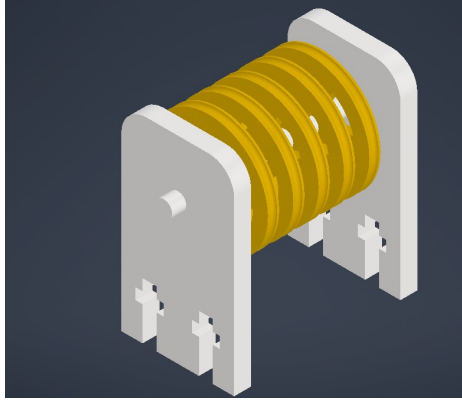


Figura 35: Sistema transmisión de fuerza ensamblado

Al hacer las pruebas preliminares se notó que era necesario agregar algún tope que ayuden a que los “tendones” no se desalineen al momento de no estar tensos. Es por ello que se diseñaron unas “grapas” que se colocaron en las poleas. En las siguientes imágenes se puede apreciar el diseño CAD (Figura 36) y la aplicación física (Figura 37).

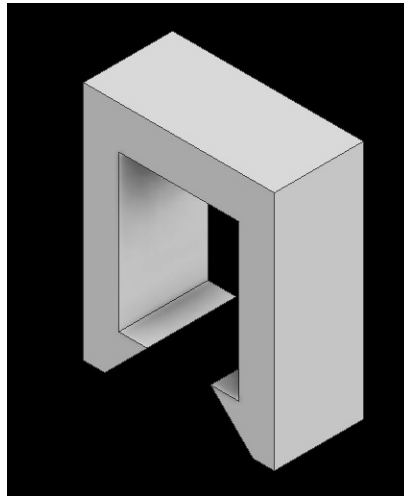


Figura 36: Diseño CAD de “grapas”

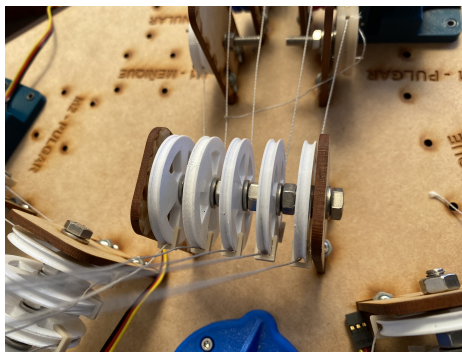


Figura 37: Colocación de las “grapas”

Ahora con este sistema se buscó, que las poleas de los hilos ya estuvieran listas solamente para colocarles de forma rápida los motores, es por ello que se visualizan como paredes con un eje y la polea. Estas poleas son de diferentes colores dependiendo del grupo de motores al que pertenecen. El tamaño de los tornillos colocados en este sistema fue de 20 mm, para que los tornillos no toparan uno con el otro, además se colocó en el lado interno de las poleas cojinetes KML 605 2RS para evitar fricción en el giro. (Figura 38)



Figura 38: Sistema de sujeción polea de hilo

Ya con los dos sistemas hechos se procedió a hacer la distribución de espacios está distribución se baso en un pentágono, pues una mano tiene 5 dedos, por lo que cada sistema de transmisión se colocó sobre este pentágono. Ahora para la colocación de cada polea de dedo, se utilizó una formación en “V”, esta permitió que se aprovechará de mejor manera el espacio que se tenía en la base. (Figura 39)

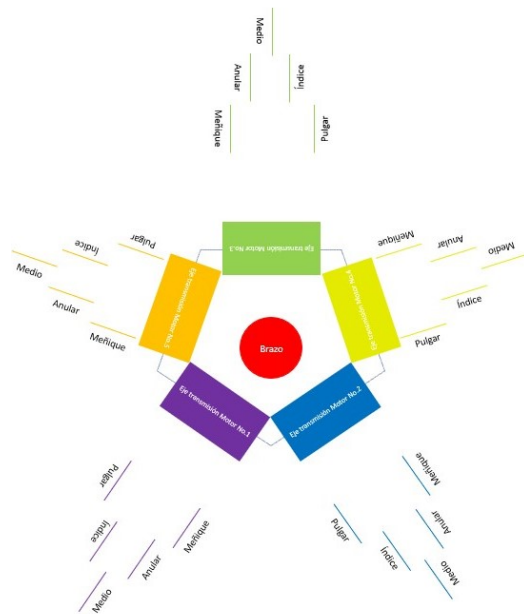


Figura 39: Distribución de las 25 poleas en base de mano.

La distancia entre la formación en “V” y los sistemas de transmisión se realizó buscando aprovechar al máximo el área máxima de la tabla que se podía colocar en la cortadora láser (600 mm X 400 mm) y que esta pudiera aun hacer los cortes. En los casos de los motores 4 y 5, la distancia quedó un poco reducida, por lo que al momento de hacer el ensamble y colocar los hilos, tomó un poco más de tiempo que con los otros 3 motores.

En la implementación física los colores de las poleas para cada uno de los dedos quedó de la siguiente manera:

Dedo	Color asignado
Pulgar	Beige
Indice	Rosado
Medio	Verde
Anular	Azul
Meñique	Blanco

Cuadro 2: Colores asignados para cada uno de los dedos.

Además, en la base se colocaron los nombres de los motores y el dedo al que está asignado esa polea con la idea de permitir que de una forma clara se pueda saber dónde se debe de colocar los motores según el dedo que se desee operar.



Figura 40: Diseño mecánico completo con *Quick-Link*

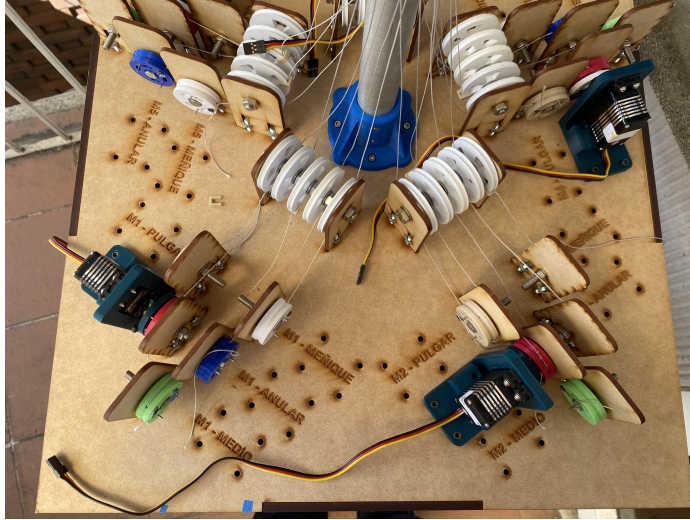


Figura 41: Implementación física de los motores No. 1 y 2.

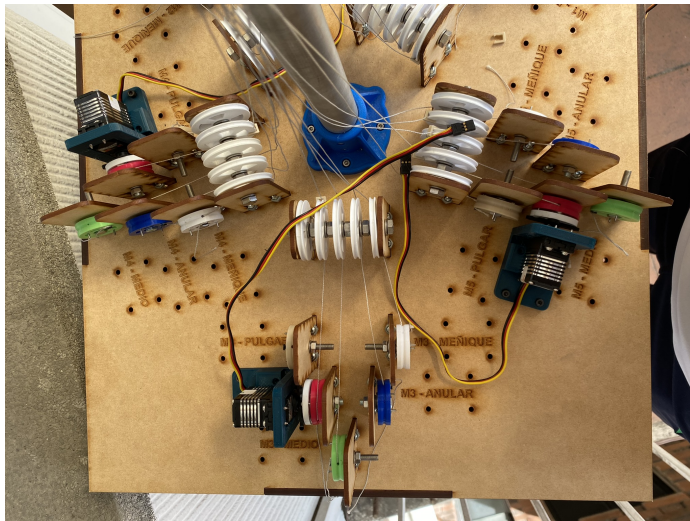


Figura 42: Implementación física de los motores No. 3, 4 y 5.

8.1. Parámetros para los motores

Ya que los motores que se utilizaron para implementar los movimientos fueron los Hitec D950TW, motores programables, a los cuales se les puede establecer los límites de giro. Para poder programarlos se requirió del programador de motores Hitec DCP-11, una fuente que suministrar 5V y el motor a programar. La interfaz del programador se puede observar en la siguiente imagen. (Figura 43)



Figura 43: Interfaz gráfica del programador DPC-11

El proceso de programación fue el siguiente: Primero conectar el programador DCP-11 a la computadora junto con el motor y la fuente de 5V, después abrir el programa y colocar el grupo al que pertenece el motor. Ya en la interfaz de programación se presionó el botón

de *connect*, al salir el mensaje de que ya el motor esta conectado, ubicar la sección de EPA para presionar el botón de *setting*. Se habilitará el poder ahora establecer los valores del centro y los extremos de los limites de operación, esto se debe hacer viendo la posición del motor para tener claro hasta donde se estará girando el motor.

En el caso de este proyecto los motores se les colocó los siguientes parámetros, haciendo la aclaración de que para el dedo pulgar los parámetros del M5 se tienen que variar para que se pueda realizar el movimiento de abducción de la mano.

Número del motor	Izquierdo	Centro	Derecho
M1	1700	4000	5000
M2	1700	3500	5300
M3	750	1400	2100
M4	1450	2500	2800
M5	4500	5300	5600
M5 (I)	750	1400	2100

Cuadro 3: Parámetros limitantes de los motores.

Ya con los parámetros ingresados en cada uno de los motores, en la misma interfaz gráfica se puede hacer una pequeña prueba de *sweep*, donde el programa le indica al motor un valor de frecuencia entre 900 a 2100 ms (milisegundos), para que el motor se pudiera ir moviendo a cada posición solicitada.

8.2. Programación de movimientos

Para implementar el controlador se utilizó el microcontrolador Arduino Uno y su programador, el cual utiliza como lenguaje C++. Con este programador se logro implementar los cuatro movimientos, los cuales fueron agrupados en dos bloques, ya que por ejemplo la flexión es lo opuesto a la extensión de un dedo.

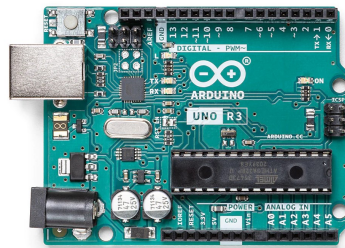


Figura 44: Microcontrolador Arduino Uno

Para hacer más amigable la interacción con el usuario se utilizó el lenguaje de programación Python, con este programa se desarrolló un menú que le pregunta al usuario, ¿cuál es el dedo que desea mover?, ¿qué grupo de movimientos desea hacer? y ¿a qué velocidad lo quiere realizar?, para después enviarlo por comunicación serial al arduino y que este ejecute el movimiento solicitado.

8.2.1. Programación en Arduino

Debido a que para los dedos IV y V, y en algunos motores para el dedo III la posición del motor quedó invertida fue necesario hacer código especial en estos casos, ya que hacer el cambio de los límites en la interfaz del programador DCP-11 era un poco compleja y tardada. Además, para el dedo pulgar(I) se tuvo que realizar el cambio de los límites del barrido para que este operara de forma correcta para los movimientos de aducción-abducción.

En el caso del grupo de movimientos flexión-extensión, los dedos I y II, utilizan el mismo código. Para los dedos IV y V, el código es invertido y el dedo III que es una combinación de ambos códigos, pues el motor 1 se invierte en esta operación.

Programación de flexión - extensión, para dedos I y II

```
for (pos = 0; pos <= 170; pos++) {
    Motor1.write(170-pos);
    Motor2.write(pos);
    Motor3.write(170 - pos);
    delay (vel);
}
for (pos = 170; pos >= 0; pos--) {
    Motor1.write(170-pos);
    Motor2.write(pos)
    Motor3.write(170-pos);
    delay(vel);
}
```

Programación de flexión - extensión, para dedo III

```
for (pos = 0; pos <= 170; pos++) {
    Motor1.write(pos);
    Motor2.write(pos);
    Motor3.write(170 - pos);
    delay (vel);
}
for (pos = 170; pos >= 0; pos--) {
    Motor1.write(pos);
    Motor2.write(pos);
    Motor3.write(170-pos);
    delay(vel);
}
```

Programación de flexión - extensión, para dedos IV y V

```
for (pos = 0; pos <= 170; pos++) {
    Motor1.write(pos);
    Motor2.write(170-pos);
    Motor3.write(pos);
    delay (vel);
}
for (pos = 170; pos >= 0; pos--) {
    Motor1.write(pos);
    Motor2.write(170-pos);
    Motor3.write(pos);
    delay(vel);
}
```

Ahora para la grupo de movimientos de aducción - abducción, solo se requieren dos motores por lo que el código para cada uno de los bloques de dedos quedo de la siguiente manera, tomando en cuenta que como el pulgar (I) su rango es mayor tiene un código único para él, para el resto de dedos se siguen manteniendo la división realizada anteriormente.

Programación de aducción - abducción, para dedo I

```
for (pos = 0; pos <= 170; pos++) {
    Motor4.write(pos);
    Motor5.write(170 - pos);
    delay (vel);
}
for (pos = 170; pos >= 0; pos--) {
    Motor4.write(pos);
    Motor5.write(170 - pos);
    delay (vel);
}
```

Programación de aducción - abducción, para dedo II

```
for (pos = 0; pos <= 170; pos++) {
    Motor4.write(pos);
    Motor5.write(170 - pos);
    delay (vel);
}
for (pos = 170; pos >= 0; pos--) {
    Motor4.write(pos);
    Motor5.write(170 - pos);
    delay (vel);
}
```

Programación de aducción - abducción, para dedo III

```
for (pos = 0; pos <= 170; pos++) {
    Motor4.write(170 - pos);
    Motor5.write(170 - pos);
    delay (vel);
}
for (pos = 170; pos >= 0; pos--) {
    Motor4.write(170 - pos);
    Motor5.write(170 - pos);
    delay (vel);
}
```

Programación de aducción - abducción, para dedo IV y V

```
for (pos = 0; pos <= 170; pos++) {
    Motor4.write(170- pos);
    Motor5.write(pos);
    delay (vel);
}
for (pos = 170; pos >= 0; pos--) {
    Motor4.write(170 - pos);
    Motor5.write(pos);
    delay (vel);
}
```

8.2.2. Programación en Python

Esta código se realizó con funciones auxiliares para hacer más fácil la interacción con el usuario. Este código primero almacena los valores ingresado por el usuario, los concatena formando un *string*, para que este sea enviado por comunicación serial al arduino. En el arduino se separan los datos para que sean almacenados en las variables que ya operaran con el código principal y de esta manera se logra la operación completa de la mano. Si se desea hacer varios movimientos se debe correr nuevamente el código en la terminal de la computadora donde se esté operando la mano, respondiendo nuevamente las preguntas.

Programación del menú para operación manual del sistema

```
#*****Menu*****
pregunta1 = ["Pulgar", "Indice", "Medio", "Anular", "Menique"]
print("A) ¿Cuál es el dedo que desea mover? ")
seleccion1 = menu(pregunta1)

print("Selecciono dedo: ")
print(seleccion1)

pregunta2 = ["Flexion - Extension", "Aduccion - Abduccion"]
print("B) ¿Cuál es el movimiento que desea hacer? ")
seleccion2 = menu(pregunta2)
print("Selecciono mov: ")
print(seleccion2)

seleccion3 = get_int("C) ¿Cuál es la velocidad? (entre 1 - 100)")
while ( not 1 <= seleccion3 <= 100):
seleccion3 = get_int("C) ¿Cuál es la velocidad? (entre 1 - 100)")

print("Selecciono velocidad: ")
print(seleccion3)

#*****preparacion datos*****

txt = "$" + str(seleccion1) + "," + str(seleccion2) + "," ...
...+ str(seleccion3).zfill(3) + ";"
msg = bytes(txt, 'utf-8');

#*****Comunicacion*****
arduino = serial.Serial("COM3", 9600)
arduino.write(msg)
arduino.close()
```

Pruebas mecánicas realizadas

Con la idea de conocer cuáles son los límites mecánicos de la prótesis biomimética. Se realizaron las pruebas mecánicas de fatiga en cada uno de los dedos de la mano. Para poder tener una muestra significativa se realizó la impresión de 5 juegos de articulaciones principales para cada uno de los dedos en el filamento elastómero termoplástico (TPE, por sus siglas en inglés). (Figura 45)

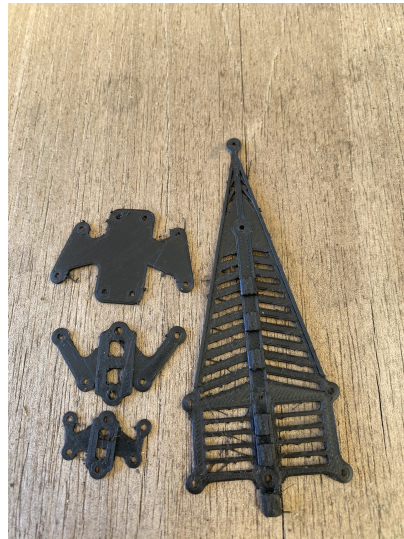


Figura 45: Ejemplo de impresión realizada en TPE

Ya teniendo los 5 juegos de articulaciones, 4 se utilizarán para realizar las pruebas y 1 se conservará como muestra de control.

9.1. Realización de pruebas mecánicas

Para realizar las pruebas se siguieron los siguientes pasos: Primero se cambiaron las articulaciones para que el dedo tuviera un juego de los recién impresos. Segundo se colocaron los motores en las posiciones para operar el dedo que le realizaríamos la prueba, fijándonos primero que la polea con el hilo se encuentre en la siguiente posición (Figura 46) , donde el tornillo principal se encuentre en la parte superior del sistema y que el hilo esté levemente tenso.

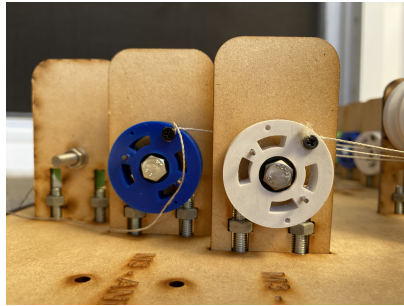


Figura 46: Posición de polea con hilo correcta

Tercero, se deben conectar los motores respetando el código establecido, donde el cable negro debe conectarse a tierra, el rojo a los 6 voltios y el amarillo al cable que sale del pin del arduino, para mandar la señal. Cuarto, se debe abrir el archivo llamado “Pruebas Mecánicas” donde se encuentra el código para hacer las pruebas y cárgalo al arduino. Quinto, abrir *Serial Monitor* para enviar el comando para ejecutarse (\$#,#,###;). Por último, se debe de colocar un ventilador dirigido a los motores para que estos no se calienten, de lo contrario se podría correr el riesgo de fundir los motores y que todo el proyecto se dañe o que los resultados obtenidos se vean alterados por el esfuerzo de los motores.

Para las pruebas se estableció que se debían hacer 10,000 repeticiones para cada uno de los movimiento, para después retirar las piezas y medirlas con un vernier digital. Para pedir cada una de las piezas se tomaron las siguientes referencias para largo y ancho, visualizar en las siguientes imágenes.

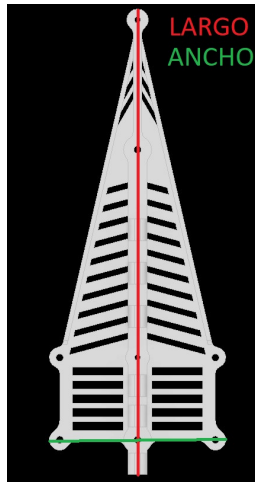


Figura 47: Forma de tomar medidas para extensor

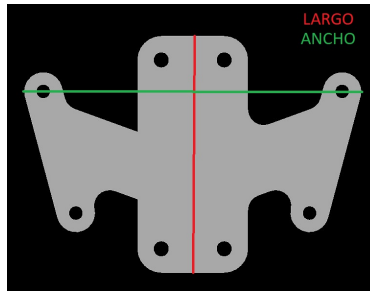


Figura 48: Forma de tomar medidas para ligamento MCP

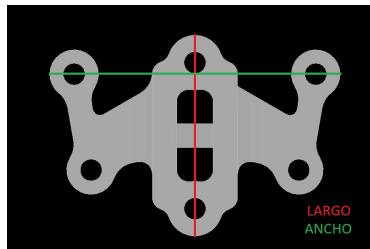


Figura 49: Forma de tomar medidas para ligamento DIP

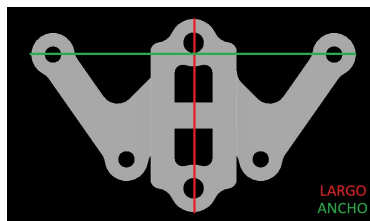


Figura 50: Forma de tomar medidas para ligamento PIP

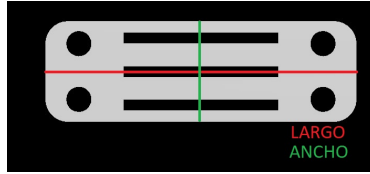


Figura 51: Forma de tomar medidas para ligamento radial

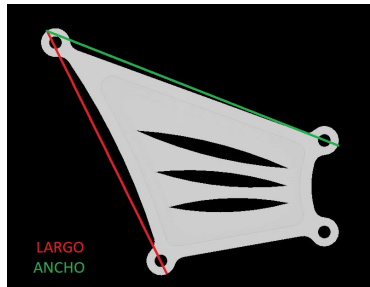


Figura 52: Forma de tomar medidas para ligamento de dedo 1 a dedo 2

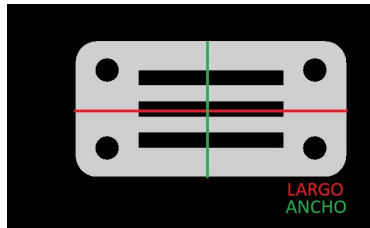


Figura 53: Forma de tomar medidas para ligamentos AOL y DRL

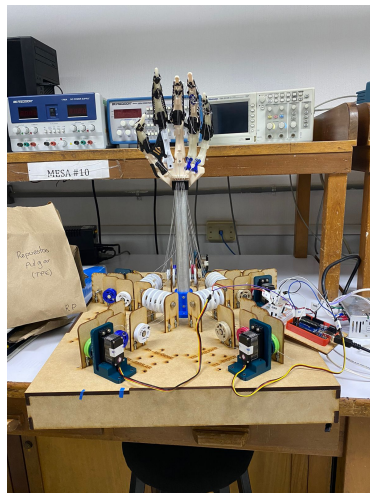


Figura 54: Realización de prueba mecánica dedo índice (II)

9.2. Resultados obtenidos

9.2.1. Análisis dedo pulgar (I)

Ligamento extensor



Figura 55: Ligamento extensor dedo I

Datos de mediciones:

No. Pieza	Largo (mm)	Ancho (mm)
0 (original)	84.45	37.00
1	80.90	35.20
2	80.40	35.00
3	80.50	35.25
4 (control)	77.00	33.06
5 (valor inventor)	77.00	32.73

Cuadro 4: Parámetros tamaño de extensor 1

Gráficas para realizar análisis de dispersión de los datos:

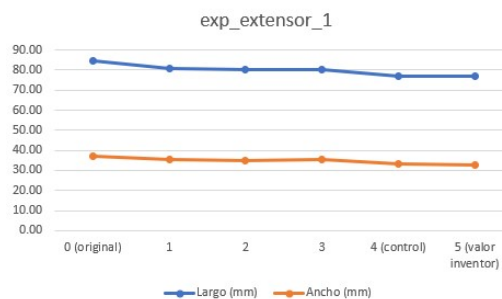


Figura 56: Gráfica de dispersión de largo y ancho, extensor dedo I

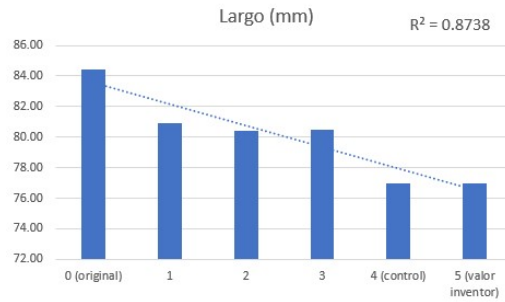


Figura 57: Gráfica de barras largo, extensor dedo I

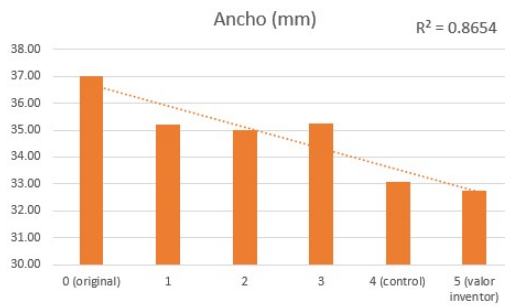


Figura 58: Gráfica de barras ancho, extensor dedo I

Ligamento MCP



Figura 59: Ligamento MCP dedo I

Datos de mediciones:

No. Pieza	Largo (mm)	Ancho (mm)
0 (original)	30.10	34.05
1	28.50	33.10
2	28.30	33.00
3	28.19	33.20
4 (control)	27.55	32.30
5 (valor inventor)	27.30	32.30

Cuadro 5: Parámetros tamaño de MCP 1

Gráficas para realizar análisis de dispersión de los datos:

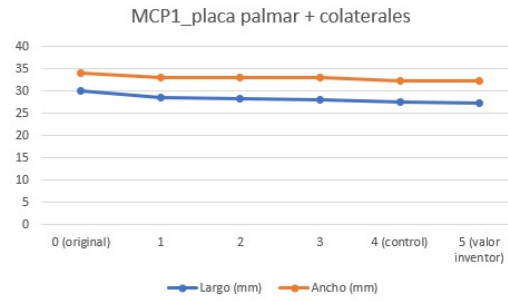


Figura 60: Gráfica de dispersión de largo y ancho, MCP dedo I

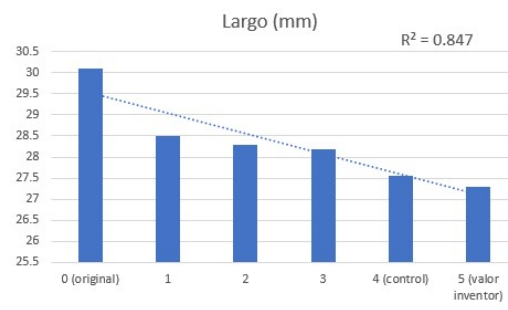


Figura 61: Gráfica de barras largo, MCP dedo I

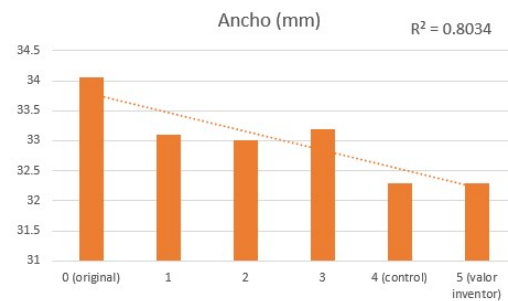


Figura 62: Gráfica de barras ancho, MCP dedo I

Ligamento PIP



Figura 63: Ligamento PIP dedo I

Datos de mediciones:

No. Pieza	Largo (mm)	Ancho (mm)
0 (original)	21.45	31.70
1	20.60	31.60
2	20.50	31.50
3	20.50	31.55
4 (control)	20.20	31.20
5 (valor inventor)	20.00	31.00

Cuadro 6: Parámetros tamaño de PIP 1

Gráficas para realizar análisis de dispersión de los datos:

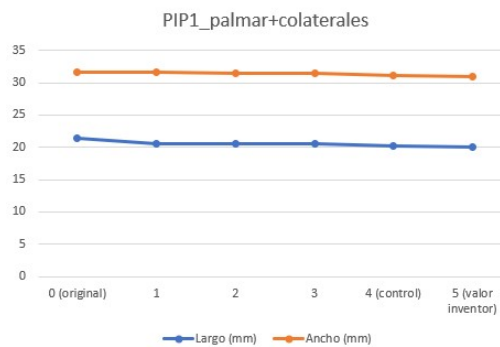


Figura 64: Gráfica de dispersión de largo y ancho, PIP dedo I

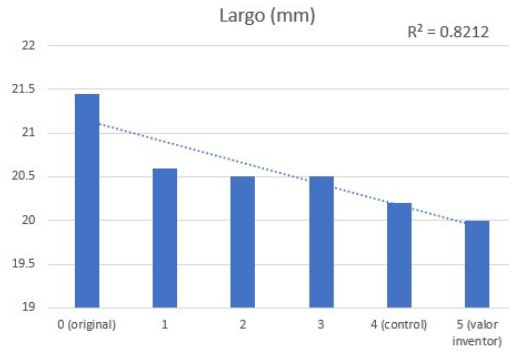


Figura 65: Gráfica de barras largo, PIP dedo I

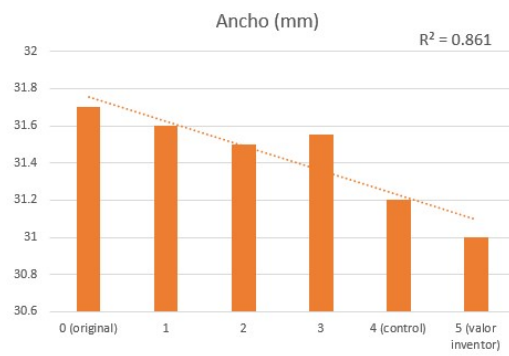


Figura 66: Gráfica de barras ancho, PIP dedo I

Ligamento radial



Figura 67: Ligamento radial dedo I

Datos de mediciones:

No. Pieza	Largo (mm)	Ancho (mm)
0 (original)	31.80	9.75
1	29.89	9.60
2	29.50	9.50
3	29.75	9.50
4 (control)	28.77	9.20
5 (valor inventor)	28.00	9.00

Cuadro 7: Parámetros tamaño de ligamento radial

Gráficas para realizar análisis de dispersión de los datos:

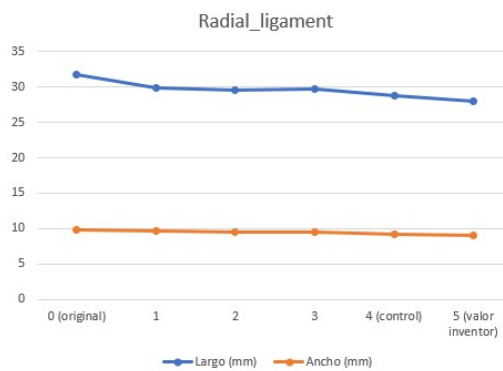


Figura 68: Gráfica de dispersión de largo y ancho, ligamento radial

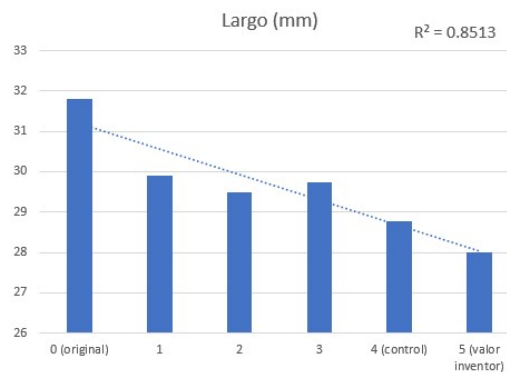


Figura 69: Gráfica de barras largo, ligamento radial

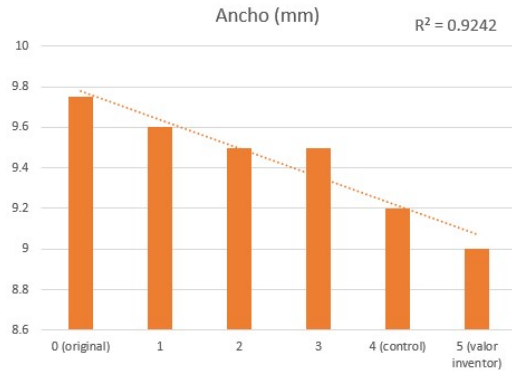


Figura 70: Gráfica de barras ancho, ligamento radial

Ligamento 1 a 2



Figura 71: ligamento dedo I a dedo II

Datos de mediciones:

No. Pieza	Largo (mm)	Ancho (mm)
0 (original)	56.45	52.65
1	55.60	49.55
2	55.50	48.95
3	55.50	49.20
4 (control)	55.20	47.80
5 (valor inventor)	55.00	47.35

Cuadro 8: Parámetros tamaño de ligamento 1 a 2

Gráficas para realizar análisis de dispersión de los datos:

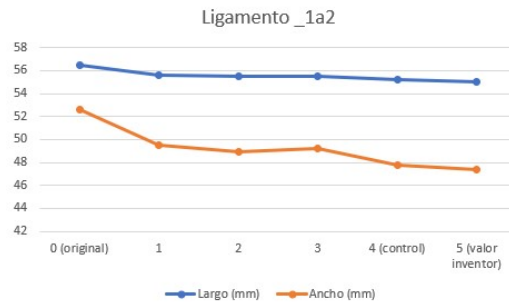


Figura 72: Gráfica de dispersión de largo y ancho, ligamento 1 a 2

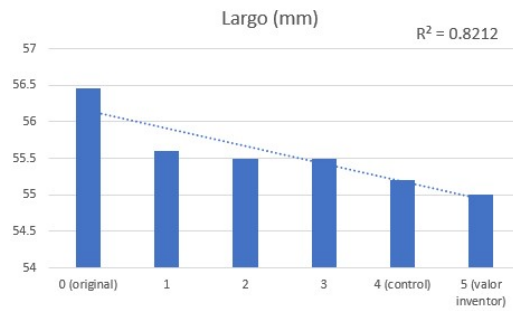


Figura 73: Gráfica de barras largo, ligamento 1 a 2

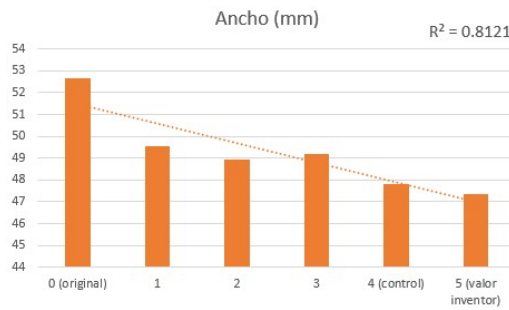


Figura 74: Gráfica de barras ancho, ligamento 1 a 2

Ligamento AOL



Figura 75: Ligamento AOL dedo I

Datos de mediciones:

No. Pieza	Largo (mm)	Ancho (mm)
0 (original)	29.50	15.10
1	28.20	13.90
2	28.00	13.80
3	27.96	13.60
4 (control)	26.20	13.35
5 (valor inventor)	26.00	13.00

Cuadro 9: Parámetros tamaño de AOL

Gráficas para realizar análisis de dispersión de los datos:

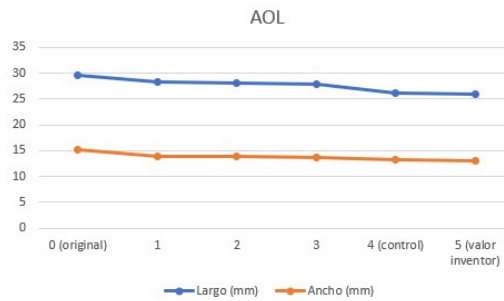


Figura 76: Gráfica de dispersión de largo y ancho, AOL I

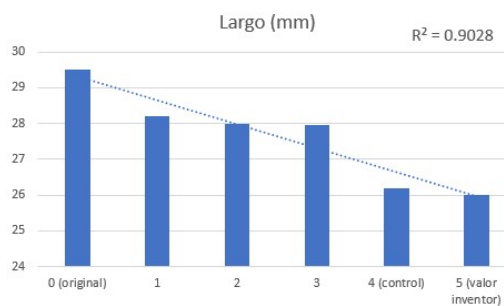


Figura 77: Gráfica de barras largo, AOL I

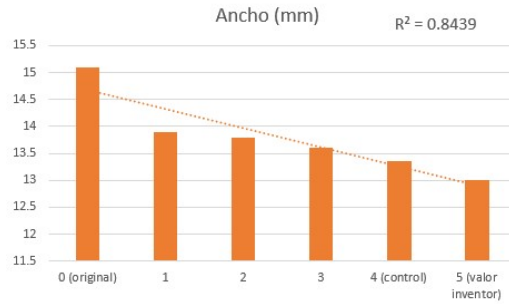


Figura 78: Gráfica de barras ancho, AOL I

Ligamento DRL



Figura 79: Ligamento DRL dedo I

Datos de mediciones:

No. Pieza	Largo (mm)	Ancho (mm)
0 (original)	29.90	14.00
1	28.90	13.65
2	28.60	13.55
3	28.80	13.60
4 (control)	27.31	13.30
5 (valor inventor)	27.00	13.00

Cuadro 10: Parámetros tamaño de DRL

Gráficas para realizar análisis de dispersión de los datos:

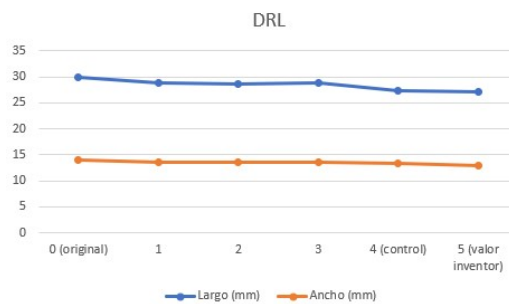


Figura 80: Gráfica de dispersión largo y ancho, DRL dedo I

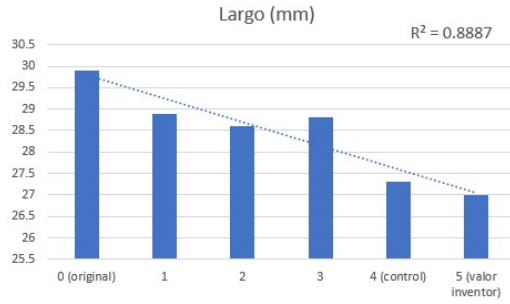


Figura 81: Gráfica de barras largo, DRL dedo I

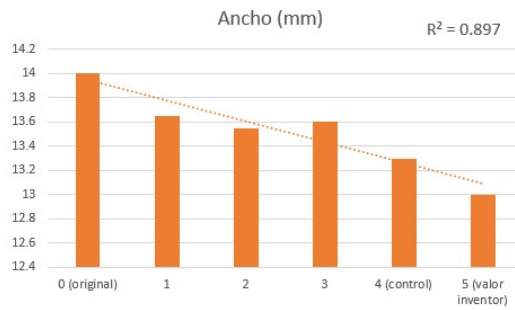


Figura 82: Gráfica de barras ancho, DRL dedo I

9.2.2. Análisis dedo índice (II)

Ligamento extensor

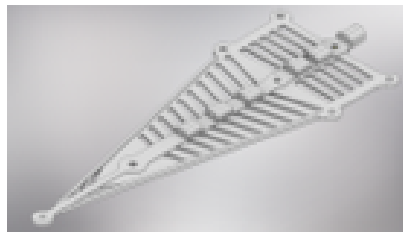


Figura 83: Ligamento extensor dedo II

Datos de mediciones:

No. Pieza	Largo (mm)	Ancho (mm)
0 (original)	116.20	41.97
1	111.32	41.22
2	111.10	41.05
3	111.20	40.93
4 (control)	106.83	40.70
5 (valor inventor)	107.50	40.70

Cuadro 11: Parámetros tamaño de extensor 2

Gráficas para realizar análisis de dispersión de los datos:

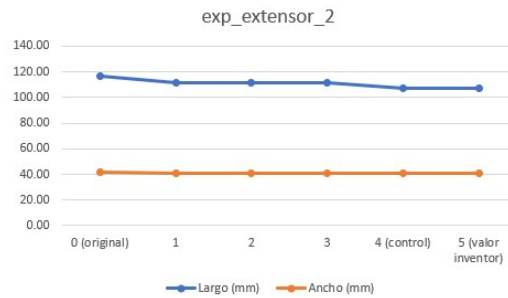


Figura 84: Gráfica de dispersión de largo y ancho, extensor dedo II

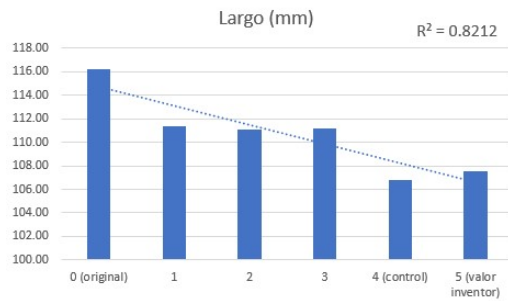


Figura 85: Gráfica de barras largo, extensor dedo II

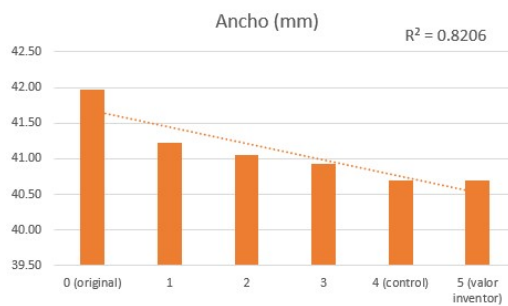


Figura 86: Gráfica de barras ancho, extensor dedo II

Ligamento MCP

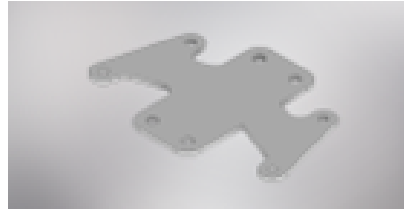


Figura 87: Ligamento MCP dedo II

Datos de mediciones:

No. Pieza	Largo (mm)	Ancho (mm)
0 (original)	30.78	43.75
1	30.70	43.26
2	30.63	42.24
3	30.66	42.25
4 (control)	30.16	42.55
5 (valor inventor)	30.00	42.60

Cuadro 12: Parámetros tamaño de MCP 2

Gráficas para realizar análisis de dispersión de los datos:

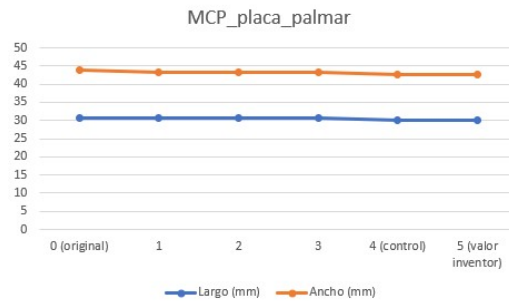


Figura 88: Gráfica de dispersión de largo y ancho, MCP dedo II

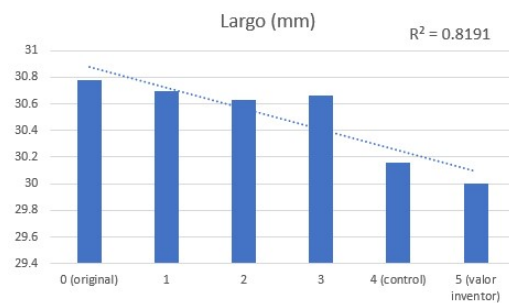


Figura 89: Gráfica de barras largo, MCP dedo II

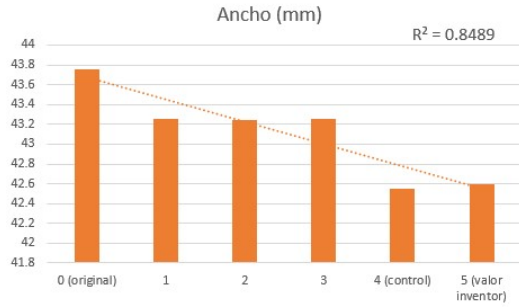


Figura 90: Gráfica de barras ancho, MCP dedo II

Ligamento PIP



Figura 91: Ligamento PIP dedo II

Datos de mediciones:

No. Pieza	Largo (mm)	Ancho (mm)
0 (original)	24.10	38.60
1	23.50	38.30
2	23.44	38.32
3	23.45	38.28
4 (control)	23.28	38.10
5 (valor inventor)	22.50	37.80

Cuadro 13: Parámetros tamaño de PIP 2

Gráficas para realizar análisis de dispersión de los datos:

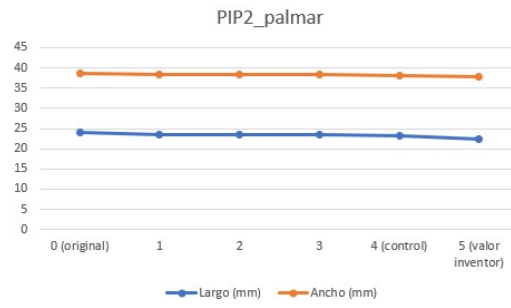


Figura 92: Gráfica de dispersión de largo y ancho, PIP dedo II

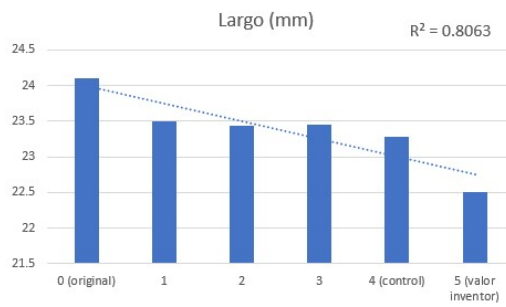


Figura 93: Gráfica de barras largo, PIP dedo II

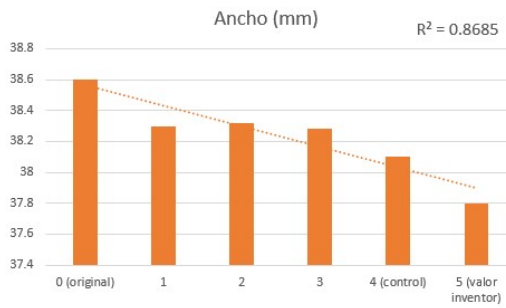


Figura 94: Gráfica de barras ancho, PIP dedo II

Ligamento DIP



Figura 95: Ligamento DIP dedo II

Datos de mediciones:

No. Pieza	Largo (mm)	Ancho (mm)
0 (original)	18.50	25.41
1	17.75	24.70
2	17.82	24.80
3	17.70	24.50
4 (control)	16.83	23.44
5 (valor inventor)	16.50	23.10

Cuadro 14: Parámetros tamaño de DIP 2

Gráficas para realizar análisis de dispersión de los datos:

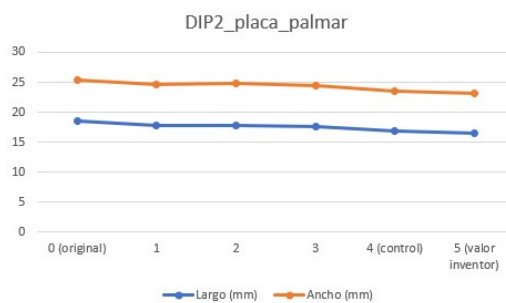


Figura 96: Gráfica de dispersión de largo y ancho, DIP dedo II

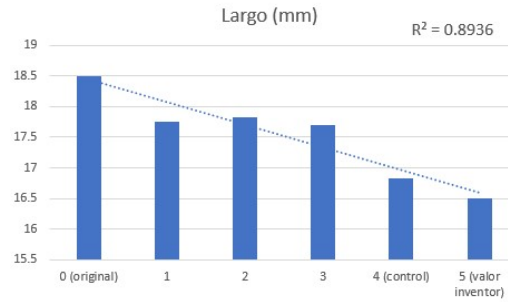


Figura 97: Gráfica de barras largo, DIP dedo II

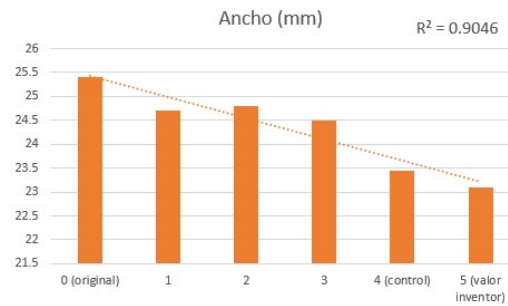


Figura 98: Gráfica de barras ancho, DIP dedo II

9.2.3. Análisis dedo medio (III)

Ligamento extensor



Figura 99: Ligamento extensor dedo III

Datos de mediciones:

No. Pieza	Largo (mm)	Ancho (mm)
0 (original)	133.14	44.42
1	127.45	43.20
2	127.50	43.08
3	127.48	43.14
4 (control)	123.20	40.70
5 (valor inventor)	123.50	37.70

Cuadro 15: Parámetros tamaño de extensor 3

Gráficas para realizar análisis de dispersión de los datos:

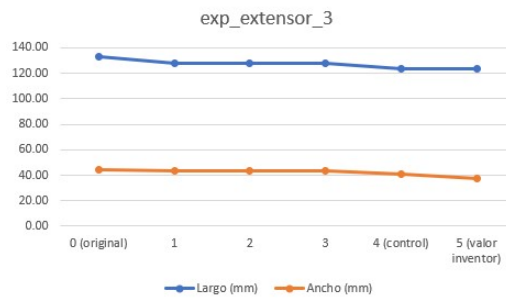


Figura 100: Gráfica de dispersión de largo y ancho, extensor dedo III

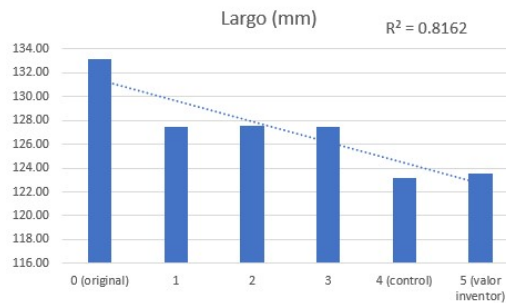


Figura 101: Gráfica de barras largo, extensor dedo III

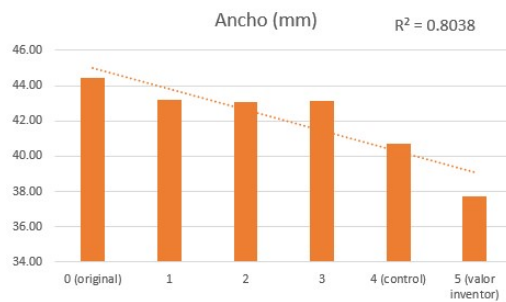


Figura 102: Gráfica de barras ancho, extensor dedo III

Ligamento MCP

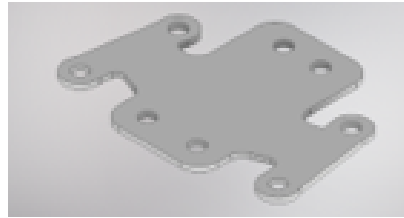


Figura 103: Ligamento MCP dedo III

Datos de mediciones:

No. Pieza	Largo (mm)	Ancho (mm)
0 (original)	29.40	37.50
1	29.30	37.30
2	29.23	37.30
3	29.25	37.27
4 (control)	29.10	37.10
5 (valor inventor)	29.00	37.00

Cuadro 16: Parámetros tamaño de MCP 3

Gráficas para realizar análisis de dispersión de los datos:

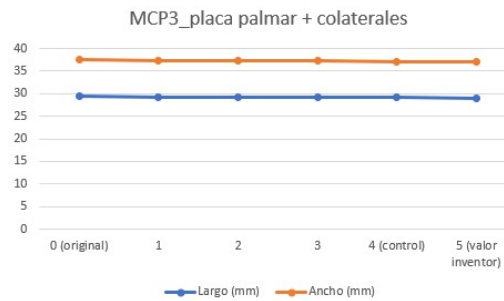


Figura 104: Gráfica de dispersión de largo y ancho, MCP dedo III

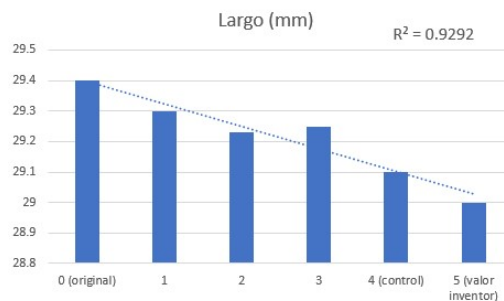


Figura 105: Gráfica de barras largo, MCP dedo III

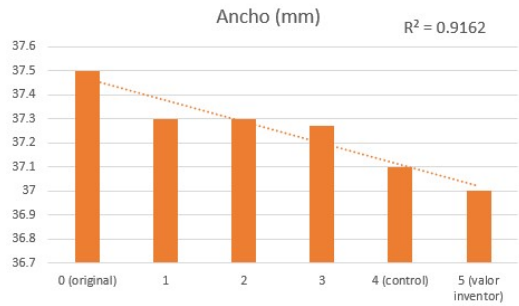


Figura 106: Gráfica de barras ancho, MCP dedo III

Ligamento PIP



Figura 107: Ligamento PIP dedo III

Datos de mediciones:

No. Pieza	Largo (mm)	Ancho (mm)
0 (original)	25.00	35.20
1	24.45	34.4
2	24.42	34.35
3	24.40	34.35
4 (control)	23.70	33.60
5 (valor inventor)	23.60	33.50

Cuadro 17: Parámetros tamaño de PIP 3

Gráficas para realizar análisis de dispersión de los datos:

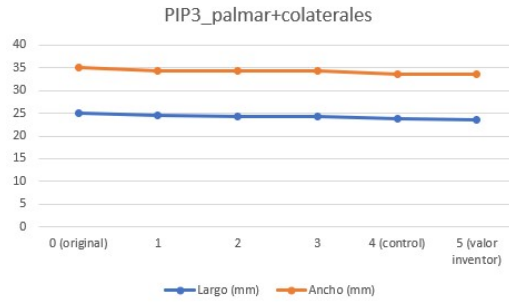


Figura 108: Gráfica de dispersión de largo y ancho, PIP dedo III

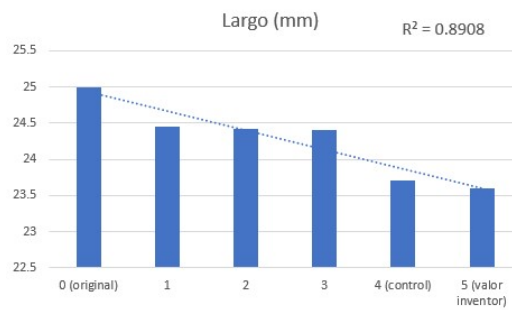


Figura 109: Gráfica de barras largo, PIP dedo III

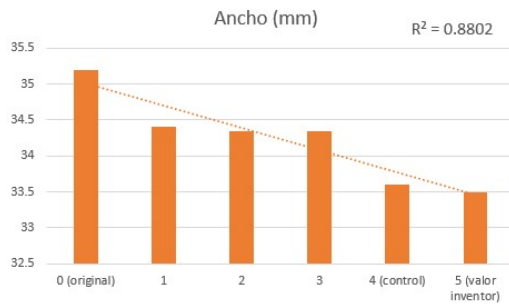


Figura 110: Gráfica de barras ancho, PIP dedo III

Ligamento DIP

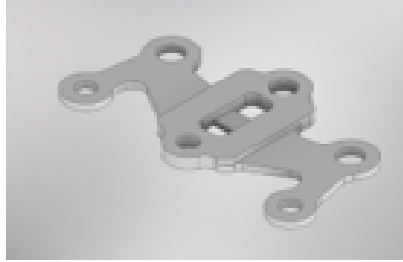


Figura 111: Ligamento DIP dedo III

Datos de mediciones:

No. Pieza	Largo (mm)	Ancho (mm)
0 (original)	15.70	24.30
1	15.40	23.89
2	15.45	23.82
3	15.42	23.85
4 (control)	14.30	22.30
5 (valor inventor)	14.00	22.00

Cuadro 18: Parámetros tamaño de DIP 3

Gráficas para realizar análisis de dispersión de los datos:

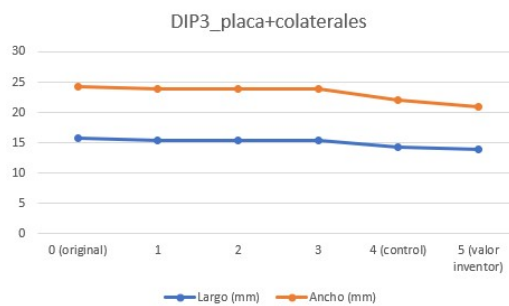


Figura 112: Gráfica de dispersión de largo y ancho, DIP dedo III

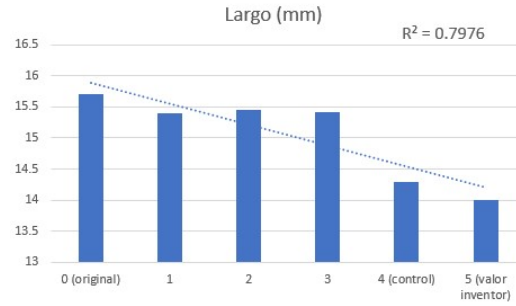


Figura 113: Gráfica de barras largo, DIP dedo III

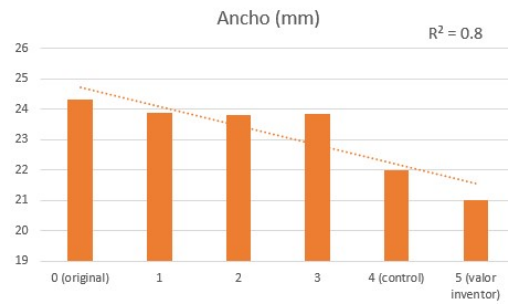


Figura 114: Gráfica de barras ancho, DIP dedo III

9.2.4. Análisis dedo anular (IV)

Ligamento extensor

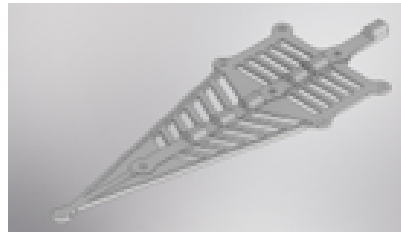


Figura 115: Ligamento extensor dedo IV

Datos de mediciones:

No. Pieza	Largo (mm)	Ancho (mm)
0 (original)	129.48	43.74
1	122.50	42.20
2	122.45	42.25
3	122.47	42.20
4 (control)	116.85	39.90
5 (valor inventor)	116.50	39.80

Cuadro 19: Parámetros tamaño de extensor 4

Gráficas para realizar análisis de dispersión de los datos:

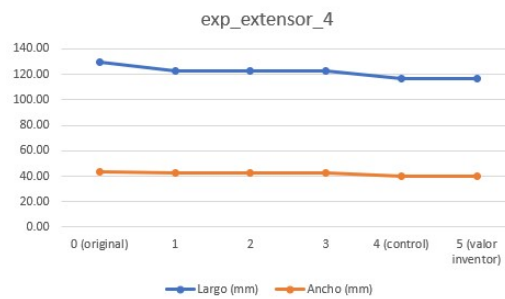


Figura 116: Gráfica de dispersión de largo y ancho, extensor dedo IV

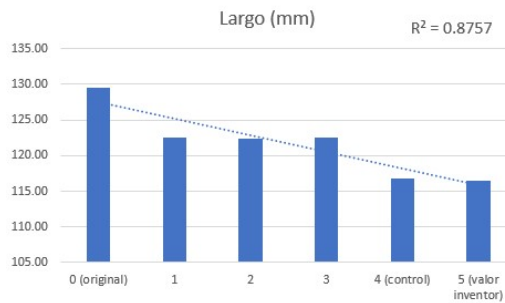


Figura 117: Gráfica de barras largo, extensor dedo IV

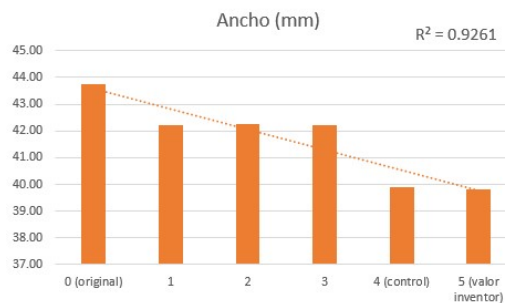


Figura 118: Gráfica de barras ancho, extensor dedo IV

Ligamento MCP



Figura 119: Ligamento MCP dedo IV

Datos de mediciones:

No. Pieza	Largo (mm)	Ancho (mm)
0 (original)	32.00	36.00
1	31.75	35.70
2	31.73	35.30
3	31.72	35.50
4 (control)	31.20	34.20
5 (valor inventor)	31.00	34.00

Cuadro 20: Parámetros tamaño de MPC 4

Gráficas para realizar análisis de dispersión de los datos:

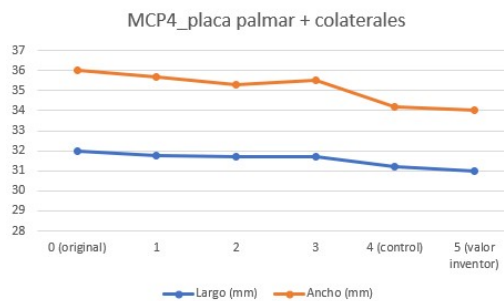


Figura 120: Gráfica de dispersión de largo y ancho, MCP dedo IV

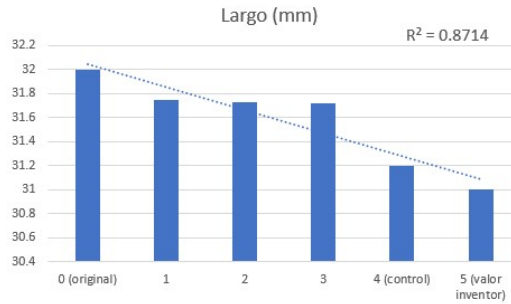


Figura 121: Gráfica de barras largo, MCP dedo IV

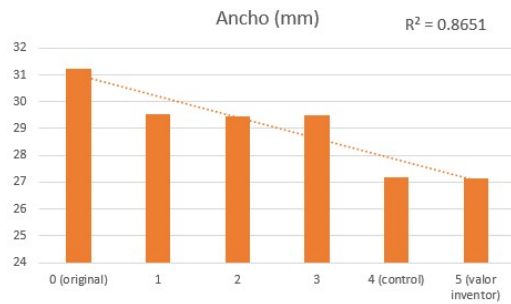


Figura 122: Gráfica de barras ancho, MCP dedo IV

Ligamento PIP



Figura 123: Ligamento PIP dedo IV

Datos de mediciones:

No. Pieza	Largo (mm)	Ancho (mm)
0 (original)	21.44	31.22
1	18.78	29.55
2	18.77	29.45
3	18.80	29.50
4 (control)	17.20	27.20
5 (valor inventor)	17.00	27.16

Cuadro 21: Parámetros tamaño de PIP 4

Gráficas para realizar análisis de dispersión de los datos:

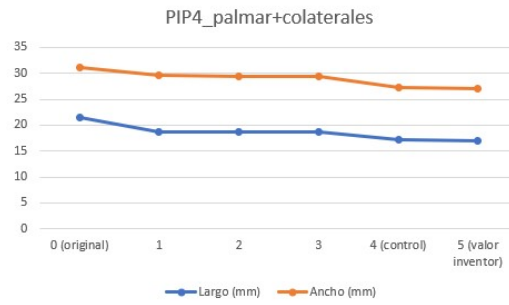


Figura 124: Gráfica de dispersión de largo y ancho, PIP dedo IV

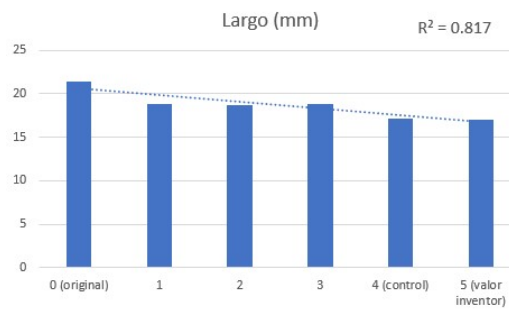


Figura 125: Gráfica de barras largo, PIP dedo IV

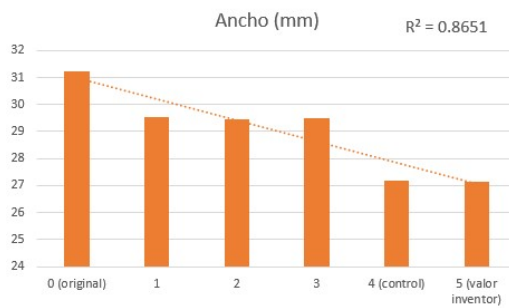


Figura 126: Gráfica de barras ancho, PIP dedo IV

Ligamento DIP

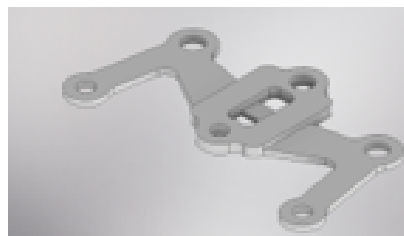


Figura 127: Ligamento DIP dedo IV

Datos de mediciones:

No. Pieza	Largo (mm)	Ancho (mm)
0 (original)	16.30	28.60
1	15.80	27.80
2	15.40	27.30
3	15.30	27.60
4 (control)	14.30	25.60
5 (valor inventor)	14.00	25.00

Cuadro 22: Parámetros tamaño de DIP 4

Gráficas para realizar análisis de dispersión de los datos:

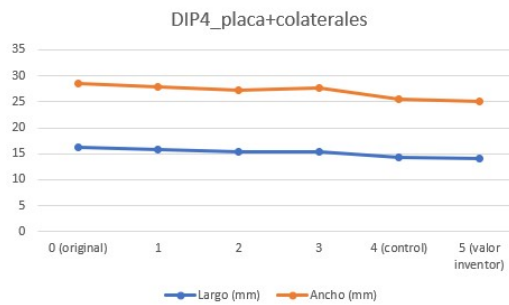


Figura 128: Gráfica de dispersión de largo y ancho, DIP dedo IV

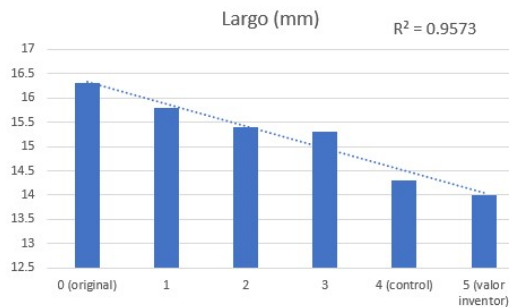


Figura 129: Gráfica de barras largo, DIP dedo IV

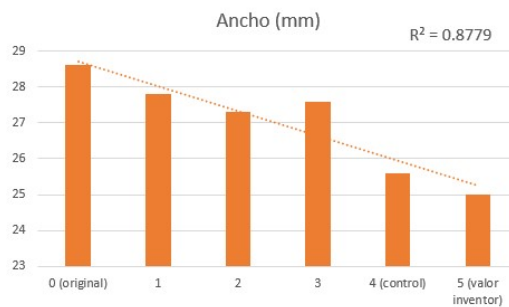


Figura 130: Gráfica de barras ancho, DIP dedo IV

9.2.5. Análisis dedo meñique (V)

Ligamento extensor

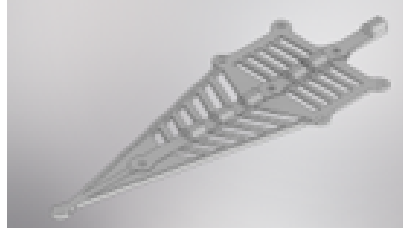


Figura 131: Ligamento extensor dedo V

Datos de mediciones:

No. Pieza	Largo (mm)	Ancho (mm)
0 (original)	101.80	38.53
1	98.94	36.65
2	98.75	36.65
3	98.89	36.60
4 (control)	92.46	34.50
5 (valor inventor)	92.00	34.00

Cuadro 23: Parámetros tamaño de extensor 5

Gráficas para realizar análisis de dispersión de los datos:

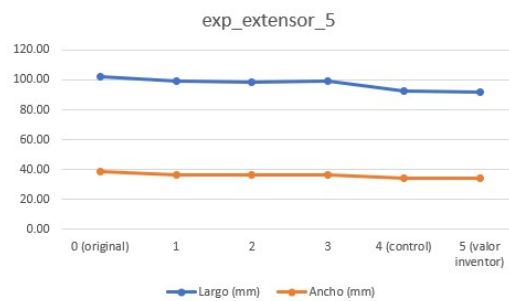


Figura 132: Gráfica de dispersión de largo y ancho, extensor dedo V

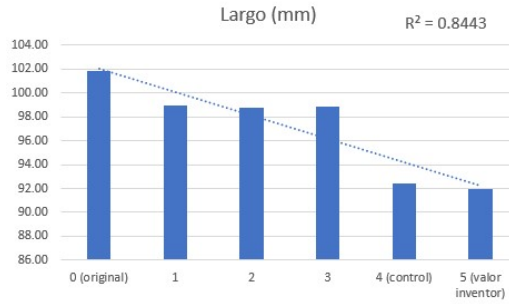


Figura 133: Gráfica de barras largo, extensor dedo V

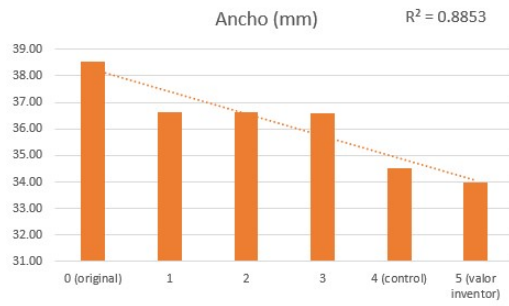


Figura 134: Gráfica de barras ancho, extensor dedo V

Ligamento MCP

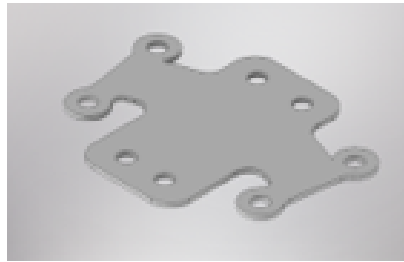


Figura 135: Ligamento MCP dedo V

Datos de mediciones:

No. Pieza	Largo (mm)	Ancho (mm)
0 (original)	30.36	37.41
1	29.45	36.43
2	29.30	36.35
3	29.34	36.40
4 (control)	28.54	35.50
5 (valor inventor)	28.30	35.00

Cuadro 24: Parámetros tamaño de MCP 5

Gráficas para realizar análisis de dispersión de los datos:

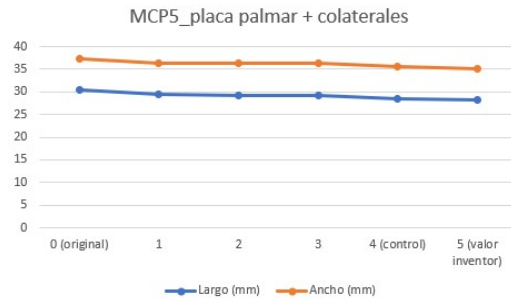


Figura 136: Gráfica de dispersión de largo y ancho, MCP dedo V

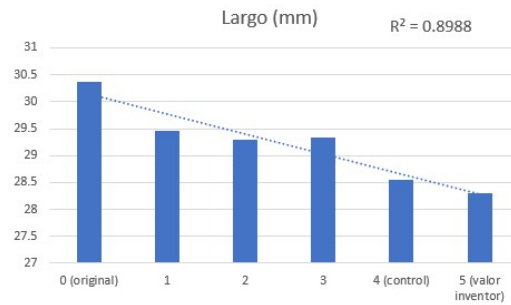


Figura 137: Gráfica de barras largo, MCP dedo V

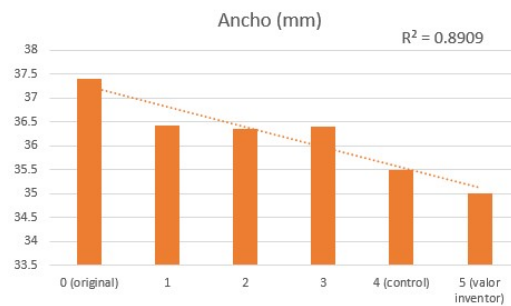


Figura 138: Gráfica de barras ancho, MCP dedo V

Ligamento PIP



Figura 139: Ligamento PIP dedo V

Datos de mediciones:

No. Pieza	Largo (mm)	Ancho (mm)
0 (original)	21.90	33.69
1	21.36	33.29
2	21.25	33.00
3	21.30	33.15
4 (control)	20.5	32.24
5 (valor inventor)	20.00	32.00

Cuadro 25: Parámetros tamaño de PIP 5

Gráficas para realizar análisis de dispersión de los datos:

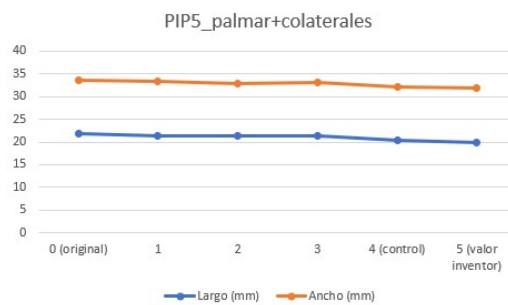


Figura 140: Gráfica de dispersión de largo y ancho, PIP dedo V

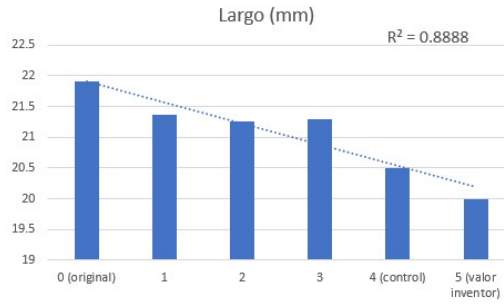


Figura 141: Gráfica de barras largo, PIP dedo V

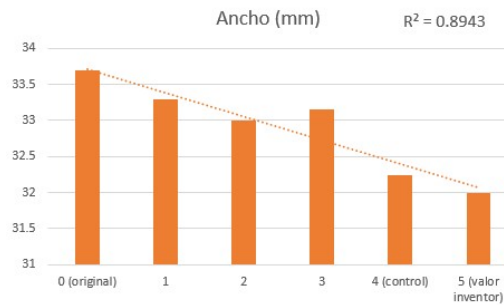


Figura 142: Gráfica de barras ancho, PIP dedo V

Ligamento DIP



Figura 143: Ligamento DIP dedo V

Datos de mediciones:

No. Pieza	Largo (mm)	Ancho (mm)
0 (original)	14.48	18.00
1	13.25	17.80
2	13.30	17.65
3	13.35	17.70
4 (control)	12.00	17.50
5 (valor inventor)	11.60	17.00

Cuadro 26: Parámetros tamaño de DIP 5

Gráficas para realizar análisis de dispersión de los datos:

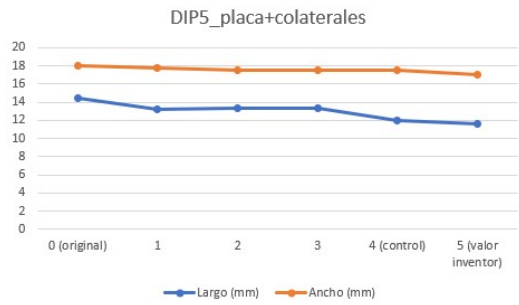


Figura 144: Gráfica de dispersión de largo y ancho, DIP dedo V

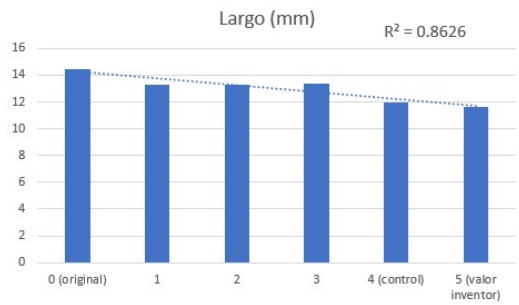


Figura 145: Gráfica de barras largo, DIP dedo V

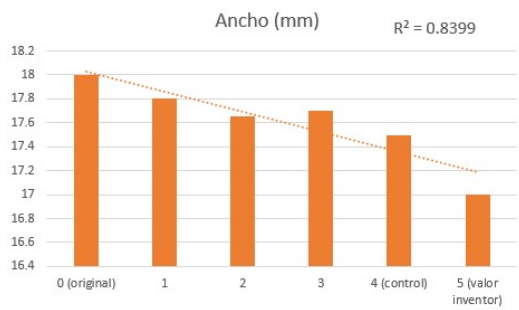


Figura 146: Gráfica de barras ancho, DIP dedo V

9.2.6. Tabla de porcetaje de elongacion

Largo	Ext	MCP	PIP	DIP
indice	8.09%	2.60%	7.11%	12.12%
Medio	7.81%	1.38%	5.93%	12.14%
Anular	11.14%	3.23%	26.12%	16.43%
Meñique	10.65%	7.28%	9.50%	24.83%
Pulgar	9.68%	10.26%	7.25%	NA

Ancho	Ext	MCP	PIP	DIP
indice	3.12%	2.70%	2.12%	10.00%
Medio	17.82%	1.35%	5.07%	10.45%
Anular	9.90%	5.88%	14.95%	14.40%
Meñique	13.32%	6.89%	5.28%	5.88%
Pulgar	13.05%	5.42%	2.26%	NA

Figura 147: Porcentajes de elongación

9.2.7. Discusión de resultados obtenidos de las pruebas:

Después de realizar las pruebas y hacer las mediciones de los dedos se observaron los siguientes aspectos; Primero, que claramente desde las tablas de datos se puede notar que las piezas quedaron ligeramente más grandes que los valores teóricos colocado en Inventor, esto se puede atribuir a la posición en que se colocaron las piezas al ser impresas, también se puede atribuir a el tamaño del extrusor, que es de 0.4 mm, por lo que las paredes de las piezas se aumentan. Otra causa puede ser, el tipo de material utilizado TPE (Elastómeros termoplásticos, por sus siglas en inglés) que al momento de imprimir se tiene que tomar en cuenta que no se puede colocar la retracción en el extrusor haciendo que quede material extra en ciertos movimientos. Dejando de último la más importante, la temperatura a la que se hizo realmente la impresión, esta es la variable que más afecta al momento de hacer una impresión de este tipo.

Ahora ya sabiendo el tamaño de las piezas de control, se comparó con los resultados de las piezas que fueron sometidas a las diferentes pruebas. La primera observación realizada es que claramente todas las piezas, si se estiraron. Todas las muestras se mantienen entre parámetros lógicos, más grandes que la pieza de control, pero más pequeños que las piezas originales que se desconoce el tiempo que estuvieron colocadas en la mano. Ahora hablando puntualmente de los valores, al sacarle una linea de tendencia lineal podemos ver que el R^2 en todas las gráficas es mayor a 0.80, esto nos dice que los datos obtenidos si están representados por la tendencia de la gráfica. Además, de notar que la pieza que más se estiro en cada uno de los dedos es el extensor, esto es lógico porque es una pieza delgada y muy larga que se somete a un gran esfuerzo al momento de la flexión y extensión de cada uno de los dedos¹⁴⁷. En el resto de piezas la observación más notoria es el aumento en el diámetro de los agujeros donde se colocan los tornillos para sujetar las piezas, evidencia en las figuras 148 y 149 en la parte de anexos de este documento.

Por último, otro tema a tomar en cuenta es la anatomía del dedo pulgar; esta se sugiere que se le agranden los canales de los “tendones” laterales del dedo, ya que al momento de estarse realizando las pruebas mecánicas se noto que el ligamento extensor no permitía el desplazamiento correcto, haciendo que fuera más difícil el poder realizar el movimiento de aducción y abducción.

CAPÍTULO 10

Conclusiones

1. Se logró implementar los cuatro movimientos principales a cada dedo, flexión, extensión, aducción y abducción.
2. La posición de las poleas para cada “tendón” se hizo aprovechando la fuerza del motor.
3. Se logró realizar el diseño de un sistema mecánico que permitiera hacer un cambio sencillo entre los grupos de poleas para cada dedo.
4. Se logró crear un código que permitiera establecer los parámetros de movimiento del dedo indicado.
5. Se determinó cuáles son los límites mecánicos para cada uno de los movimientos de los dedos, gracias a las pruebas mecánicas de fatiga realizadas. Donde se puede apreciar que la pieza que más se estiró fue el extensor de cada uno de los dedos y la que menos varios fue el ligamento PIP.

Recomendaciones

1. Reducir el tamaño del modelo con la idea de que se pueda ajustar a poder utilizarse en un brazo humano.
2. Investigar e implementar el diseño de músculos o piel a la mano con la idea de hacerla que se mire lo más real posible.
3. Cambiar el diseño del sistema de poleas, para que pueda ser utilizado en una prótesis real.
4. Modificar el diseño del carpo a que sea biomimético, para lograr que los movimientos de la mano sean más controlados.
5. Investigar nuevas formas de sistemas mecánicos para lograr implementar movimiento a la mano requiriendo menos fuerza.
6. Modificar el diseño de los canales para los tendones de manera que se pueda asegurar que este al momento de incluir músculos no se vea obstruido.
7. Implementar un sistema que tome los impulso nerviosos del brazo para que de esa manera pueda ser controlada la mano.
8. Modificar la transmisión de potencia para la aducción-abducción de los dedos.

-
- [1] K. Norton, “Un breve recorrido por la historia de la protésica,” *University of Iowa*, vol. 17, n.º 7, págs. 1-3, 2007.
 - [2] O. Gálvez, “Optimización de diseño de una mano y muñeca animatronics antropomorfa de la fase tres e implementación de un control interactivo,” 2021.
 - [3] J. Asturias, “Diseño y fabricación de una mano robótica biomimética para ser implementada como prótesis,” 2022.
 - [4] U. de Creighton, “Cyborg Beast,” 2015.
 - [5] S. Malavé, “Diseño y fabricación de un banco de pruebas de fatiga para piezas impresas en 3D,” *Escuela superior politecnica del litoral*, 2019.
 - [6] G. Cárdenas, “Biomimética: tecnología que imita a la naturaleza,” *Ciencia UNAM-DGDC*, 2019.
 - [7] R. Karlin, “Anatomía de la mano,” *San Diego Health*, 2020.
 - [8] J. Vaskovic, “Mano y muñeca,” *KEN HUB*, vol. 2, n.º 1, 2022.
 - [9] J. D. y M. Botte, “Surgical Anatomy of the Hand and Upper Extremity,” *LWW medical book collection*, 2003.
 - [10] F. Palmero, “Articulaciones del Miembro Superior,” *Enfermeria.es*, 2021.
 - [11] Physiopedia, *Extensor Hood Mechanism Hand*, Último acceso el 08 de junio de 2022, 2021.
 - [12] BraceLab, *What Drives Finger Motion*, Último acceso el 08 de junio de 2022, 2020.
 - [13] L. Arias, “Biomecánica y patrones funcionales de la mano,” *UNAL*, vol. 4, n.º 1, 2012.
 - [14] K. Ruiz, *La fabricación digital; el futuro de la industria 4.0*, Último acceso el 08 de junio de 2022, 2020.
 - [15] ZwickRoell, *Ensayo de fatiga: Fatiga de material bajo carga cíclica*, Último acceso el 08 de junio de 2022, 2021.
 - [16] ZwickRoell, *Ensayo de tracción: Tracción de material bajo carga cíclica*, Último acceso el 08 de junio de 2022, 2021.

- [17] J. P. M. Yoel Portuondo Paisan, “La repetibilidad y reproducibilidad en el aseguramiento de la calidad de los procesos de medición,” *Tecnología química*, 2003.

13.1. Diseño mecánico

<https://drive.google.com/drive/u/1/folders/1CNHaCVpBJGYTsJgXqWPN00v6Q7HD976D>

13.2. Código implementación

<https://drive.google.com/drive/u/1/folders/1kHuLlTc1x5USpVKTa-x31auQ3mzzSp4M>

13.3. Documentación

https://drive.google.com/drive/u/1/folders/1-h0puUgppROTERpF41Htp8_BmkypmFZU

13.4. Evidencia pruebas mecánicas



Figura 148: Evidencia de elongación en DPC para el dedo II



Figura 149: Evidencia de elongación en MCP para el dedo III

CAPÍTULO 14

Glosario

Movimientos mecánicos: El movimiento mecánico es cambio de posición de los cuerpos o sistemas físicos respecto de un sistema de referencia al transcurrir el tiempo. 31

Ruteo: enrutamiento, acción de hacer circular un hilo o cable a través de una ruta específica de canales o tubos. 31