

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Optimización de diseño de una mano y muñeca animatrónica antropomórfica de la fase tres e implementación de un control interactivo

Trabajo de graduación presentado por Osman Omar Gálvez Chicó para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2021

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Optimización de diseño de una mano y muñeca animatrónica antropomórfica de la fase tres e implementación de un control interactivo

Trabajo de graduación presentado por Osman Omar Gálvez Chicó para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,


2021

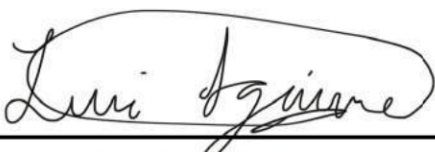
Vo.Bo.:

(f) 
Ing. Kurt Kellner

Tribunal Examinador:

(f) 
Ing. Kurt Kellner

(f) 
Ing. Pablo Mazariegos

(f) 
Ing. Luis Aguirre

Fecha de aprobación: Guatemala, 20 de Enero de 2021.

Este trabajo de graduación lo dedico a...

La Fundación Juan Bautista Gutiérrez por la oportunidad que me brindó otorgándome una beca para poder cumplir mi sueño de ser un profesional, en especial a Doña Isabelita (Q.E.P.D) por creer en mí, por descubrir y motivar mi potencial, mil gracias. A las orientadoras que son parte fundamental en la Fundación, eternamente agradecido por su apoyo incondicional en todo momento.

La Universidad del Valle de Guatemala por darme la bienvenida al mundo tecnológico que ha sido un reto grande y todo lo que este proceso conlleva, brindándome las herramientas necesarias para poderme desenvolver en la vida y mi futuro. A mis catedráticos por su esfuerzo en especial a mi asesor el Ing. Kurt Kellner que me trasmitió sus diversos conocimientos sobre los temas que corresponden a mi profesión.

Mis Padres Francisco Javier Gálvez y Silvia Verónica Chicó por haber forjado la persona que soy, por motivarme a seguir en el proceso, por creer que puede lograr todo lo que me propongo.

Mi hermano Joaquín Gálvez por estar presente en todo momento.

Mi familia en especial a mis abuelos, tíos y tías por su apoyo emocional.

Mis compañeros por haber recorrido este camino junto a mí, por la ayuda brindada en momentos precisos y por todo lo que convivimos.

Prefacio	V
Lista de figuras	XII
Lista de cuadros	XIII
Resumen	XVI
Abstract	XVIII
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
3. Justificación	5
4. Objetivos	7
5. Alcance	9
6. Marco teórico	11
7. Requerimientos	21
7.1. Movimientos	21
7.2. Articulaciones y mecanismo de transmisión	22
7.3. Grados de libertad	23
7.4. Actuadores	24
8. Diseño mecánico	25
8.1. Falanges	25
8.2. Yemas	27
8.3. Palma	28
8.4. Muñeca	31
8.5. Antebrazo	34

8.6. Poleas	40
8.7. Base con ajuste de tensión	41
8.8. Transmisión de movimiento	44
8.9. Cajón	45
9. Prototipos	49
9.1. Prototipo 1	49
9.2. Prototipo 2	51
9.2.1. Antebrazo	51
9.2.2. Cajón	52
10. Validación de diseño	55
10.1. Análisis de elementos finitos	55
10.1.1. Geometría modelada	56
10.1.2. Geometría simplificada	61
11. Diseño electrónico	67
11.1. Manejo de potencia	67
11.2. Controlador	69
11.3. Circuito impreso	70
11.4. Conexión	72
12. Implementación de control	75
12.1. Software de control	75
12.2. Comunicación	76
12.3. Control	77
12.3.1. Control del antebrazo	79
12.3.2. Control de la muñeca	79
12.3.3. Control de los dedos	81
12.3.4. Control en OpenCM 9.04 C	82
12.3.5. Resumen del control	82
13. Conclusiones	85
14. Recomendaciones	87
15. Bibliografía	89
16. Anexos	93
16.1. Códigos utilizados	93
16.1.1. Código principal en Matlab	93
16.1.2. Función cota en Matlab	97
16.1.3. Función ang _ ProdPun en Matlab	98
16.1.4. Código en OpenCM IDE	99
17. Glosario	103

Lista de figuras

1.	Primera mano antropomórfica, Utha/MIT.	11
2.	Pronación y Supinación.	12
3.	a) Desviación radial. b) Desviación cubital. c) Flexión. d) Extensión.	12
4.	Huesos del carpo y metacarpo, visión palmar	13
5.	Falanges de la mano humana.	14
6.	a) Movimiento metacarpo, b) Movimiento falange.	14
7.	Tecnología FFF.	15
8.	Tecnología SLA.	16
9.	Protocolo 1.0 Dynamixel.	17
10.	Protocolo 2.0 Dynamixel.	17
11.	Accionamiento con cable Bowden.	18
12.	Comunicación Half Duplex Asynchronous Serial.	18
13.	Controlador Leap Motion.	19
14.	Bisagra cilíndrica.	22
15.	Articulaciones del dedo medio.	22
16.	Articulaciones del pulgar.	22
17.	Articulaciones de la muñeca y antebrazo.	23
18.	Servomotores utilizados, AX-12A (izquierda), XL-320 (derecha).	24
19.	Fotografías de la mano, a) vista frontal (izquierda), b) vista lateral (derecha).	26
20.	Sólido del dedo índice generado en Fusion 360, vista ortogonal.	26
21.	Bisagra de unión entre falanges.	26
22.	Diseño de los dedos (no a escala).	27
23.	Dedo anular y pulgar.	27
24.	Molde para fabricar las yemas de silicona.	28
25.	Vista de las yemas de silicona colocadas en cuatro dedos.	28
26.	Diseño de la estructura de soporte para la palma y estructura móvil para el movimiento metacarpiano, comparación con la morfología real.	29
27.	a) Unión palma-metacarpo y detalle de tapadera en palma (izquierda), b) detalle de tapadera en metacarpo (derecha).	29
28.	Marco de la palma y metacarpo junto a sus tapaderas.	30
29.	Tapaderas de las palmas, palmar (izquierda) y dorsal (derecha).	30

30.	Tapaderas de las palmas.	30
31.	a) Configuración modular utilizando acople FP04-F3 (izquierda), b) acople FP04-F3 (derecha).	31
32.	a) Ensamble del acople de unión muñeca-mano (izquierda), b) acople FP04-F2 (derecha).	32
33.	Ensamble del acople para el movimiento de desviación cubital-radial.	32
34.	Ensamblaje de servomotores y acople muñeca-mano.	33
35.	a) Base para los servomotores (izquierda), b) ensamble de la muñeca (derecha).	33
36.	Montaje del mecanismo de la muñeca.	34
37.	Sólido generado de la vista frontal y lateral del antebrazo.	34
38.	Pieza superior del antebrazo, a) vista frontal (izquierda), b) vista lateral (derecha).	35
39.	Pieza inferior del antebrazo, a) vista frontal (izquierda) y b) detalle de la cavidad para tuerca (derecha).	35
40.	Vista inferior del antebrazo, a) vista interna (izquierda), b) vista externa (derecha).	36
41.	Base del antebrazo, a) vista superior (izquierda), b) vista inferior (derecha).	36
42.	Base del antebrazo y cojinete axial (no a escala), a) detalle del cojinete axial (izquierda), b) ensamble (derecha).	37
43.	Piezas del antebrazo.	37
44.	Vistas del montaje de las piezas del antebrazo.	38
45.	Vista de los balines dentro del cojinete axial.	38
46.	Acople supinación-pronación a) vista superior (izquierda), b) ensamble en el servomotor AX-12A (derecha).	39
47.	Base para el servomotor a) parte inferior (izquierda), b) parte superior (derecha).	39
48.	Montaje del servomotor, acople y base para generar el movimiento de supinación-pronación del antebrazo.	40
49.	Polea a) parte superior (izquierda), b) parte inferior (derecha).	40
50.	Ensamble de la polea en el eje del servomotor XL-320.	41
51.	Base móvil a) sujeción al servomotor XL-320 (izquierda), b) vista del tornillo hexagonal (derecha).	41
52.	Base fija, vista de los carriles.	42
53.	a) tuerca de ajuste de tensión (izquierda), b) ensamble de la base móvil, una base fija y una tuerca de ajuste.	42
54.	Vistas de la pieza de sujeción para los extremos de los cables bowden.	43
55.	Vistas del ensamble de la base con ajuste de tensión para las falanges.	43
56.	Montaje de las base con ajuste de tensión.	43
57.	Hilo de pesca trenzado de “Dyneema”, marca FIOTOK.	44
58.	Tubo de teflón, marca Allen Tech.	44
59.	Partes resaltadas en azul, a) tapadera de sujeción a la mano animatrónica (izquierda), b) pared para conducir los cables bowden.	45
60.	Vista superior de la plancha inferior del cajón.	46
61.	Vista de la parte interior del espacio inferior y tapadera trasera.	46
62.	Plancha inferior deslizable del espacio superior, a) ensamble (resaltado en azul), b) vista superior.	47
63.	Vista de la parte interior del espacio superior, tapadera trasera y superior.	47
64.	Distribución de las patas de goma en el cajón.	47

65.	División física del movimiento metacarpiano. Extensión (izquierda) y flexión (derecha).	49
66.	Diseño y disposición de la estructura para la palma, con una escala de 1.5 veces el tamaño real.	50
67.	Mecanismo de un cuello robótico.	50
68.	Mecanismo para la muñeca dentro del antebrazo.	51
69.	Vistas del ensamblaje de los dedos, palma, muñeca, antebrazo y base giratoria.	52
70.	Montaje del prototipo fabricado.	52
71.	Caja con diseño Kerf Bent. Vista del sitio web MakerCase.	53
72.	Tapadera frontal del cajón con geometría semicircular.	53
73.	Modificación al cajón. a) tapadera utilizando Kerf Bent (izquierda), b) columnas de carga y angulares para sujeción (derecha).	54
74.	Vista del cajón fabricado en MDF.	54
75.	Detalle de la tapadera frontal usando Kerf Bent.	54
76.	Poses analizadas.	56
77.	Resultado del análisis de la primera pose, geometría modelada.	57
78.	Resultado del análisis de la segunda pose, geometría modelada.	58
79.	Resultado del análisis de la tercera pose, geometría modelada.	59
80.	Resultado del análisis de la cuarta pose, geometría modelada.	60
81.	Resultado del análisis de la quinta pose, geometría modelada.	61
82.	Resultado del análisis de la primera pose, geometría simplificada.	62
83.	Resultado del análisis de la segunda pose, geometría simplificada.	63
84.	Resultado del análisis de la tercera pose, geometría simplificada.	64
85.	Resultado del análisis de la cuarta pose, geometría simplificada.	65
86.	Resultado del análisis de la quinta pose, geometría simplificada.	66
87.	Fuente de alimentación S-250-12.	68
88.	a) Cable de alimentación NEMA 5-15P a IEC C13 (izquierda). b) Conector IEC C14 con switch y fusible integrado (derecha).	68
89.	Convertidor XL4015.	69
90.	Controlador OpenCM9.04 C.	70
91.	Conectores utilizados. a) PRT AK500/2 (izquierda), b) MOLEX 22-03-5035 (centro), c) MOLEX 53253-0370 (derecha).	71
92.	Circuito de distribución.	71
93.	PCB de distribución, vista del ruteo y 3D.	72
94.	Diagrama de conexiones.	73
95.	Vistas del montaje de los módulos y conexión eléctrica.	74
96.	Detección de las juntas, visualizador del Leap Motion SDK.	75
97.	Representación del brazo, visualizador de diagnóstico del Leap Motion SDK.	77
98.	Marco de referencia del sensor Leap Motion.	78
99.	Vectores obtenidos por Leap Motion SDK. Normal y dirección.	78
100.	Ángulos de rotación del antebrazo.	79
101.	Ángulos directores de un vector.	80
102.	Ángulos de rotación de la palma.	80
103.	Producto punto entre vectores 3D.	81
104.	Ángulo de flexión del dedo anular.	81

105. Diagrama de flujo del control en MATLAB.	83
106. Diagrama de flujo del control en OpenCM 9.4 C.	84

Lista de cuadros

1.	Especificaciones mecánicas del PLA	16
2.	Especificaciones físicas y eléctricas de los servomotores	24
3.	Resultado del análisis estático con geometría modelada	56
4.	Resultado del análisis estático con geometría simplificada	62
5.	Necesidades eléctricas de los servomotores	67
6.	Comparación de las especificaciones de los distintos controladores	69
7.	Ancho de pista requerido para la cadena de servomotores AX-12A	72
8.	Ancho de pista requerido para la cadena de servomotores XL-320	72
9.	Descripción de los bloques	73
10.	Descripción de las líneas de conexión entre bloques	74
11.	Calibre de cable necesario para cada línea	74
12.	Movimientos del antebrazo	79
13.	Movimientos de la muñeca	80

El presente trabajo es la continuación de la fase tres del Megaproyecto Animatronics. En la fase anterior se realizó el diseño e implementación de una mano y antebrazo animatrónico antropomorfo. En este trabajo se pretende optimizar el diseño de la mano, muñeca y antebrazo. Manteniendo los movimientos de las falanges e implementado los movimientos de la muñeca y antebrazo.

Utilizando el software Fusion 360 se diseñaron los dedos, palma y antebrazo de forma realista utilizando la proyección de fotografías en planos perpendiculares. Con esto se logró obtener una forma más anatómica, replicando la morfología de mi brazo derecho. Los dedos poseen bisagras en las articulaciones y dos conductos, uno en la parte frontal y otro en la parte dorsal, para conducir el movimiento de flexión y extensión.

Para aumentar la movilidad de la muñeca se utilizaron dos servomotores Dynamixel AX-12A ensamblados en configuración modular. Logrando el movimiento de flexión, extensión, desviación cubital y radial. El movimiento correspondiente al antebrazo, supinación y pronación, se realizó utilizando un servomotor Dynamixel AX-12A.

Para realizar el movimiento de las falanges se utilizó seis servomotores Dynamixel XL-320 acoplados a poleas y ensamblados en una base con ajuste de tensión. Estos utilizan el cable en configuración bowden, por medio de tubos de teflón e hilo de pesca de “Dyneema”, para generar el movimiento de las cinco falanges y el metacarpo del pulgar.

Gracias a la velocidad de actuación de estos servomotores se logró implementar el movimiento fluido de la mano. Con la integración de estos movimientos se alcanzó nueve grados de libertad mejorando el diseño anterior,

La base o cajón se diseñó para fabricarla en MDF utilizando corte láser. Este además de ser estructural y funcional es modular, permitiendo la separación de las partes mecánicas y electrónicas del prototipo.

Validando el ensamblaje se realizó el análisis de elementos finitos usando la geometría modelada y simplificada a las piezas críticas. Se obtuvo que el software tiene limitantes al modelar la geometría de la rosca de los tornillos y presentó resultados falsos. Al utilizar la geometría simplificada se obtuvo esfuerzos realistas, estos fueron menores al límite elástico de los materiales involucrados.

Se diseñó el sistema electrónico necesario para la regulación eléctrica, conversión de voltaje y PCB de distribución de alimentación y datos para los servomotores conectados en cadena.

Finalmente, se diseñó el control electrónico utilizando el sensor de captura de gestos sin contacto Leap Motion. Se presentó un método para procesar la información obtenida por Leap Motion, utilizando Matlab para obtener los ángulos de los dedos, muñeca y antebrazo, y el envío de estos valores por USART al controlador OpenCM9.04 C. Este se encargará de realizar la comunicación por el Bus de datos con los servomotores en cadena utilizando el protocolo half-duplex para la marca Dynamixel.

The present work is the continuance of third phase of the Mega project Animatronics. In the previous phase, the design and implementation of an anthropomorphic animatronic hand and forearm was carried out. Maintaining the movements of the phalanges and implementing the movements of the wrist and forearm. Using the Fusion 360 software, the fingers, palm and forearm were designed in a realistic way using the projection of photographs in perpendicular planes. With this, it was possible to obtain a more anatomical shape, replicating the morphology of my right arm. The fingers have hinges at the joints and two channels, one in the front and the other in the dorsal part, to guide the movement of flexion and extension.

To improve the mobility of the wrist, two Dynamixel AX-12A Servo Motors assembled in a modular configuration were used. Achieving the movement of flexion, extension, ulnar and radial deviation. The movement corresponding to the forearm, supination and pronation was performed using a Dynamixel AX-12A Servo Motor.

Six Dynamixel XL-320 Servo Motors coupled to pulleys and assembled on a base with tension adjustment were used to perform the movement of the phalanges. These use the cable in bowden configuration, through Teflon tubes and “ Dyneema ” fishing line, to generate the movement of the five phalanges and the metacarpus of the thumb.

Thanks to the speed of actuation of these Servo Motors, it was possible to implement the fluid movement of the hand. With the integration of these movements, nine degrees of freedom were achieved, improving the previous design,

The base or case was designed to be made of MDF using laser cutting. This, in addition to being structural and functional, is modular, allowing the separation of the mechanical and electronic parts of the prototype.

Validating the assembly, a finite element analysis was performed using the modeled and simplified geometry of the critical parts. It was found that the software has limitations when modeling the screw thread geometry and presented false results. By using the simplified geometry realistic stresses were obtained, these were less than the elastic limit of the materials involved.

The electronics required for electrical regulation, voltage conversion, and power and data distribution PCB were designed for the daisy-chained Servo Motors.

Finally, electronic control was designed using the Leap Motion non-contact gesture capture sensor. A method was presented to process the information obtained by Leap Motion, using Matlab to obtain the angles of the fingers, wrist and forearm, and the sending of these values by USART to the OpenCM9.04 C controller. This will be in charge of carrying out the communication by the Data Bus with chain servo motors using the half-duplex protocol for the Dynamixel brand.

Se realizó la optimización del diseño de una mano, muñeca y antebrazo animatrónico y la realización del control interactivo de la misma.

Por medio de software CAD se diseñó de forma realista los dedos, palma, muñeca y antebrazo. Dotando a las falanges y metacarpo del pulgar de movimiento de flexión-extensión utilizando seis servomotores. La muñeca de movimiento de flexión-extensión y desviación radial-cubital utilizando dos servomotores. Al antebrazo de movimiento de supinación-pronación utilizando un servomotor. Esto logrando la simulación el movimiento humano.

Además se diseñó una base funcional y estructural para soportar la mano animatrónica y poder alojar al mecanismo para las falanges y la electrónica para el control.

Por medio de cables en la configuración bowden se implementó el mecanismo de accionamiento, este se encargará de transmitir el giro de los servomotores utilizando poleas y tendones a través de conductos hasta las falanges.

Para verificar el funcionamiento del ensamblaje se realizó análisis de elementos finitos a las piezas críticas del prototipo.

El control se realizó utilizando un sensor de gestos sin contacto para promover el control natural e intuitivo de la mano animatrónica antropomórfica.

La necesidad de fabricar una mano proviene de las guerras y enfermedades, inicialmente fueron ideadas cosméticas o pasivas, con cero movimiento o maniobradas manualmente para colocar la pose deseada de agarre, ya que trataban de disimular la pérdida de la extremidad y brindar cierta funcionalidad extra. [1]

El primer avance de una mano robótica controlada por el cuerpo lo presenta la Universidad de Utah, utilizando señales mioeléctricas en dispositivos planares de dos dedos utilizados para agarrar objetos. El avance en las funcionalidades requeridas para el efector final propician el desarrollo de las llamadas manos "multidedos", dotando de mayor destreza a los robots. [1] Esto lleva a una colaboración entre la Universidad Utah y el MIT para crear la primer mano de cuatro dedos con disposición antropomórfica, utilizando cables como tendones accionados por cilindros neumáticos. [2]

La Universidad del Valle de Guatemala ha desarrollado una prótesis biónica en los últimos años. En la fase inicial se diseñó el movimiento de falanges. La siguiente etapa fue la implementación de muñeca y codo. El siguiente paso es la optimización de mecanismos, mejorar la apariencia para hacer que el diseño sea más realista y, por último, desarrollar un sistema de control que permite el fácil e intuitivo manejo de la prótesis. [3]

Los fundamentos que generó la prótesis fueron utilizados en el brazo antropomórfico realizado en la tercera fase del Megaproyecto Animatrónica, este complementaría la construcción del pirata animatrónico. El objetivo de este trabajo es aumentar el valor estético de la mano, muñeca y antebrazo de forma que pueda ser utilizado en exhibiciones. Para poder alcanzar ese objetivo es necesario un nivel de realismo y fluidez alto. [4]

Justificación

Con el avance de la tecnología, nuevos materiales y técnicas de fabricación han ido tomando espacio en el campo de diseño 3D, al nivel de tener una gama de recursos con diferentes funcionalidades y prestaciones.

El desarrollo de animatrónicos en la Universidad de Guatemala ha ido creciendo y se han mejorado los modelos con el transcurso de los años, implementando estos avances en el diseño y fabricación de los mismos. Parte de esta motivación es exponer modelos realistas e interactivos de partes de cuerpo animatrónicas, las cuales puedan aportar un atractivo visual y motivacional para los aspirantes a Ingeniería Mecatrónica, Electrónica y Biomédica.

La replicación de la mano humana es de los proyectos más efectuados en el área de animatrónica ya que es un proceso multidisciplinario, reúne en general a la robótica, mecánica, electrónica, control, programación y diseño CAD, proporcionando el medio oportuno para desarrollar los múltiples conocimientos adquiridos en la carrera, Asimismo proveer un animatrónico capaz de favorecer la mercadotecnia del departamento.

4.1 Objetivo general

Optimizar el diseño de la mano, muñeca y antebrazo animatrónico de la fase tres e implementar un control interactivo

4.2 Objetivos específicos

- Diseñar en un software CAD la forma realista de los dedos, palma, muñeca y antebrazo, proporcionándoles los movimientos de extensión, flexión y rotación requeridos para simular el movimiento humano
- Diseñar en un software CAD una base estructural o cajón que soporte el brazo completo permitiendo realizar demostraciones de su funcionamiento además de ser atractivo visualmente
- Implementar un sistema de conductos y tendones inelásticos para controlar el movimiento de las falanges y un mecanismo que permita los tres principales movimientos de la muñeca
- Realizar análisis de elementos finitos a las piezas críticas del modelo 3d
- Implementar un movimiento fluido e integrar el control electrónico de los dedos, palma, muñeca y antebrazo de la mano animatrónica utilizando un control intuitivo y fácil de usar por medio de la captura de posición y orientación sin contacto

El propósito de este trabajo es optimizar el diseño de una mano, muñeca y antebrazo animatrónico e implementar un control electrónico interactivo.

El diseño de la mano debe ser antropomórfico y mecánicamente funcional a los movimientos seleccionados. Los movimientos seleccionados son de extensión y flexión para las falanges y el movimiento metacarpiano del pulgar; para la muñeca la extensión, flexión, desviación radial y cubital; para el antebrazo pronación y supinación. Esto con el propósito de imitar la versatilidad del movimiento de los dedos, muñeca y antebrazo.

La estética proporcionada debe imitar la morfología de una mano humana, proporcionándole un atractivo visual que anime a la interacción con la mano. Se diseñó pensando en la exhibición, esto regula el funcionamiento a poder sostenerse a si misma y no a soportar cargas. El diseño se ideó para ser liviano y resistente a los esfuerzos generados en su funcionamiento.

El mecanismo encargado del movimiento de las falanges se ideó como un cable bowden, consintiendo en un conducto y dentro de estos tendones inelásticos, estos se controlarán desde la base del diseño. La muñeca consistirá en dos servomotores acoplados y unidos a la mano y el antebrazo, esto permitirá los cuatro movimientos de la muñeca. El movimiento del antebrazo consistirá en un servomotor acoplado a la base y el antebrazo. Los actuadores deberán tener el par de torsión suficiente para proporcionar la maniobrabilidad necesaria para el seguimiento de los movimientos.

Debido a la situación mundial que generó el virus COVID-19 se paralizaron las actividades universitarias. Esto generó el cierre de fronteras y por lo tanto importaciones derivando un atraso a la hora de conseguir los elementos y componentes necesarios para desarrollar el control del prototipo. Por lo tanto se desarrolló un control básico para el manejo electrónico.

CAPÍTULO 6

Marco teórico

La mano es de los mecanismos más complejos debido a la gran cantidad de movimientos posibles además de la precisión de estos, al ser la responsable de la completa manipulación de objetos es uno de los proyectos más populares en la animatrónica. [5]

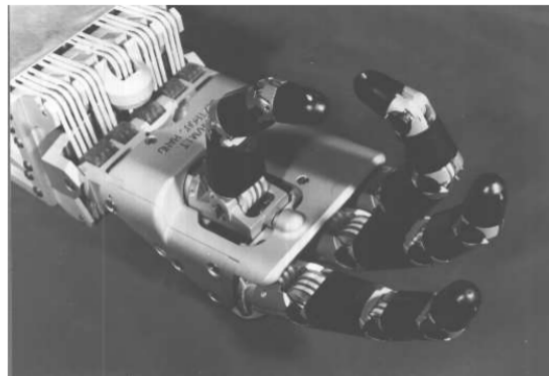


Figura 1: Primera mano antropomórfica, Utha/MIT.

[1]

6.1 Morfología del antebrazo

El antebrazo consta de dos movimientos principales, la supinación que consiste en el giro de la mano en dirección hacia dentro, dejando la palma orientada para arriba u la pronación que consiste en el giro de la mano en dirección hacia afuera, dejando la palma orientada para abajo. [6]

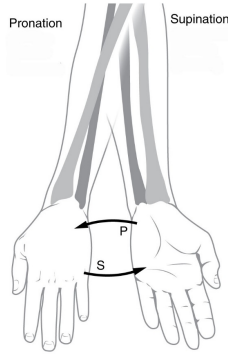


Figura 2: Pronación y Supinación.

[7]

6.2 Morfología de la muñeca

La muñeca consta de cuatro movimientos principales. La desviación radial o abducción donde la mano se inclina hacia el radio, Figura 3a. La desviación cubital o aducción donde la mano se inclina hacia el cúbito, Figura 3b. La flexión donde la palma de la mano se inclina en dirección anterior del antebrazo, Figura 3c. La extensión donde el dorso de la mano se inclina en dirección posterior del antebrazo, Figura 3d. [6]

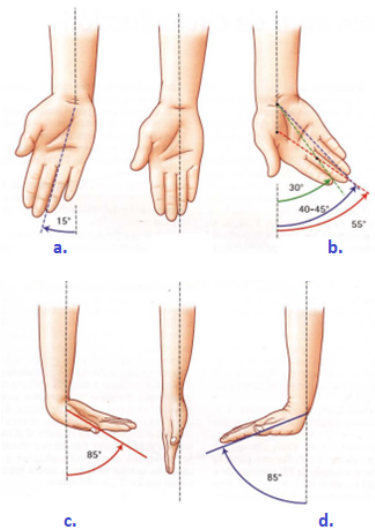


Figura 3: a) Desviación radial. b) Desviación cubital. c) Flexión. d) Extensión.

[8]

6.3 Morfología de la mano

6.3.1 Metacarpo y Carpo

El metacarpo es la parte que se encuentra unida a las falanges y el carpo se une con la muñeca, estos se componen de pequeños huesos, músculos y ligamentos que proporcionan la destreza característica a la mano. [9]

Los huesos del carpo son 8 y se clasifican principalmente en dos grupos. Huesos de la fila proximal (próxima a la muñeca): Escafoides, Semilunar, Piramidal y Pisiforme. Huesos de la fila distal (próximos a los carpos); Trapecio, Trapezoide, Grande, Ganchoso. [9]

Los huesos del metacarpo conforman la estructura de la palma y dorso de la mano, esta se conforma de 5 huesos largos que se relacionan con cada uno de los dedos de la mano, se nombran comenzando por el pulgar como I Metacarpiano y del II al V para los siguientes dedos, índice, medio, anular y meñique. [9]



Figura 4: Huesos del carpo y metacarpo, visión palmar

[8]

6.3.2 Falanges

Las falanges son los huesos que conforman los dedos, todos los dedos poseen 3 falanges, debe de aclararse que el pulgar cuenta únicamente con 2 falanges. Estas se nombran como: falange proximal, falanges medial y falange distal, en donde la falange proximal es la que se encuentra junto con los metacarpos y la falange distal es la que posee la punta del dedo. [3]

La mayoría de los numerosos y complejos músculos y huesos que posee la mano participan en el movimiento activo de esta, se pueden dividir en flexores y extensores. [10] Estos movimientos se enfocarán únicamente en los que permiten el movimiento de los dedos de la mano ya que serán útiles en el desarrollo del prototipo.

Los dedos índice, medio, anular y meñique poseen flexión y extensión a nivel de falange Figura 6b. y el dedo pulgar posee el tipo anterior de movimiento y lo combina con flexión y extensión a nivel metacarpiano Figura 6a.

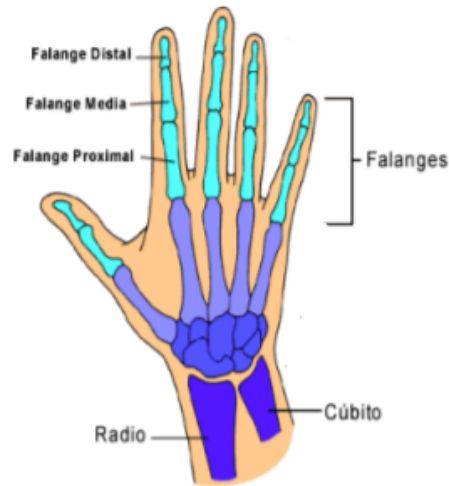


Figura 5: Falanges de la mano humana.

[9]

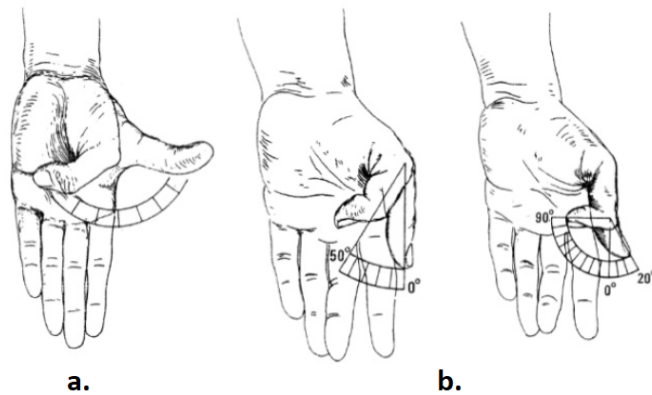


Figura 6: a) Movimiento metacarpo, b) Movimiento falange.

[8]

6.4 Diseño CAD

Para entender el concepto primero se definirán los terminos utilizados.

CAD (Computer Aided Design): Diseño asistido por computador.

CAE (Computer Aided Engineering): Ingeniería asistida por computador.

El concepto CAD actualmente se entiende como la integración del diseño y del análisis (CAD unida al CAE). El diseño CAD es una una manera de crear un modelo del comportamiento de un producto aun antes de que se haya construido. [11]

6.4.1 Fusion 360

Fusion 360 combina el diseño industrial y mecánico en una sola herramienta y adiciona los detalles necesarios para hacer el diseño manufacturable. Es una herramienta de modelación directa que permite explorar los diseños y crear formas orgánicas con comandos, importar archivos en formato OBJ u STL como modelos de malla y crear diseños personalizados tomando como base la superficie de la malla, modelar y ensamblar los diseños completos con la animación de sus movimientos, validar la calidad de su modelo con análisis de curvatura, importar y exportar archivos de diseño. [12]

6.5 Impresión 3D

La impresora 3D permite construir objetos tridimensionales por medio de modelos digitales, fundamentalmente se basan en la fabricación aditiva, esto indica que el objeto se creará mediante la deposición capa por capa permitiendo la tercera dimensión. La dificultad de la geometría que pueden manejar estas impresoras es superior a otros métodos, consecuencia de lo anterior, el tiempo de fabricación se eleva, esto puede generar que para ciertas aplicaciones no sea rentable. [13]

6.5.1 Impresión por extrusión

El método de modelado por filamento/deposición fundido (FFF o FDM), este utiliza la técnica aditiva depositando el material por capas, principalmente de filamentos plásticos embobinados, junto con el control, mecanismos y componentes realiza el desplazamiento en los tres ejes. [13]

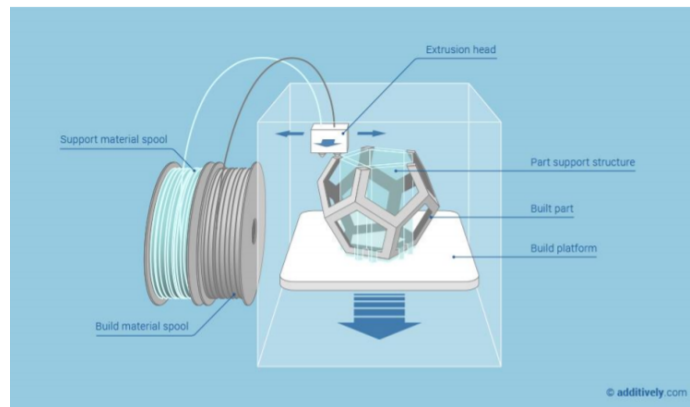


Figura 7: Tecnología FFF.

[13]

6.5.2 Impresión fotoquímica

El método de estereolitografía (SLA) se forma de cuatro partes, un tanque con fotopolímero, una plataforma de adhesión, un láser ultravioleta y el controlador. Este método se basa en el principio del fotopolímero el cual se endurece instantáneamente al exponerse a luz ultravioleta formando una capa de espesor constante, luego la plataforma se desplaza y se expone la siguiente capa con la luz. [13]

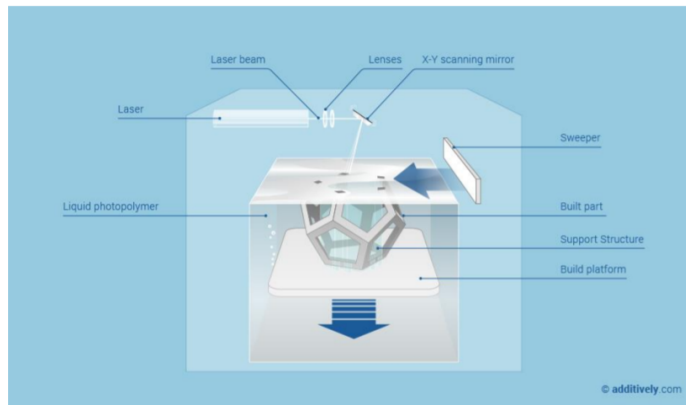


Figura 8: Tecnología SLA.

[13]

6.6 Materiales de impresión 3D

6.6.1 PLA

Se trata de un material derivado del almidón, esto lo clasifica como biodegradable y reciclable. Es un filamento resistente y de los más comunes en la impresión 3D, se encuentra en diámetros de 1.75 y 3 mm, la temperatura de fusión se encuentra en 170 y 200 grados centígrados. Aunque el resultado suele ser rugoso, se puede dar un mejor acabado utilizando epoxi y lija. [14]. Sus propiedades mecánicas pueden observarse en el Cuadro 1.

Propiedades mecánicas	Unidades
Módulo de Young	3.5 Gpa
Módulo de corte	24000 Mpa
Límite elástico	60 Mpa
Resistencia a la tracción	70 Mpa
Densidad	1.25 g/cm ³

Cuadro 1: Especificaciones mecánicas del PLA marca UltraMachine.

[15]

6.6.2 Resina fotocurable

Las resinas fotocurables son el material que utilizan las impresoras del tipo SLA o estereolitográficas para llevar a cabo sus impresiones. Estas resinas son compuestos químicos que se encuentran en formato líquido generalmente en una botella especial. Tienen la propiedad de solidificarse al recibir el contacto directo de luz. Cuando pasa al estado sólido, la pieza adquiere las propiedades del material al cual está imitando, dureza, fragilidad, elasticidad, opacidad, etc. en función de los componentes químicos que lleva la resina. [16]

6.7 Actuadores

6.7.1 Servomotor Dynamixel AX-12A

Es un servomotor capaz de controlar su velocidad, temperatura, posición tensión y carga soportada, este posee un microcontrolador habilitado para manejar 50 comandos en total de lectura y escritura, utiliza el protocolo Half Duplex Asynchronous Serial Communication 1.0. [17]

Header1	Header2	ID	Length	Instruction	Param 1	...	Param N	Checksum
0xFF	0xFF	ID	Length	Instruction	Param 1	...	Param N	CHKSUM

Figura 9: Protocolo 1.0 Dynamixel.

[17]

6.7.2 Servomotor Dynamixel XL-320

Tiene las mismas prestaciones que el anterior, este posee un microcontrolador habilitado para manejar 51 comandos en total de lectura y escritura, utiliza el protocolo Half Duplex Asynchronous Serial Communication 2.0. [18]

Header1	Header2	Header3	Reserved	Packet ID	Length1	Length2	Instruction	Param	Param	Param	CRC1	CRC2
0xFF	0xFF	0xFD	0x00	ID	Len_L	Len_H	Instruction	Param 1	...	Param N	CRC_L	CRC_H

Figura 10: Protocolo 2.0 Dynamixel.

[18]

6.8 Transmisión de movimiento e información

6.8.1 Cable Bowden

En una transmisión de cable bowden, un cable se guía dentro de una funda flexible para el accionamiento remoto de una junta robótica, se aplica fuerza a la junta remota por medio del desplazamiento mecánico entre el cable y la cubierta exterior. Los cables se pueden fijar a las poleas que se encuentran en los actuadores rotacionales. [19]



Figura 11: Accionamiento con cable Bowden.

[19]

6.8.2 Half Duplex Asynchronous Serial Communication

La comunicacional en serie se inicia cuando un dispositivo desea comunicarse enviando datos (un bit a la vez) a través de pulsos digitales a otro dispositivo a una velocidad decidida anteriormente, cuando no se requiere una conexión física para un pulso de reloj de sincronización para ambos dispositivos se llama comunicación en serie asíncrona. El tipo de transmisión Half Duplex se refiere a que solo un dispositivo puede comunicarse a la vez y por ende los dispositivos se turnan para transmitir. [20]

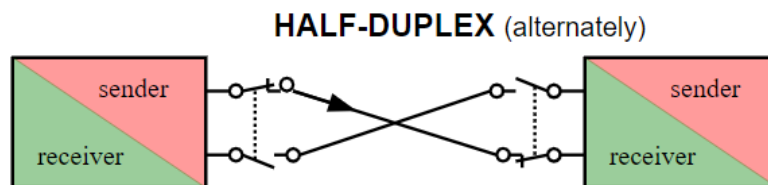


Figura 12: Comunicación Half Duplex Asíncrona Serial.

[21]

6.9 Control gestual sin contacto

El desarrollo de dispositivos que permiten el control por medio de gestos sin contacto, como Leap Motion, han permitido redefinir el tradicional uso del ratón, teclado o pantalla táctil. El funcionamiento se basa en el uso de cámaras infrarrojas para triangular y calcular la distancia a la cual se encuentra el objeto rastreado o usuario, analiza los datos e interpreta la posición y orientación. [22]

Esta tecnología se han aplicado en áreas como control industrial, rehabilitación y control de brazos robóticos, aprovechando la interacción más natural que proporciona el control por gestos sin que sea necesario tocar físicamente los dispositivos. [22]

El seguimiento de gestos se realiza por medio del controlador Leap Motion. Este cuenta con un módulo óptico que captura los movimientos de las manos. La principal ventaja es el control digital natural e intuitivo. [23]

Este dispositivo logra rastrear las manos en una zona interactiva 3D, tiene la capacidad de distinguir 27 elementos de la mano, incluido huesos y articulaciones, además puede determinar su posición incluso cuando estén ocultos por otra parte de la mano. Funciona con dos cámaras infrarrojas de 640x240 píxeles y tres ledes infrarrojos, las cámaras están espaciadas 40mm y funciona a 120Hz. [23]



Figura 13: Controlador Leap Motion.

[23]

7.1. Movimientos

Es necesario comprender los principales movimientos que realiza la mano, muñeca y antebrazo humano. Debido a la complejidad que posee este sistema, ya que tiene múltiples huesos pequeños involucrados en diversos movimientos, se representarán únicamente los que tienen mayor presencia en la interacción común de la mano.

Las falanges que conforman a los dedos, Figura 5, poseen dos movimientos principales, flexión y extensión. Este movimiento se encuentra en los cinco dedos, el pulgar posee movimiento metacarpiano de flexión y extensión. Estos movimientos realizan los múltiples agarres de la mano.

Los movimientos de abducción y aducción de los dedos no serán incluidos debido a que el fin de esta mano es puramente demostrativa.

La muñeca poseerá los cuatro movimientos que la conforman, Figura 3, flexión, extensión, desviación radial y cubital. Esta selección proporcionará una buena aproximación a la movilidad que posee la muñeca humana.

El antebrazo se compone por dos huesos, el radio y cúbito. Estos generan los movimientos de pronación y supinación, Figura 2, que representa el movimiento de rotación de la mano.

7.2. Articulaciones y mecanismo de transmisión

La selección de bisagras cilíndricas como articulaciones está basada en la fase 3 de la mano y antebrazo animatrónico. Las bisagras son de 4 mm de diámetro y 17 mm de altura, Figura 14.



Figura 14: Bisagra cilíndrica.

[4]

Las articulaciones que unen a las falanges distal-medial, medial-proximal y proximal-metacarpo serán constituidas por bisagras cilíndricas, Figura 15. El dedo pulgar posee solamente dos articulaciones en el dedo, distal-proximal y proximal-metacarpo. Pero la inclusión del movimiento a nivel metacarpo le proporciona una articulación más, Figura 16.

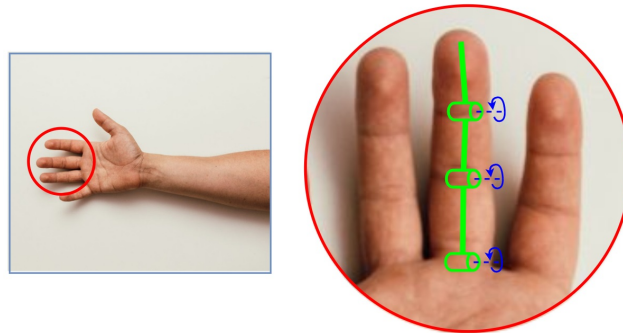


Figura 15: Articulaciones del dedo medio.

Elaboración propia

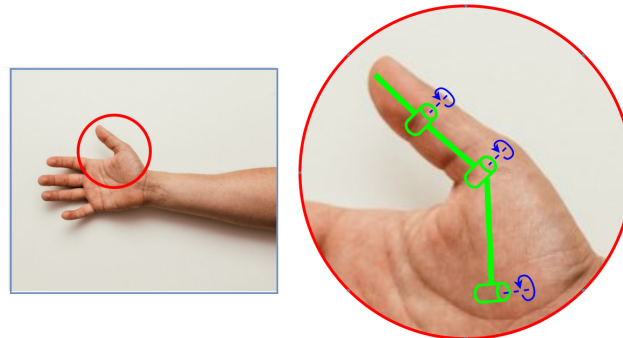


Figura 16: Articulaciones del pulgar.

Elaboración propia

Al poseer dos movimientos, la muñeca será conformada por dos articulaciones. Mecánicamente será constituida por el acople mano muñeca, acople muñeca y acople muñeca antebrazo. Estos tres permitirán los movimientos descritos en el Capítulo 7.1.

El antebrazo tendrá una articulación. Este deberá poseer un acople antebrazo-base el cual permitirá realizar el giro de todo el conjunto.

La unión de muñeca y antebrazo proporcionarán los tres movimientos que se observan en la Figura 17.

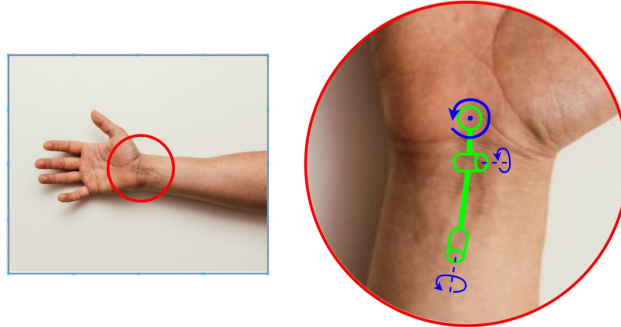


Figura 17: Articulaciones de la muñeca y antebrazo.

Elaboración propia

Como mecanismo de transmisión del movimiento de los servomotores se utilizaron los tendones inelásticos utilizados en la fase 3. Parte de la decisión para mantener este accionamiento fue la flexibilidad y bajo peso. Un cambio importante fue la implementación de estos tendones en configuración de cable bowden. Para estos conductos se utilizó tubería de teflón de 2 mm de diámetro interno por 3 mm de diámetro externo. La naturaleza de este material proporciona una baja fricción al momento de manipular los tendones.

Los servomotores contarán con poleas ensambladas mecánicamente a sus ejes. El movimiento de estas se conducirá por medio del hilo, que funciona como tendón, a través de la tubería y conductos hasta llegar a la punta de los dedos.

7.3. Grados de libertad

A pesar que los dedos están compuestos por tres articulaciones o juntas, a excepción del pulgar, el dedo no posee tres grados de libertad. Dado que cada dedo será controlado por medio de un servomotor las articulaciones serán solo un mecanismo para conducir el movimiento y proporcionar la rigidez del sistema. Se infiere que el movimiento de cada articulación no es independiente.

Por lo tanto se deduce que cada dedo (índice, medio, anular y meñique) posee solamente un grado de libertad; por otra parte el pulgar al tener movimiento en las falanges y en el metacarpo posee dos grados de libertad.

La muñeca posee dos movimientos completamente independientes, esta configuración la faculta de dos grados de libertad. El antebrazo posee únicamente un movimiento de rotación esto lo faculta de un grado de libertad.

En conclusión, la mano posee seis grados de libertad, la muñeca dos y el antebrazo uno. Esto resulta en un sistema con 9 GDL.

7.4. Actuadores

Se conservó la selección de actuadores de la fase anterior. Para controlar la posición de las falanges se utilizarán seis servomotores de la marca Dynamixel modelo XL-320 debido a su versatilidad. Los movimientos de la muñeca y antebrazo serán generados por medio de tres servomotores de la marca Dynamixel modelo AX-12A debido a su alto torque.

Los servomotores de la marca Dynamixel presentan ventajas de control. Poseen la capacidad de definir por medio de registros de memoria los límites de movilidad angular, velocidad y torque máximo. Registros de lectura de posición actual, la carga presente y la dirección en la cual está aplicada, temperatura y voltaje de alimentación. Los servomotores XL-320 poseen un controlador PID integrado configurable. Esto los provee de una comunicación avanzada utilizando el protocolo half-duplex. Y la capacidad de conectarlos en cadena, evitando cableado excesivo.

Servomotor	Carrera (°)	Peso (g)	Torque (N*m)	Velocidad (rpm)	Voltaje (V)
XL-320	0 - 300	16.7	0.39	114	6 - 8.4
AX-12A	0 - 300	54.6	1.5	59	9.0 - 12.0

Cuadro 2: Especificaciones físicas y eléctricas de los servomotores. Comparación de las especificaciones mecánicas, físicas y eléctricas de los servomotores de la marca Dynamixel. [17] y [18]



Figura 18: Servomotores utilizados, AX-12A (izquierda), XL-320 (derecha). [17] y [18]

El modelo de la mano y antebrazo está basado en la mano y antebrazo derecho del autor. Se utilizaron múltiples fotografías para obtener la morfología completa de los dedos, palma, muñeca y antebrazo. Utilizando el software Autodesk Fusion 360 junto con las imágenes se realizaron los modelos 3D para cada pieza que integra el sistema.

8.1. Falanges

Para optimizar el diseño se decidió utilizar dos imágenes, una en vista frontal, Figura 19a, y otra en lateral, Figura 19b. Con la integración y calibración, utilizando marcas blancas de 5cm, de las dos imágenes en dos en planos perpendiculares se pudo obtener una interpolación visual para la forma 3D. Esto permitió obtener las dimensiones de cada dedo, tanto longitudinal, transversal y profundidad.

Se generaron bocetos iniciando desde la base del dedo y cada 10 mm hasta llegar a la punta de este. Por medio de *Splines* y la base que proporcionaba la imagen se generó una forma que se acoplaba mejor a las variaciones de forma de los dedos. Por medio de la función *Loft* se generó la forma transicional entre los bocetos obteniendo sólido mostrado en Figura 20.

Usando los surcos de flexión de los dedos, que indican el punto donde se encuentran las articulaciones, se dividió el sólido por falange distal, medial y proximal. Gracias a los resultados de la fase 3 se decidió utilizar el mismo diseño para unir las falanges y articulaciones, este diseño limitaba físicamente el movimiento de sobre flexión y proporcionaba rigidez al movimiento de las falanges.



Figura 19: Fotografías de la mano, a) vista frontal (izquierda), b) vista lateral (derecha).
Elaboración propia



Figura 20: Sólido del dedo índice generado en Fusion 360, vista ortogonal.
Elaboración propia

Para las articulaciones, conformadas por las bisagras cilíndricas, se decidió que estarían divididas en cuatro partes de la misma longitud, $1/4$ estaría dentro de la falange, $1/2$ estaría expuesto y la longitud restante dentro de la siguiente falange, Figura 21. Se agregó dos conductos por los cuales ingresarían los tendones inelásticos, estos recorren longitudinalmente todo el dedo y terminan en el espacio destinado a la yema, estos tienen un diámetro de 2.5 mm. Se propone que el espacio correspondiente a la yema sea fabricado de silicona. Este material podrá simular el agarre que los dedos poseen, además funcionará como un espacio donde se podrá amarrar el extremo de los tendones.

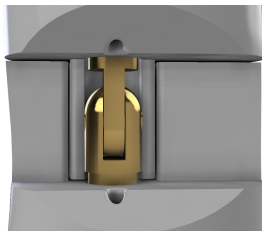


Figura 21: Bisagra de unión entre falanges.

Elaboración propia

Este procedimiento se realizó para las tres falanges de todos los dedos, para el pulgar solamente se realizó para sus dos falanges. El resultado de los cinco dedos se puede observar en la Figura 22. De izquierda a derecha: meñique, anular, medio, índice y pulgar.

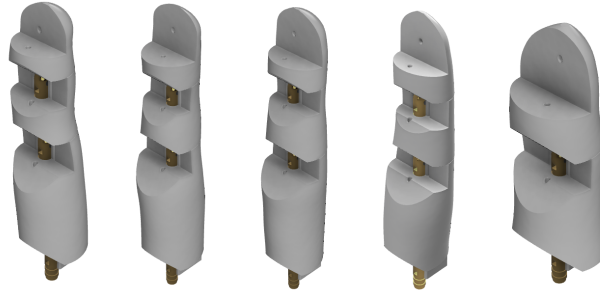


Figura 22: Diseño de los dedos (no a escala).

Elaboración propia

En la Figura 23 se observa el dedo anular y pulgar luego de ser fabricados en resina.



Figura 23: Dedo anular y pulgar.

Elaboración propia

8.2. Yemas

Debido a que el modelo de la mano será de exhibición, se dispone que las yemas de todos los dedos sean de silicona. Esto le proporcionará una superficie flexible en la punta de los dedos útil para sostener objetos livianos.

Gracias a las propiedades moldeables de la silicona se realizó un molde para las yemas de los dedos, Figura 24. Este se conforma de dos piezas para facilitar la extracción y tres agujeros para colocar tornillos para sostener el conjunto durante el secado.



Figura 24: Molde para fabricar las yemas de silicona.

Elaboración propia



Figura 25: Vista de las yemas de silicona colocadas en cuatro dedos.

Elaboración propia

8.3. Palma

Para la palma se realizó el procedimiento de proyección de la cara palmar en un plano, con esto se obtuvo las dimensiones. Debido a que el pulgar posee un movimiento metacarpiano y este se encuentra dentro de lo que se denomina como área palmar, se dividirá en dos partes la estructura de la palma. La primera parte será la que sostenga los dedos índice, medio, anular y meñique. La segunda parte será móvil, esta generará el movimiento del metacarpo y además sostendrá el pulgar.

Para la primera parte se generó un marco con la forma de la palma de 20 mm de profundidad. Este será estructural y posee los conductos que facilitarán el movimiento de los tendones, además que la unión del tubo para la configuración del cable bowden. Esta estructura tendrá el eje que permita el movimiento metacarpiano y el área de sujeción con la muñeca.

Para la segunda parte se utilizó la morfología del pulgar y la palma para mantener la forma natural del movimiento de esta estructura. Además de los conductos y uniones de la tubería para las falanges del pulgar, posee conductos alrededor del eje que la conecta con la primera parte de la palma. Estos conductos se encargarán de generar el movimiento metacarpiano al conducir el movimiento de rotación utilizando los tendones alrededor de este eje.

En la Figura 26 se observa de color verde la primera parte de la palma (estructura) y de color azul la segunda parte (metacarpo), que conforma la parte móvil de la muñeca. Estas dos estructuras están unidas por un eje de rotación. El eje está conformado por un tornillo M4x60 mm con su respectiva tuerca.

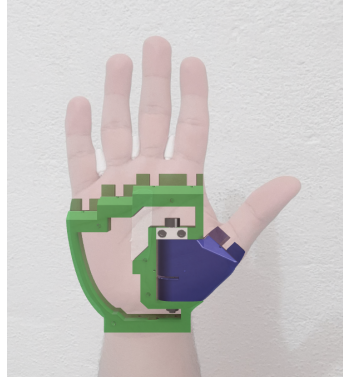


Figura 26: Diseño de la estructura de soporte para la palma y estructura móvil para el movimiento metacarpiano, comparación con la morfología real.

Elaboración propia

Para facilitar la inserción del eje y el metacarpo, la estructura de la palma posee una tapadera con dos agujeros para tornillos M3x8 mm y dos espacios para insertar las tuercas de cada tornillo, Figura 27a. La estructura del metacarpo posee una tapadera con un agujero para tornillo M3x8 mm. Este espacio será de utilidad para conducir los tendones dentro de la pieza y realizar los nudos en los extremos, Figura 27b.

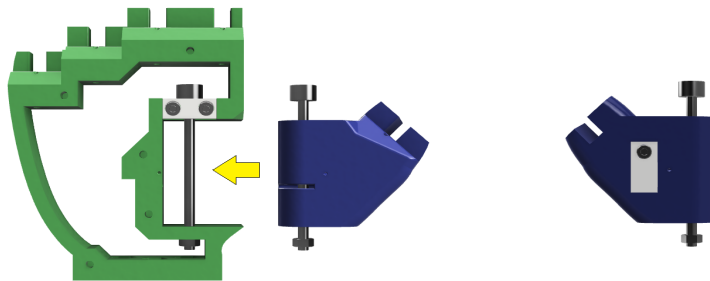


Figura 27: a) Unión palma-metacarpo y detalle de tapadera en palma (izquierda),
b) detalle de tapadera en metacarpo (derecha).

Elaboración propia

En la Figura 28 se observa el marco de la palma y el metacarpo junto a sus tapaderas emulando la imagen anterior. Piezas fabricadas en PLA.

Con el fin de cerrar la estructura de la muñeca se diseñaron tapaderas para ambos lados del marco de la palma. Para lograr la “suavidad” en la superficie de la palma se recurrió a la implementación de superficies, estas recrean la morfología de la eminencia hipotenar y hueco central, además de los nudillos, Figura 29.

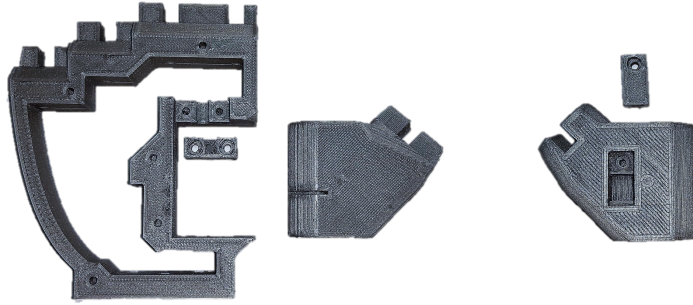


Figura 28: Marco de la palma y metacarpo junto a sus tapaderas.

Elaboración propia

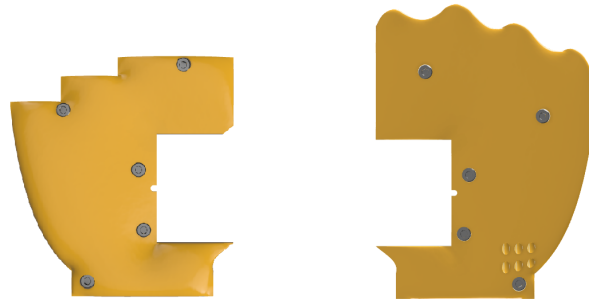


Figura 29: Tapaderas de las palmas, palmar (izquierda) y dorsal (derecha).

Elaboración propia

Para unir las tapaderas de las palmas con la parte estructural de esta se utilizaron tornillos M3x8 mm. Debido a que los tubos para los seis cables bowden no pasarán dentro de la estructura de la muñeca, se realizaron seis agujeros en la parte inferior del dorso de la palma. Estos agujeros sostendrán los tubos y los mantendrán en un conjunto para facilitar el direccionamiento a la estructura del antebrazo.

En la Figura 30 se observan las tapaderas que emulan la palma y el dorso de la mano. Piezas fabricadas en PLA.

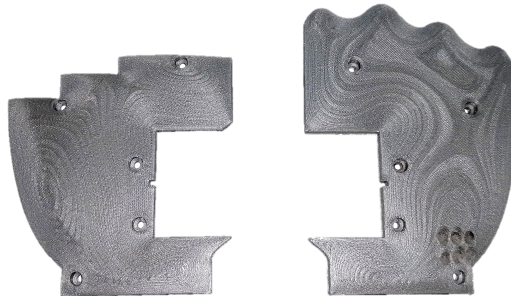


Figura 30: Tapaderas de las palmas.

Elaboración propia

8.4. Muñeca

La muñeca posee el movimiento flexión-extensión y desviación cubital-radial, esta combinación se representó por medio de dos servomotores AX-12A. Estos se conectaron en configuración modular, Figura 31a. Se utilizó el acople FP04-F3, este está incluido por Dynamixel en la compra del servomotor, Figura 31b. Estos se unirán utilizando los tornillos M2x6 mm incluidos con el servomotor.

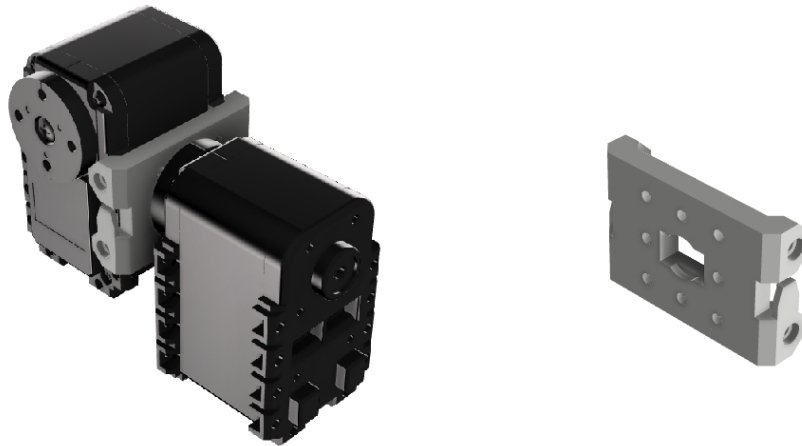


Figura 31: a) Configuración modular utilizando acople FP04-F3 (izquierda),
b) acople FP04-F3 (derecha).

Elaboración propia

Ya que la configuración modular y el tamaño de los servomotores generaban un excedente de volumen, obstaculizando diseñarlo completamente dentro del antebrazo, se determinó que el excedente estará en la parte dorsal del brazo. Esto permite conservar el diseño antropomórfico visto frontalmente además de mantener la movilidad necesaria.

La unión entre la mano y la muñeca se realizó por medio de un acople inspirado en el incluido por Dynamixel, FP04-02 Figura 32b. Se utilizará las piezas BPF-BU y BPF-WA incluidas con el servomotor para sostener en la parte trasera al acople. Este acople posee tres agujeros en los cuales se introducirán tornillos M3x12 mm, en la parte interna de la palma se diseñó el espacio para tres tuercas M3 las cuales producirán la fuerte sujeción entre las dos partes, Figura 32a. La unión del acople con el servomotor se realizó utilizando los tornillos M2x6 mm incluidos. El acople junto con el servomotor serán los encargados de generar el movimiento de flexión-extensión.

Simétrico al acople FP04-F3 se diseñó un acople que conserva el eje de rotación para el servomotor que genera el movimiento de desviación cubital-radial. Un tornillo de M3X12 mm atravesará la pieza para la sujeción con la base de la muñeca, Figura 33. Este acople se une mecánicamente al servomotor utilizando los tornillos M2x6 mm incluidos.

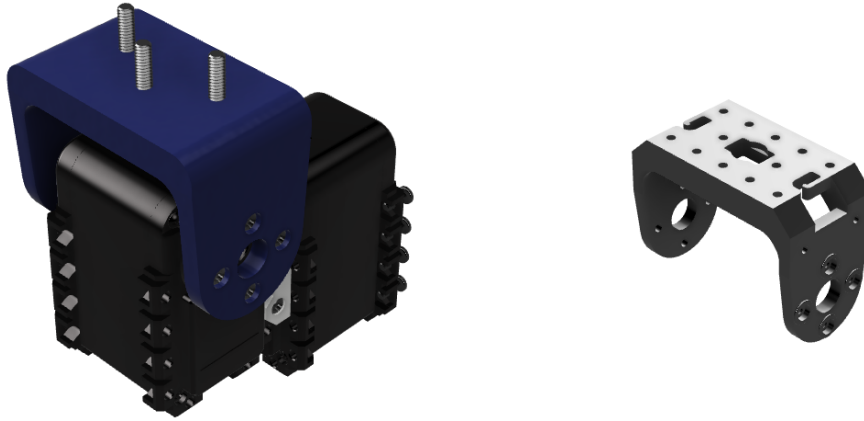


Figura 32: a) Ensamble del acople de unión muñeca-mano (izquierda), b) acople FP04-F2 (derecha).
Elaboración propia



Figura 33: Ensamble del acople para el movimiento de desviación cubital-radial.
Elaboración propia

En la Figura 34 se observa el acople de unión muñeca-mano y el montaje de los servomotores en configuración modular.

Se diseñó una base para la configuración modular. Esta tendrá tres funciones: sostener los dos servomotores, permitir el movimiento de desviación cubital-radial y acoplarse mecánicamente al antebrazo. De manera que el peso que sostendrá el servomotor responsable de la flexión-extensión no se apoye completamente en el segundo servomotor.

La base posee agujeros para utilizar los tornillos M2x6 mm como sujeción al servomotor. En el extremo opuesto posee un cojinete SKF 626-RS y un barril de poste de unión. Esta configuración cumple las dos primeras funciones que se requiere para la base. En la parte inferior de la base se encuentran tres agujeros para utilizar tornillos M3x12 mm y unir la base de la muñeca con el antebrazo. Figura 35a.



Figura 34: Ensamblaje de servomotores y acople muñeca-mano.
Elaboración propia

En la Figura 35b, puede observarse el ensamblaje en Fusion 360 de todas las piezas de la muñeca junto a los tornillos utilizados. En la Figura 36 se observa una vista superior de la base para los servomotores y el montaje del mecanismo de muñeca.

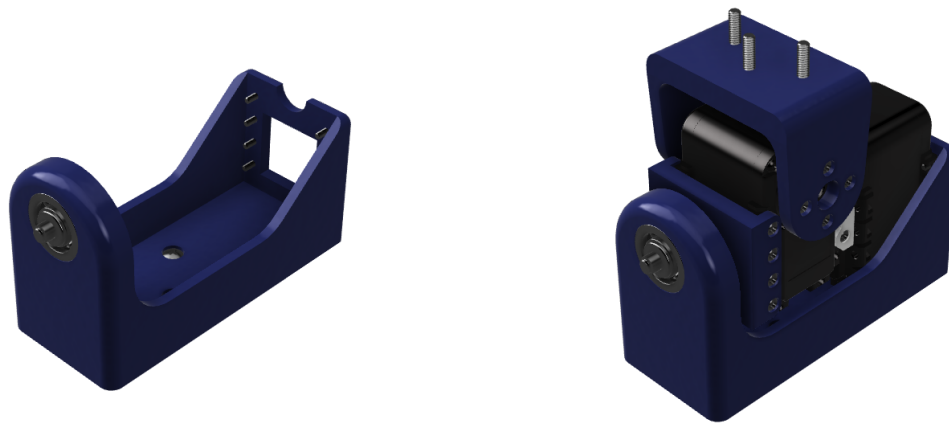


Figura 35: a) Base para los servomotores (izquierda), b) ensamble de la muñeca (derecha).
Elaboración propia

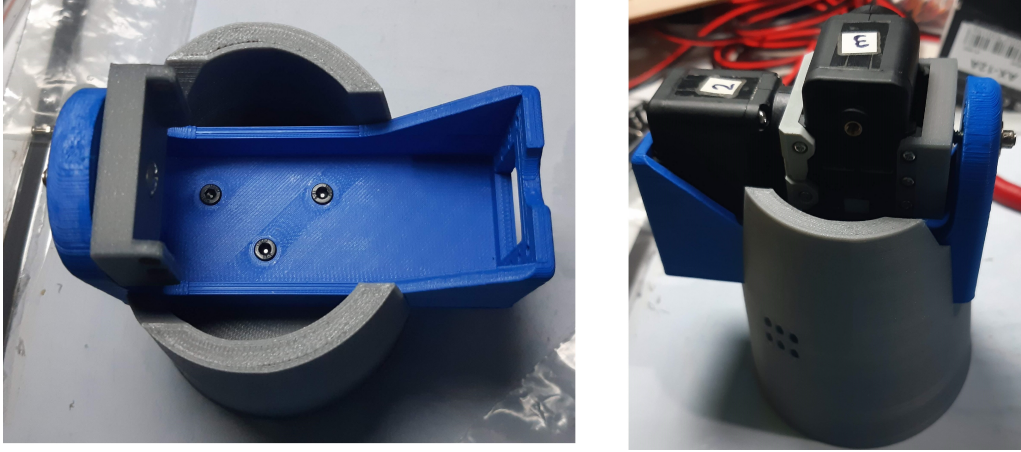


Figura 36: Montaje del mecanismo de la muñeca.

Elaboración propia

8.5. Antebrazo

El proceso de diseño del antebrazo fue similar al de los dedos, se utilizaron proyecciones de fotografías y *Splines* para capturar la geometría del antebrazo, Figura 37. Luego se procedió a vaciarlo dejando una cascarón de 5 mm de ancho.

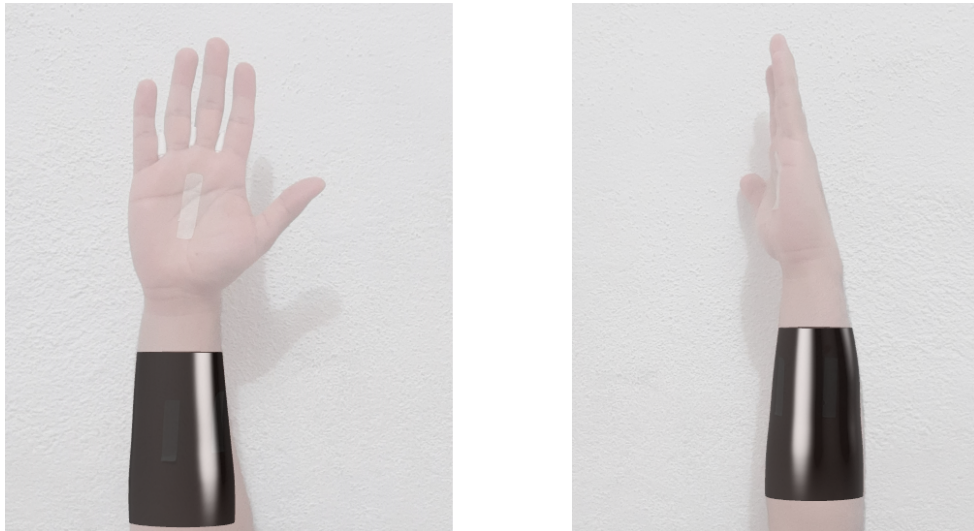


Figura 37: Sólido generado de la vista frontal y lateral del antebrazo.

Elaboración propia

Procurando simplificar el diseño e impresión del antebrazo se determinó realizarlo en dos partes. Parte superior, únicamente con la sujeción para la muñeca. Parte inferior, sujeción con la base y responsable del acople con el servomotor que genera el movimiento de pronación y supinación.

Para la parte superior se recortó una porción de la estructura frontal y trasera del antebrazo. Este espacio posee una pared horizontal base y en ella la estructura para colocar tres tuercas M3 para los tornillos de la muñeca, Figura 38a. En la parte trasera se encuentran seis agujeros, estos sostendrán y conducirán los tubos para la configuración de cable bowden, Figura 38b. En la parte inferior se realizaron dos agujeros para tornillos M3x8 mm, estos sujetan la pieza inferior con la superior.



Figura 38: Pieza superior del antebrazo, a) vista frontal (izquierda), b) vista lateral (derecha).
Elaboración propia

La parte inferior del antebrazo posee una pestaña interior, esta actuará como acople de posición y forma con la parte superior. En la parte superior de esta pieza se colocó un espacio para cada tuerca M3, esta combinación logrará un ajuste sólido, Figura 39b.



Figura 39: Pieza inferior del antebrazo, a) vista frontal (izquierda) y
b) detalle de la cavidad para tuerca (derecha).

Elaboración propia

La pieza inferior que compone al antebrazo será la encargada de recibir el movimiento de giro proporcionado por un servomotor en el cajón. Este movimiento será el de pronación y supinación. Para conectar el eje del servomotor con el antebrazo se utilizó un tornillo hexagonal de 3/8x2 pulgadas. En la parte inferior de esta pieza se realizó un recorte semicircular, en esta parte pasará los seis cables bowden, Figura 40a.

Ya que el peso de todo el brazo debe descansar sobre la base y además poder girar libremente, se procedió a implementar un cojinete axial. En la parte inferior del antebrazo se realizó un carril por el cual podrán rodar balines de 4.5 mm, imitando la construcción del cojinete anteriormente mencionado, Figura 40b.

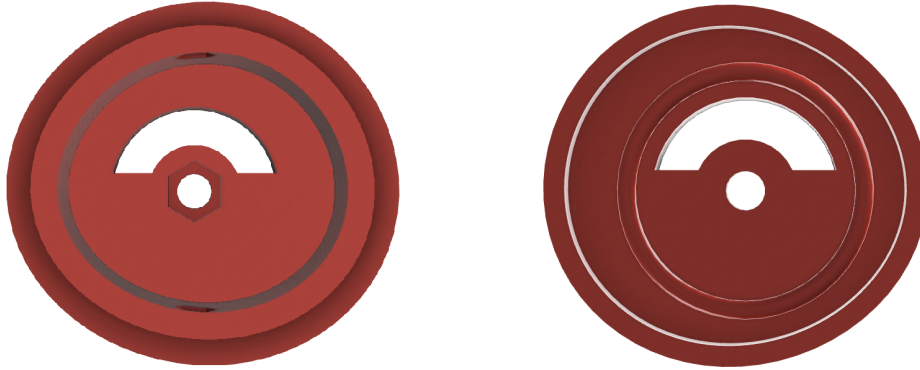


Figura 40: Vista inferior del antebrazo, a) vista interna (izquierda), b) vista externa (derecha).
Elaboración propia

El ensamblaje de la mano, muñeca y antebrazo descansará sobre una base circular. Esta base retendrá los balines, posee agujeros guía para los tubos del cable bowden y tendrá agujeros para colocar tornillos M3x8 mm y sujetar la pieza al cajón, Figura 41a. En la parte inferior de esta pieza se acoplará una igual a la forma inferior del antebrazo, es decir, donde se encuentran los carriles para los balines, Figura 41b.

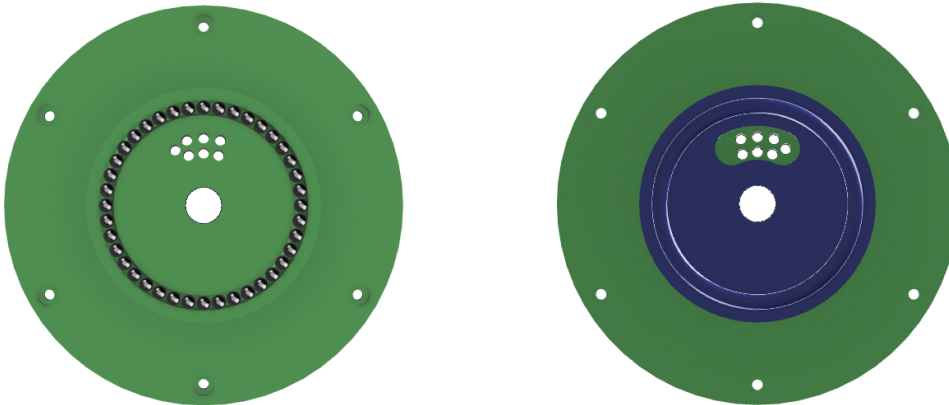


Figura 41: Base del antebrazo, a) vista superior (izquierda), b) vista inferior (derecha).
Elaboración propia

Para cerrar esta agrupación de piezas que conforman el cojinete, se diseñó la última tapadera inferior. Esta será la que, por medio de una tuerca y roldana, sujetará el ensamblaje permitiendo un deslizamiento fluido. Generando un “emparedado” sólido y la base móvil de toda la mano animatrónica. En la sección del tornillo hexagonal se colocará una tuerca de unión, esta encajará en el acople que estará en el eje del servomotor, Figura 42. En total para el cojinete axial se deberán utilizar 80 balines (40 en cada cara) de 4.5 mm.

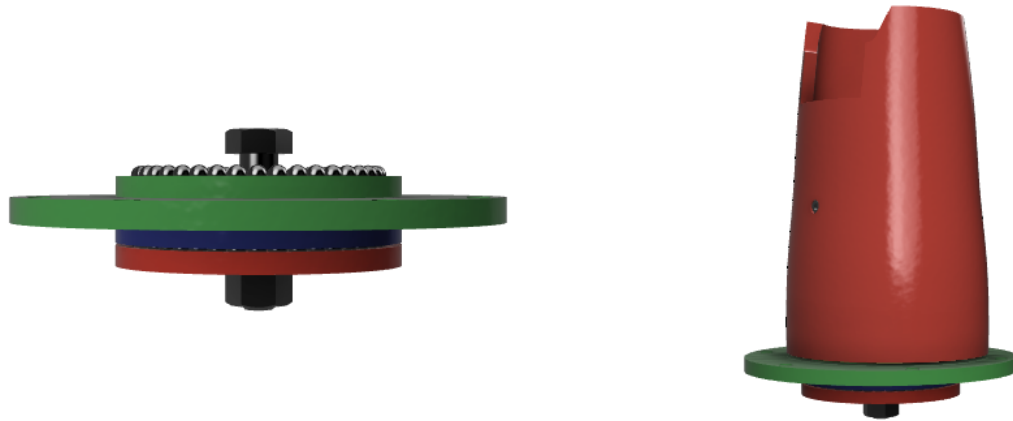


Figura 42: Base del antebrazo y cojinete axial (no a escala),
a) detalle del cojinete axial (izquierda), b) ensamble (derecha).
Elaboración propia

En la Figura 43 se muestran las piezas que conforman al antebrazo fabricadas en PLA.



Figura 43: Piezas del antebrazo.
Elaboración propia

En la Figura 44 se pueden observar vistas del montaje de las piezas del antebrazo superior con la muñeca y el antebrazo inferior con el cojinete axial. La Figura 45 es un vista detallada de la implementación de los balines en el cojinete axial.

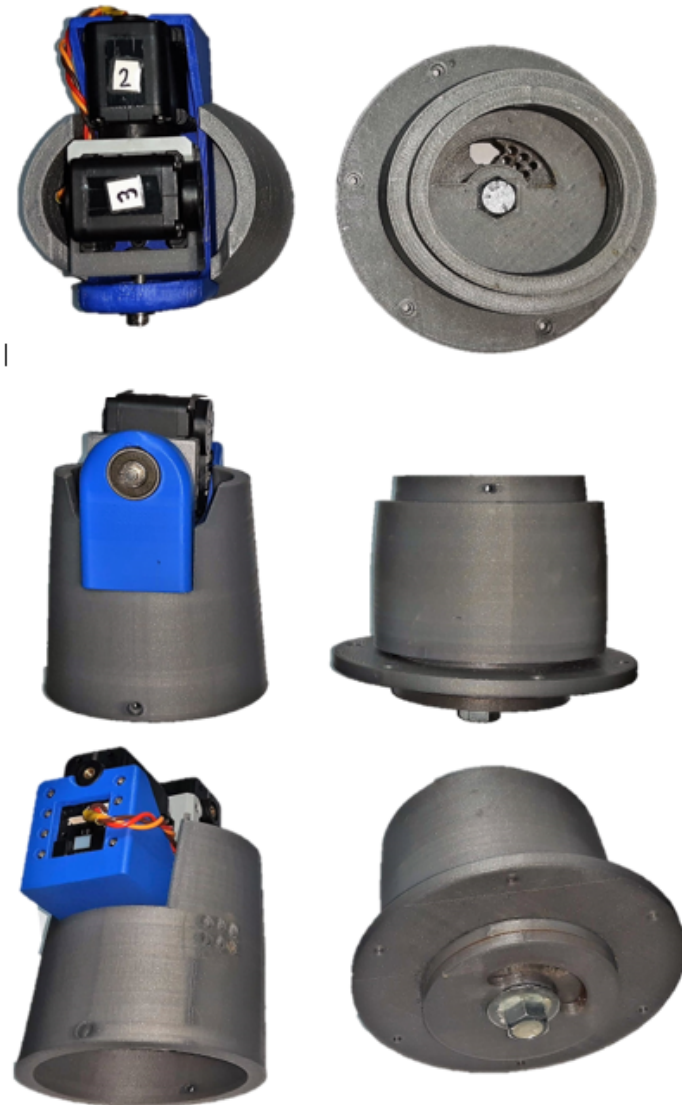


Figura 44: Vistas del montaje de las piezas del antebrazo.
Elaboración propia

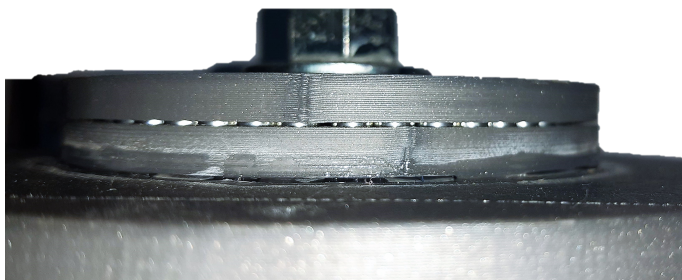


Figura 45: Vista de los balines dentro del cojinete axial.
Elaboración propia

Un servomotor AX-12A será el responsable de originar el movimiento de supinación y pronación. Este se une a la tuerca que sujeta el cojinete por medio de un acople, fue diseñado específicamente para encajar a la geometría de esta pieza, Figura 46a. Para tener una geometría simple se diseñó de forma cilíndrica con una altura de 17 mm y posee agujeros para la sujeción con el eje del servomotor por medio de cuatro tornillos M2x 6mm, Figura 46b.

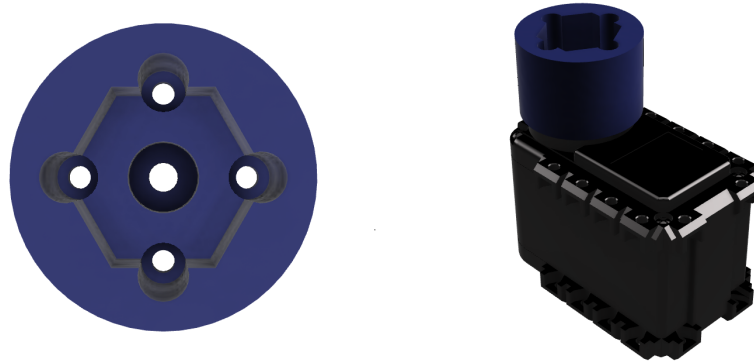


Figura 46: Acople supinación-pronación a) vista superior (izquierda), b) ensamble en el servomotor AX-12A (derecha).

Elaboración propia

Para sostener el servomotor se diseñó una base que envuelve a este. La base está conformada por dos piezas. Parte inferior, Figura 47a, se ancla al cajón en la parte inferior por medio de cuatro tornillos M3x12 mm y sus respectivas tuercas. Esta sostendrá el servomotor y posee una ranura para el cableado. Parte superior, Figura 47b, funciona como tapadera, se encaja en la ranura de la parte inferior y evita que el servomotor se mueva de su lugar.

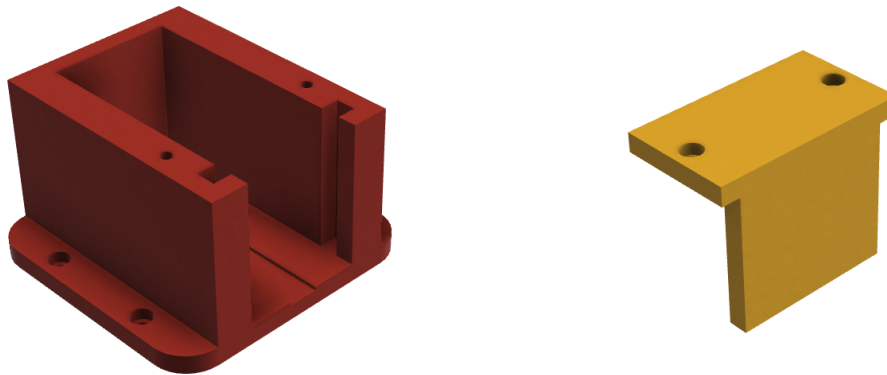


Figura 47: Base para el servomotor a) parte inferior (izquierda), b) parte superior (derecha).
Elaboración propia

En la Figura 48 se observa el montaje del servomotor en la base y el acople ubicado en el eje del mismo.

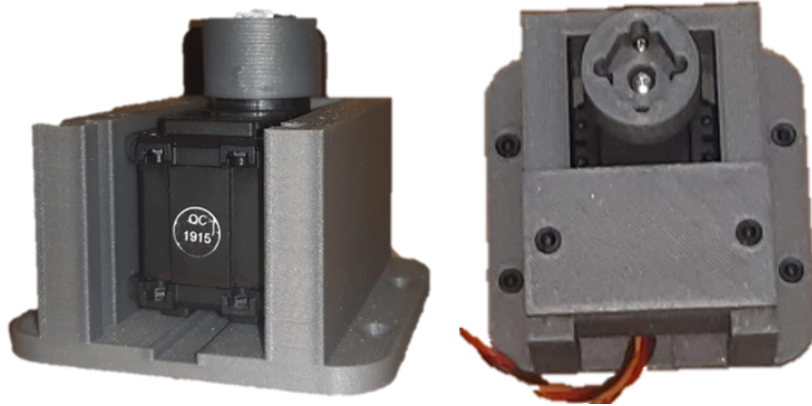


Figura 48: Montaje del servomotor, acople y base para generar el movimiento de supinación-pronación del antebrazo.

Elaboración propia

8.6. Poleas

El diseño de la polea se realizó en una sola pieza, esta se conforma en parte inferior o guía para los tendones y parte superior que posee el método de sujeción al servomotor y de los tendones.

La principal función de la parte inferior es limitar el movimiento de los tendones y posee dos agujeros para tornillos M2x6 mm. Estos tornillos ajustarán la tensión de los tendones al ensamblarse, Figura 49a. La función de la parte superior es sujetarse a presión al eje del servomotor XL-320. Esta pieza posee cuatro columnas que se introducirán en los cuatro agujeros disponibles en el eje. Posee un agujero central por el cual se utilizará el mismo tornillo incluido en el servomotor para sostener las poleas. Además tiene dos agujeros para los tornillos M2x6 mm, el diámetro es 0.5 mm mayor al diámetro tornillo para que el tendón pase por el agujero y quede sujetado por el tornillo a presión, Figura 49b.

Debido al tamaño y los pequeños detalles, las poleas serán fabricadas en resina fotocurable.

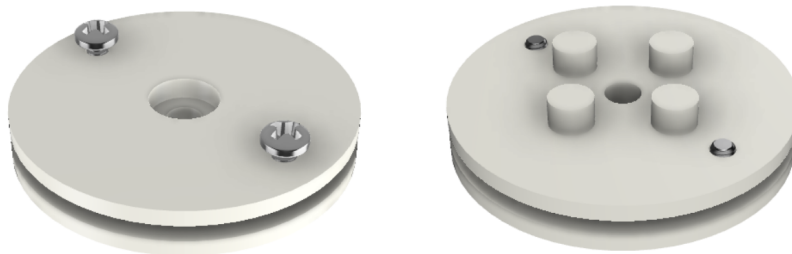


Figura 49: Polea a) parte superior (izquierda), b) parte inferior (derecha).

Elaboración propia

La parte inferior de la polea tiene un espesor de 1 mm y el carril central tiene 1.5 mm y la parte superior 1.5 mm. Insertando la polea en el servomotor XL-320 y sujetándolo con el tornillo central proporciona una estructura firme por la cual puede deslizarse los tendones, Figura 50.

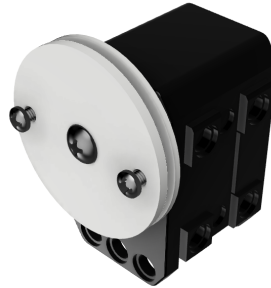


Figura 50: Ensamble de la polea en el eje del servomotor XL-320.
Elaboración propia

8.7. Base con ajuste de tensión

Debido a la integración de los servomotores en la muñeca y antebrazo, aumentando los grados de libertad de este, se decidió implementar los servomotores para las falanges fuera del antebrazo. Además fue necesario ajustar la tensión de los tendones, ya que se dificulta instalarlos directamente con la tensión necesaria. Para solucionar esta situación se diseñó una base capaz de realizar estos ajustes, facilitando la instalación y la posterior regulación de tensión.

Los motores XL-320 estarán ensamblados a una base móvil, esta posee dos agujeros para tornillos M4x35 mm los cuales sostienen el servomotor a la pieza y por medio de las tuercas afirman este ensamble, Figura 51a. Además posee un agujero para un tornillo hexagonal M4x50 mm, este será el responsable de generar el movimiento de corredera para calibrar la tensión requerida, Figura 51b.

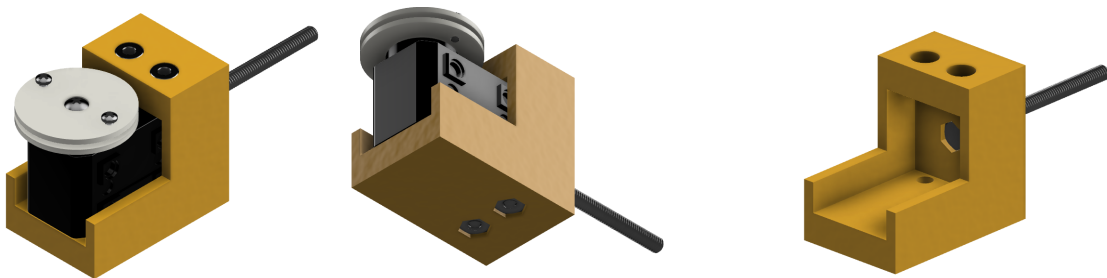


Figura 51: Base móvil a) sujeción al servomotor XL-320 (izquierda),
b) vista del tornillo hexagonal (derecha).

Elaboración propia

La base fija posee el carril por donde podrá desplazarse la base móvil. Aprovechando que la geometría será la misma para los seis servomotores que manipularán las falanges, se diseñaron en módulos de tres. Las principales funciones de esta pieza son: sostener a la base móvil, generar el ajuste de tensión y sostener los extremos de los conductos para el cable bowden.

Para sostener la base móvil se diseñaron tres carriles, estos guían el movimiento de traslación. El movimiento disponible es de 20 mm, esto genera una distancia aceptable en la cual, luego de instalar los tendones, la tensión podrá ser regulada a la necesidad del movimiento, Figura 52.

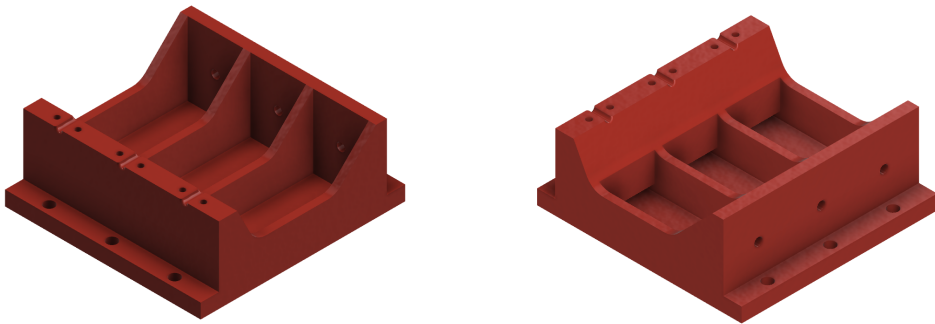


Figura 52: Base fija, vista de los carriles.

Elaboración propia

Para regular la tensión se diseñó un agujero donde el tornillo hexagonal podrá sobresalir. Este posee una tuerca M4 del lado exterior de la base fija y una pieza en forma de tuerca de mayor tamaño. Su función es ajustar por medio de movimiento rotacional la distancia entre la base móvil y la parte trasera de la base fija, Figura 53.

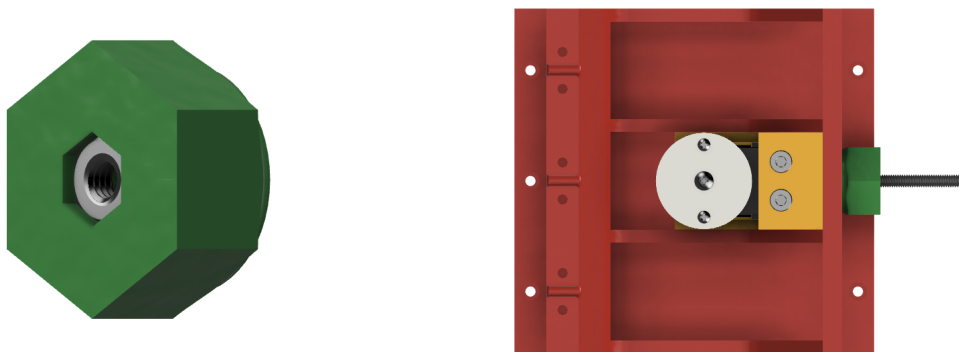


Figura 53: a) tuerca de ajuste de tensión (izquierda), b) ensamble de la base móvil, una base fija y una tuerca de ajuste.

Elaboración propia

Para sostener los extremos de los conductos del cable bowden se diseñaron piezas de sujeción a presión. Estas piezas poseen geometría rectangular con un semicírculo en uno de los lados más largos. A los costados de esta ranura se posee dos agujeros para albergar tornillos M3x12 mm, los cuales se unirán a la base fija para crear el soporte a presión de los conductos, Figura 54.

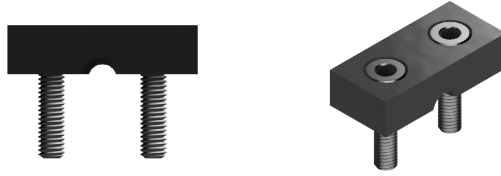


Figura 54: Vistas de la pieza de sujeción para los extremos de los cables bowden.
Elaboración propia

Puesto que la base fija estará en el cajón, se diseñó con agujeros para seis tornillos M3x12 mm y sus respectivas tuercas. Estas anclarán la base al cajón. El ensamble de la base con ajuste de tensión se observa en la Figura 55 con mayor detalle. Para manejar los seis movimientos de la mano se utilizarán dos de estas bases modulares.

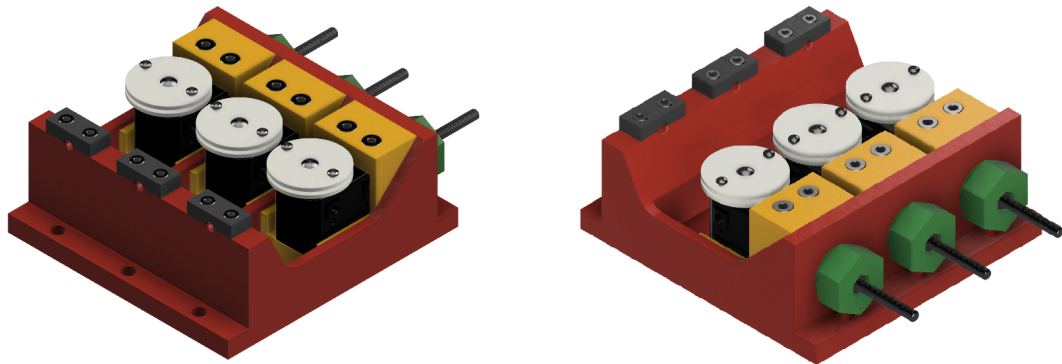


Figura 55: Vistas del ensamble de la base con ajuste de tensión para las falanges.
Elaboración propia

En la Figura 56 puede observarse el montaje de las poleas en los servomotores, estos en sus respectivas bases móviles y estas sobre la base fija con la tuerca de ajuste de tensión.

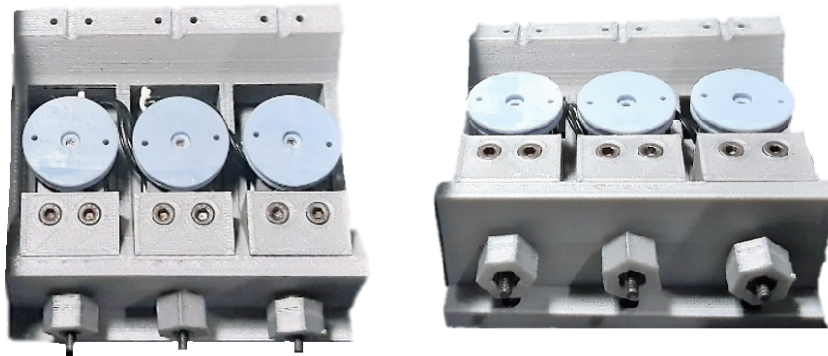


Figura 56: Montaje de las base con ajuste de tensión.
Elaboración propia

8.8. Transmisión de movimiento

Como tendones inelásticos se propone utilizar hilo de pesca de la marca FIOTOK. Se utilizará este hilo debido a que se compone de filamentos trenzados de polietileno de peso molecular ultra alto, conocido como “Dyneema” o “Spectra”. Según la ficha técnica, tiene la capacidad de soportar 100Lb, presenta una baja elasticidad y alta lubricidad. Posee un diámetro de 0.465 mm. [24]



Figura 57: Hilo de pesca trenzado de “Dyneema”, marca FIOTOK.

[24]

Aprovechando las propiedades de lubricidad de los tendones para promover un movimiento con baja fricción entre estos, ya que cada conducto llevará dos tendones, se utilizó en conjunto con tubos de teflón. Estos presentan capacidad lubricante y antiadherente, 2 mm ID (diámetro interno) y 3 mm OD (diámetro externo). [25]

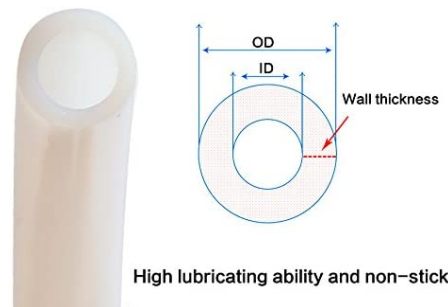


Figura 58: Tubo de teflón, marca Allen Tech.

[25]

Como se indicó anteriormente, cada conducto guiará el par de tendones desde la base con ajuste de tensión hasta el extremo de la falanges. En el extremo de las falanges se realizó un nudo a cada tendón y en el extremo de las poleas se anudarán a los tornillos de sujeción destinados a la fijación de estos. En total se utilizarán seis tubos de teflón y seis pares de hilo de pesca.

8.9. Cajón

El cajón es de las estructuras principales del diseño, esta deberá soportar la carga de la mano animatrónica, promover el movimiento de supinación-pronación y alojar toda la electrónica necesaria para el control y potencia. Para simplificar su diseño y fabricación se utilizará MDF de 6.3 mm de ancho junto a la cortadora láser y se acoplará por medio de pestañas o dedos. Promoviendo el diseño modular, el cajón se dividió en dos partes.

Primera parte: Sujeción de la mano, procurar el movimiento fluido de supinación-pronación y recepción de los conductos y cableado. Esta se diseñó con geometría semi hexagonal.

Para la sujeción de la mano se realizaron los mismos agujeros que posee el cojinete axial, de esta manera se podrá sujetar por medio de seis tornillos M3x12 mm y sus tuercas. Además posee un agujero central por el cual podrá girar libremente las piezas inferiores del cojinete, evitando el roce con el material, Figura 59a.

En la recepción de los conductos se utilizó una pared vertical con los agujeros del diámetro del cable bowden ya perforados. Estos conducirán los extremos a las bases fijas para el movimiento de las falanges. Esta posee ventanas rectangulares para disminuir el peso y recortes diagonales en las esquinas inferiores para conducir el cableado, Figura 59b.

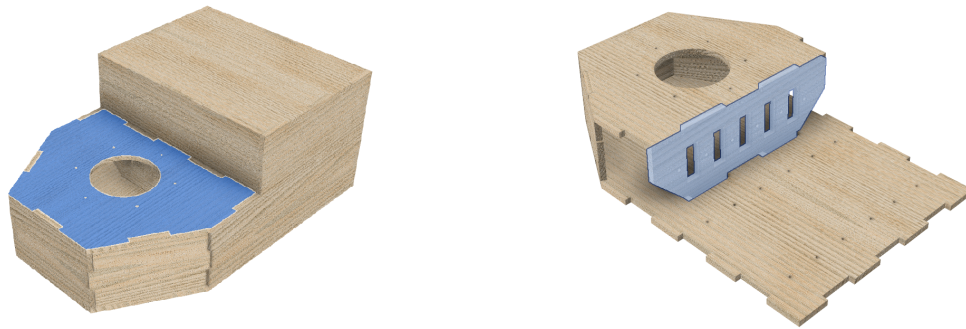


Figura 59: Partes resaltadas en azul, a) tapadera de sujeción a la mano animatrónica (izquierda), b) pared para conducir los cables bowden.

Elaboración propia

La parte inferior del cajón se conforma de una sola pieza. En el diseño se incluye los agujeros para la base del servomotor que realizará el movimiento de supinación-pronación y los agujeros para las bases fijas con ajuste de tensión, Figura 60.

Segunda parte: Mecanismo para el movimiento de las falanges y electrónica de control y potencia necesaria. Esta parte se divide en dos espacios.

Espacio inferior: En este módulo únicamente se instalarán las bases con ajuste de tensión. Tendrá el espacio suficiente para realizar los ajustes quitando la tapa trasera. Esta tapa será el acceso principal a las tuercas de regulación de tensión para los seis servomotores, Figura 61.



Figura 60: Vista superior de la plancha inferior del cajón.

Elaboración propia

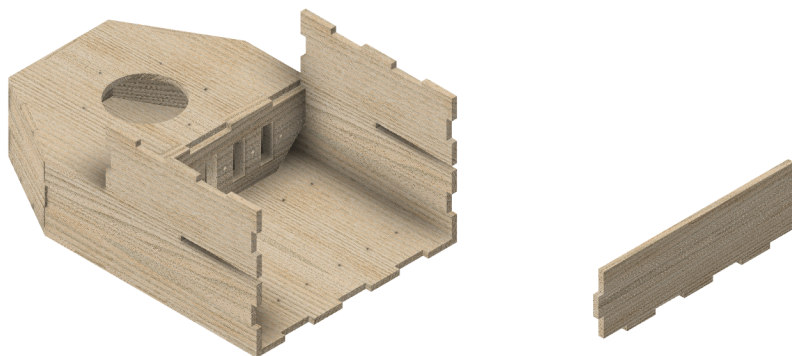


Figura 61: Vista de la parte interior del espacio inferior y tapadera trasera.

Elaboración propia

Espacio superior: En este módulo se ensamblarán toda la electrónica necesaria para el control de la mano animatrónica. La tapa superior y trasera será movable, esto habilitará un mayor acceso a las conexiones ente fuente de poder, módulos de regulación, controlador y demás electrónica necesaria. La parte inferior será deslizable, posee ranuras a los lados en las cuales se acoplará. También posee agujeros para sujetar la fuente y tarjetas de circuito impreso junto a espaciadores por medio de tornillos M3x12 mm, Figura 62.

En la parte trasera se encuentran los agujeros para los conectores, Figura 63. En la vista trasera, a la izquierda se encuentra el conector IEC C14 de chasis, con interruptor y fusible integrado. Este será el método de conexión entre la línea de alimentación, 120V AC, y la fuente de poder de 12V DC. En el lado derecho estará el cable con conector de chasis micro USB B hembra. Este será el método de conexión y comunicación entre la computadora y el controlador OpenCM 9.04C.

Por último, para alzar el cajón se utilizarán patas de goma. Estos elevadores están distribuidos en la parte inferior del cajón, cerca de los vértices y en el centro de la plancha. Su función es levantar todo el sistema para aislarlo física y eléctricamente del entorno, Figura 64.

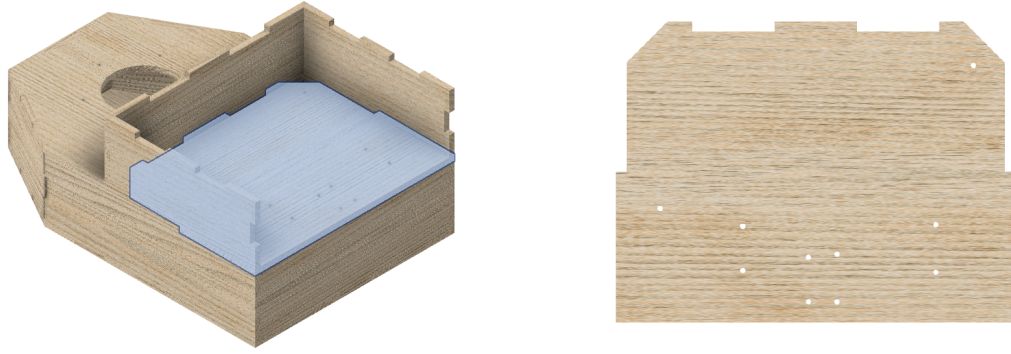


Figura 62: Plancha inferior deslizable del espacio superior, a) ensamble (resaltado en azul),
b) vista superior.
Elaboración propia

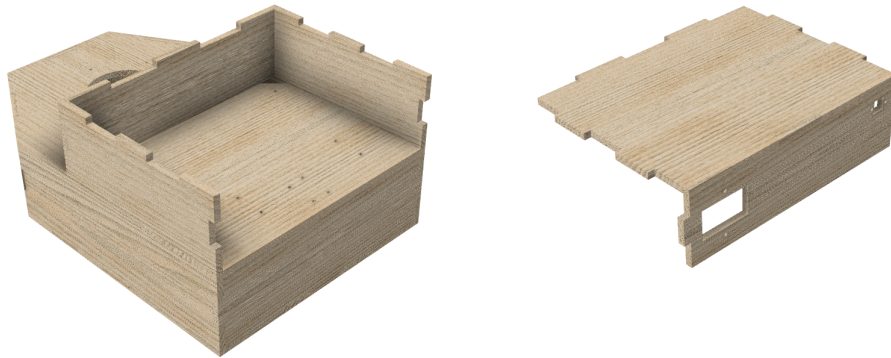


Figura 63: Vista de la parte interior del espacio superior, tapadera trasera y superior.
Elaboración propia

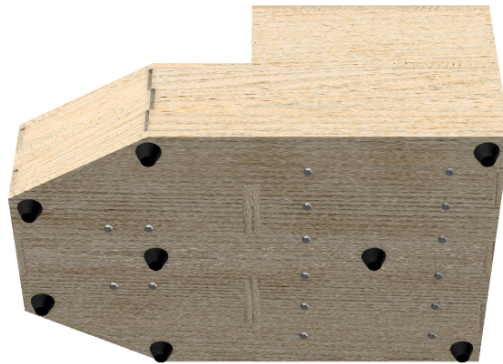


Figura 64: Distribución de las patas de goma en el cajón.
Elaboración propia

9.1. Prototipo 1

Al inicio de este trabajo de graduación se pretendió utilizar un diseño similar a la mano animatrónica de la fase anterior. Optimizando el diseño para darle un aspecto antropomórfico e integrando grados de libertad en la muñeca y antebrazo.

Observando el diseño y la morfología se decidió que el movimiento metacarpiano (base del pulgar) no representaba la utilidad que posee este. No era capaz de representar los diferentes tipos de agarre, por ejemplo, el agarre cilíndrico. En este agarre es necesario rotar el metacarpo junto con las falanges del pulgar y tocar la falange distal del pulgar con cualquiera de los cuatro dedos restantes.

Teniendo en cuenta la consideración anterior se decidió utilizar el movimiento de flexión y extensión del metacarpo, Figura 65.

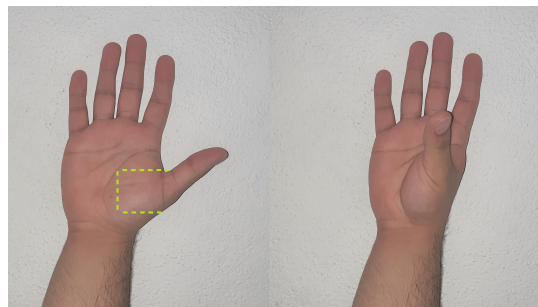


Figura 65: División física del movimiento metacarpiano. Extensión (izquierda) y flexión (derecha).
Elaboración propia

Al diseñar la palma utilizando conectores PC4-01 para recibir los extremos de los tubos, se observó que el espacio disponible dentro de la estructura no era suficiente para albergar los conductos de los cables bowden. Para solucionar este problema se incrementó 1.5 veces las dimensiones de la mano y dedos, esperando que el espacio fuera suficiente para los tubos, Figura 66.



Figura 66: Diseño y disposición de la estructura para la palma, con una escala de 1.5 veces el tamaño real.

Elaboración propia

El movimiento de desviación cubital-radial ya había sido implementado en la mano animatrónica de la fase anterior utilizando un servomotor AX-12A. La dificultad de incluir más movimientos supone el aumento de volumen debido a los servomotores extras necesarios. Para poder generar el movimiento cubital-radial, flexión-extensión y pronación-supinación en la mano animatrónica se intentó diseñar un mecanismo de cuello robótico similar a la Figura 67. Al implementarlo se observó que la movilidad necesaria interfería con el volumen disponible para diseñarlo dentro del antebrazo.

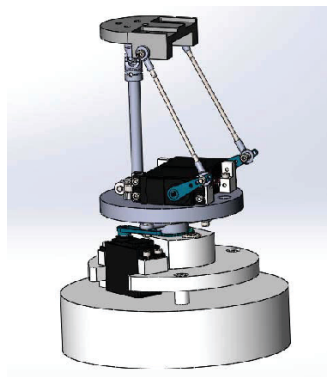


Figura 67: Mecanismo de un cuello robótico.

[26]

Este punto dio paso a la decisión de colocar los servomotores que controlan las falanges fuera el diseño del antebrazo y realizar una base para sostener el ensamblaje y funcionar de cajón para los servomotores, controladores y alimentación del mismo.

A consecuencia del tamaño del mecanismo de cuello se decidió aumentar 1.5 veces el tamaño del antebrazo. La finalidad era tener el suficiente espacio dentro del antebrazo para el mecanismo de cuello adaptado a una muñeca, Figura 68.

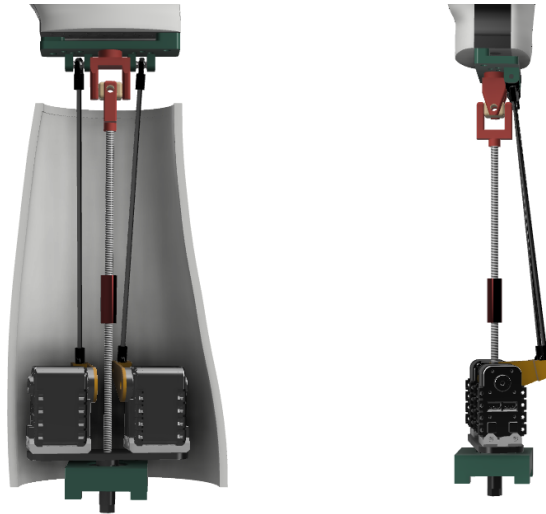


Figura 68: Mecanismo para la muñeca dentro del antebrazo.

Elaboración propia

Analizando la altura, peso y volumen para una mano animatrónica se determinó que las dimensiones son excesivas para un prototipo que intenta imitar la morfología humana. Por lo tanto este diseño se abandonó debido a que no era práctica la fabricación.

9.2. Prototipo 2

9.2.1. Antebrazo

Debido a que la finalidad de la mano animatrónica es de exhibición se requirió aumentar la movilidad de la muñeca y antebrazo. Examinando los huesos de la palma, muñeca y antebrazo se determinaron las funcionalidades motrices que estas poseen.

La muñeca presenta el movimiento de flexión-extensión y desviación cubital-radial. Por ende, dos servomotores realizarían estos movimientos. El antebrazo presenta el movimiento de pronación y supinación. Este movimiento se lograría con una base del antebrazo móvil, utilizando un cojinete axial y un servomotor en la parte del cajón.

Así pues, se lograría mantener la misma escala de la mano y antebrazo animatrónico con la mano y antebrazo derecho del autor, Figura 69. Los cables bowden serán conducidos saliendo en el dorso de la palma y entrando al antebrazo, Así los motores que controlan el movimiento de las falanges estarán dentro del cajón.

En la Figura 70 se muestra el montaje del segundo prototipo de la mano animatrónica.



Figura 69: Vistas del ensamblaje de los dedos, palma, muñeca, antebrazo y base giratoria.
Elaboración propia



Figura 70: Montaje del prototipo fabricado.

Elaboración propia

9.2.2. Cajón

Para conseguir un diseño de cajón más interesante se procedió a cambiar la geometría frontal de este. Realizar una geometría circular utilizando una plancha que es plana como el MDF genera un acabado atractivo. Para este cambio se recurrió al software online MakerCase [27]. Esta página se enfoca al diseño de cajas o estuches de proyectos mediante el uso de cortadoras láser o enrutadores CNC. Para el diseño del cajón se utilizó la opción Kerf Bent Box. Figura 71

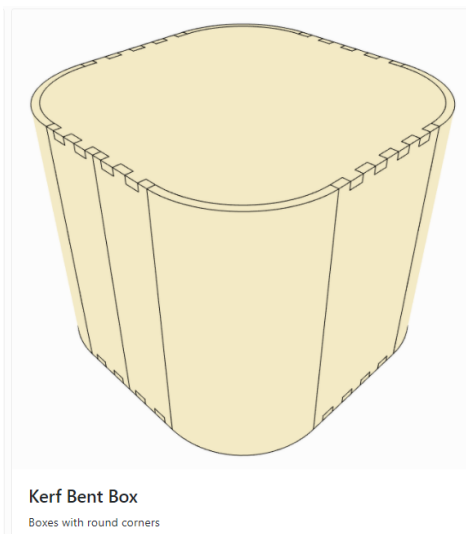


Figura 71: Caja con diseño Kerf Bent. Vista del sitio web MakerCase.

[27]

Ingresando las especificaciones del tamaño de ancho, alto y profundidad de la caja se obtuvo el plano de una caja completa. Estos planos se descargaron en formato .DXF para poder realizar los ajustes en el software Fusion 360. Luego de realizar los ajustes de tamaño y geometría se exportó como formato de dibujo .DWG obteniendo el plano mostrado en la Figura 72.

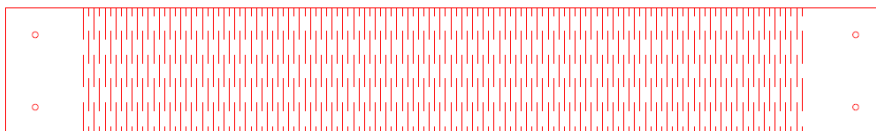


Figura 72: Tapadera frontal del cajón con geometría semicircular.

Elaboración propia

Aplicando este cambio al diseño del cajón observado anteriormente se modificó su diseño frontal Figura 73a. Se observó que por la cantidad de cortes necesarios para realizar el doblez la estructura semicircular no debía cargar con el peso del ensamblaje del brazo y tapadera superior. Para soportar esta carga se incluyeron dos columnas, estas serán únicamente estructurales Figura 73b. Además se diseñaron angulares para impresión en 3D que se utilizarán para sostener las tapaderas. Estos angulares utilizarán tornillos M3X12 mm y una tuerca para cada tornillo.

En la Figura 74 se muestra la modificación de la geometría del cajón, vista de la base y de la tapadera. Además se presenta un acercamiento al detalle de la tapadera que utiliza el diseño Kerf Bent en la Figura 75. El cajón fue pintado para mejorar la presentación.

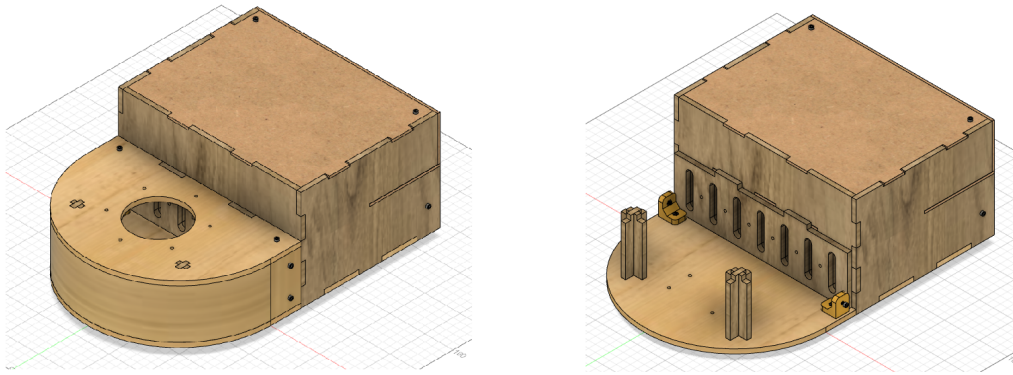


Figura 73: Modificación al cajón. a) tapadera utilizando Kerf Bent (izquierda),
b) columnas de carga y angulares para sujeción (derecha).

Elaboración propia

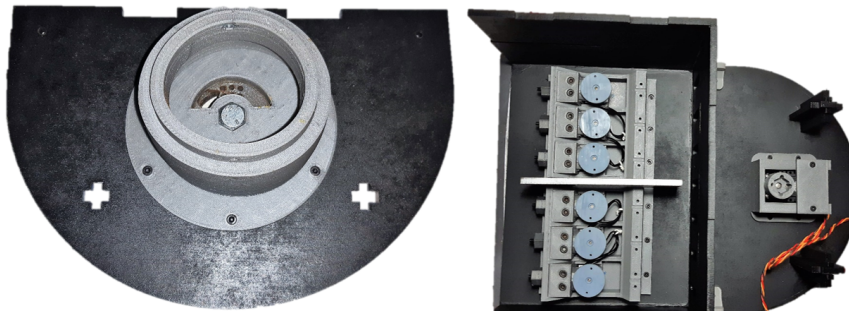


Figura 74: Vista del cajón fabricado en MDF.

Elaboración propia

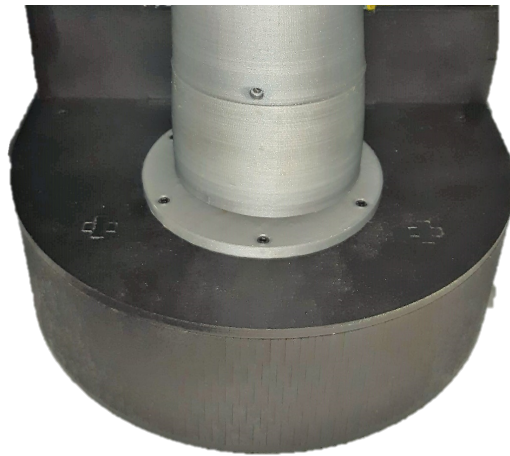


Figura 75: Detalle de la tapadera frontal usando Kerf Bent.

Elaboración propia

10.1. Análisis de elementos finitos

Se utilizó la herramienta de simulación del software Fusion 360 para obtener los esfuerzos en los puntos críticos del ensamble por medio de un análisis de elementos finitos. Ya que el prototipo fue diseñado para tener una aplicación específicamente de exhibición, no tendrá la capacidad de soportar cargas.

Esto genera que los dedos y palma no estén bajo cargas externas y por lo tanto, no sean un elemento crítico. Pero el esfuerzo que genera el peso de este ensamblaje recae en el mecanismo de la muñeca. Este esfuerzo es originado por la gravedad, esta se estimó como 9.807 m/s^2 .

Debido a la cantidad de piezas que posee el ensamble y los distintos tipos de unión, se realizará el análisis estático únicamente al mecanismo de muñeca, palma y dedos. Esto fue necesario debido a la imposibilidad que suponía para el software realizar el análisis del ensamble completo. [28] Para el análisis estático se configuró la mano en una pose neutral y cuatro límites que representan los movimientos máximos permitidos, Figura 76. Las imágenes se muestran con una exageración de 2.5% al desplazamiento real.

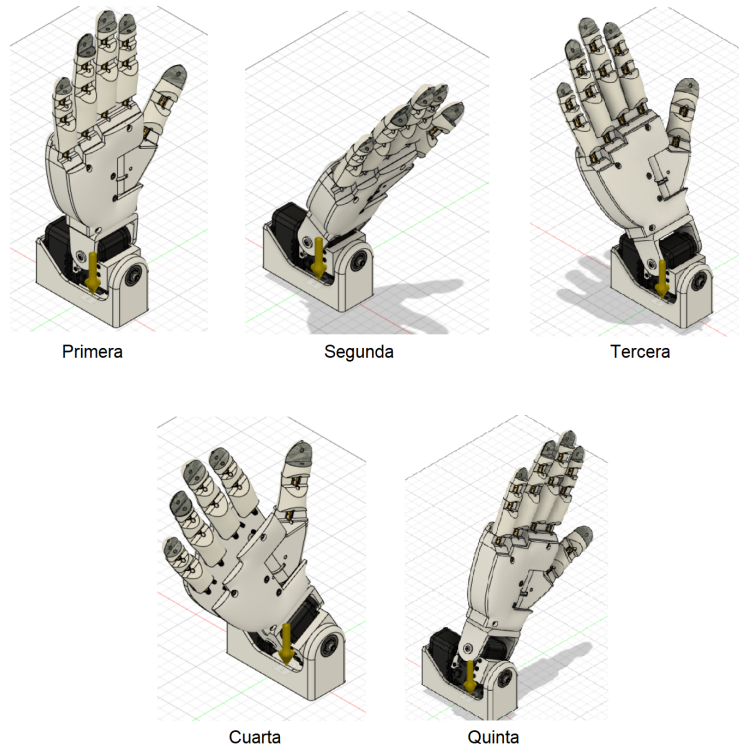


Figura 76: Poses analizadas.

Elaboración propia

10.1.1. Geometría modelada

En el primer análisis realizado se utilizaron los tornillos proporcionados por MacMaster. Estos poseen la rosca modelada es decir, tienen la geometría exacta de la rosca. Los resultados se muestran en el Cuadro 3.

Pose	Resultado	Movimiento	Esfuerzo máximo	Fs mínimo
Primera	Figura 77	Neutro	57.23 Mpa	3.617
Segunda	Figura 78	Flexión	111.1 Mpa	1.863
Tercera	Figura 79	Extensión	88.28 Mpa	2.345
Cuarta	Figura 80	Desviación cubital	110.3 Mpa	1.877
Quinta	Figura 81	Desviación radial	103.4 Mpa	2.003

Cuadro 3: Resultado del análisis estático con geometría modelada.

Elaboración propia

Como se puede observar, el esfuerzo máximo obtenido utilizando el análisis de esfuerzos de von Mises supera el límite elástico del PLA (60 Mpa). Esto supone que las piezas involucradas tenderán a llegar al punto de ruptura. Debido que el software encontró los esfuerzos sobre la rosca de los tornillos este esfuerzo se comparó contra el límite elástico del acero (207 Mpa [29]). Por lo tanto el factor de seguridad, nombrado Fs en la tabla, sigue siendo mayor a 1.

Analizando a fondo estos resultados se observó que el problema se debía a las limitaciones del software utilizado. Este es una versión de Inventor simplificada y amigable al usuario y no está dedicada a la ingeniería mecánica. [28]

El principal problema se encuentra en la creación del modelo matemático a la hora de interpretar las roscas de los tornillos. Esto generaba que la cresta de la rosca se modelara como una superficie muy reducida en contacto con una pieza. Para solucionar este inconveniente se decidió modelar los tornillos sin rosca, creando un modelo simplificado con geometría cilíndrica.

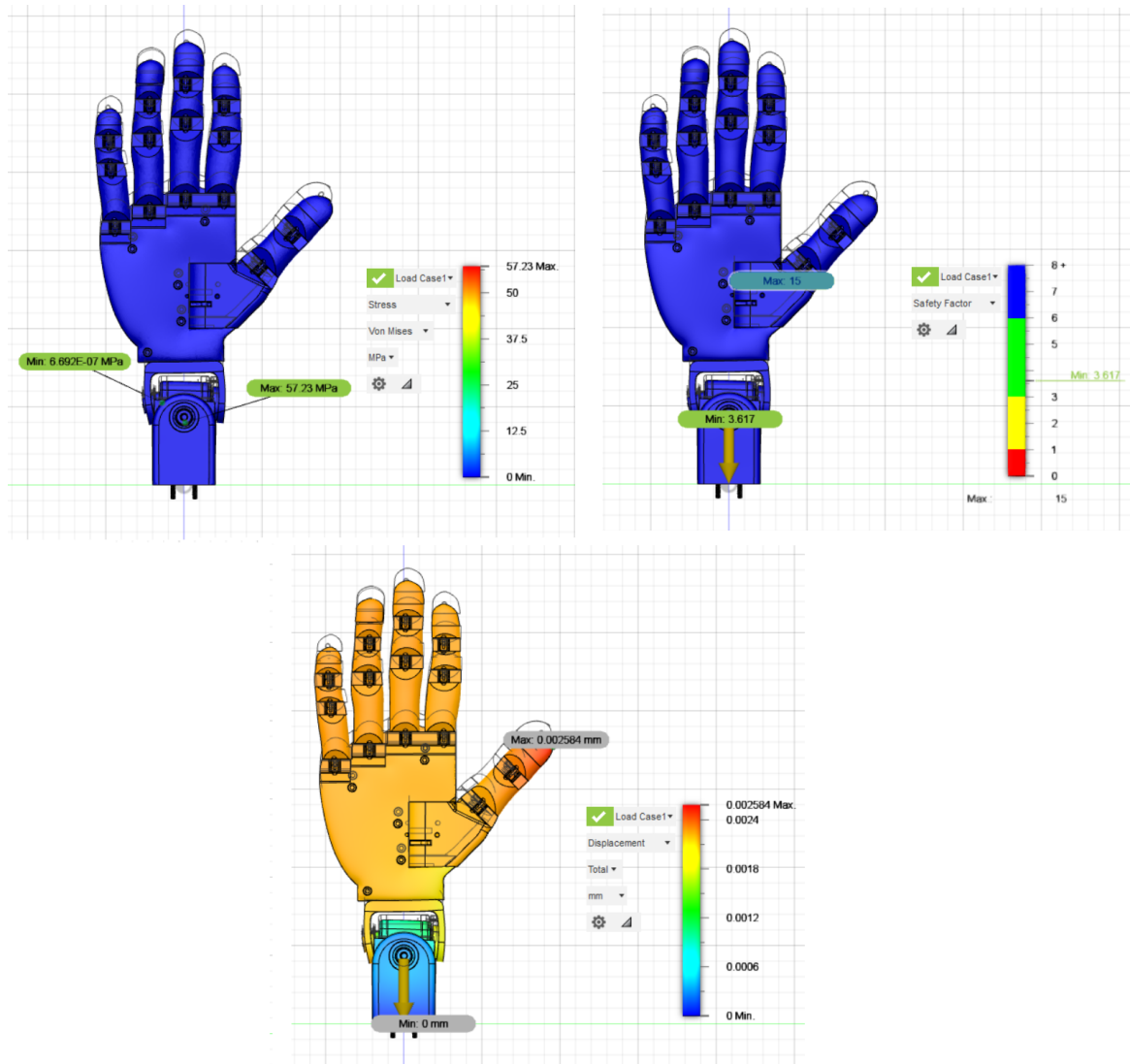


Figura 77: Resultado del análisis de la primera pose, geometría modelada. Elaboración propia

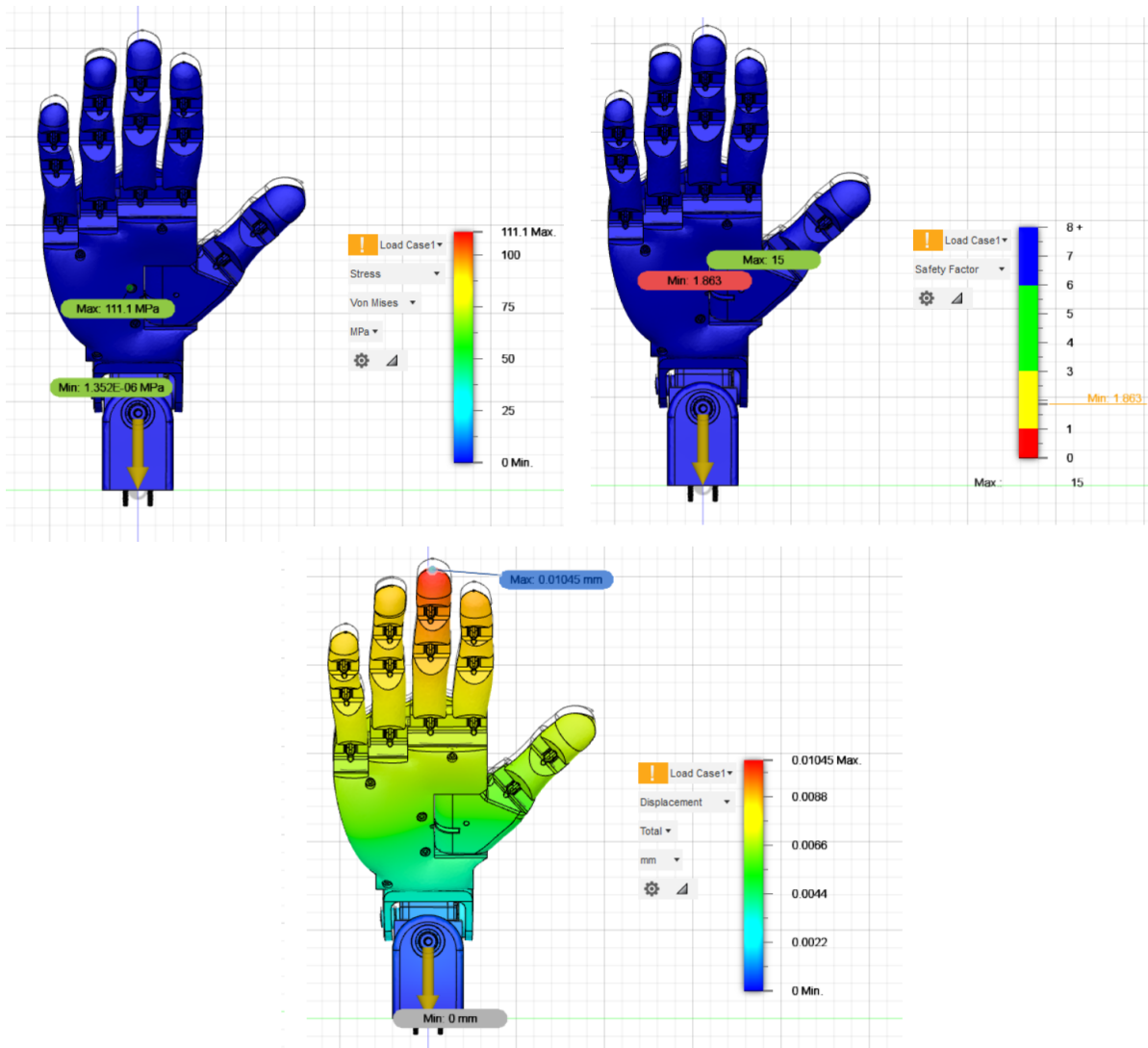


Figura 78: Resultado del análisis de la segunda pose, geometría modelada.
Elaboración propia

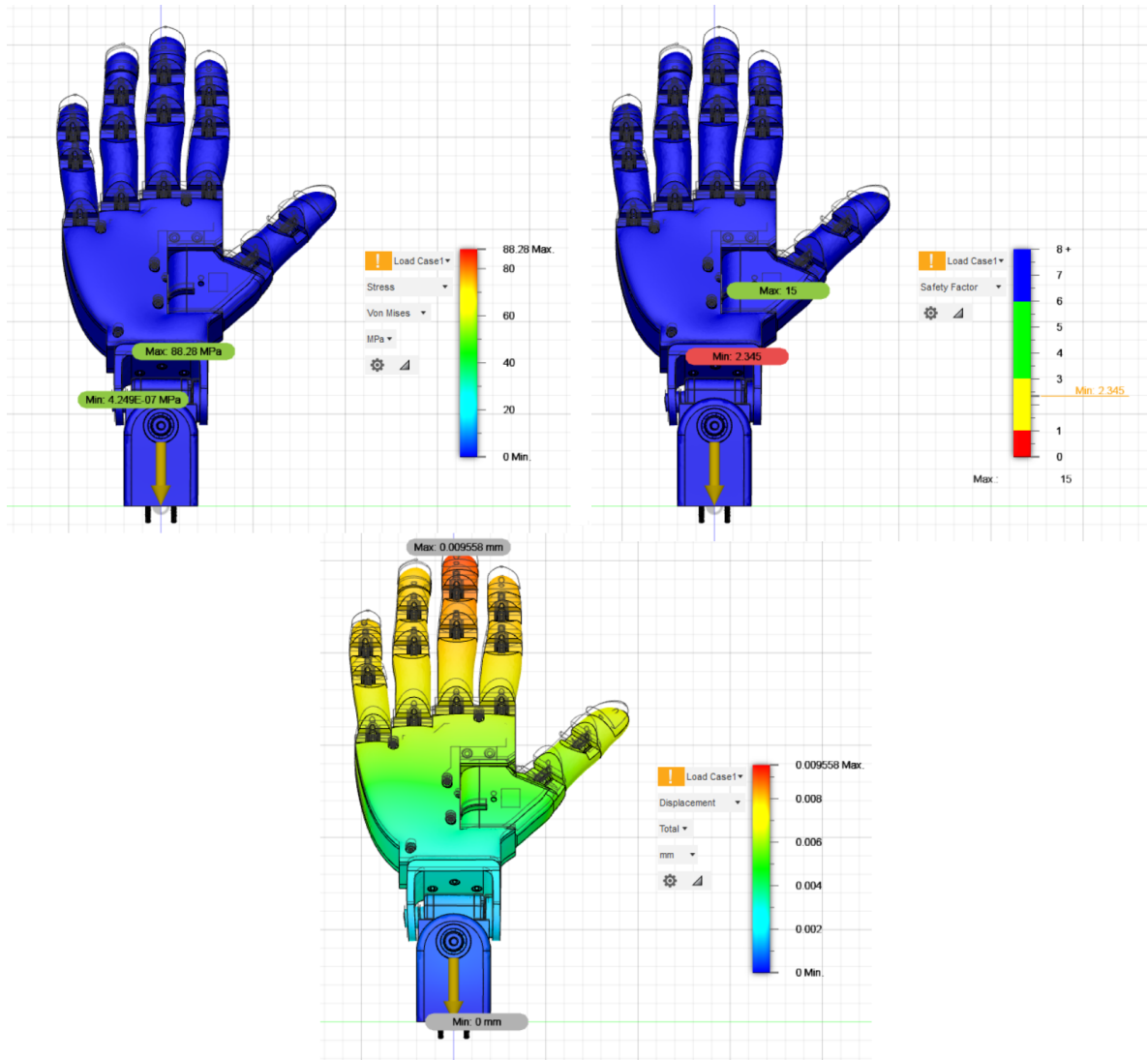


Figura 79: Resultado del análisis de la tercera pose, geometría modelada.
Elaboración propia

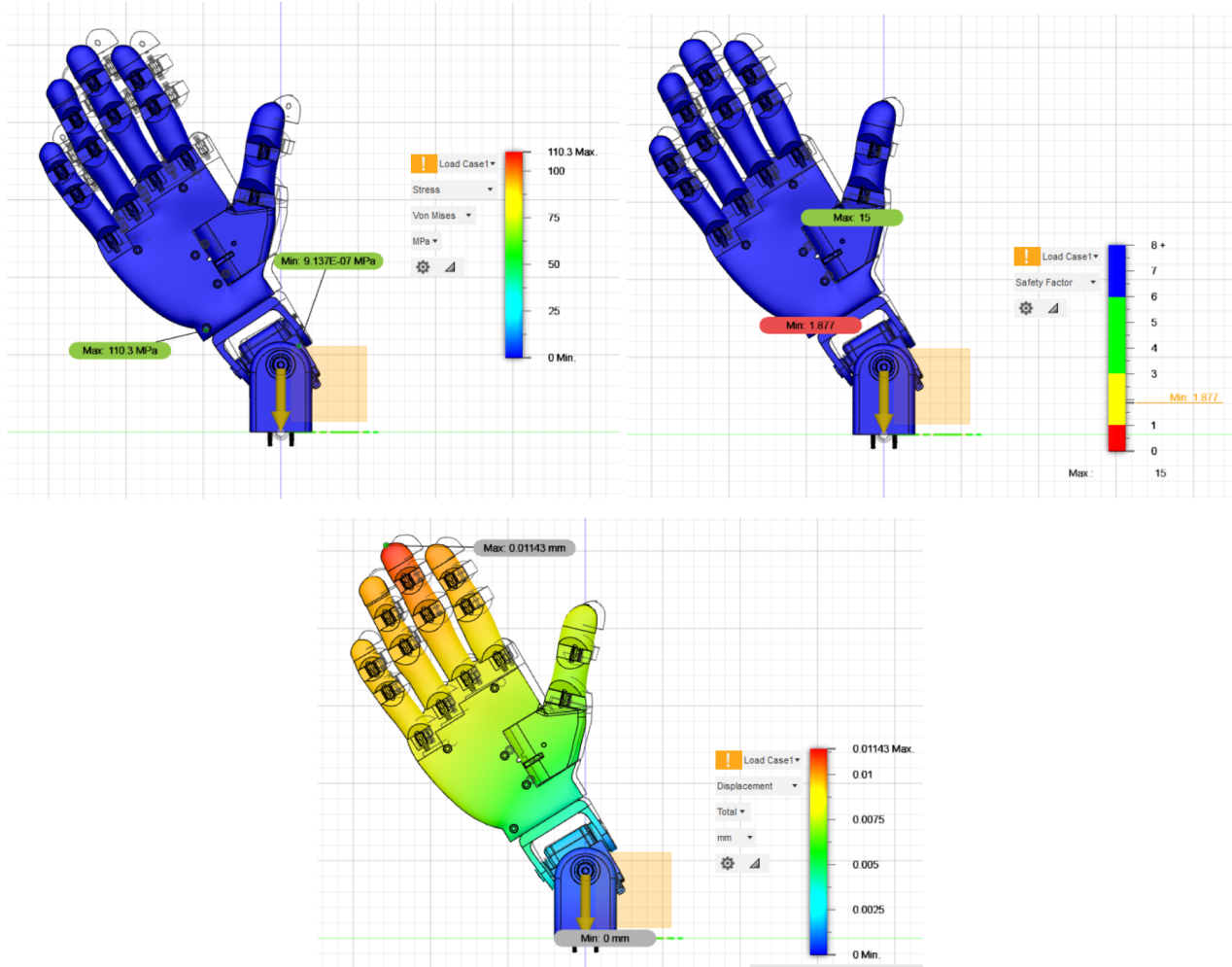


Figura 80: Resultado del análisis de la cuarta pose, geometría modelada.
Elaboración propia

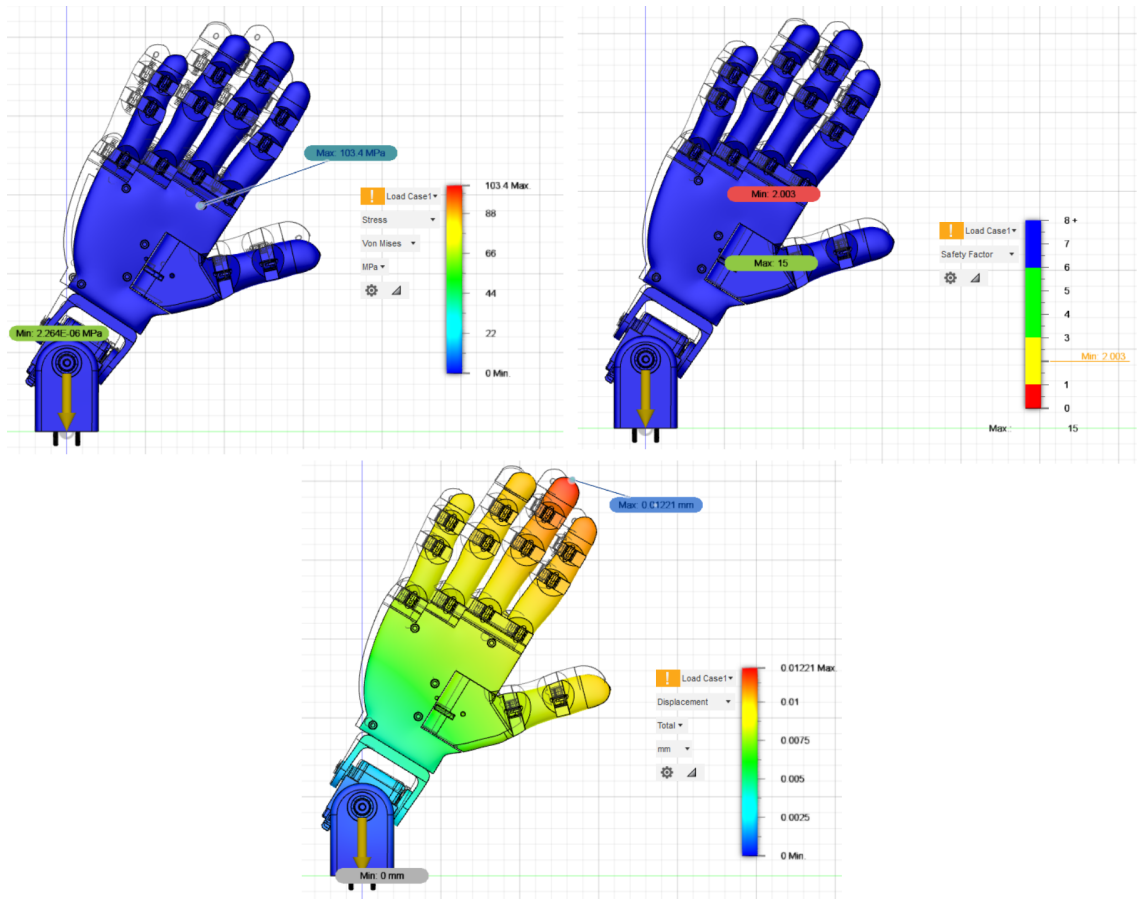


Figura 81: Resultado del análisis de la quinta pose, geometría modelada. Elaboración propia

10.1.2. Geometría simplificada

Debido a las limitaciones de procesamiento del software y el modelo matemático de las roscas, se modificó la parte de la rosca a cilindros como se mencionó anteriormente. Los resultados de este análisis se muestran en el Cuadro 4. Ya que los esfuerzos se encuentran en tornillos, el software compara el esfuerzo máximo encontrado con el material de la pieza. Por lo tanto se encuentran factores de seguridad altos.

Para hacer una mejor comparación el resultado del factor de seguridad se comparó con el límite elástico del PLA (60 Mpa). Este se calculó como la división entre el límite elástico del PLA y el esfuerzo máximo en el punto crítico encontrado en el análisis.

Las figuras muestran cuatro capturas, en la parte superior izquierda se encuentra el resultado del esfuerzo máximo. En la parte superior derecha se ve en detalle la parte en donde se encuentra este esfuerzo. En la parte inferior izquierda el factor de seguridad. En la parte inferior derecha el resultado del máximo desplazamiento en el ensamble. Este último es el desplazamiento que genera la gravedad en las piezas.

Pose	Resultado	Movimiento	Esfuerzo máximo	Fs mínimo
Primera	Figura 82	Neutro	3.61 Mpa	16.62
Segunda	Figura 83	Flexión	20.9 Mpa	2.87
Tercera	Figura 84	Extensión	23.01 Mpa	2.60
Cuarta	Figura 85	Desviación cubital	9.674 Mpa	6.20
Quinta	Figura 86	Desviación radial	20.68 Mpa	2.90

Cuadro 4: Resultado del análisis estático con geometría simplificada.
Elaboración propia

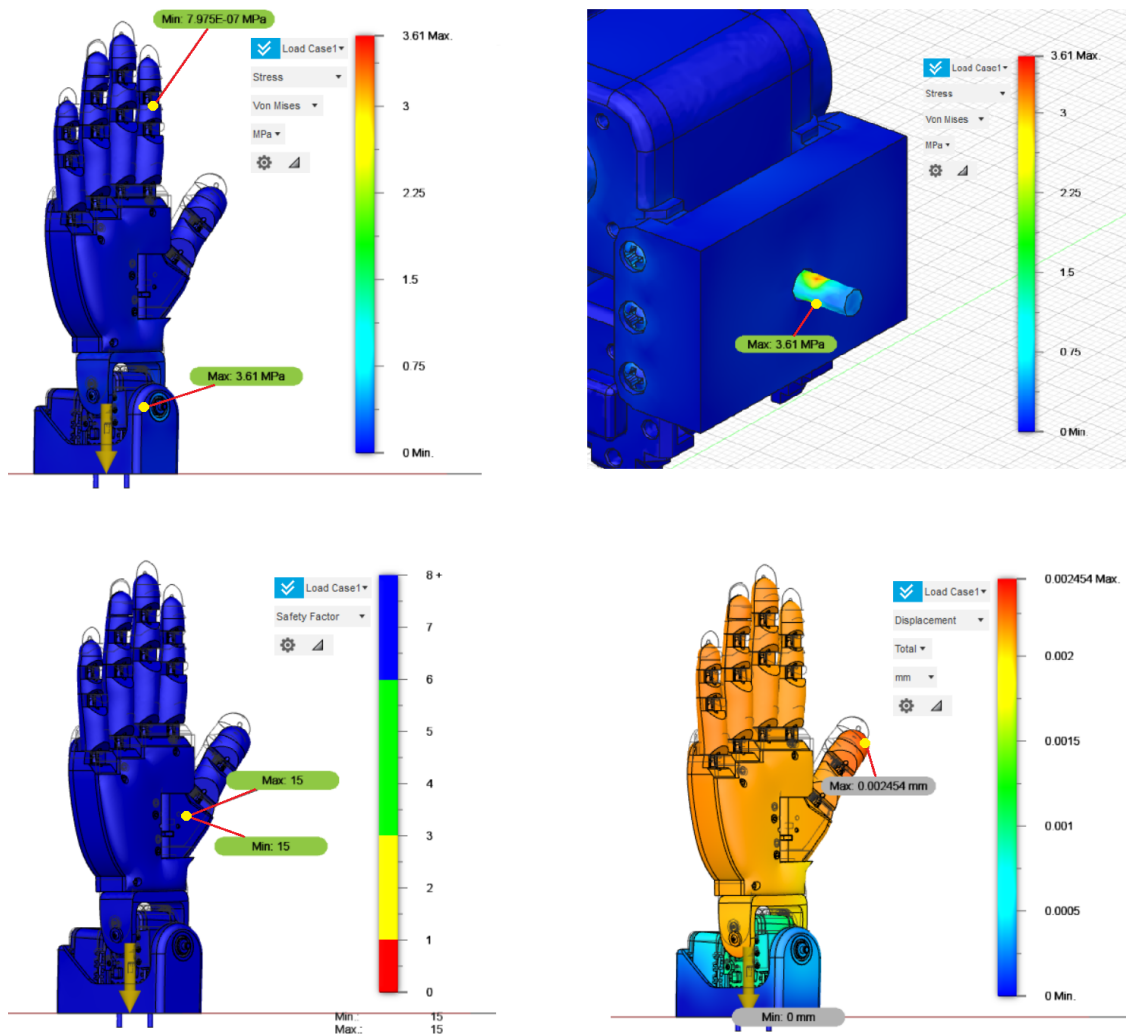


Figura 82: Resultado del análisis de la primera pose, geometría simplificada.
Elaboración propia

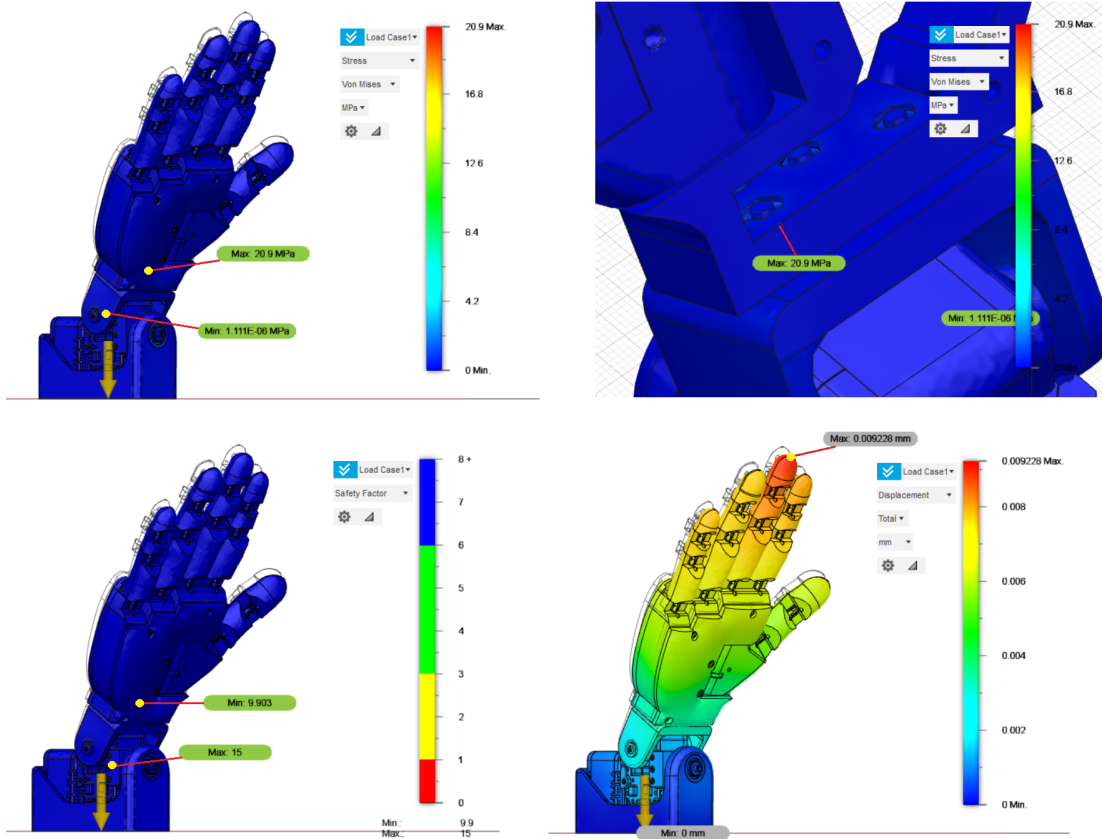


Figura 83: Resultado del análisis de la segunda pose, geometría simplificada. Elaboración propia

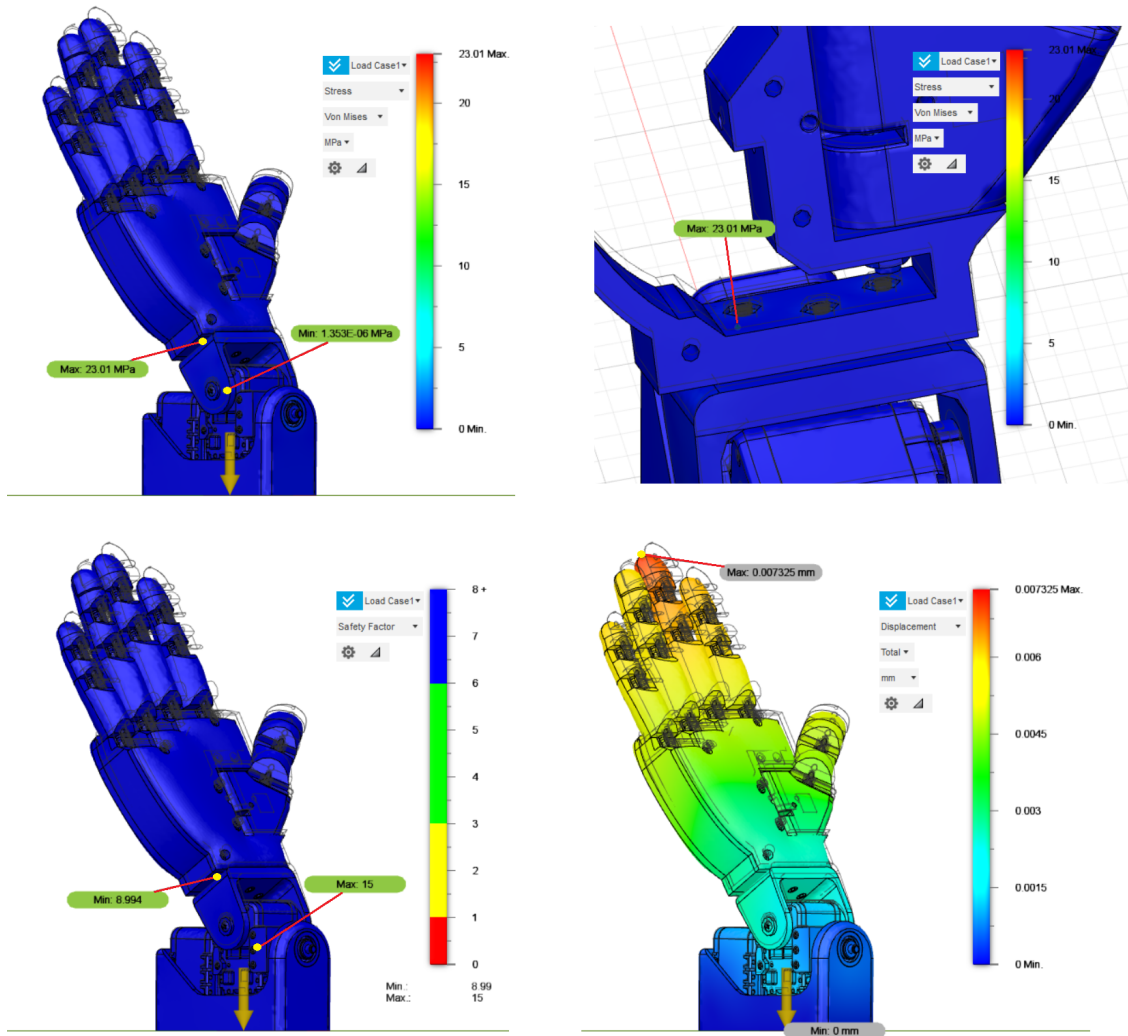


Figura 84: Resultado del análisis de la tercera pose, geometría simplificada.
Elaboración propia

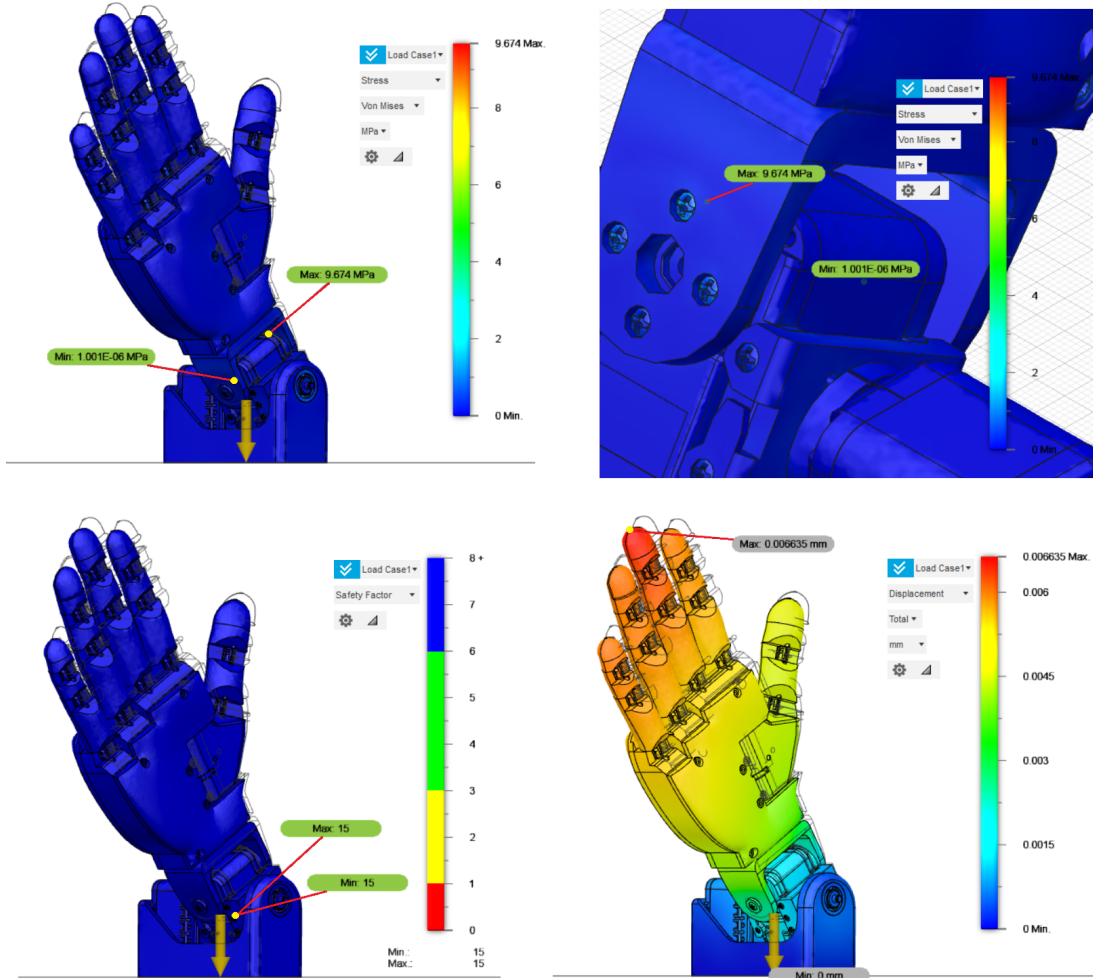


Figura 85: Resultado del análisis de la cuarta pose, geometría simplificada.
Elaboración propia

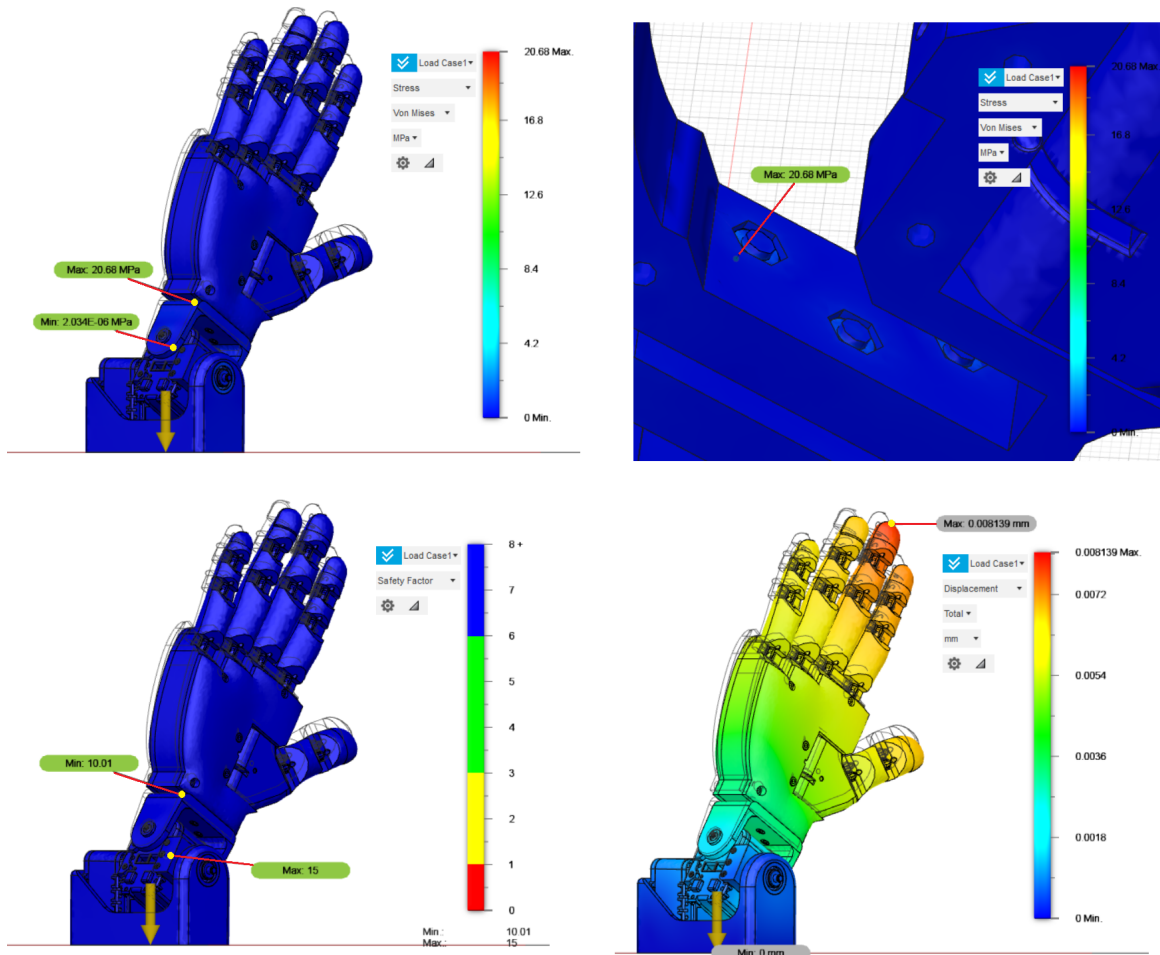


Figura 86: Resultado del análisis de la quinta pose, geometría simplificada.
Elaboración propia

En la primera pose se observa que el desplazamiento máximo se presenta distribuido en todos los dedos. En las siguientes poses este desplazamiento se presenta en el dedo medio. Este desplazamiento está en el orden de las milésimas de milímetro esto equivale a micrómetros, insignificante en esta aplicación.

Con los resultados obtenidos anteriormente se puede comprobar que las piezas fabricadas en PLA se mantendrán en la zona elástica. En conclusión, luego de aplicar el análisis de elementos finitos a las distintas poses se comprobó que el punto crítico, ubicado en la muñeca, no presenta problemas mecánicos en sus piezas. El prototipo es capaz de soportar su propio peso.

11.1. Manejo de potencia

Ya que se utilizarán dos series de servomotores de la marca Dynamixel, el AX-12A y XL-320, será necesario contar con dos niveles de voltaje. En el Cuadro 5 se muestra un resumen de la necesidad eléctrica en este proyecto para cada servomotor.

Servomotor	Voltaje (V)	Corriente (A)	Cantidad	Corriente total (A)
XL-320	6 - 8.4	1.1	6	6.6
AX-12A	9.0 - 12.0	1.5	3	4.5

Cuadro 5: Tabulación de las necesidades eléctricas de los servomotores de la marca Dynamixel. [17] y [18]

Todos los motores en pleno funcionamiento requieren 11.1A, esto genera que se necesite una fuente que proporcione una corriente mayor. El valor de corriente mayor y estándar es 20A. Así la fuente proporcionaría aproximadamente 0.56 % de la corriente máxima que puede conducir, esto evitará sobrecalentamiento.

Debido al uso común que tienen las fuentes de alimentación para tiras led, mayormente en proyectos de electrónica, impresión 3D y CNC, se utilizará una como fuente principal. La fuente de poder S-250-12, Figura 87, convierte de 120V AC a 12V DC, tiene la capacidad de manejar una potencia de 250W, proporcionando 20A máximo. [30]



Figura 87: Fuente de alimentación S-250-12.

[30]

Para suministrar la energía eléctrica a la fuente de poder principal se utilizó un cable conector NEMA 5-15P para la red eléctrica y en el otro extremo un conector IEC C13, Figura 88a. En el cajón estará montado el conector IEC C14, este posee un switch de encendido y apagado.

Como método de protección se utilizó el fusible que integra el conector IEC C14, limitando la corriente tomada de la red eléctrica a 10A máx. Figura 88b. Este conector proporciona la corriente, por medio del cable de alimentación y la red eléctrica, a la fuente de poder S-250-12.



Figura 88: a) Cable de alimentación NEMA 5-15P a IEC C13 (izquierda).
b) Conector IEC C14 con switch y fusible integrado (derecha).

[31] y [32]

La fuente principal se utilizará para suministrar la corriente a los tres servomotores AX-12A, aprovechando que el voltaje está dentro del rango permisible. Para alimentar los servomotores XL-320 se utilizarán módulos convertidores Buck ajustables XL4015, estos son capaces de suministrar 5A máximo. [33]

El voltaje de salida será ajustado a 7.4V DC. Según los datos técnicos proporcionados por el vendedor, la conversión de 12V a 7.4V DC se genera con una eficiencia de 89.5%, proporcionando una corriente de 4.5A. [33]

Para evitar la sobre corriente y excesivo aumento de temperatura en los convertidores, se utilizarán dos módulos. Tres servomotores XL-320 serán alimentados por módulo, por lo tanto, estos deberán suministrar 3.3A. Los convertidores se conectarán a la fuente de voltaje principal de 12V DC a 20A.

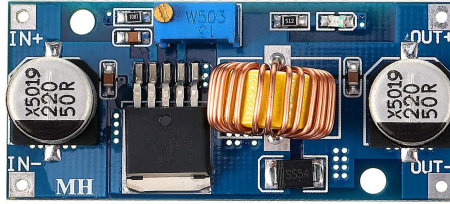


Figura 89: Convertidor XL4015.

[33]

11.2. Controlador

Dynamixel pone a disposición controladores para sus servomotores. El recomendado para aplicaciones con los servomotores de la serie AX y XL es el controlador OpenCM9.04. Este posee las especificaciones, circuitería y conectores necesarios para controlar directamente a los servomotores de la serie XL. Posee módulos de expansión para utilizar la serie AX, estos agregan los conectores específicos para esta serie.

Para verificar las prestaciones de los controladores y placas de desarrollo comúnmente utilizadas (PIC16F8878, Arduino UNO, Tiva-C LaunchPad), junto al controlador OpenCM9.04 se realizó el siguiente cuadro comparativo.

Controlador	PIC 16F887	Arduino UNO ATmega328P	Tiva C TM4C123GH6PM	OpenCM9.04 C STM32F103CB
Tamaño de instrucciones	8 bits	8 bits	32 bits	32 bits
Memoria de programa	14 KB	32 KB	256 KB	128 KB
Frecuencia de operación	8 MHz	16 MHz	80 MHz	72 MHz
Interfaz USB	No	No	Si	Si

Cuadro 6: Comparación de las especificaciones de los distintos controladores.

[34], [35], [36] y [37]

Examinando el Cuadro 6, se observó que que el controlador Tiva-C posee mejores especificaciones técnicas que los otros controladores. A excepción de la memoria de programa, el controlador OpenCM9.04 C tiene características similares a Tiva-C. De manera que el controlador OpenCM9.04 C al ser fabricado por Dymanixel para ser destinado al manejo de sus servomotores y poseer los conectores para los servos XL-320, se ajusta mejor a nuestros requerimientos.

El controlador OpenCM9.04 tipo C se utilizará para realizar el control y comunicación de los servomotores. El controlador posee cuatro conectores TTL de tres pines, este bus es utilizado para controlar específicamente a los servomotores Dynamixel en cadena utilizando la comunicación half duplex. [38]



Figura 90: Controlador OpenCM9.04 C.

[38]

Debido a que se necesitan nueve servomotores, tres AX-12A y seis XL-320, se decidió realizar cadenas de tres servomotores. Esto coincide con la separación de los módulos convertidores de voltaje. En consecuencia, la fuente de poder de 12V suministra la corriente a la cadena de tres servomotores AX-12A, y dos módulos XL4015 de 7.4V proporciona la corriente a las dos cadenas de tres servomotores XL-320.

Para realizar la distribución de voltajes y bus de datos se diseñó una placa de circuito impreso o PCB. La función de esta es recibir los cables de salida de la fuente de poder y módulos convertidores, recibir del controlador la línea de comunicación (datos) y los respectivos conectores MOLEX para cada cadena de servomotores.

11.3. Circuito impreso

El circuito impreso tiene el único objetivo de distribuir y ordenar las señales necesarias para cada cadena de servomotores. Por lo tanto únicamente llevará conectores en ella.

Los conectores utilizados para la recepción de voltajes de alimentación son los PTR AK500/2, Figura 91a. Estos se conocen como terminal block, poseen 2 contactos los cuales aprisionan al cable utilizando tornillos de apriete. Se utilizaron tres, uno para la entrada de 12V DC y dos para la entrada de 7.4V DC.

El conector utilizado para la entrada de datos desde el controlador es el MOLEX 53253-0370, Figura 91c. Este corresponde al conector hembra que posee el controlador OpenCM9.04 C como bus de comunicación dedicado a los servomotores XL-320. Este tipo de conector será utilizado para las dos salidas de cadena de los motores XL-320.

El conector utilizado para la salida de la cadena de los motores AX-12A es el MOLEX 22-03-5035, Figura 91b. Este es de mayor tamaño que los conectores de la serie XL-320.

El software utilizado para realizar el circuito impreso fue Altium Designer 20. Se utilizaron las librerías de símbolos, footprint y modelo 3D proporcionadas por los fabricantes de los conectores para realizar el esquemático, las circuitos de distribución necesarios para el manejo de los servomotores se muestran en la Figura 92.



Figura 91: Conectores utilizados. a) PRT AK500/2 (izquierda), b) MOLEX 22-03-5035 (centro), c) MOLEX 53253-0370 (derecha).

[39], [17] y [18]

Todos los conectores comparten la línea de GND y la línea de datos, el positivo de cada conector de alimentación está conectado directamente a la terminal de alimentación de los conectores para los servomotores.

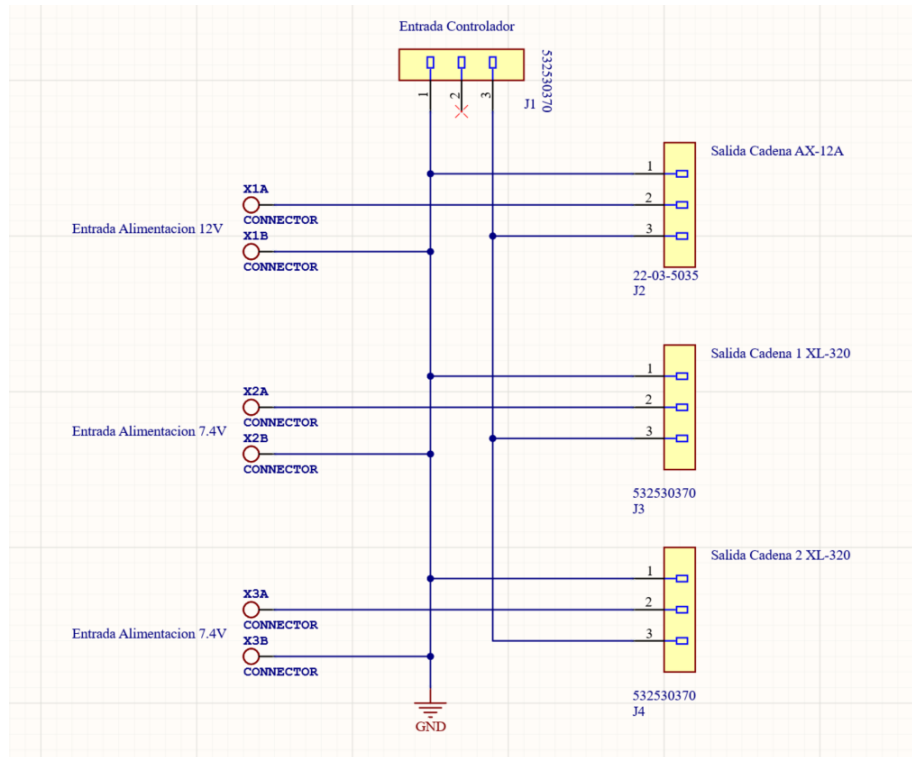


Figura 92: Circuito de distribución.

Elaboración propia

Se consideró la corriente para cada pista utilizando el Cuadro 5. Para realizar los cálculos se utilizó el estándar ANSI IPC-2221A por medio de la calculadora de ancho de pista de circuito impreso ANSI [40]. Para utilizar la calculadora se consideró que las placas poseen 1 oz de cobre por pie cuadrado, la temperatura máxima que puede aumentar es 40°C y la temperatura ambiente es 25°C , las pistas a una longitud promedio de 5cm.

Cadena para servomotores AX-12A			
Datos entrada		Datos salida	
Corriente	4.5 A	Ancho de pista	1.06 mm
Voltaje	12 V	Espacio entre vías	0.65 mm

Cuadro 7: Ancho de pista requerido para la cadena de servomotores AX-12A.
Elaboración Propia

Cadena para servomotores XL-320			
Datos entrada		Datos salida	
Corriente	3.3 A	Ancho de pista	0.69 mm
Voltaje	7.4 V	Espacio entre vías	0.62 mm

Cuadro 8: Ancho de pista requerido para la cadena de servomotores XL-320.
Elaboración Propia

Con la información obtenida en los Cuadros 7 y 8 se determinó el ancho de pista de 1.3 mm y el espaciado entre pistas de 0.65 mm. Esto genera que todas las pistas posean ancho constante. Se ingresaron estos parámetros como reglas al software y se procedió a rutear las conexiones revisando el cumplimiento de las reglas anteriormente mencionadas. Priorizando el diseño compacto y colocando agujeros de 3 mm para montaje se obtuvo el PCB mostrado en la Figura 93.

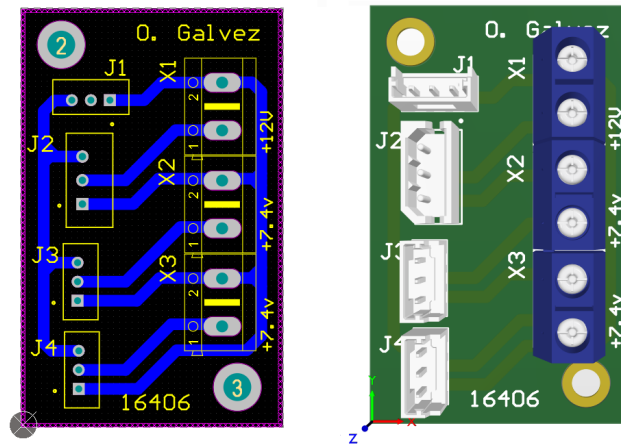


Figura 93: PCB de distribución, vista del ruteo y 3D.

Elaboración propia

11.4. Conexión

Teniendo en cuenta que la prioridad hasta ahora fue mantener un diseño modular, tanto mecánico como electrónico, el diagrama de conexiones puede representarse de una forma sencilla de comprender. En la Figura 93 se observa el diagrama diferenciando por color las líneas y bloques según su funcionamiento.

El funcionamiento de las líneas se observa en el Cuadro 10 y el de los bloques en el Cuadro 9.

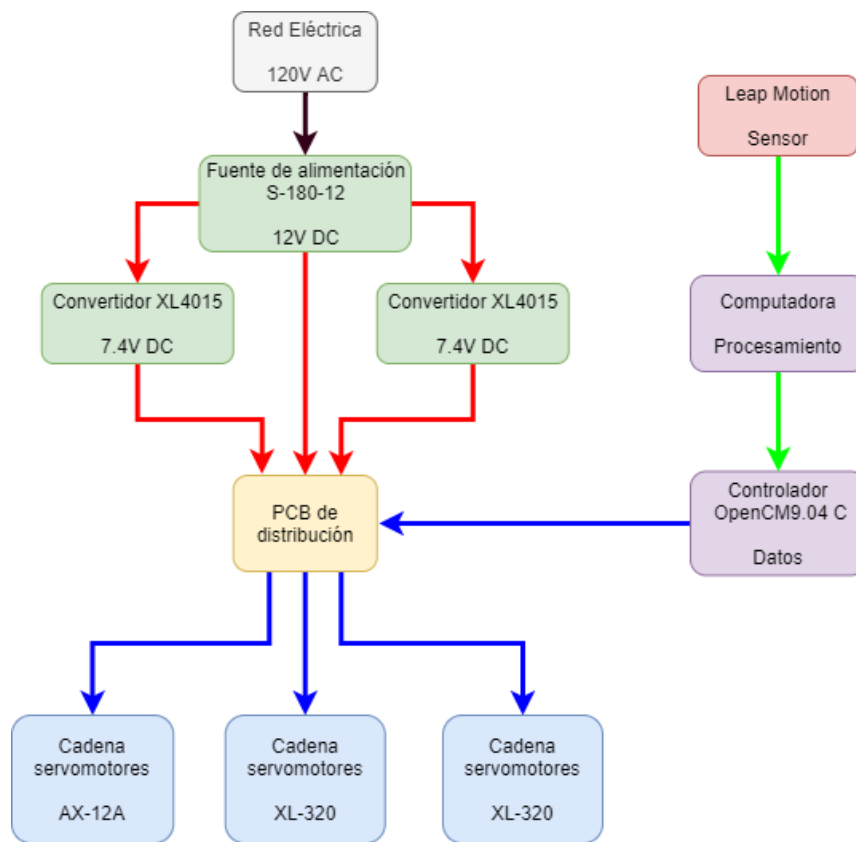


Figura 94: Diagrama de conexiones.

Elaboración propia

Bloque	Color	Descripción
Distribución eléctrica	Gris	Alimentación en corriente alterna provista por el distribuidor
Conversión de voltaje	Verde	Transformación y conversión a corriente directa
Leap Motion	Rojo	Sensor de seguimiento de la mano
Procesamiento	Morado	Lectura, procesamiento e interpretación de los datos del sensor
PCB de distribución	Amarillo	Distribución de las líneas de alimentación y comunicación con los servomotores
Actuadores	Azul	Cadenas de servomotores Dynamixel XL-320 Y AX-12A

Cuadro 9: Descripción de los bloques.

Elaboración propia

Línea	Color	Descripción
Corriente alterna	Negro	Alimentación para la fuente de poder
Corriente directa	Rojo	Alimentación para los módulos convertidores y servomotores
Datos	Verde	Datos desde el sensor procesados por la computadora e interpretados por el controlador
Control	Azul	Comunicación half-duplex en cadena para los servomotores

Cuadro 10: Descripción de las líneas de conexión entre bloques.

Elaboración propia

Debido que es necesario utilizar cables para conectar los módulos, se necesitó emplear un estándar. Para tal motivo se empleó el American Wire Gauge (AWG) [41]. Para cada línea se asignó un calibre de cable dependiendo de la corriente que debe conducir. Cuadro 11

Línea	Color	Corriente máx (A)	Calibre (AWG)
Corriente alterna	Negro	32	14
Corriente directa	Rojo	11	20
Datos (USB) [42]	Verde	1.4	28
Control	Azul	7	22

Cuadro 11: Calibre de cable necesario para cada línea.

Elaboración propia

En la Figura 95 se observa la conexión entre los módulos sobre la tapa diseñada especialmente para alojar todo lo electrónico.



Figura 95: Vistas del montaje de los módulos y conexión eléctrica.

Elaboración propia

12.1. Software de control

Para desarrollar el código de control en la computadora utilizó el kit de desarrollo de software Leap (SDK). Este es el responsable de la interpretación de los fotogramas obtenidos por las cámaras de Leap Motion, se encarga de realizar los cálculos y procesamiento para determinar cada junta. Las juntas son representadas por esferas, Figura 96. La información de posición y orientación de estas esferas, llamadas joints, es la que se utilizó para obtener la posición de cada elemento de la mano.

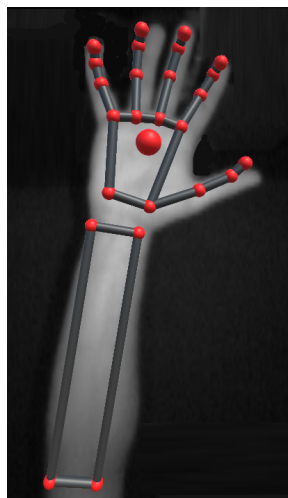


Figura 96: Detección de las juntas, visualizador del Leap Motion SDK.
Elaboración propia

Esta información se interpretó por el software MATLAB utilizando programación orientada a objetos. Debido que Leap SDK no posee como plataforma directa de desarrollo al software MATLAB, se utilizó una interfaz proporcionada por usuarios desarrolladores. Esta interfaz ha tenido cambios dependiendo de la orientación a la cual se pretende dirigir. Para utilizar el Leap Motion de la forma más general posible se utilizó la interfaz desarrollada por el usuario en Github HotTotem llamada Matleap [43].

La interfaz se compone de un archivo MEX (MATLAB ejecutable). Esta es una función que se corre en MATLAB desarrollada como una subrutina en C++. Funcionando como una función nativa de MATLAB, obteniendo la información de Leap SDK disponible en MATLAB como una estructura.

De las estructuras obtenidas en MATLAB se obtuvo la información de los objetos como los dedos, muñeca y antebrazo. Estos datos se mapearon a un ángulo y se enviaron al controlador por medio del puerto USB conectado a OpenCM9.04 C.

El controlador OpenCM9.04 C posee un entorno de desarrollo integrado llamado OpenCM IDE, este deberá correr el código que interpretará los datos para los ángulos, mapearlo al rango utilizado por los servomotores y los enviará a través del Bus TTL utilizando comunicación half-duplex.

12.2. Comunicación

La computadora se conectó por medio del cable USB 3.0 A a USB 3.0 micro B a la extensión de cable USB ubicada en la parte trasera del cajón, el cual a la vez se conecta al controlador OpenCM9.04 C. Se utilizó comunicación serial por medio del protocolo USART a 9600 baudios para el envío de datos.

Estos bytes los recibe el controlador OpenCM9.04 C. Este deberá interpretar la información obtenida y enviar el resultado por el bus de comunicación dedicado del controlador. El conector MOLEX 53253-0370 que posee el controlador se conectó al PCB de distribución. Este posee el mismo tipo de conector como receptor.

En el PCB se distribuye el bus en tres líneas. Dos para el bus de servomotores XL-320 (tres servomotores por bus) y uno para el bus de servomotores AX-12A. Los servomotores se conectaron por medio de cables trenzados utilizando los conectores macho para cada serie.

12.3. Control

El sensor Leap Motion devuelve la información de cada junta. Estas juntas corresponden a las articulaciones de la mano, muñeca y antebrazo. El software MATLAB guarda la información en una estructura. Dentro de esta se encuentra la información del tipo de mano detectada, información del antebrazo, palma y dedos en sus respectivos campos.

Para observar la información que se obtuvo del sensor se utilizó el visualizador integrado en el SDK. En este se observa la posición de las juntas detectadas por el sensor. Presentando la información en tiempo real en la pantalla de la computadora, Figura 97.

Un problema observado con este sensor es la determinación de posiciones cuando la parte de la mano está oculta por otra. Ya que el software es capaz de regresar un modelo completo de la mano por medio del plano de proyección de las cámaras, es imposible determinar exactamente si un dedo se encuentra flexionado estando oculto por otra parte de la mano. En esta circunstancias el software interpreta que el dedo está extendido.

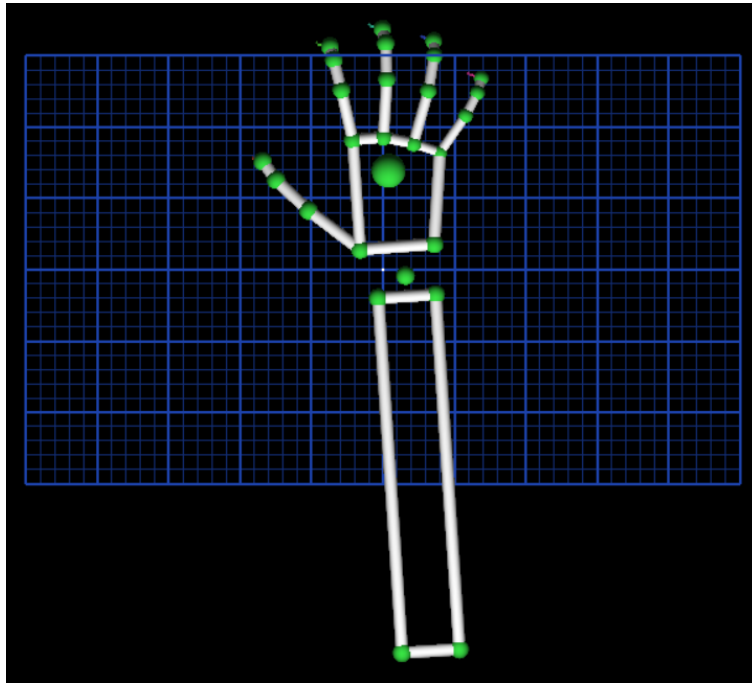


Figura 97: Representación del brazo, visualizador de diagnostico del Leap Motion SDK.
Elaboración propia

El sensor Leap Motion regresa las mediciones de posición y orientación utilizando el marco de referencia observado en la Figura 98. Además regresa dos vectores de la palma útiles llamados normal y dirección, Figura 99. El vector normal es un vector unitario que sale perpendicularmente del centro de la palma. El vector dirección es un vector unitario que apunta del centro de la palma a la punta de los dedos. Estos se utilizaron en los cálculos de los ángulos necesarios.

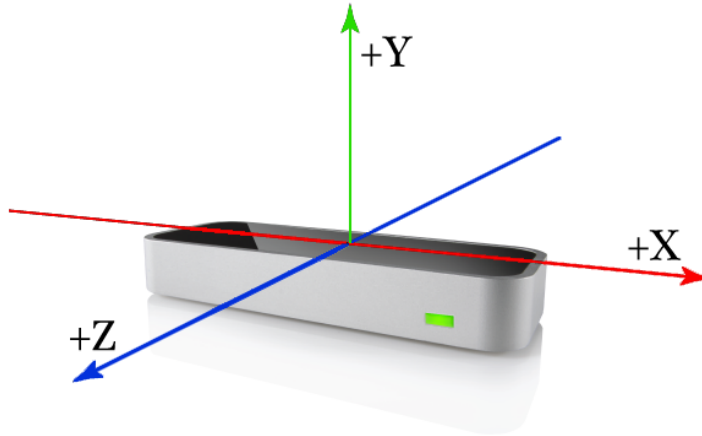


Figura 98: Marco de referencia del sensor Leap Motion.

[44]

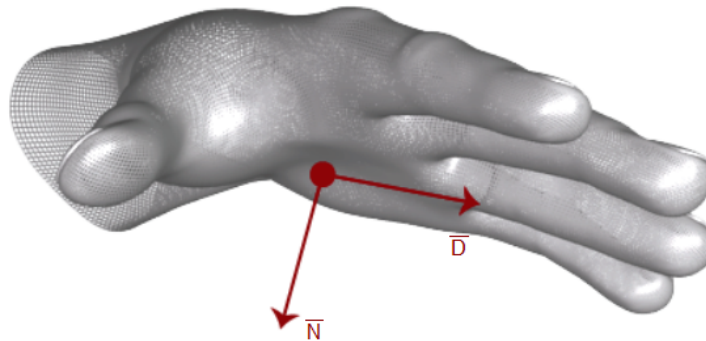


Figura 99: Vectores obtenidos por Leap Motion SDK. Normal y dirección.

[45]

En el código desarrollado en MATLAB se definieron cotas para limitar los ángulos máximos y mínimos en función del movimiento necesario. Por motivos de seguridad mecánica se colocaron cotas máximas y mínimas tanto electrónicas como mecánicas. Así se evitará que el brazo haga movimientos fuera de su espacio de configuración dañando las estructuras. Se inició la comunicación serial seleccionando y abriendo el puerto COM conectado al controlador.

Debido a que las operaciones descritas a continuación se replican para las distintas falanges, se crearon funciones para simplificar el código. La función Cota mapea el ángulo a un valor entero positivo, con el cero correspondiente a 127 (la mitad de un byte). Esto simplifica el manejo de ángulos negativos y los organiza para ser enviados directamente por comunicación serial. La función ang_ProdPun devuelve el ángulo entre dos vectores en formato de grados sexagesimales.

12.3.1. Control del antebrazo

Dentro del campo que identifica al antebrazo “arm” se puede obtener el subcampo rotación. Este regresa la rotación del antebrazo en el espacio representada en cuaterniones. Se utilizó la función `quat2eul` (Convierte cuaterniones a ángulos de Euler), especificando la secuencia de rotación de los ángulos de Euler como “ $x y z$ ”. Luego se convirtió de radianes a grados utilizando `rad2deg` (Convierte ángulos de radianes a grados) para un mejor manejo.

El ángulo alrededor de x se definió como α_1 . El ángulo alrededor de y se definió como β_1 . El ángulo alrededor de z se definió como γ_1 . La correspondencia del movimiento de cada ángulo se describe en el Cuadro 12 y se visualiza en la Figura 100.

De estos tres ángulos se utilizó directamente el valor de α_1 . para generar el movimiento del antebrazo en el prototipo.

Correspondencia entre ángulos y movimientos	
α_1	Pronación y Supinación
β_1	Rotación alrededor de un eje dorsal del antebrazo
γ_1	Rotación alrededor de un eje lateral del antebrazo

Cuadro 12: Ángulos obtenidos a partir del antebrazo.

Elaboración propia

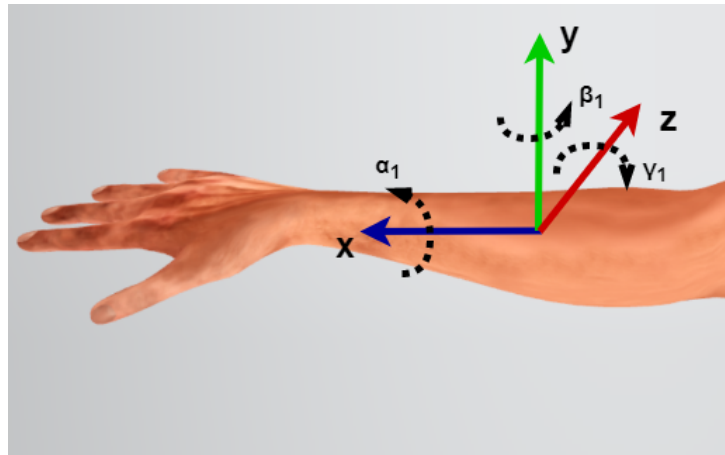


Figura 100: Ángulos de rotación del antebrazo.

Elaboración propia

12.3.2. Control de la muñeca

Utilizando los componentes del vector dirección \vec{D} . Este vector se encuentra dentro del subcampo “direction” del campo “palm”. Y los cosenos directores del vector que representa la posición de la palma, Figura 101, se obtuvo dos ángulos.

El ángulo alrededor de y se definió como β_2 . El ángulo alrededor de z se definió como γ_2 . La correspondencia del movimiento de cada ángulo se describe en el Cuadro 13 y se visualiza en la Figura 102.

Correspondencia entre ángulos y movimientos	
β_2	Rotación alrededor de un eje dorsal de la palma
γ_2	Rotación alrededor de un eje lateral de la palma

Cuadro 13: Ángulos obtenidos a partir del vector dirección de la palma.
Elaboración propia

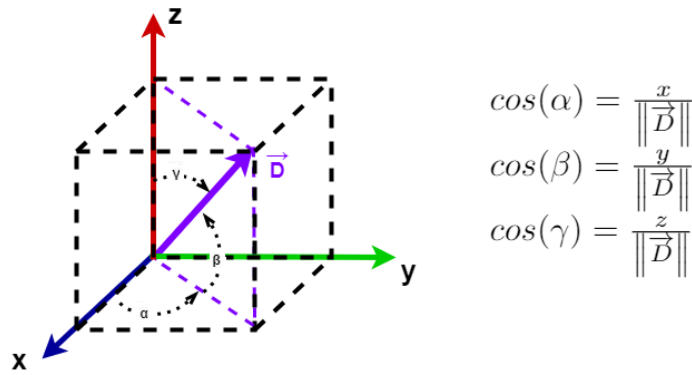


Figura 101: Ángulos directores de un vector.

Elaboración propia

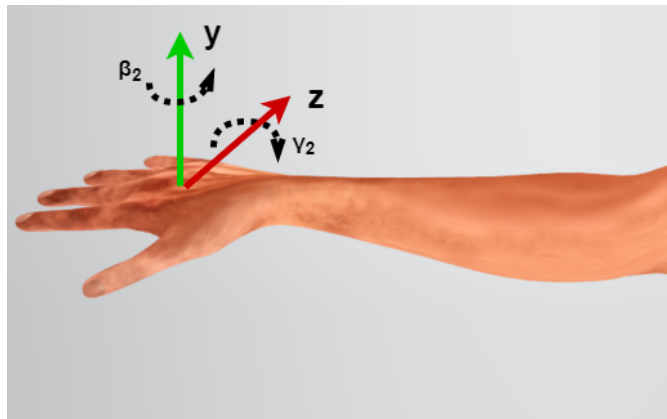


Figura 102: Ángulos de rotación de la palma.

Elaboración propia

Para obtener el ángulo “neto” de la muñeca con respecto al antebrazo se realizó lo siguiente:

$$\text{Desviación radial-cubital} = \beta_1 - \beta_2$$

$$\text{Flexión-extensión} = \gamma_1 - \gamma_2$$

12.3.3. Control de los dedos

La información de las juntas en Leap Motion, que representan las articulaciones, se localizan como coordenadas en el espacio. Estas se encuentran dentro del subcampo “bones” del campo “digits”. Se formaron vectores para cada falange proximal y la falange distal del pulgar.

Utilizando las componentes del vector normal \vec{N} , el vector que forma la falange proximal del dedo de interés \vec{V} y el producto punto entre vectores, Figura 103. Se obtuvo el ángulo de flexión-extensión del dedo, Figura 104.

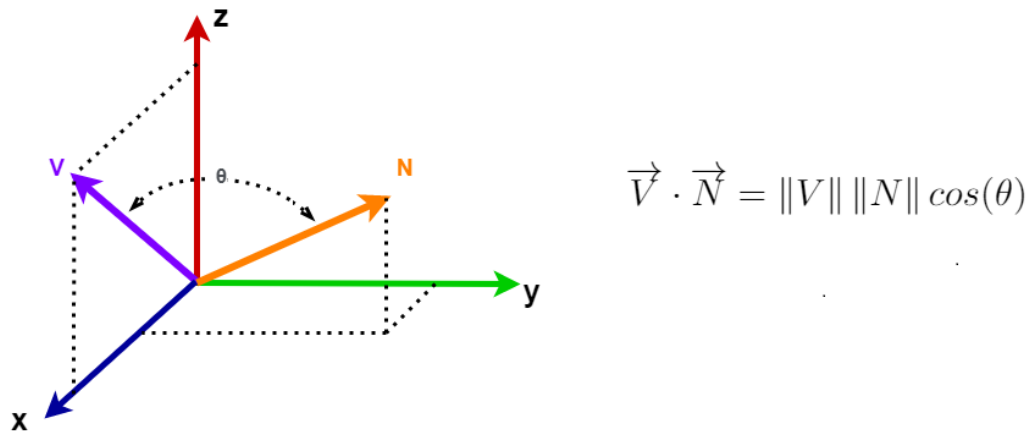


Figura 103: Producto punto ente vectores 3D.

Elaboración propia



Figura 104: Ángulo de flexión del dedo anular.

Elaboración propia

Con el pulgar se realizó el mismo procedimiento para la falange distal. Para esto se calcularon los vectores de la falange medial y distal, utilizando el producto punto se obtuvo el ángulo de flexión-extensión.

12.3.4. Control en OpenCM 9.04 C

Se inicializó la comunicación serial USART a 9600 baudios y la comunicación del bus serial de Dynamixel a 1Mbps. Los motores se moverán a su posición inicial, generalmente a la mitad o posición neutra.

Aprovechando la función de interrupción por comunicación serial que posee el controlador, se procedió a leer cada cadena enviada únicamente cuando se tiene en ejecución un envío de datos. Dentro de la interrupción se desempaquetó la cadena para cada servomotor y se mapeó al valor correspondiente del ángulo en el actuador.

Después de obtener estos valores se formaron tres listas para enviarlas de forma síncrona a cada bus. Se cambió a protocolo 1.0 para enviar los datos de posición para los tres motores AX-12A correspondientes al movimiento del antebrazo y dos de la muñeca. Luego se cambió a protocolo 2.0 para enviar los datos de posición para los primeros tres motores XL-320, al terminar los otros tres motores XL-320 correspondiente a los seis movimientos de los dedos.

12.3.5. Resumen del control

La Figura 105 resume el control y comunicación planteada anteriormente para MATLAB. La Figura 106 resume el control planteado para el controlador OpenCM 9.04 C.

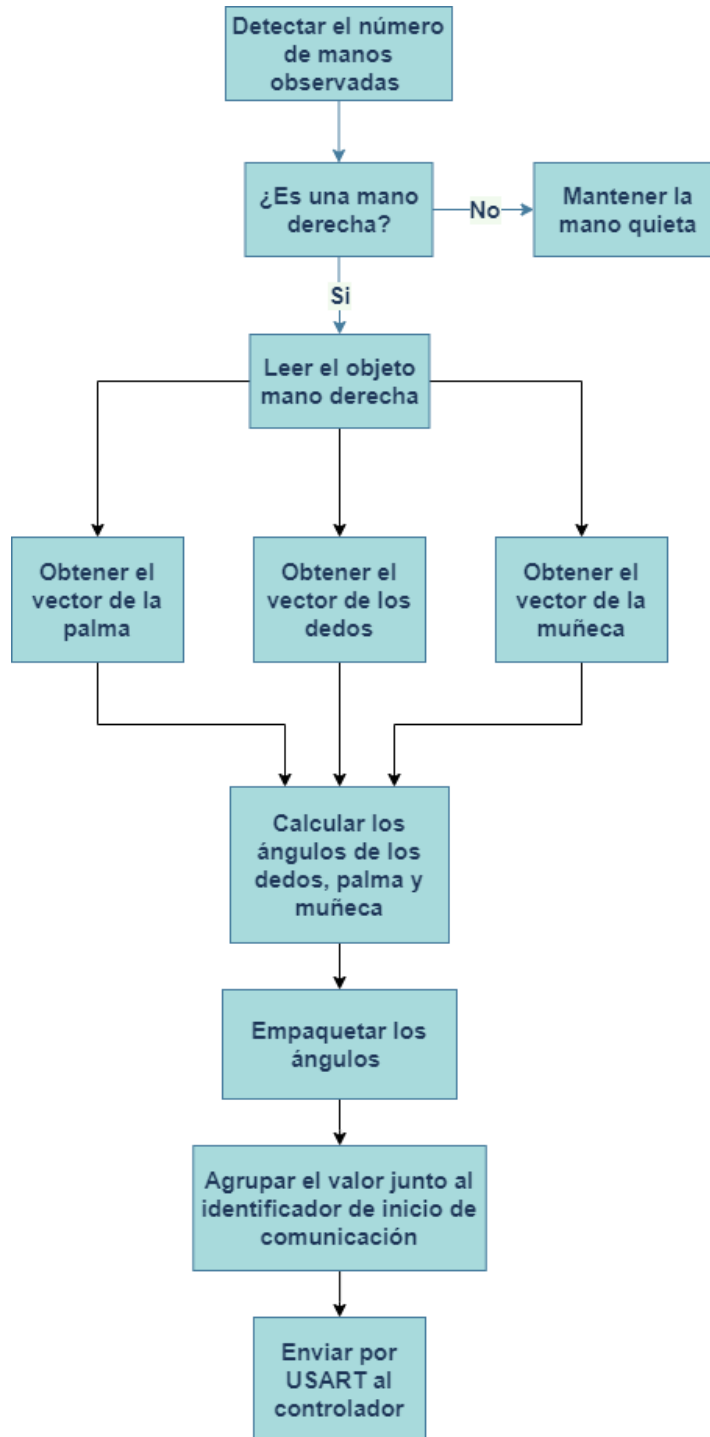


Figura 105: Diagrama de flujo del control en MATLAB.
Elaboración propia

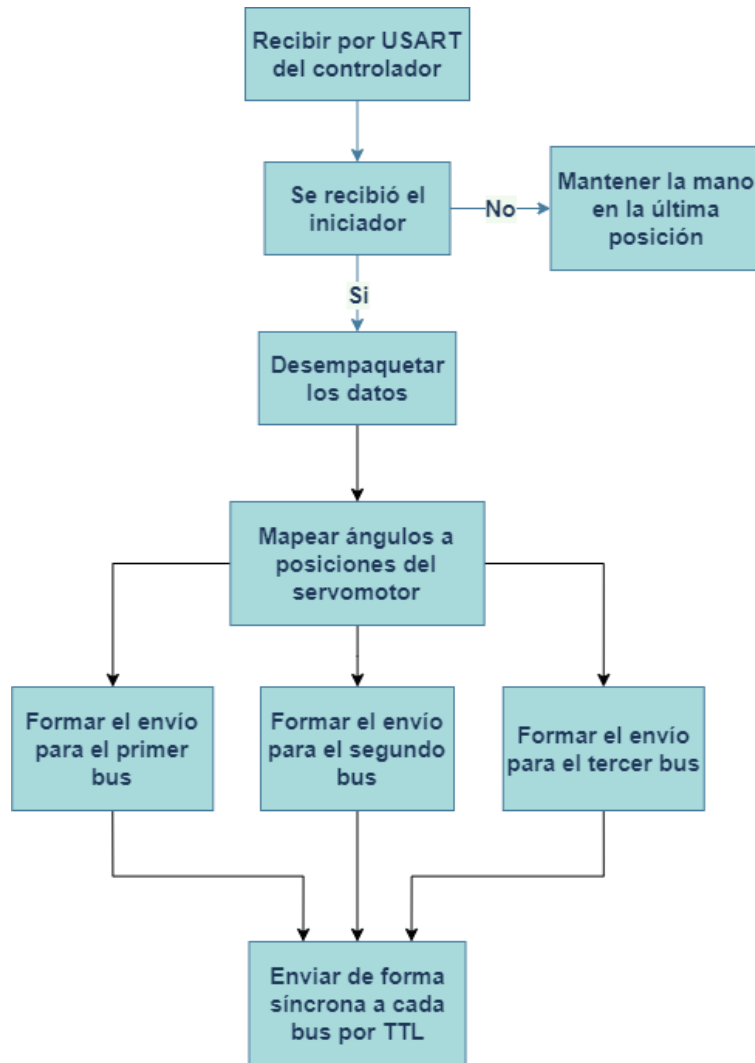


Figura 106: Diagrama de flujo del control en OpenCM 9.4 C.
Elaboración propia

- Se diseñó en el software Fusion 360 de forma realista los dedos, palma, muñeca y antebrazo para fabricarse por impresión 3D en resina foto curable y PLA.
- La mano animatrónica se dotó de movimientos de extensión, flexión, desviación cubital y radial, pronación y supinación simulando el movimiento humano.
- Se diseñó una base estructural, se ideó para soportar y ubicar los servomotores de los dedos y la electrónica utilizada, aplicando el diseño Kerf Bent en la parte frontal del cajón.
- Se implementó un sistema de conductos utilizando tubos de teflón de 2mm de diámetro interno e hilo de pesca para la implementación de tendones inelásticos.
- Debido al reducido espacio en la palma y las curvas cerradas que formaban los conductos dentro de esta, no fue posible implementar el funcionamiento eficiente con este tipo de transmisión de movimiento.
- En el primer análisis de elementos finitos se utilizó la geometría modelada de la rosca de los tornillos. Como resultado se obtuvo esfuerzos mayores al soportado por el PLA en la rosca de cada tornillo. Esto se debió a la limitación del software para modelar geometrías complejas.
- Para el segundo análisis de elementos finitos se utilizó geometría simplificada para la rosca de los tornillos. Tomando esta medida los resultados de los esfuerzos fueron menores al límite elástico del material más débil, en este caso el PLA. El esfuerzo máximo fue de 23.01 Mpa encontrado en la pose de extensión límite de la muñeca. El factor de seguridad es de 2.60.
- Para el mecanismo de muñeca y antebrazo se utilizaron tres servomotores Dynamixel AX-12A generando el movimiento de flexión-extensión, desviación cubital-radial y supinación-pronación.

- Se utilizó un sistema de poleas en los servomotores Dynamixel XL-320A y el control de posición y velocidad que estos presentan para conseguir el movimiento fluido de las falanges junto al controlador OpenCM9.04 C.
- Se realizó el control utilizando el dispositivo Leap Motion para controlar los dedos, muñeca y antebrazo individualmente.

- Analizar la forma de diseñar un mecanismo de muñeca compacto, con la posibilidad de implementarse dentro del espacio del antebrazo. Esto aumentaría la similitud a la forma de una muñeca humana.
- Mejorar la base o cajón utilizando materiales transparentes para proporcionar una vista de todo el mecanismo y electrónica.
- Utilizar un software especializado en ingeniería mecánica para realizar un análisis de elementos finitos usando la geometría real de todas las piezas.
- Implementar las yemas de los dedos. Debido al retraso que generó la pandemia no se pudo fabricar el molde.
- Aprovechar las prestaciones de la impresión por resina foto curable para fabricar todas las piezas, esto proporcionaría un excelente acabado superficial.
- Implementar un sistema de control más eficiente y preciso para emular los movimientos de la mano, muñeca y antebrazo humano, utilizando más sensores Leap Motion para eliminar los puntos ciegos.
- Ubicar de mejor manera los extremos de los conductos dentro de la palma para evitar curvas cerradas.
- Crear una interfaz HMI para el controlador en Matlab.

-
- [1] R. Murray, *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. CRC Press, 2017.
 - [2] S. Jacobsen, E. Iversen, D. Knutti, R. Johnson y K. Biggers, “Design of the Utah/M.I.T. Dextrous Hand,” en *Proceedings. 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 3, 1986, págs. 1520-1532.
 - [3] P. Mazariegos, “Diseño e implementación de un nuevo modelo de la mano de la Prótesis Biónica Transhumeral,” *Universidad del Valle de Guatemala*, 2012.
 - [4] B. Rodas, “Diseño e implementación de mano y antebrazo animatráonico antropomorfo,” *Universidad del Valle de Guatemala*, 2018.
 - [5] M. Romero, A. Sánchez, C. San Miguel, L. Sáez y P. González, “Prototipo de mano robótica antropométrica sub-actuada,” *Universidad de Antioquia*, n.º 65, págs. 46-59, 2012.
 - [6] R. Cailliet, *Anatomia funcional, biomecánica*. Marbán, 2005.
 - [7] W. Commons, *Pronation and supination*. dirección: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=29624332>.
 - [8] G. Topanta, “Dispositivo mecatrónico para rehabilitación pasiva de muñeca,” *Universidad Técnica del Norte*, 2017.
 - [9] D. Andrade y D. Zuñiga, “Diseño y construcción de una mano robótica para la enseñanza del alfabeto dactilológico universal para personas sordomudas,” *Universidad Politécnica Salesiana*, 2011.
 - [10] P. Dueñas y C. Acevedo, “Diseño y construcción de una mano animatráonica controlada mediante guante sensor y comunicada inalámbricamente con un alcance de hasta 5 metros.,” *Universidad de San Buenaventura*, 2016.
 - [11] O. Lazo y L. Rojas, “Diseño asistido por computador,” *Industrial Data*, 2006.
 - [12] IAC, *Autodesk Fusion 360*. dirección: <https://www.iac.com.co/fusion-360/>.
 - [13] J. Polo, “Diseño de una impresora 3D tipo FFF plegables,” *Universitat Jaume I*, 2016.
 - [14] 3DMakerNow, *Filamento para impresora 3D*. dirección: <https://3dmakernow.com/filamento-para-impresora-3d/>.

- [15] NatureWorks, *Ingeo Biopolymer 4043D*. dirección: https://cdn.shopify.com/s/files/1/1223/5992/files/PLA_4043D_TDS.pdf?11501836698641121673.
- [16] 3DMakerNow, *Resinas para impresoras 3D SLA*. dirección: <https://3dmakernow.com/resinas-para-impresoras-3d/>.
- [17] ROBOTIS, *AX-12A e-manual*. dirección: <http://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/ax/ax-12a/>.
- [18] ROBOTIS, *XL-320 e-manual*. dirección: <http://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/x/xl320/>.
- [19] A. Schiele, P. Letier, R. V. Der Linde y F. V. Der Helm, "Bowden Cable Actuator for Force-Feedback Exoskeletons," en *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2006.
- [20] S. Thornton, *Asynchronous serial communication explained (including TTL, UART, and RS232)*. dirección: <https://www.microcontrollertips.com/asynchronous-serial-communication-explained-including-ttl-uart-rs232/>.
- [21] Weigu, *Tutorials: Sensors, interfaces and bus systems (SENIN, BUSSY)*. dirección: <http://www.weigu.lu/tutorials/sensors2bus/02interfaces/svg/simplexduplexmulti.svg>.
- [22] K. Villalobos, D. Antón, A. Goñi y A. Illarramendi, "KVLEAP: Interacción sin contacto (touchless) con ordenadores," 2015.
- [23] 0. Ultraleap, *Leap Motion Controller*. dirección: <https://www.ultraleap.com/product/leap-motion-controller/>.
- [24] FIOTOK, *FIOTOK Braided Fishing Line 500M 546Yds Stronger Multifilament Braid Wire for Saltwater*. dirección: <https://fiotok.com/product/fiotok-braided-fishing-line-500m-546yds-stronger-multifilament-braid-wire-for-saltwater>.
- [25] A. Tech, *Tube de teflón PTFE*. dirección: <https://www.amazon.com/PTFE-Teflon-tubing-5ft-Allen/dp/B07B8LKG9R>.
- [26] Y. Yang, X. Ke, J. Xin y K. Lu, "Development and experiment of facial robot SHFR-III," *2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, 2015.
- [27] J. Hollander, *MakerCase*. dirección: <https://es.makercase.com/>.
- [28] Autodesk, *Diferencia entre Autodesk Inventor y Fusion 360*. dirección: <https://knowledge.autodesk.com/es/support/fusion-360/learn-explore/caas/simplecontent/content/diferencia-entre-autodesk-inventor-y-fusion-360.html>.
- [29] E. ToolBox, *Young's Modulus - Tensile and Yield Strength for common Materials*. dirección: https://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus-d_417.html.
- [30] inShareplus, *inShareplus 12V 20 A 240W DC Universal Regulated Switching Power Supply*. dirección: <https://www.amazon.com/inShareplus-Universal-Regulated-Switching-Transformer/dp/B07RJMG3FB/>.
- [31] DTK, *DTK 10 ft / 3.05M IEC 60320 3 Prong C13 Power Cord NEMA 5-15P to IEC-320-C13 Power Cable*. dirección: <https://www.amazon.com/DTK-IEC-320-C13-Adapter-Monitor-Projector/dp/B07MC9R7BQ>.

- [32] URBEST, *URBEST 10A 250V AC Rocker Switch 3 Pin IEC320 C14 Inlet Module Plug Fuse*. dirección: <https://www.amazon.com/URBEST-Rocker-Switch-IEC320-Module/dp/B00NWO68JI>.
- [33] Frienda, *5A DC-DC Adjustable Buck Converter Step-Down Voltage Regulator Power Module 4V - 38V to 1.25V - 36V*. dirección: <https://www.amazon.com/gp/product/B088H4J6HB>.
- [34] Microchip, *PIC16F887*. dirección: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC16F887>.
- [35] Microchip, *ATmega328P*. dirección: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/atmega328p>.
- [36] T. Instruments, *TM4C123GH6PM*. dirección: <https://www.ti.com/product/TM4C123GH6PM>.
- [37] STMicroelectronics, *STM32F103CB*. dirección: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f103cb.html>.
- [38] ROBOTIS, *OpenCM9.04*. dirección: <https://emanual.robotis.com/docs/en/parts/controller/opencm904>.
- [39] G. Electronic, *PTR AK500/2DS*. dirección: https://www.gmelectronic.com/terminal-plate-ptr-ak500-2ds-5-0-v-grey?id_lang=2&id_currency=2.
- [40] deSmith, *ANSI PCB Trace Width Calculator*. dirección: <https://www.desmith.net/NMds/Electronics/TraceWidth.html>.
- [41] PowerStream, *Wire Gauge and Current Limits*. dirección: https://www.powerstream.com/Wire_Size.htm.
- [42] L. Direct, *USB Wiring*. dirección: <https://www.leadirect.co.uk/technical-library/pinouts-wiring-diagrams/usb-wiring>.
- [43] HotTotem, *Matleap: MATLAB Interface to the Leap Motion Controller*. dirección: <https://github.com/tomh4/matleap>.
- [44] Ultraleap, *Leap Motion C API*. dirección: <https://developer-archive.leapmotion.com/documentation/LeapC/a00029.html>.
- [45] Ultraleap, *Getting Started*. dirección: https://developer-archive.leapmotion.com/documentation/python/api/Leap_Classes.html.

16.1. Códigos utilizados

16.1.1. Código principal en Matlab

```
1
2
3 %% DESIGNACIONES
4 %ANTE      = ANTEBRAZO           => PRONACION - SUPINACION
5 %MUNE_DES  = MUN~ECA DESVIACIONES => DESVIACION RADIAL - CUBITAL
6 %MUNE_EXT  = MUN~ECA EXTENSIONES => EXTENSI N - FLEXI N
7 %INDI      = DEDO INDICE         => EXTENSI N - FLEXI N
8 %MEDI      = DEDO MEDIO          => EXTENSI N - FLEXI N
9 %ANUL      = DEDO ANULAR         => EXTENSI N - FLEXI N
10 %MENI     = DEDO MEN~IQUE       => EXTENSI N - FLEXI N
11 %PULG     = DEDO PULGAR         => EXTENSI N - FLEXI N
12 %PULG_META = DEDO PULGAR METACARPO => EXTENSI N - FLEXI N
13
14 %% VARIABLES
15
16 %DEFINICI N DE MAXIMOS Y MINIMOS
17 MAX_ANTE = 75;      MIN_ANTE = -75;
18 MAX_MUNE_DES = 30;  MIN_MUNE_DES = -30;
19 MAX_MUNE_EXT = 30;  MIN_MUNE_EXT = -30;
20 MAX_INDI = 90;     MIN_INDI = 0;
21 MAX_MEDI = 90;     MIN_MEDI = 0;
22 MAX_ANUL = 90;     MIN_ANUL = 0;
23 MAX_MENI = 90;     MIN_MENI = 0;
24 MAX_PULG = 90;     MIN_PULG = 0;
25 MAX_PULG_META = 90; MIN_PULG_META = 0;
26
27 %% INICIO
28
29 %SE CONECTA CON EL OBJETO
30 OpenCM = serial('COM12');
31 fopen(OpenCM);
```

```

32
33 for i = 1:10000
34     pause(0.01);
35     f=matleap_frame; %%LECTURA DE FRAME
36     %pause(1.0);
37
38     NUM_MANOS = size(f.hands,2); %NUMERO DE MANOS
39
40     if (NUM_MANOS == 1)
41         fprintf('UNA MANO\n')
42
43         DERECHA = f.hands.type;
44         if (DERECHA == 1)
45             fprintf('DERECHA\n')
46
47             %%PRONACION SUPINACION
48             ANTEBRAZO = f.hands.arm.rotation;
49             ORIENTACION_ANTEBRAZO = quat2eul(ANTEBRAZO, 'XYZ');
50             ORIENTACION_ANTEBRAZO = rad2deg(ORIENTACION_ANTEBRAZO);
51
52             ANG_ANTEBRAZO = ORIENTACION_ANTEBRAZO(1); %UTIL
53
54             ANG_ANTEBRAZO_DIRECCION = ORIENTACION_ANTEBRAZO(2);
55             if (sign(ORIENTACION_ANTEBRAZO(3)) == 1)
56                 ANG_ANTEBRAZO_TRANS = 180-(ORIENTACION_ANTEBRAZO(3));
57             else
58                 ANG_ANTEBRAZO_TRANS = -(180+ORIENTACION_ANTEBRAZO(3));
59             end
60
61             %%EXTENSION FLEXION Y DESVIACION RADIA_CUBITAL
62             VEC_DIR= f.hands.palm.direction;
63             ANG_PALMA_X = 90-acosd(VEC_DIR(2));
64             ANG_PALMA_Y = -(90+atan2d(VEC_DIR(3),VEC_DIR(1)));
65
66             ANG_MUNE_EXT = ANG_ANTEBRAZO_TRANS - ANG_PALMA_X; %UTIL
67             ANG_MUNE_DES = ANG_ANTEBRAZO_DIRECCION - ANG_PALMA_Y; %UTIL
68
69
70             %%EXTENSION FLEXION DEDOS
71             VEC_NORMAL = f.hands.palm.normal;
72
73             %%INDICE
74             INDI_P = f.hands.digits(2).bones(2).prev_joint;
75             INDI_N = f.hands.digits(2).bones(2).next_joint;
76             INDI_VEC = INDI_N - INDI_P;
77
78             ANG_INDI = ang_ProdPun(VEC_NORMAL, INDI_VEC); %UTIL
79
80             %%MEDIO
81             MEDI_P = f.hands.digits(3).bones(2).prev_joint;
82             MEDI_N = f.hands.digits(3).bones(2).next_joint;
83             MEDI_VEC = MEDI_N - MEDI_P;
84
85             ANG_MEDI= ang_ProdPun(VEC_NORMAL, MEDI_VEC); %UTIL
86
87             %%ANULAR
88             ANUL_P = f.hands.digits(4).bones(2).prev_joint;
89             ANUL_N = f.hands.digits(4).bones(2).next_joint;
90             ANUL_VEC = ANUL_N - ANUL_P;

```

```

91
92     ANG_ANUL = ang_ProdPun(VEC_NORMAL , ANUL_VEC);           %UTIL
93
94     %%MENIQUE
95     MENI_P = f.hands.digits(5).bones(2).prev_joint;
96     MENI_N = f.hands.digits(5).bones(2).next_joint;
97     MENI_VEC = MENI_N - MENI_P;
98
99     ANG_MENI= ang_ProdPun(VEC_NORMAL , MENI_VEC);           %UTIL
100
101     %%PULGAR METACARPIAL
102     PULG_META_P = f.hands.digits(1).bones(2).prev_joint;
103     PULG_META_N = f.hands.digits(1).bones(2).next_joint;
104     PULG_META_VEC = PULG_META_N - PULG_META_P;
105
106     ANG_PULG_META= ang_ProdPun(VEC_NORMAL , PULG_META_VEC); %UTIL
107
108     %%PULGAR DISTAL
109     PULM_PROX_P = f.hands.digits(1).bones(3).prev_joint;
110     PULM_PROX_N = f.hands.digits(1).bones(3).next_joint;
111     PULM_PROX_VEC = PULM_PROX_N - PULM_PROX_P;
112
113     PULM_DIST_P = f.hands.digits(1).bones(4).prev_joint;
114     PULM_DIST_N = f.hands.digits(1).bones(4).next_joint;
115     PULM_DIST_VEC = PULM_DIST_N - PULM_DIST_P;
116
117     ANG_PULG = ang_ProdPun(PULM_PROX_VEC , PULM_DIST_VEC); %UTIL
118
119
120
121     %%ARREGLO DE DATOS (ORDEN DE SERVOS)
122     ANTE      = COTA(ANG_ANTEBRAZO , MAX_ANTE , MIN_ANTE);
123     MUNE_DES  = COTA(ANG_MUNE_DES , MAX_MUNE_DES , MIN_MUNE_DES);
124     MUNE_EXT  = COTA(ANG_MUNE_EXT , MAX_MUNE_EXT , MIN_MUNE_EXT);
125     PULG      = COTA(ANG_PULG , MAX_PULG , MIN_PULG);
126     PULG_META = COTA(ANG_PULG_META , MAX_PULG_META , MIN_PULG_META);
127     INDI      = COTA(ANG_INDI , MAX_INDI , MIN_INDI);
128     MEDI      = COTA(ANG_MEDI , MAX_MEDI , MIN_MEDI);
129     ANUL      = COTA(ANG_ANUL , MAX_ANUL , MIN_ANUL);
130     MENI      = COTA(ANG_MENI , MAX_MENI , MIN_MENI);
131
132
133     %%ENVIO DE DATOS
134     MATRIZ_DATA = [255, ANTE, MUNE_DES, MUNE_EXT, PULG, PULG_META ,
135     INDI, MEDI, ANUL, MENI];
136     fprintf(OpenCM, MATRIZ_DATA);
137     fprintf('ENVIADO\n')
138     % FIN ENVIO DATOS
139
140     else
141         fprintf('IZQUIERDA\n')
142     end
143
144     elseif (NUM_MANOS == 2)
145         fprintf('DOS MANOS\n')
146
147     else
148         fprintf('SIN LECTURA DE MANOS\n')

```

```
149     end
150
151 end
152
153 %SE DESCONECTA DEL OBJETO
154 fclose(OpenCM);
155 %BORRA TODOS LOS OBJETOS
156 delete(OpenCM);
157 clear OpenCM
```

16.1.2. Función cota en Matlab

```
1 %% ACOTA Y REDONDEA LOS VALORES INGRESADOS
2
3 % OPERACION DEDICADA PARA ESTA APLICACION
4 % TRANSFORMA EL CERO DE LAS MEDICIONES DE ANGULO A LA MITAD DE UN BYTE
5 % ES DECIR: (0 = 1278)
6 % LUEGO ACOTA A LOS VALORES MAXIMOS Y MINIMOS INGRESADOS
7 % POR ULTIMO REDONDEA AL ENTERO MAS CERCANO.
8
9 function [ACOTADO] = COTA (VALOR , MAXIMO , MINIMO)
10
11 VAL_MEDIO = 127;
12 ACOTADO = VAL_MEDIO + VALOR;
13
14 if (VALOR > MAXIMO)
15     ACOTADO = VAL_MEDIO + MAXIMO;
16 elseif (VALOR < MINIMO)
17     ACOTADO = VAL_MEDIO + MINIMO;
18 end
19
20 ACOTADO = round(ACOTADO);
21
22 end
```

16.1.3. Función ang _ ProdPun en Matlab

```
1 %% CALCULO DEL ANGULO ENTRE DOS VECTORES 3D
2
3 % UTILIZA EL PRODUCTO PUNTO PARA CALCULAR EL ANGULO ENTRE DOS
4 % VECTORES EN 3 DIMENSIONES
5
6 function [ang] = ang_ProdPun(vec1,vec2)
7
8
9 num = (vec1(1)*vec2(1))+(vec1(2)*vec2(2))+(vec1(3)*vec2(3));
10 den = norm(vec1)*norm(vec2);
11
12 ang = rad2deg(acos(num/den));
13
14 end
```

16.1.4. Código en OpenCM IDE

```
1 //INCLUYE MATH PARA FUNCIONES
2 #include <math.h>
3
4 //DEFINE EL NOMBRE Y ID DE LOS MOTORES
5 #define AX_ANTE      1
6 #define AX_MUNE_DES  2
7 #define AX_MUNE_EXT  3
8 #define XL_PULG      4
9 #define XL_PULG_META 5
10 #define XL_INDI      6
11 #define XL_MEDI      7
12 #define XL_ANUL      8
13 #define XL_MENI      9
14
15
16 //INICIA VARIABLES DE RECEPCION
17 int ANTE      = 0;
18 int MUNE_DES  = 0;
19 int MUNE_EXT  = 0;
20 int PULG      = 0;
21 int PULG_META = 0;
22 int INDI      = 0;
23 int MEDI      = 0;
24 int ANUL      = 0;
25 int MENI      = 0;
26
27
28
29 //DEFINICIONES DE REGISTROS DE POS Y VEL
30 #define P_GOAL_POSITION  30
31 #define P_GOAL_SPEED    32
32
33 //DEFINE E INICIA BUS SERIAL USART1 PARA SERVOS
34 #define DXL_BUS_SERIAL1 1
35 Dynamixel SERVO(DXL_BUS_SERIAL1);
36
37
38 //INICIALIZACION
39 void setup(){
40
41     //INICIA COMUNICACION A 1Mbps
42     SERVO.begin(3);
43
44     //DEFINE LOS DOS PROTOCOLOS
45     SERVO.setPacketType(DXL_PACKET_TYPE1);
46     SERVO.writeWord( BROADCAST_ID,  P_GOAL_POSITION,  512 );
47     SERVO.writeWord( BROADCAST_ID,  P_GOAL_SPEED,    200 );
48
49     SERVO.setPacketType(DXL_PACKET_TYPE2);
50     SERVO.jointMode(1);
51     SERVO.writeWord( BROADCAST_ID,  P_GOAL_POSITION,   0 );
52     SERVO.writeWord( BROADCAST_ID,  P_GOAL_SPEED,    200 );
53
54     //INICIALIZAA CON POS 0 Y VEL 0 TODOS LOS SERVOS
55     //CONECTADOS EN EL MISMO BUS
56
57
```

```

58 //INICIALIZA LA INTERRUPCION POR COMUNICACION SERIAL USB
59 SerialUSB.attachInterrupt(usbInterrupt);
60
61 delay(5000);
62 }
63 //FIN DE LA INICIALIZACION
64
65 //INICIA INTERRUPCION
66 void usbInterrupt(byte* buffer, byte nCount){
67 //BANDERA DE INICIO DE TRANSMISION DE DATOS
68 if (buffer[0] == 255){
69
70 // (max_data/max_angulo)*(angulo centrado en 127 - 127)+(medio_data)
71 // (1023/300)*(buffer -127)+ (512)
72 // 3.41* buffer - 78.93
73
74 //MAPEO A ANGULOS DEL SERVO SEGUN DEDUCCION ANTERIOR
75 ANTE = 3.41*(buffer[1])+79;
76 MUNE_DES = 3.41*(buffer[2])+79;
77 MUNE_EXT = 3.41*(buffer[3])+79;
78 PULG = 5*(buffer[4]);
79 PULG_META = 5*(buffer[5]);
80 INDI = 5*(buffer[6]);
81 MEDI = 5*(buffer[7]);
82 ANUL = 5*(buffer[8]);
83 MENI = 5*(buffer[9]);
84 }
85 }
86 //FIN DE INTERRUPCION
87
88
89 //INICIO DE LOOP
90 void loop(){
91
92
93 //CREACION DE LISTA PARA AX-12A
94 word AX_Sincrono[9]=
95 {
96 AX_ANTE, round(ANTE), 100,
97 AX_MUNE_DES, round(MUNE_DES), 100,
98 AX_MUNE_EXT, round(MUNE_EXT), 100 };
99
100 SERVO.setPacketType(DXL_PACKET_TYPE1);
101 SERVO.syncWrite(30,2,AX_Sincrono,9);
102
103 //CREACION DE LISTA PARA XL-320
104 word XL_Sincrono1[9]=
105 { XL_PULG, round(PULG), 200,
106 XL_PULG_META, round(PULG_META), 200,
107 XL_INDI, round(INDI), 200 };
108
109 word XL_Sincrono2[9]=
110 { XL_MEDI, round(MEDI), 200,
111 XL_ANUL, round(ANUL), 200,
112 XL_MENI, round(MENI), 200 };
113
114
115 SERVO.setPacketType(DXL_PACKET_TYPE2);
116 SERVO.syncWrite(30,2,XL_Sincrono1,9);

```

```
117  SERVO.syncWrite(30,2,XL_Sincrono2,9);
118
119  delay(50);
120
121  }
122  //FIN DE LOOP
```


Animatrónico: Uso de mecanismos robóticos para simula el aspecto y comportamiento de los seres vivos. 1

Antropomórfica: Con forma o apariencia humana. 1, 3

Baudios: Unidad de medida utilizada en telecomunicaciones, representa el número de símbolos por segundo en un medio de transmisión digital. 76, 82

Bowden: Cable mecánico flexible usado para la transmisión mecánica del movimiento por tracción, para ello dispone de un cable flexible interior que trasmite el movimiento, rodeado de una camisa protectora también flexible que sirve de punto de apoyo para transmitir el esfuerzo al extremo final del cable. 1, 9, 18, 23, 28, 30, 35, 36, 42, 45, 50, 51

Buck: Convertidor reductor de corriente directa a corriente directa, se obtiene a su salida una tensión menor que a su entrada. 68

Cuaterniones: Es una generalización de los números complejos, un espacio vectorial de dimensión cuatro sobre los números reales. Es una forma particularmente cómoda y práctica de definir las rotaciones en 3D. 79

Esfuerzos de von Mises: Magnitud física proporcional a la energía de distorsión. Se usa en el contexto de las teorías de fallo como indicador de un buen diseño para materiales dúctiles. 56

Espacio de configuración: Es el espacio de todas las posibles posiciones instantáneas de un sistema mecánico. 78

Fotogramas: Cada una de las imágenes que se suceden en un video consideradas de manera aislada.. 75

Kerf Bent: Proceso de cortar una serie de ranuras en una pieza de material, estas le permitirán flexionar para seguir una curva. 52, 53

Loft: Herramienta para crear una transición entre dos o más perfiles o bocetos. 25

Lubricidad: Que resbala fácilmente o que es fácil resbalar sobre ello. 44

Mioeléctricas: Pequeña señal eléctrica generada por la contracción o flexión de un músculo.
3

Modular: Que se conforma de elementos independientes agrupados. 31, 32, 45, 72

Splines: Curva diferenciable definida en porciones mediante polinomios. 25, 34

USART: Transmisor-Receptor Síncrono/Asíncrono Universal (Universal Synchronous/Asynchronous Receiver Transmitter). Es un protocolo empleado en comunicaciones duales, es decir que está en la capacidad de recibir y transmitir simultáneamente. 82