



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

**SEDE QUITO**

**CARRERA DE MECATRÓNICA**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE MANO ROBÓTICA CON  
CONTROL DE PRESIÓN PARA EL AGARRE DE DIFERENTES TIPOS DE  
OBJETOS**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingenieros en Mecatrónica

**AUTORES: FRANKLIN DAVID NICOLALDE CELORIO**

**LUIS DANIEL CALVACHE ÁVILA**

**TUTOR: BYRON RICARDO ZAPATA CHANCUSIG**

Quito-Ecuador

2022

## **CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Nosotros, Franklin David Nicolalde Celorio con documento de identificación N° 1754364006 y Luis Daniel Calvache Ávila con documento de identificación N° 1723871313; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 15 de noviembre del año 2022.

Atentamente,



---

Franklin David Nicolalde Celorio  
1754364006



---

Luis Daniel Calvache Ávila  
1723871313

## **CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Franklin David Nicolalde Celorio con documento de identificación No. 1754364006 y Luis Daniel Calvache Ávila con documento de identificación No. 1723871313, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del dispositivo tecnológico: “Diseño y construcción de un prototipo de mano robótica con control de presión para el agarre de diferentes tipos de objetos”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 15 de noviembre del año 2022.

Atentamente,



---

Franklin David Nicolalde Celorio  
1754364006



---

Luis Daniel Calvache Ávila  
1723871313

## **CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Byron Ricardo Zapata Chancusig con documento de identificación N° 1723724876, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE MANO ROBÓTICA CON CONTROL DE PRESIÓN PARA EL AGARRE DE DIFERENTES TIPOS DE OBJETOS, realizado por Franklin David Nicolalde Celorio con documento de identificación N° 1754364006 y por Luis Daniel Calvache Ávila con documento de identificación N° 1723871313, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de dispositivo tecnológico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 15 de noviembre del año 2022.

Atentamente,



---

Ing. Byron Ricardo Zapata Chancusig, MSc.  
1723724876

## **AGRADECIMIENTO**

Queremos agradecer a Dios que nos permitió tener salud e inteligencia a lo largo de toda la carrera. A nuestros padres que fueron los que nos apoyaron y guiaron para poder alcanzar nuestros objetivos. A la Universidad Politécnica Salesiana, por habernos acogido con mucha dedicación y respeto a lo largo de nuestra formación académica. A todos los docentes que con mucho esfuerzo y sabiduría nos transmitieron los conocimientos necesarios en cada materia de nuestra carrera. Por último pero no menos importante un agradecimiento especial a nuestro tutor quien a pesar de las adversidades se comprometió a guiarnos para el desarrollo de este trabajo.

Luis Daniel Calvache Ávila  
Franklin David Nicolalde Celorio

## ÍNDICE

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE.....	I
TITULACIÓN .....	I
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE .....	II
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA .....	II
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....	III
AGRADECIMIENTO .....	IV
ÍNDICE.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VII
ÍNDICE DE TABLAS .....	IX
RESUMEN .....	X
ABSTRACT .....	XI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	XII
PROBLEMA DE ESTUDIO .....	XII
JUSTIFICACIÓN .....	XII
OBJETIVO GENERAL.....	XIII
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	XIII
CAPÍTULO I.....	1
1.1 Historia de los mecanismos robóticos.....	1
1.2 La mano humana.....	4
1.2.1 Sistema óseo de la mano.....	4
a. Carpo.....	5
b. Metacarpo .....	5
c. Falanges .....	5
1.2.2 Movimientos básicos de agarre de la mano .....	6
1.2.3 Aspectos biométricos de la mano .....	7
1.3 Servomotores .....	8
1.4 Arduino Nano.....	9
1.5 Sensores de Fuerza (SFR).....	10
CAPÍTULO II.....	12
2.1 Sistema de Calificación para Alternativas de Actuadores .....	12
2.2 Sistema de Calificación para Alternativa de Manufactura .....	13
2.3 Sistema de Calificación para Alternativas de Materiales de Impresión .....	13
2. 4 Análisis de Alternativas de Servomotores. ....	13
2. 5 Análisis de Alternativas Manufactura:.....	14
2.6 Análisis de Alternativas de Materiales .....	14

2.7. Conclusión de alternativa de diseño .....	15
CAPÍTULO III .....	16
3.1 Justificación de las medidas del prototipo. ....	16
3.2 Diseño del prototipo.....	16
3.3 Ensamblaje del Prototipo de Mano Robótica.....	17
3.4 Estudio de tensión estática. ....	18
3.5 Análisis de Deformación por Von Mises.....	18
3.5.1 Análisis por Von Mises del Dedo Pulgar.....	19
3.5.2 Análisis estático de la juntura del dedo y la palma.....	19
3.5.3 Análisis estático del pulgar .....	20
3.6 Dimensionamiento de los motores.....	22
3.7 Construcción del prototipo.....	22
3.7.1 Impresión 3d .....	23
3.8 Placa de Control.....	24
3.8.1 Identificación y Tratamiento de las Señales de los Sensores de Fuerza (FSR).....	24
3.9 Diseño del Control PID para la Mano Robótica. ....	27
3.9.1 Identificación del sistema .....	27
3.9.2 Diseño del controlador PID .....	28
CAPITULO IV .....	31
4.1 Análisis de Sujeción de una Caja de Cartón. ....	31
4.2 Análisis del Agarre de un Embace de Lata. ....	32
4.3 Análisis del Agarre de una Botella de Plástico.....	33
4.4 Análisis del agarre de un rollo de papel.....	34
4.5 Prueba del control PID para la caja de cartón.....	35
4.6 Prueba del control PID para la botella de plástico. ....	36
4.7 Prueba del control PID con papel higiénico .....	37
4.8 Prueba del control PID con envase de metal. ....	38
4.9 Análisis de Costos y Precio.....	38
4.9.1 Construcción Mecánica.....	39
4.9.2 Construcción Electrónica .....	39
4.9.3 Costos de Mano de Obra.....	39
4.8.4 Total del costo del prototipo. ....	40
CAPITULO V.....	41
5.1 Conclusiones .....	41
5.2 Recomendaciones .....	41
BIBLIOGRAFÍA .....	43

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mano de Marcus Sergius.....	1
<b>Figura 2.</b> Mano de Ambroise Paré.....	2
<b>Figura 3.</b> Mano Robótica Utah.....	2
<b>Figura 4.</b> Mano Humanoide TUAT/Karlsruhe .....	3
<b>Figura 5.</b> Mano Robótica ILDA .....	3
<b>Figura 6.</b> Nombres de los dedos de la mano humana.....	4
<b>Figura 7.</b> Sistema óseo de la mano.....	5
<b>Figura 8:</b> Sistema óseo de la mano.....	6
<b>Figura 9.</b> Agarre descritos por Schlessinger.....	7
<b>Figura 10.</b> Servomotor SG90.....	9
<b>Figura 11.</b> Arduino Nano.....	10
<b>Figura 12.</b> Sensor de Fuerza SFR 402.....	11
<b>Figura 13.</b> Vista explosionada de la mano robótica.....	17
<b>Figura 14.</b> Vista Isométrica de la Mano Robótica.....	18
<b>Figura 15.</b> Deformación del Dedo Pulgar.....	19
<b>Figura 16.</b> Factor de Seguridad del Dedo Pulgar.....	19
<b>Figura 17.</b> Vista frontal del estudio estático (Factor de seguridad).....	20
<b>Figura 18.</b> Vista frontal del estudio estático (Desplazamiento) .....	20
<b>Figura 19.</b> Vista frontal del estudio estático del pulgar (Factor de seguridad).....	21
<b>Figura 20.</b> Vista frontal del estudio estático del pulgar (Deformación).....	21
<b>Figura 21.</b> Factor de seguridad de la Palma y Pulgar.....	22
<b>Figura 22.</b> Deformación entre la palma y pulgar.....	22
<b>Figura 23.</b> Vista isométrica de las piezas a imprimir en Resina.....	23
<b>Figura 24.</b> Vista isométrica de la palma a imprimir en PLA.....	23
<b>Figura 25.</b> Vista isométrica del. Brazo a imprimir en PLA.....	24
<b>Figura 26:</b> Diagrama eléctrico de la placa de control.....	24
<b>Figura 27.</b> Divisor de voltaje para el Sensor de Fuerza (SFR).....	25
<b>Figura 28.</b> Voltaje vs Fuerza en sensores FSR.....	25
<b>Figura 29.</b> Gráfica de Fuerza VS Voltaje.....	26
<b>Figura 30.</b> Diagrama de identificación de la planta.....	27
<b>Figura 31.</b> Función de Transferencia con una entrada escalón.....	28
<b>Figura 32.</b> Diagramas de Bloque del Control PID.....	30
<b>Figura 33.</b> Señales de presión obtenidas con la caja de cartón.....	31
<b>Figura 34.</b> Sujeción de una caja de cartón.....	32



<b>Figura 35.</b> Señal de presión obtenidas con un embace de lata. ....	32
<b>Figura 36.</b> Sujeción de un embace de lata. ....	33
<b>Figura 37.</b> Señal de presión obtenida con una botella de plástico. ....	33
<b>Figura 38.</b> Sujeción de una botella de plástico. ....	34
<b>Figura 39.</b> Señal de presión obtenida con un rollo de papel higiénico. ....	34
<b>Figura 40.</b> Sujeción de un rollo de Papel Higiénico. ....	35
<b>Figura 41.</b> Control caja de cartón. ....	35
<b>Figura 42.</b> Control botella plástica. ....	36
<b>Figura 43.</b> Control rollo de papel higiénico. ....	37
<b>Figura 44.</b> Control rollo de papel higiénico. ....	38

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Descripción de los seis tipos de agarre descritos por Schlensinger.....	6
<b>Tabla 2:</b> Biometría promedio de la mano derecha de hombres chilenos.....	8
<b>Tabla 3:</b> Principales características del Servomotor MG996R.....	9
<b>Tabla 4:</b> Principales características del Arduino Nano.....	10
<b>Tabla 5:</b> Características Técnicas Sensor de Fuerza SFR 402.....	10
<b>Tabla 6:</b> Necesidades y características técnicas.....	12
<b>Tabla 7:</b> Sistema de calificación para alternativas de servomotores. ....	12
<b>Tabla 8:</b> Sistema de calificación para alternativas de manufactura.....	13
<b>Tabla 9:</b> Sistema de calificación para alternativas de materiales. ....	13
<b>Tabla 10:</b> Análisis de alternativas de Servomotores.....	14
<b>Tabla 11:</b> Análisis de alternativas de manufactura.....	14
<b>Tabla 12:</b> Análisis de alternativas de material para manufactura.....	15
<b>Tabla 13:</b> Descripción de componentes del prototipo de mano robótica.....	16
<b>Tabla 14:</b> Medidas finales del prototipo de mano robótica. ....	17
<b>Tabla 15:</b> Puntos recolectados en base de la Figura 26. ....	26
<b>Tabla 16:</b> Método de Ziegler y Nichols.....	30
<b>Tabla 17:</b> Datos obtenidos del control de sujeción de caja de cartón.....	36
<b>Tabla 18:</b> Datos obtenidos del control de sujeción de botella plástica.....	36
<b>Tabla 19:</b> Datos obtenidos del control de sujeción de botella plástica.....	37
<b>Tabla 20:</b> Datos obtenidos del control de sujeción de botella plástica.....	38
<b>Tabla 21:</b> Costos de los componentes mecánicos.....	39
<b>Tabla 22:</b> Costos de los componentes electrónicos.....	39
<b>Tabla 23:</b> Costos de la mano de obra.....	39
<b>Tabla 24:</b> Costos totales.....	40

## RESUMEN

El presente trabajo de titulación está enfocado al diseño y construcción de un prototipo de mecanismo de mano robótica con control de presión para el agarre de diferentes objetos.

Para la etapa del diseño se ha iniciado con un estudio fisiológico y anatómico de la mano, partiendo desde su sistema óseo, muscular y articular, ayudando a comprender de mejor manera los movimientos y funciones naturales de la mano, además de su importancia en actividades diarias para una persona normal.

Con la ayuda del software Fusión 360 se realiza el diseño y construcción del prototipo de cada uno de los elementos del prototipo, se realiza los estudios estáticos los cuales permiten conocer el factor de seguridad y desplazamiento de las partes aplicando las fuerzas y momentos calculados.

Para el correcto agarre de los objetos se realiza un control PID el cual permite tener una retroalimentación por medio de los sensores de presión, dando la presión que existe entre cada dedo y el objeto. Con esos datos adquiridos se envía la señal PWM a los servomotores para el agarre de la mano.

**Palabras claves:** Mano robótica, control PID, sensor de presión.

## **ABSTRACT**

The present degree work is focused on the design and construction of a prototype of a robotic hand mechanism with pressure control for grasping different objects.

For the design stage, a physiological and anatomical study of the hand has begun, starting from its bone, muscle and joint system, helping to better understand the natural movements and functions of the hand, in addition to its importance in daily activities. for a normal person.

With the help of Fusion 360 software, the design and construction of the prototype of each of the elements of the prototype are carried out, static studies are carried out which allow knowing the safety factor and displacement of the parts by applying the calculated forces and moments.

For the correct grasping of the objects, a PID control is carried out, which allows feedback through the pressure sensors, giving the pressure that exists between each finger and the object. With these acquired data, the PWM signal is sent to the servomotors for the grip of the hand.

Keywords: Robotic hand, pid control, pressure sensor.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **PROBLEMA DE ESTUDIO**

Los avances tecnológicos en la robótica que trata de simular los movimientos humanos son muy dinámicos. En Ecuador existen robots o prótesis que tienen como función el agarre de diferentes tipos de objetos. Por ejemplo, algunos objetos pueden ser blandos y livianos mientras que otros pueden ser duros y densos, por lo cual la mano robótica debe saber cómo sujetarlos [1]

. Una mano robótica debe tener la capacidad de agarrar objetos con la fuerza adecuada para evitar aplastarlos o dejarlos caer. Se han desarrollado varias estrategias para que una mano robótica tenga el correcto agarre mediante el uso de sensores táctiles para obtener información de la fuerza de contacto, la mano robótica debe tener una fuerza mínima a fin de evitar dificultades en el agarre [2]. Diferentes sensores han sido utilizados para controlar el agarre, sin embargo, han surgido problemas, como la miniaturización, grosor, muchos cables y el peso [3]. El no tener un buen agarre en una mano robótica desencadena problemas en las industrias o en personas con prótesis.

### **JUSTIFICACIÓN**

En Ecuador la mayoría de manos robóticas no cuentan con un buen sistema de agarre. Varias utilizan sensores neumáticos o hidráulicos que emiten la adquisición de datos, como la presión o posición del objeto. En los sistemas hidráulicos una bomba es la que se encarga de accionar el movimiento para el agarre. El presente trabajo de titulación está orientado al diseño y construcción de una mano robótica con el uso de sensores de presión mioeléctricos los que permitirá obtener los diferentes valores de presión durante el agarre de objetos del diario vivir, como esferos, vasos y botellas. Los servomotores serán controlados por medio de las señales electrónicas las cuales previamente serán obtenidas por medio del proceso de control. Para lograr un agarre parecido al humano la fuerza de agarre debe controlarse sin el uso de las características del objeto, como su peso o forma. Los niveles de fuerza de agarre serán los datos que permitan el control de la fuerza [4], [5].

## **OBJETIVO GENERAL**

Diseñar y construir un prototipo de mano robótica con control de presión para el agarre de diferentes tipos de objetos.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Construir el mecanismo de movilidad de los dedos con la ayuda de software CAD para emular el movimiento de la mano en el agarre de objetos.
- Desarrollar el sistema de control de presión de los dedos mediante el uso de dispositivos mecatrónicos para la sujeción de objetos utilizados en tareas cotidianas.
- Verificar el funcionamiento a través de la realización de pruebas para corregir posibles errores.

# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO

En este primer capítulo se aborda brevemente la historia de las prótesis y mecanismos de manos robóticas, además se describirá las funciones y partes más importantes de la mano humana.

### 1.1 Historia de los mecanismos robóticos

La sustitución por pérdida de extremidades superiores ha estado presente desde el comienzo de la historia humana. En un inicio se utilizaban palos y ganchos para poder reemplazar a la extremidad faltante, con el paso del tiempo la tecnología ha permitido el diseño y construcción de prótesis más complejas, en su mayoría se cuenta con un sistema Mecatrónica que permite devolver funcionalidades de sujeción y agarre a personas que lo necesitan, sin embargo, este no es perfecto, ya que su control es complejo y varía dependiendo de cada paciente. A continuación, se resumirá en orden cronológico los distintos mecanismos y prótesis de manos robóticas más relevantes de la historia humana

Uno de los primeros mecanismos de mano robótica perteneció a Marcus Sergius quien fue un general romano que tras participar en la guerra Púnica (218.-210 a.C.) sufrió heridas que obligaron a los médicos a amputarle el brazo, sin embargo, en su afán de seguir luchando y sostener su escudo, los herreros romanos le confeccionaron un brazo de hierro el cual es mostrado en la Figura 1, con el cual pudo lograr su cometido [6].



**Figura 1.** Mano de Marcus Sergius.

Durante el siglo XVI Ambroise Paré, un médico y militar francés, desarrolló el primer brazo artificial móvil a nivel de codo. Este mecanismo podía abrir y cerrar las dedos presionando o traccionando los diferentes actuadores del mecanismo, además contaba con

una palanca que permitía la flexión a nivel del codo. Años más tarde se mejoró la estética y comodidad utilizando materiales como cuero y madera [6] y [7]. En la Figura 2 se observa una representación gráfica de la mano de Ambroise Paré.



**Figura 2.** Mano de Ambroise Paré.

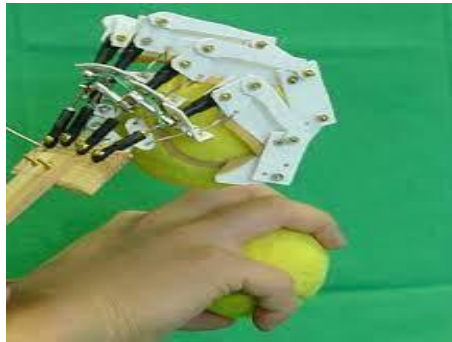
La mano Utah construida por el MIT en el año de 1982, cuenta con 16 grados de libertad distribuidos en cuatro dedos (cuatro grados de libertad por cada dedo), esta puede ser observada en la Figura 3. El diseño de la mano presenta una geometría antropomórfica, además de que su pulgar mantiene una posición permanente. Los movimientos de los dedos son accionados mediante un sistema de tendones que a su vez son accionados por actuadores neumáticos, [8]. Este mecanismo de mano robótica tiene una alta ejecución dinámica con siete libras de fuerza en cada yema del dedo, sin embargo, su uso es demasiado incómodo y complicado, [9] y [10].



**Figura 3.** Mano Robótica Utah.



TUAT/Karlsruhe es una mano artificial con capacidades similares a la humana, cuentan con ajustes para el control de presión, además tienen cinco dedos que son accionados a través de motores cilíndricos ultrasónicos. Por lo general estos mecanismos son usados en robots humanoides capaces de manipular herramientas y maquinaria, [11]. En la Figura 4 se aprecia la comparación en el agarre de una pelota de tenis entre la TUAT/Karlsruhe con una mano real.



**Figura 4.** Mano Humanoide TUAT/Karlsruhe

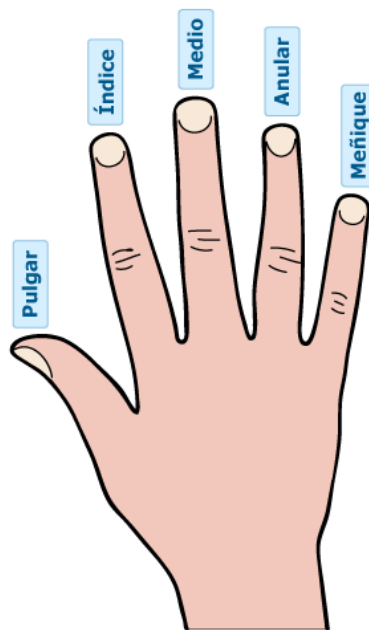
ILDA es una mano robótica desarrollada en 2021 por investigadores coreanos. Presenta habilidades muy similares a la del ser humano, en cuanto a precisión, sujeción, agarre y fuerza. La mano cuenta con 4 dedos y un pulgar muy parecido al de la mano humana, además tiene sensores ubicados en la yema de cada dedo, que le permite realizar funciones de tacto y presión, [12]. En la Figura 5 se observa a la mano robótica ILDA sujetando un huevo con la yema de los dedos.



**Figura 5.** Mano Robótica ILDA

## 1.2 La mano humana

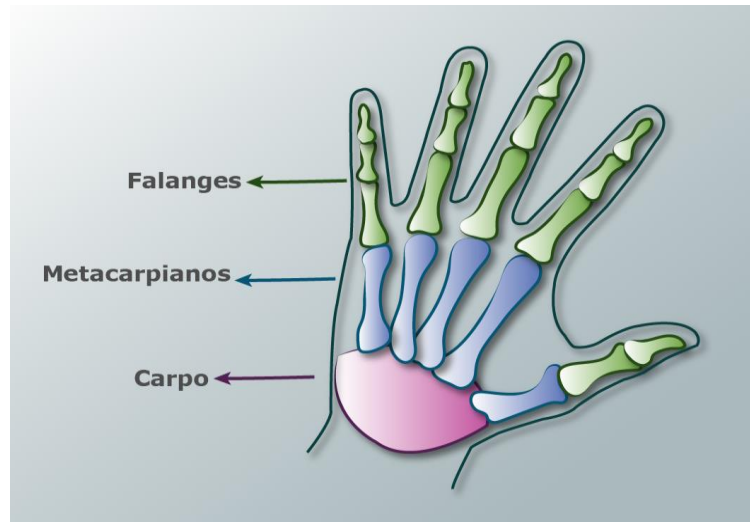
La mano humana es una parte del cuerpo que comprende desde la muñeca hasta la punta de los dedos. Son las encargadas de realizar principalmente las funciones de tacto y presión. El tacto es un sentido corporal que permite percibir objetos físicos de nuestro alrededor pudiendo distinguir sus cualidades como forma, tamaño, rugosidad, dureza o temperatura. La presión es la fuerza con la que se manipula un objeto permite apretar, presionar o sostener. La mano humana cuenta con cinco dedos (meñique, anular, dedo medio, índice y pulgar), además de una muñeca y una palma [13]. En la Figura 6 se observa el lugar correspondiente a cada dedo.



**Figura 6.** Nombres de los dedos de la mano humana.

### 1.2.1 Sistema óseo de la mano

El sistema óseo de la mano está formado por ocho huesos cortos constituyendo el esqueleto del carpo comúnmente llamada muñeca, cinco huesos largos que forman el metacarpo y finalmente, catorce huesos, los más largos de toda la mano, llamados falanges que conforman los dedos [14]. En la Figura 7 y Figura 8 se aprecia el sistema óseo de la mano humana y sus partes.



**Figura 7.** Sistema óseo de la mano.

**a. Carpo**

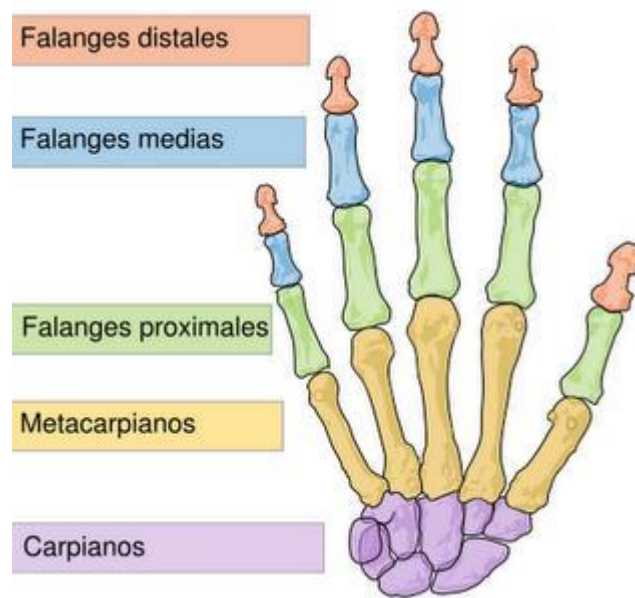
Está conformado por ocho huesos cortos ubicados en dos filas superpuestas, constituyendo una masa ósea cóncava a un lado y convexa al otro. Esta geometría en particular crea un canal por donde pasan los tendones de los músculos flexores de los dedos, [14].

**b. Metacarpo**

Está conformado por cinco huesos largos denominados huesos metacarpianos y designados con los números ordinales, empezando desde el pulgar hasta el meñique, conformando el esqueleto de la palma de la mano, [14].

**c. Falanges**

Conforman los huesos de los dedos, dos huesos para el pulgar y tres para los dedos restantes. Son huesos largos conformados por un cuerpo y dos extremidades, su tejido es compacto en el cuerpo, mientras que en las extremidades son esponjosos y están cubiertos por una capa compacta y fina que otorga una mayor rigidez a las falanges, [14].



**Figura 8:** Sistema óseo de la mano

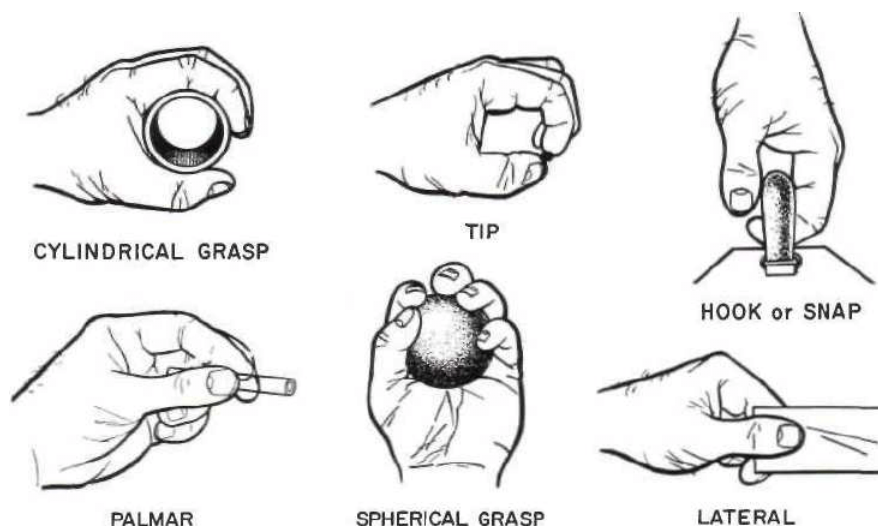
### 1.2.2 Movimientos básicos de agarre de la mano

La gran cantidad de huesos, músculos y articulaciones que tiene la mano humana proveen de una variedad de movimientos simples y complejos que permiten el agarre y prensión de objetos. En el año de 1919 Schlensinger clasificó seis tipos de agarre (cilíndrico, propina, gancho, palmar, esférico y lateral) basándose en la forma y propiedades del objeto [15] y [16]. Estos tipos de agarres se encuentran representados gráficamente en la Figura 9.

**Tabla 1:** Descripción de los seis tipos de agarre descritos por Schlensinger.

Tipo	Descripción
Esférico	Agarre y sujeción de objetos esféricos como pelotas.
Cilíndrico	Agarre cilíndrico de objetos como copas.
Palmar	Agarre de objetos con la palma de la mano.
Propina	Agarre de objetos pequeños como lápices o esferos.
Lateral	Agarre de objetos delgados y finos como papel.
Gancho	Agarre y soporte de cargas pesadas como maletas y bolsas.

En la figura 9 se detallan las diferentes maneras de agarre de una mano humana.



**Figura 9.** Agarre descritos por Schlessinger.

En el año de 1959 Napier, clasificó la presión de la mano humana de acuerdo a factores como: forma, tamaño, peso, textura y temperatura del objeto, además añade la importancia que tiene la posición del dedo pulgar y la postura de los dedos restantes para realizar tareas de agarre y presión. Dependiendo de la posición del pulgar la presión de la mano puede ser clasificada como de precisión o fuerza. Si el pulgar se encuentra en oposición la presión será de fuerza, caso contrario será de precisión. Los dedos meñique, anular, índice y medio añaden mayor estabilidad a estos tipos de presión, [17]. Actualmente existen 33 tipos agarre que utilizan la clasificación de Schlessinger y Napier simultáneamente para describirlos, [18]. Sin embargo en este documento únicamente nos centraremos en la clasificación propuesta por Schlessinger.

### 1.2.3 Aspectos biométricos de la mano

La mano humana cumple con funciones básicas y complejas, cada una de ellas pueden ser estudiadas y analizadas de mejor manera cuando es dividida en partes, ayudando a tener una mejor comprensión del funcionamiento de la mano humana, [19]. Para el diseño de una prótesis o mecanismo es necesario tomar en cuenta las medidas promedio de las partes más importantes de la mano, por dicho motivo se tomará como referencia un estudio donde se muestra la biometría promedio de la mano humana de ciudadanos chilenos, estos datos se encuentran reflejados en la Tabla 2.

**Tabla 2:** Biometría promedio de la mano derecha de hombres chilenos.

<b>Biometría Promedio</b>			
Ancho		Mano	186 [mm]
Longitud	Mano	Palma	92 [mm]
	Pulgar	Falange Proximal	40 [mm]
		Falange Distal	32 [mm]
	Índice	Falange Proximal	50 [mm]
		Falange Media	31 [mm]
		Falange Distal	24 [mm]
	Medio	Falange Proximal	53 [mm]
		Falange Media	36 [mm]
		Falange Distal	25[mm]
	Anular	Falange Proximal	50 [mm]
		Falange Media	34 [mm]
		Falange Distal	25[mm]
	Meñique	Falange Proximal	37 [mm]
		Falange Media	22 [mm]
		Falange Distal	20 [mm]

En 2002 Armstrong realizó una investigación en la cual denota la fuerza de agarre promedio de la mano humana en hombres y mujeres, además explica que existen distintos factores que afectan a la fuerza de agarre tales como: género, mano dominante, edad, guantes y postura. Para el hombre la fuerza de agarre promedio es de  $100 \mp 15$  libras, por otro lado la mujer tiene una fuerza de agarre de  $55 \mp 11$  libras [20]. Además según un estudio publicado en 2018 por una clínica neurológica cada dedo de la mano tiene un torque de  $1.69 \pm 0.69$  Nm, independientemente del género [21].

### 1.3 Servomotores

Los servomotores son actuadores conformados por un motor síncrono y un circuito electrónico que permite controlar su velocidad y posición. Esto se logra mediante la modulación de una señal PWM. Los modelos de servomotores más comunes son los SG90, MG996R, entre otros. Estos dispositivos se caracterizan por ser baratos y fáciles de controlar, generalmente son utilizados en aplicaciones de robótica [22]. En la Tabla 3 se muestran sus principales características técnicas.

**Tabla 3.** Principales características del Servomotor MG996R.

<b>Principales características del Servomotor MG996R</b>	
Peso	13 gramos
Tamaño	(22.8 x 12.3 x 22.5) mm
Material de los Engranajes	Nylon
Torque	2.5 kg/cm
Voltaje Recomendado	5 V
Rango de Ángulos	0 a 180
Resolución	7 microsegundos

En la Figura 10 se presenta el servomotor SG90 empleado para la construcción del prototipo.



**Figura 10.** Servomotor SG90.

#### **1.4 Arduino Nano.**

Para el desarrollo de este proyecto se utilizará la placa de desarrollo Arduino Nano que se puede apreciar en la Figura 11. El Arduino Nano fue diseñado en base al microcontrolador ATmega328P, el cual realizará todo el sistema de muestreo y control. Su interfaz de programación es muy sencilla y fácil de entender, permitiendo disminuir el tiempo de desarrollo de prototipos. En la Tabla 4 se muestran sus principales características técnicas. [23].

**Tabla 4:** Principales características del Arduino Nano.

<b>Principales características del Arduino Nano.</b>	
Velocidad del CPU	20 MHz
Memoria de Programa	32 KB
N° Canales Analógicos	6
N° Salidas PWM	6

En la Figura 11 se presenta el Arduino Nano el cual se empleará para el control electrónico del brazo robótico.



**Figura 11.** Arduino Nano.

### 1.5 Sensores de Fuerza (SFR)

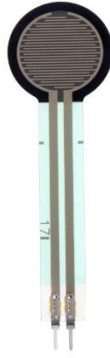
Para el desarrollo de este proyecto se utilizarán sensores de Fuerza SFR 402. Estos son sensores piezoeléctricos, los cuales varían su resistencia dependiendo de la fuerza aplicada. Estos tipos de sensores son optimizados para el uso humano y poder detectar la fuerza con la que se ha tocado un objeto, generalmente son utilizados en aplicaciones de sistemas médicos y robóticos [24]. En la Figura 12 se puede apreciar este tipo de sensores y en la Tabla 5 se puede apreciar sus principales características técnicas.

**Tabla 5:** Características Técnicas Sensor de Fuerza SFR 402.

<b>Características Técnicas Sensor de Fuerza SFR 402</b>	
Rango de Sensibilidad	0.1-10 Newtons
Resistencia sin fuerza	10 M ohms
Fuerza de Actuación	0.1 Newtons
Área de superficie sensitiva	12.7 mm

En la Figura 12 se presenta la forma física de los sensores de fuerza los cuales se emplearán para medir la fuerza de la mano robótica.





**Figura 12.** Sensor de Fuerza SFR 402.

## CAPÍTULO II

### ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

En este capítulo se analizará las posibles alternativas de servomotores, métodos de manufactura y material, ayudando a encontrar la mejor opción para la construcción del prototipo y brindando una solución al problema de estudio. El conjunto de alternativas ganadoras conformará al prototipo final y deberán cumplir las necesidades y características técnicas planteadas en la Tabla 6.

**Tabla 6:** Necesidades y características técnicas.

<b>Necesidades</b>	<b>Características técnicas.</b>
Tamaño	El prototipo presentará dimensiones promedio de mano a las de una persona latinoamericana.
Bajo costo	Los materiales para su construcción deben ser baratos y accesibles en el mercado ecuatoriano.
Resistencia	El prototipo deberá tener resistencia a la humedad, polvo e impactos.
Sujeción y Presión	El prototipo podrá sujetar y agarrar firmemente diferentes tipos de objetos.

#### 2.1 Sistema de Calificación para Alternativas de Actuadores

En la Tabla 7 se muestra los criterios y los distintos indicadores de equivalencia que serán empleados para determinar el mejor modelo de servomotor a implementarse. Los servomotores son unos elementos muy importantes para la construcción del proyecto ya que son los encargados de generar movimiento, agarre y presión en la mano.

**Tabla 7:** Sistema de calificación para alternativas de servomotores.

<b>Criterios</b>	<b>Equivalencia de Indicadores</b>		
	1-3	4-7	7-10
<b>Costo</b>	Muy Costoso	Medianamente Costoso	Muy Barato
<b>Facilidad de Implementación</b>	Muy Difícil	Medianamente Fácil de Controlar	Fácil
<b>Accesibilidad de Compra</b>	No Disponible	Medianamente Disponible	Disponible
<b>Peso</b>	Muy Pesado	Medianamente Pesado	Muy Liviano
<b>Fuerza</b>	Muy Débil	Medianamente Fuerte	Muy Fuerte

## 2.2 Sistema de Calificación para Alternativa de Manufactura

En la Tabla 8 se muestra los criterios y los distintos indicadores de equivalencia que serán empleados para determinar el mejor proceso de manufactura del prototipo.

**Tabla 8:** Sistema de calificación para alternativas de manufactura.

Criterios	Equivalencia de Indicadores		
	1-3	4-7	7-10
<b>Costo</b>	Muy Costoso	Medianamente Costoso	Muy Barato
<b>Densidad</b>	Muy Denso	Medianamente Denso	Poco Denso
<b>Resistencia</b>	Poco Resistencia	Medianamente Resistente	Alta Resistencia
<b>Calidad</b>	Mala Calidad	Calidad Medianamente	Buena Calidad
<b>Resolución</b>	Mala Resolución	Medianamente Buena	Buena Resolución
<b>Diseños Complejos</b>	Mala para impresión de diseños complejos	Medianamente buena para impresión de diseños complejos	Buena para impresión de diseños complejos
<b>Acabado Superficial</b>	Buen Acabado Superficial	Acabado superficial Medianamente Bueno	Mal Acabado Superficial

## 2.3 Sistema de Calificación para Alternativas de Materiales de Impresión

En la Tabla 9 se muestra los criterios y los distintos indicadores de equivalencia que serán empleados para determinar el mejor material a utilizar en el prototipo.

**Tabla 9:** Sistema de calificación para alternativas de materiales.

Criterios	Equivalencia de Indicadores		
	1-3	4-7	7-10
<b>Costo</b>	Muy Costoso	Medianamente Costoso	Muy Barato
<b>Accesibilidad</b>	No Disponible	Medianamente Disponible	Disponible
<b>Exactitud</b>	Inexacto	Medianamente Exacto	Muy Exacto
<b>Acabado Superficial</b>	Mal Acabado Superficial	Acabado Medianamente Bueno	Buen Acabado Superficial

## 2.4 Análisis de Alternativas de Servomotores.

Los servomotores son uno de los elementos más importantes en cualquier tipo de mecanismo robótico donde se incluya su aplicación, debido a que estos permiten generar movimientos con determinadas fuerzas pudiendo ser constantes o variables. En la Tabla 10 se muestran las alternativas a usar en el prototipo de mano robótica.

**Tabla 10:** Análisis de alternativas de Servomotores.

N°	Criterios	Servomotor SG90	Servomotor MG996r
1	Costo	10	9
2	Facilidad	10	10
3	Accesibilidad	10	10
4	Peso	10	9
5	Fuerza	6	10
Sumatoria		46	48
Índice Porcentual		0,92	0,96
Orden de Selección		92 %	96 %

Según los resultados obtenidos en el análisis podemos concluir que la mejor opción en ámbito de servomotores es el modelo MG996r pues es más barato accesible y liviano.

## 2. 5 Análisis de Alternativas Manufactura:

En este análisis únicamente tomaremos en cuenta la manufactura en impresión 3D por filamento y resina, pues son utilizadas mayoritariamente en la fabricación de prototipos. Este análisis se muestra en la Tabla 11.

**Tabla 11:** Análisis de alternativas de manufactura.

N°	Criterios	Impresión 3D de Resina	Impresión 3D de Filamento
1	Costo	10	8
2	Accesibilidad	9	10
3	Exactitud	9	9
4	Facilidad de uso	10	10
5	Resolución	4	10
6	Diseños Complejos	6	9
7	Acabado Superficial	4	10
Sumatoria		52	66
Índice Porcentual		0,74	0,94
Orden de Selección		74	94

Según los resultados obtenidos de la tabla se puede afirmar que la mejor opción para la construcción del prototipo es la Impresión en 3D de Filamento, ya que es más barato y accesible en el mercado ecuatoriano.

## 2.6 Análisis de Alternativas de Materiales

Existe una gran cantidad de materiales que pueden ser utilizados para la manufactura del prototipo, sin embargo, solo se analizarán los 3 tipos más comunes que se pueden encontrar en el mercado. Este análisis se encuentra detallado en la Tabla 12.

**Tabla 12:** Análisis de alternativas de material para manufactura

N°	Criterios	PLA	Resina (Tough 2000)	PET/PETG
1	Costo	8	9,3	8,5
2	Densidad	10	10	10
3	Resistencia al Impacto	2	10	5
4	Calidad de Impresión	10	5	7,5
	Sumatoria	30	34,3	31
	Índice Porcentual	0,75	0,86	0,78
	Orden de Selección	75	85,75	77,5

### 2.7. Conclusión de alternativa de diseño

En base a los análisis anteriores se ha determinado que la prótesis de mano robótica deberá ser construida utilizando impresión 3D de resina, con el material Tough 2000. Para el sistema de control se recomienda usar los Servomotores SG90. Estas alternativas ofrecen y satisfacen todas las características y necesidades técnicas planteadas en la Tabla 6.

## CAPÍTULO III

### DISEÑO Y CONTRUCCIÓN

En este capítulo, se muestra el proceso de diseño y ensamblaje del prototipo de mano robótica, consta de dos partes el diseño mecánico y el electrónico con sus respectivos cálculos para su correcto funcionamiento.

#### 3.1 Justificación de las medidas del prototipo.

El prototipo está construido a una escala de 1.5 con respecto a las medidas antropométricas promedio de una mano humana. La decisión se encuentra fundamentada principalmente en el tamaño de los servomotores seleccionados debido a que el modelo de servomotores MG996R satisface las necesidades de torque requeridas por el prototipo de mano robótica.

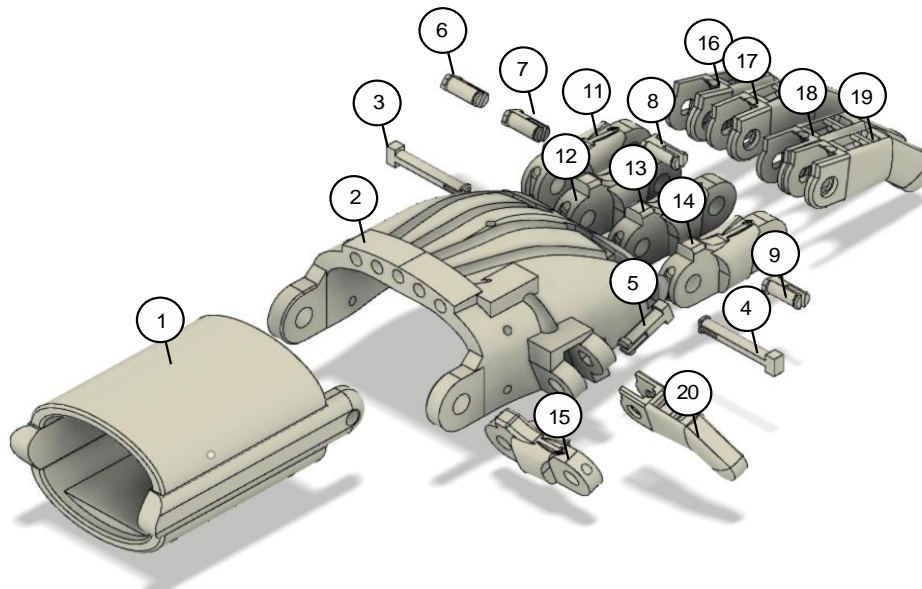
#### 3.2 Diseño del prototipo.

En base en la Tabla 2, se diseña el prototipo de mano robótica, recordando que a cada una de estas medidas se le aplicará una escala de 1.5. Cada componente de la mano diseñada en el software Fusion 360, debido a las múltiples opciones de diseño, facilidad de ensamble y herramientas que nos permiten verificar la posición y el ajuste de cada uno de los componentes, en la Tabla 13 se encuentra una breve descripción de estas.

**Tabla 13:** Descripción de componentes del prototipo de mano robótica.

Numero	Parte	Descripción
1	Antebrazo	Espacio en el cual se instala toda la parte electrónica.
2	Palma	La base en donde todos los componentes tienen su unión.
3	Unión Palma I	Permite la unión entre la "palma" con los "metacarpianos"
4	Unión Palma II	Permita la unión entre la "palma" con los "metacarpianos"
5	Unión III	Permita la unión entre la palma con los metacarpos.
6,7,8,9,10	Uniones	Permiten la unión entre los metacarpos y las falanges.
11,12,13,14,15	Metacarpos	En donde se va a unir las falanges de la mano robótica.
16,17,18,19,20	Falanges	Partes de la mano robótica que nos permiten el agarre de los objetos.

En la Figura 13, se muestra una vista explosionada de diseño del prototipo de mano robótica.



**Figura 13.** Vista explosionada de la mano robótica.

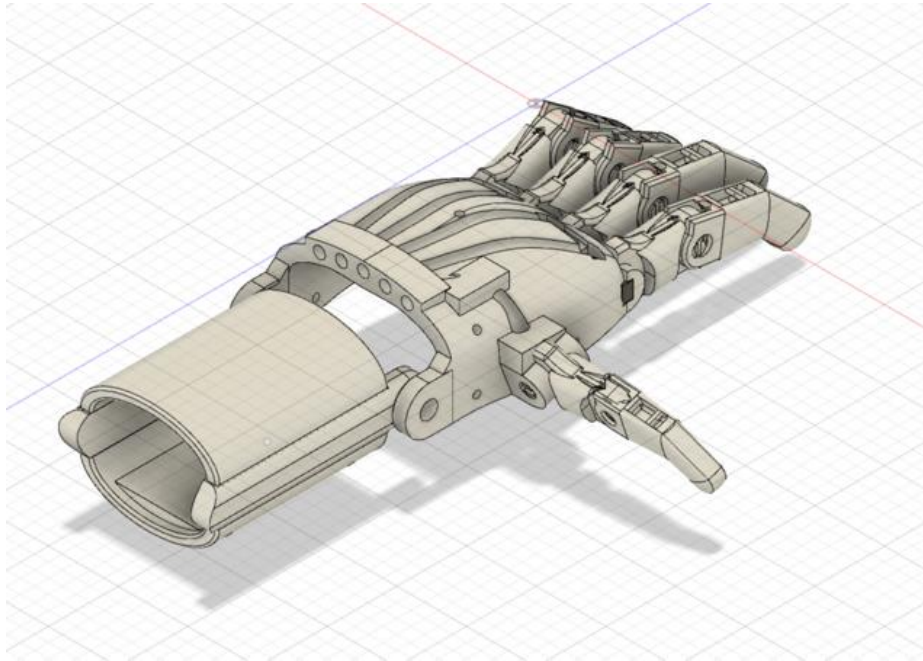
### 3.3 Ensamblaje del Prototipo de Mano Robótica

Después del análisis de cada una de las partes del prototipo de mano robótica se obtiene las dimensiones finales, las cuales se presentan detalladas en la Tabla 14.

**Tabla 14:** Medidas finales del prototipo de mano robótica.

Descripción	Medida (mm)
Largo	414
Ancho	265
Alto	88

En la Figura 14 se presenta el ensamblaje final de la mano robótica, al unir las partes detalladas en la Tabla 7.



**Figura 14.** Vista Isométrica de la Mano Robótica.

### 3.4 Estudio de tensión estática.

Para el análisis estático en los dedos de la mano se determinan las fuerzas, momentos y torque ejercidos por cada dedo. El torque promedio de cada dedo de una mano humana es de  $1.69\text{Nm} (\pm 0.69)$  [21]. A continuación, se presentan las ecuaciones para determinar los momentos y fuerzas de los 5 dedos del prototipo de mano:

$$M = F * d$$

$$F = \frac{M}{d}$$

$$F = \frac{M}{d}$$

$$F = 11.26 \text{ N}$$

(1)

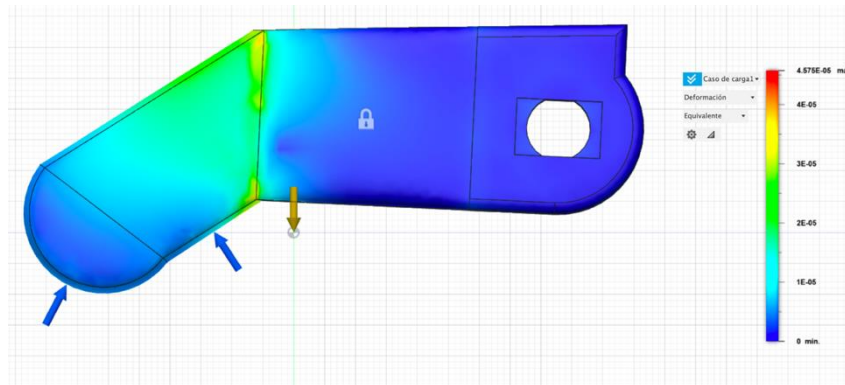
### 3.5 Análisis de Deformación por Von Mises.

Los dedos de la mano se encuentran divididos en dos partes, las falanges y los metacarpos, debido a esto el análisis de deformación de Von Mises se realizarán en ambas partes por separado. Además, se añadirá el análisis de deformación del pulgar por separado, debido a que las medidas del pulgar son distintas a las medidas de los otros dedos.



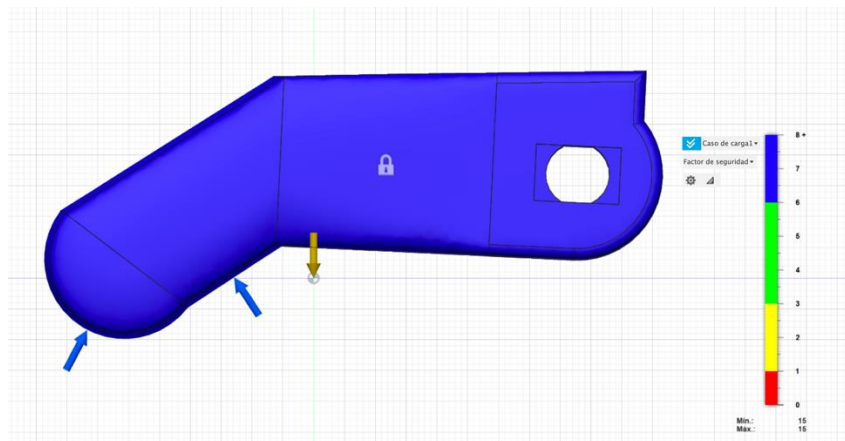
### 3.5.1 Análisis por Von Mises del Dedo Pulgar.

En la Figura 15, se puede observar la deformación sufrida por el pulgar al aplicar una fuerza de 11.26N.



**Figura 15.** Deformación del Dedo Pulgar.

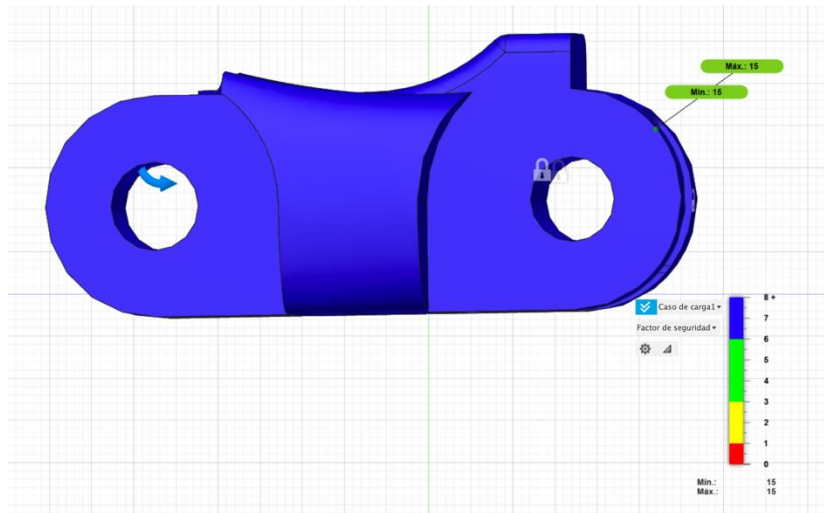
En la Figura 16 se muestra el factor de seguridad calculado por el software, donde la respuesta obtenida es de 8.



**Figura 16.** Factor de Seguridad del Dedo Pulgar.

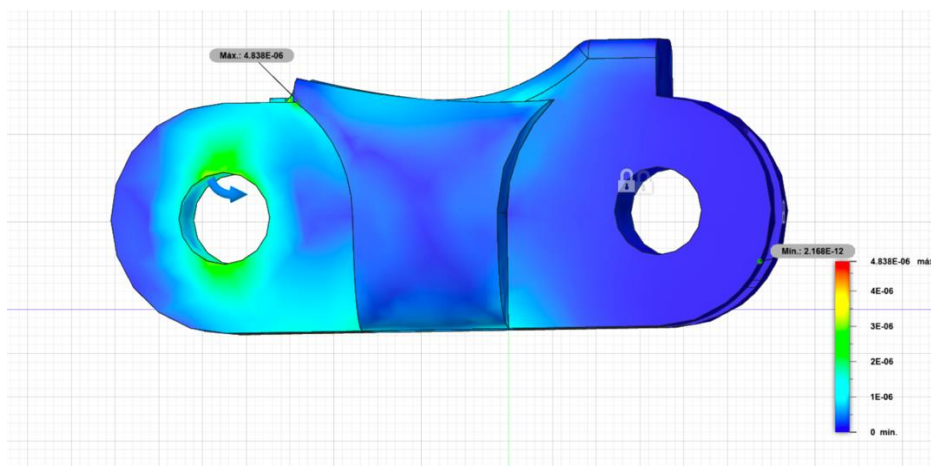
### 3.5.2 Análisis estático de la junta del dedo y la palma

En la figura 17, se puede observar el factor de 15 un momento de 1.69Nm.



**Figura 17.** Vista frontal del estudio estático (Factor de seguridad)

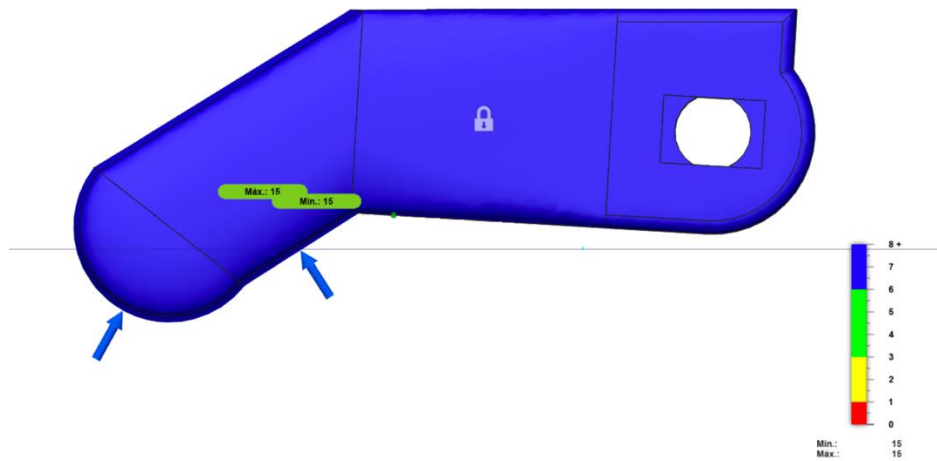
En la figura 18, se puede observar el desplazamiento desarrollado al aplicar un momento de 1.69Nm



**Figura 18.** Vista frontal del estudio estático (Desplazamiento)

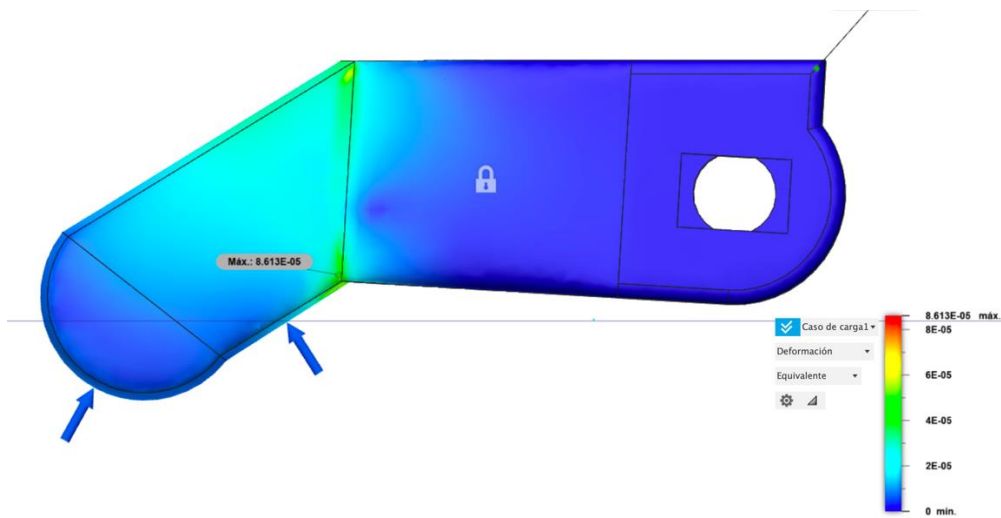
### 3.5.3 Análisis estático del pulgar

En la figura 19, se puede observar como aplicando la fuerza promedio de 11.26N en el dedo, tendrá un factor de seguridad de **8**.



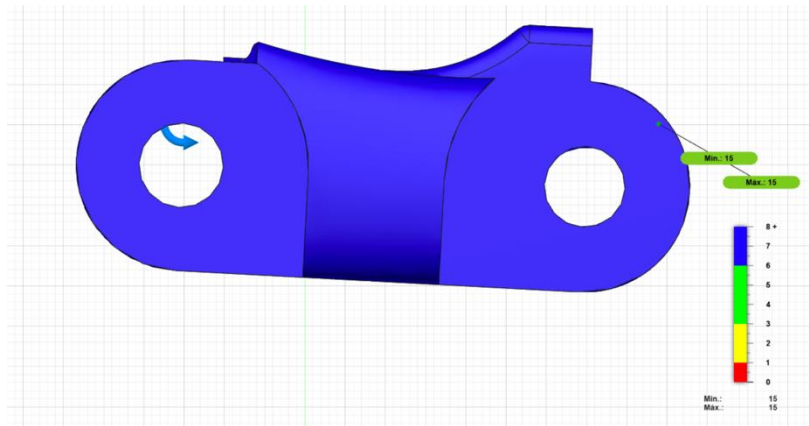
**Figura 19.** Vista frontal del estudio estático del pulgar (Factor de seguridad)

En la figura 20, se puede observar que la deformación aplicando la presión promedio de 11.26N.



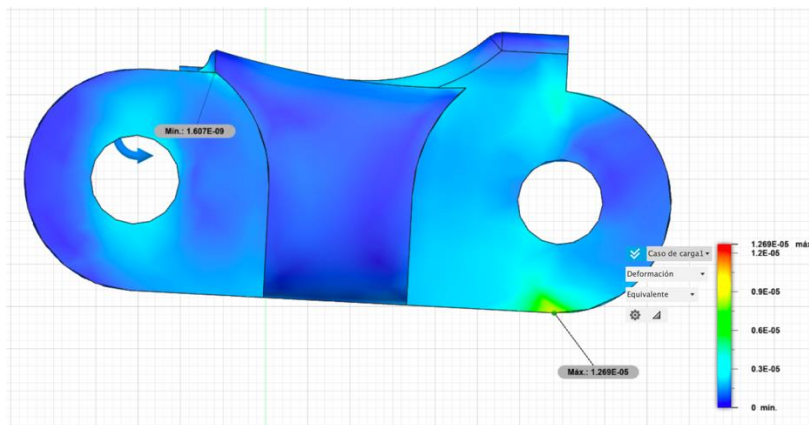
**Figura 20.** Vista frontal del estudio estático del pulgar (Deformación)

En la figura 21 se puede observar el estudio estático en la parte en donde existe torsión, el valor de torsión es de 1.69Nm, nos determina un factor de seguridad de 15.



**Figura 21.** Factor de seguridad de la Palma y Pulgar.

En la Figura 22 se aplica una torsión de 1.69N, muestra una deformación mínima.



**Figura 22.** Deformación entre la palma y pulgar.

### 3.6 Dimensionamiento de los motores.

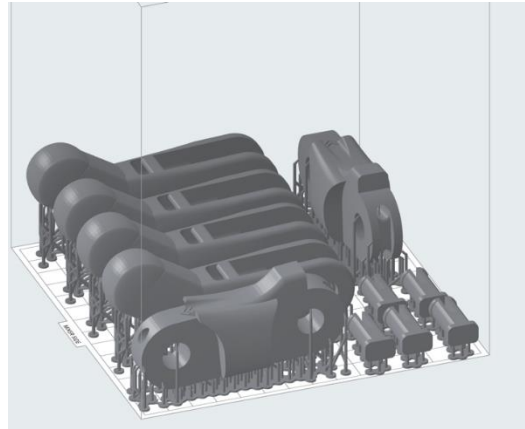
Tomando en cuenta que el momento promedio de una mano humana (1.69 Nm) ejercido por un también que en tipo de servomotores existen en el mercado ecuatoriano junto con las necesidades del proyecto se eligió el uso de un servomotor mg996R el cual cuenta con un torque de 1,079Nm el cual nos permitirá tener un buen agarre.

### 3.7 Construcción del prototipo

Después de realizar el dimensionamiento y cálculos estáticos se pueden establecer todos los parámetros de construcción, permitiendo empezar la manufactura del prototipo las cuales se detallan a continuación.

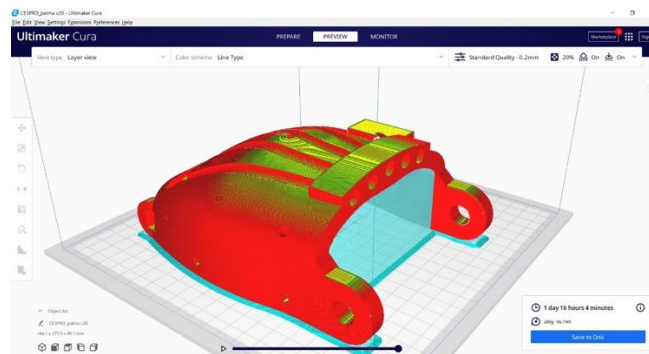
### 3.7.1 Impresión 3d

En la Figura 23 se muestra la configuración inicial de las piezas para la impresión 3d en resina, estas piezas corresponden al metacarpo y las falanges.



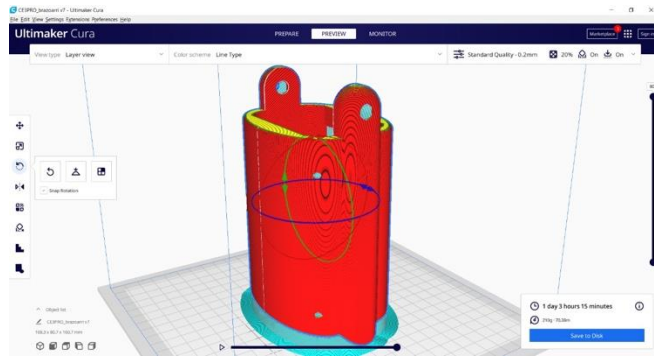
**Figura 23.** Vista isométrica de las piezas a imprimir en Resina

Para la palma y muñeca de la mano se ha utilizado impresión 3D por filamento en PLA, en la Figura 24 muestra la configuración inicial para la manufactura.



**Figura 24.** Vista isométrica de la palma a imprimir en PLA

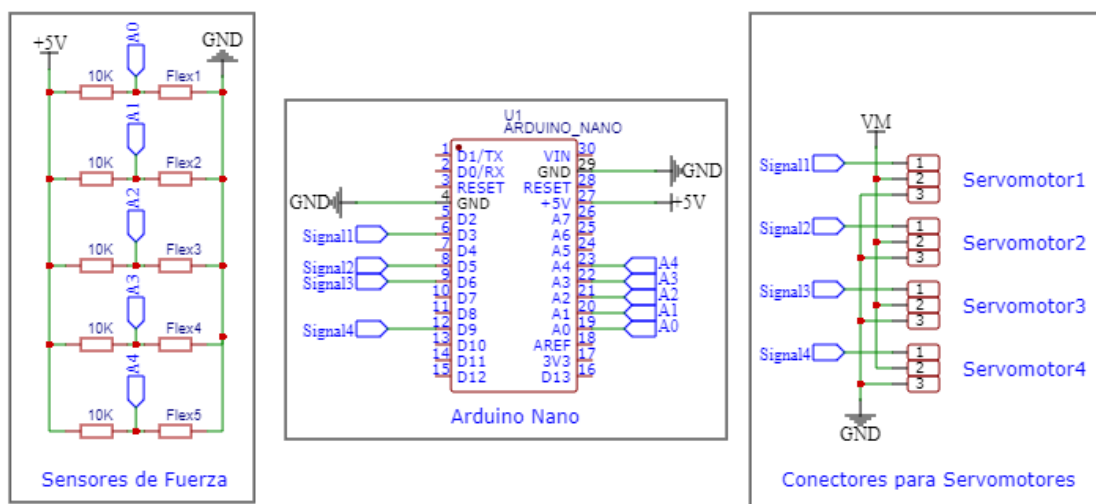
En la Figura 25 se muestra la configuración inicial de la parte de la palma en donde se encontrarán la mayoría de las partes electrónicas.



**Figura 25.** Vista isométrica del. Brazo a imprimir en PLA

### 3.8 Placa de Control

En la Figura 26 se presenta el diagrama electrónico para el control electrónico de la prótesis de mano robótica, para esto se ha utilizado el software EasyEDA, en el que se diseña el diagrama esquemático y posteriormente la construcción de la placa electrónica.



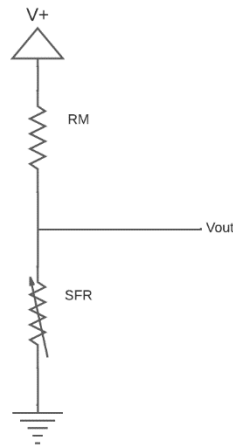
**Figura 26:** Diagrama eléctrico de la placa de control.

#### 3.8.1 Identificación y Tratamiento de las Señales de los Sensores de Fuerza (FSR).

Para la adquisición de datos de cada uno de los sensores de fuerza se utilizan 5 canales del módulo ADC del Arduino Nano, el proceso para determinar la fuerza que se aplica a cada sensor es el siguiente:

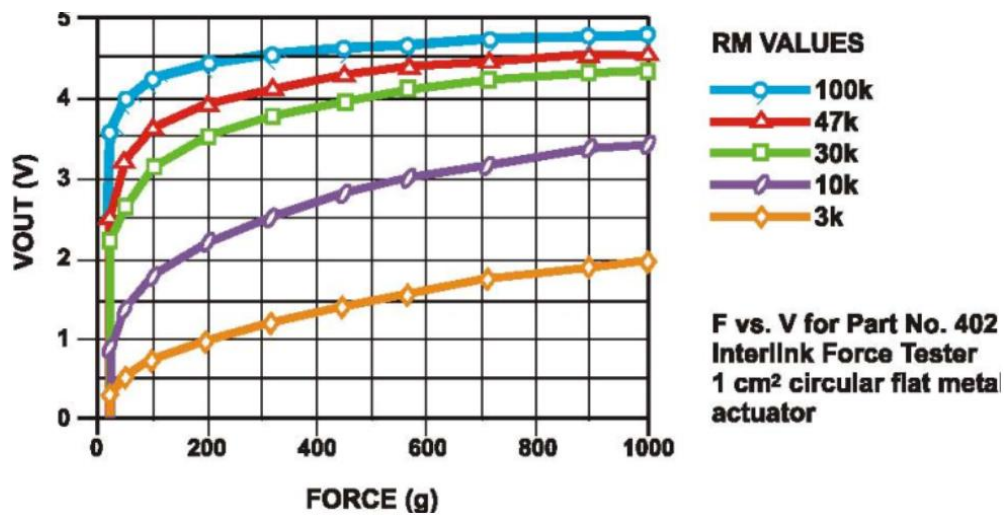
- El fabricante recomienda unir el FSR a una configuración de un divisor de voltaje, como se muestra en la Figura 27. La medida de la resistencia  $R_M$  podrá ser escogida de acuerdo a la sensibilidad de la fuerza deseada o el límite de la

corriente, además dependiendo de los requerimientos de medida en la impedancia del circuito se puede agregar un amplificador operacional a la salida [25].



**Figura 27.** Divisor de voltaje para el Sensor de Fuerza (SFR).

En la Figura 28 se muestran las diferentes curvas de Voltaje vs Fuerza, para los sensores FSR con diferentes configuraciones de resistencia  $R_M$  en el divisor de voltaje [25]. Para el prototipo de mano robotica se ha decidido utilizar una resistencia  $R_M = 10\text{ k}\Omega$ , debido a que satisface la sensibilidad de fuerza deseada para el prototipo.



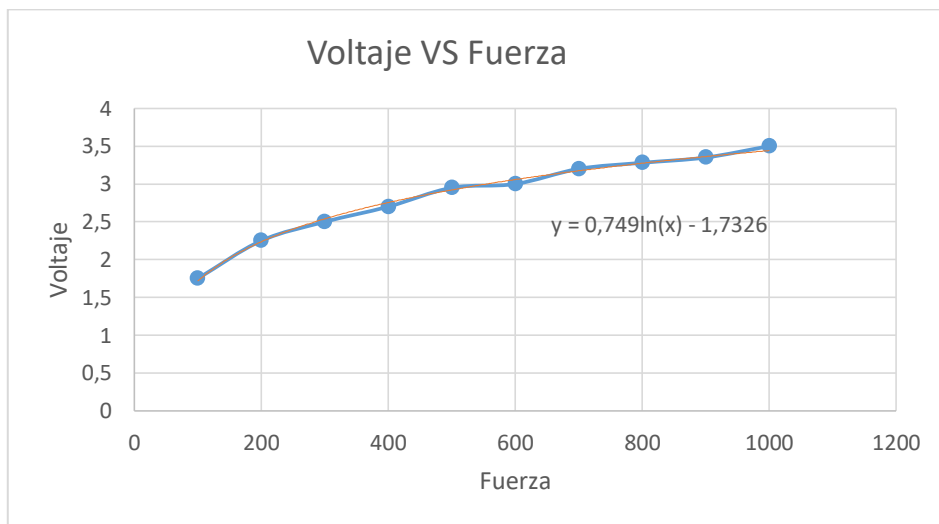
**Figura 28.** Voltaje vs Fuerza en sensores FSR.

Mediante la adquisición de datos de los FSR se determinan los valores de Fuerza vs Voltaje los cuales se presentan en la Tabla 9.

**Tabla 15:** Puntos recolectados en base de la Figura 26.

Fuerza(gramos fuerza)	Voltaje (Voltaje del Sensor FSR)
100	1,75
200	2,25
300	2,5
400	2,7
500	2,95
600	3
700	3,2
800	3,28
900	3,35
1000	3,5

En la Figura 29 se representa gráficamente los valores de Voltaje vs Fuerza presentados en la Tabla 14.



**Figura 29.** Gráfica de Fuerza VS Voltaje.

Mediante la figura 29 y el software Excel se agregó línea de tendencia a la gráfica con lo cual se obtiene la ecuación (2), que se aproxima a la curva obtenida mediante los valores de la Tabla 12.

$$F = 0.749 \ln(V_{out}) - 1.73 \quad (2)$$

Donde:

$V_{out}$  = Voltaje de Salida.



### 3.9 Diseño del Control PID para la Mano Robótica.

El prototipo de mano robótica utiliza un Arduino nano, cinco sensores de fuerza y cuatro servomotores. Los sensores de fuerza son los encargados de suministrar los datos de fuerza al Arduino nano. Los servomotores se encargan de realizar los movimientos adecuados para sujetar un objeto.

#### 3.9.1 Identificación del sistema

La función de transferencia del sistema es obtenida mediante el muestreo de datos de la planta para ello se emplea la herramienta Ident de MATLAB la cual permite determinar una aproximación de la función de transferencia del prototipo de mano robótica.

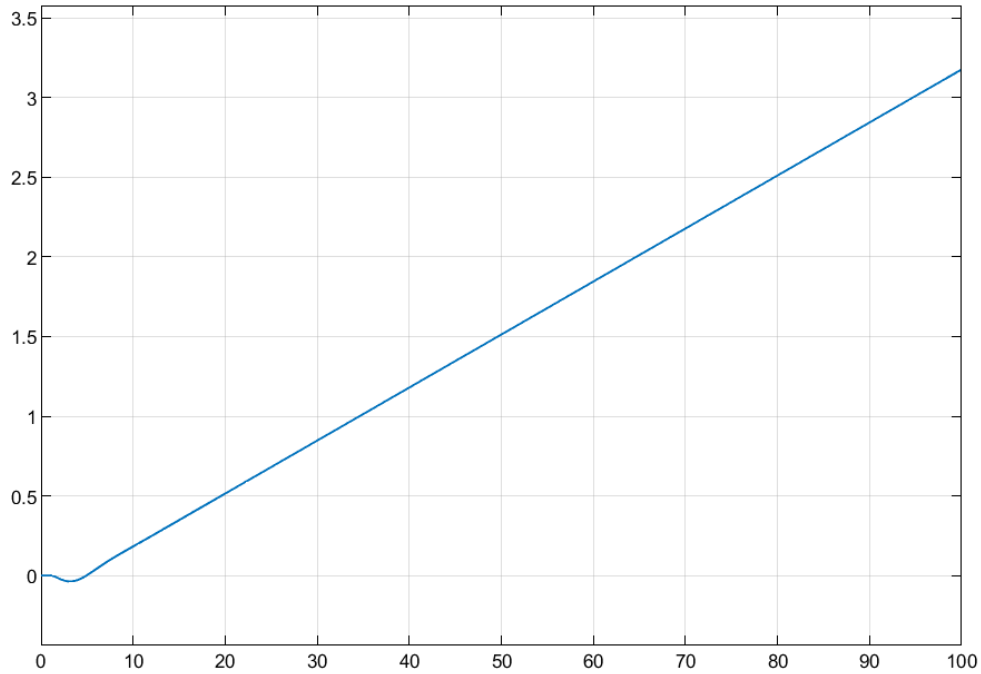


**Figura 30.** Diagrama de identificación de la planta.

Los datos muestreados del prototipo de mano robótica son guardados en una hoja de Excel para luego ser importados a MATLAB y cargados en Ident como datos en dominio del tiempo. En la Ecuación 3 se aprecia la Función de Transferencia obtenida con 77% de aproximación.

$$G(s) = \frac{-0.06995s + 0.03022}{s^3 + 1.102s^2 + 0.9085s + 4.75e - 9} \quad (3)$$

En la Figura 31 se aprecia la gráfica de la función de transferencia obtenida en respuesta a una entrada escalón. La función de transferencia no tiene un tiempo de estabilización definida.



**Figura 31.** Función de Transferencia con una entrada escalón.

### 3.9.2 Diseño del controlador PID

Para el diseño del Control PID se parte de la ecuación 4, que representa al controlador PID en términos del tiempo.

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

Donde:

$k_p$  : Ganancia del control proporcional.

$k_i$  : Ganancia del control integrativo.

$k_d$  : Ganancia del control derivativo.

$e(t)$ : Error del sistema, entre la referencia y salida del sistema.

La ecuación 5 representa al controlador PID en términos de Laplace.

$$U(s) = k_p E(s) + \frac{k_i}{s} E(s) + k_d s E(s) \quad (5)$$

La ecuación 6 relaciona la entrada con el error del sistema, representando la función de transferencia del controlador PID.

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{k_d s^2 + k_p s + k_i}{s} \quad (6)$$

Las ganancias del controlador PID se obtienen mediante el método de sintonización de Ziegler-Nichols de respuesta a la frecuencia. Para aplicar este método es necesario la función de transferencia de la planta en lazo cerrado con el controlador. La ecuación 7 representa dicha función.

$$G(s) = \frac{-0.06995s + 0.03022}{s^3 + 1.102s^2 + 0.9085s + 4.75e - 9} \quad (7)$$

Reemplazando  $s$  por  $jw$  en los polos de la ecuación 7 se obtiene:

$$(jw)^3 + 1.102(jw)^2 + 0.9085(jw) + 4.75e - 9 \quad (8)$$

Donde  $jw$  representa el eje imaginario.

En la ecuación 9 se observa el procedimiento para encontrar  $w$  en el cual el lugar geométrico cruza con las raíces del eje imaginario  $jw$ .

$$jw(w^2 + 0.9085) = 0$$

$$w = \pm 0.95j \quad (9)$$

Donde:

$w$ : Frecuencia de oscilación del sistema.

El período de oscilación  $P_u$  se determina mediante la ecuación 9.

$$P_u = \frac{2\pi}{w}$$

Para este caso solo se tomara en cuenta el valor positivo de  $w$  y se lo reemplazará en la ecuación 9, obteniendo nuestro periodo de oscilación  $P_u$ .

$$P_u = \frac{2\pi}{0.95}$$

$$P_u = 6.61 \quad (10)$$

Finalmente para la obtención de la ganancia máxima  $k_u$  se empleará la ecuación 11, encontrada previamente en la ecuación 8.

$$\begin{aligned}
 k_u &= 1.167j\omega^2 + 4.75e - 9 \\
 k_u &= 1.167(0.95)^2 \\
 k_u &= 1.05
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Una vez obtenido todos los datos necesarios se empleará el criterio de Ziegler and Nichols, en base a la Tabla 16.

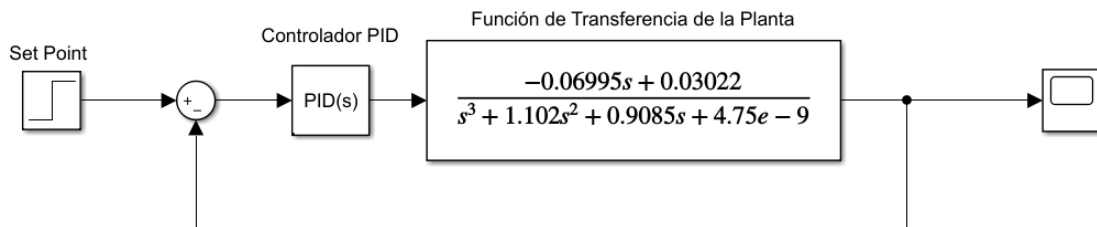
**Tabla 16.** Método de Ziegler y Nichols.

Tipo de Controlador	$k_p$	$k_i$	$k_d$
<b>P</b>	$0.5k_u$	$\infty$	0
<b>PI</b>	$0.45k_u$	$\frac{P_u}{1.2}$	0
<b>PID</b>	$0.6k_u$	$0.5P_u$	$0.125P_u$

El tipo de controlador escogido será un PID. A continuación se reemplazarán los valores de las ecuaciones 10 y 11 en la última fila de la Tabla 16.

$$\begin{aligned}
 k_p &= 0.63 \\
 k_i &= 3.31 \\
 k_d &= 0.83
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

En la Figura 32 se aprecia el diagrama de bloques del controlador PID, realizado en la herramienta Simulink de MATLAB.



**Figura 32.** Diagramas de Bloque del Control PID.

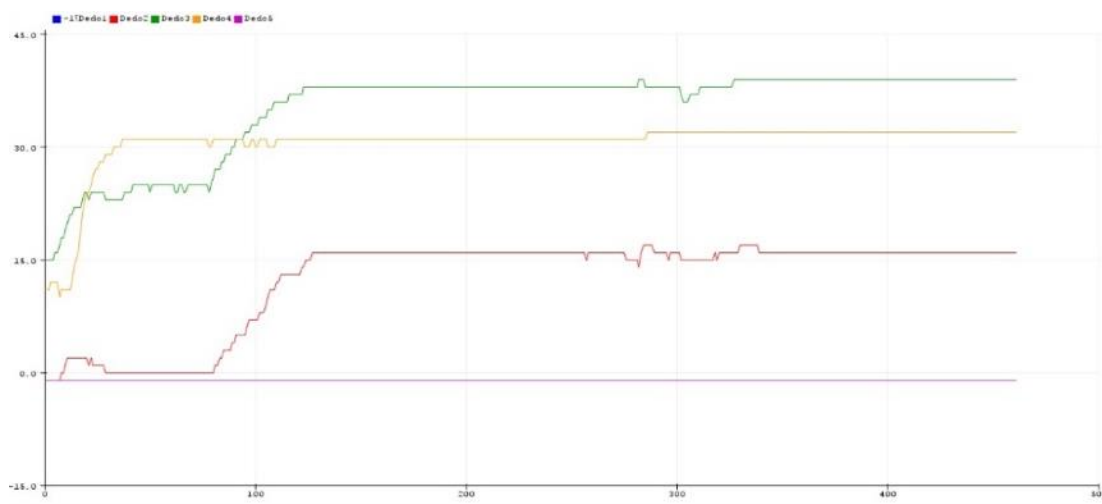
## CAPITULO IV

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se analizan los resultados del control de presión en el prototipo de mano robótica, para ello se ha utilizado diferentes tipos de objetos entre ellos: una caja de cartón, botella de plástico, rollo de papel higiénico y un embace de lata, esto debido a que son objetos cotidianos de uso diario para las personas.

#### 4.1 Análisis de Sujeción de una Caja de Cartón.

En la Figura 33 se puede apreciar las señales de cuatro sensores de fuerza al sujetar una caja de cartón, esto debido a que los dedos que entran en contacto con el objeto son: índice, medio, anular y meñique.



**Figura 33.** Señales de presión obtenidas con la caja de cartón.

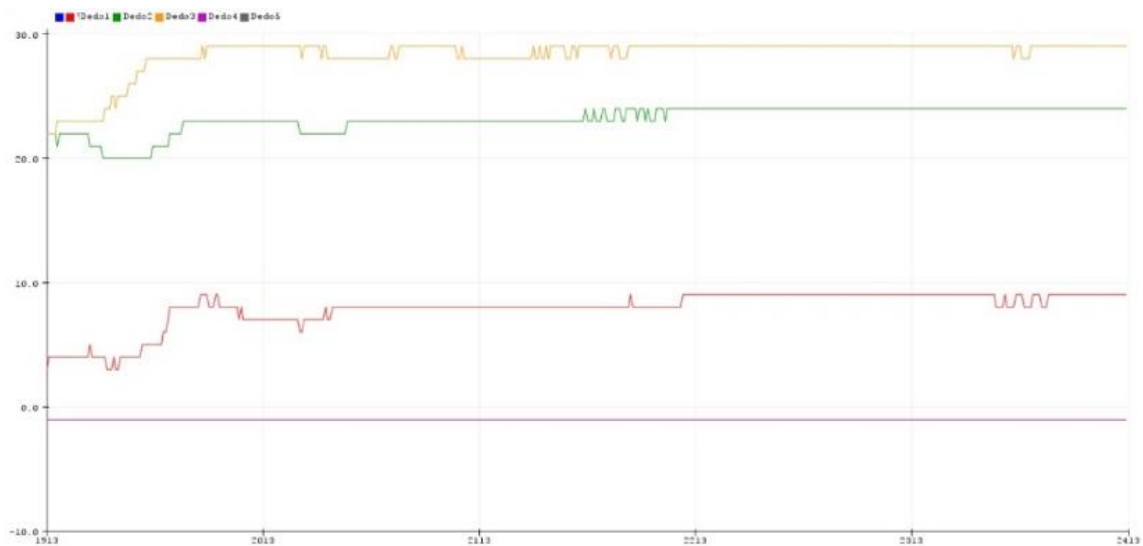
En la Figura 34 se muestra el prototipo de mano robótica sujetando una caja de cartón, se puede apreciar que los dedos medio, índice, anular y meñique realizan la presión de sujeción en este objeto.



**Figura 34.** Sujeción de una caja de cartón.

#### 4.2 Análisis del Agarre de un Embace de Lata.

En la Figura 35 se puede apreciar las señales de cuatro sensores de fuerza al sujetar una embace de lata, esto debido a que los dedos que entran en contacto con el objeto son: índice, medio, anular y meñique.



**Figura 35.** Señal de presión obtenidas con un embace de lata.

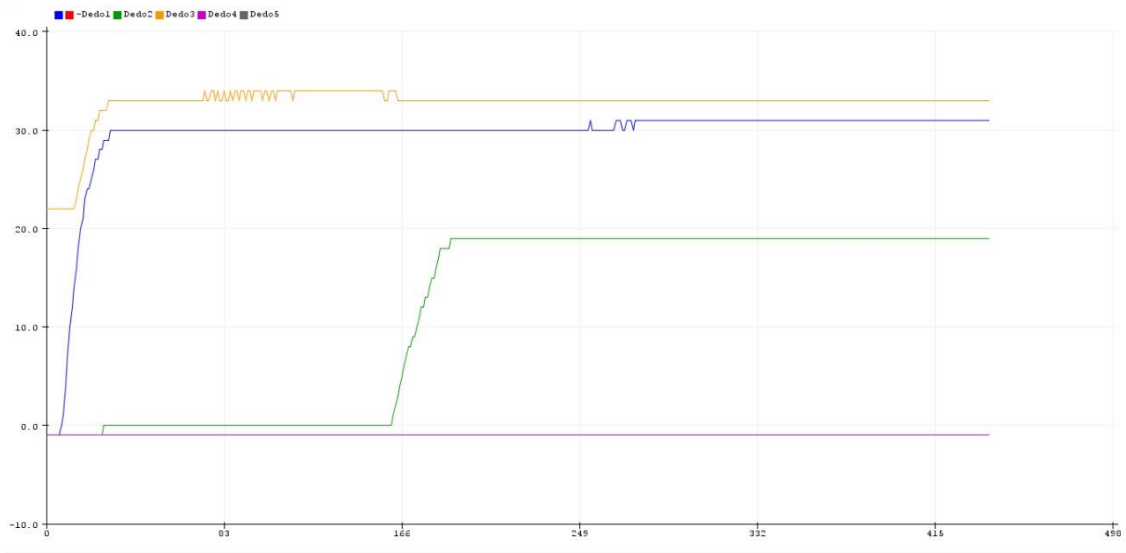
En la Figura 36 se muestra el prototipo de mano robótica sujetando un embace de lata, se puede apreciar que los dedos medio, índice, anular y meñique realizan la presión de sujeción en este objeto.



**Figura 36.** Sujeción de un embace de lata.

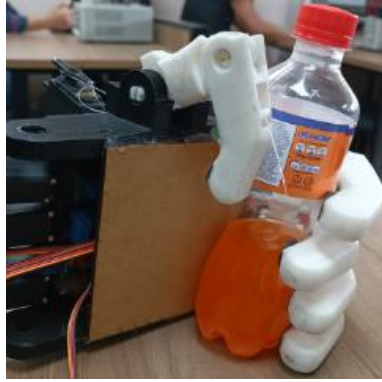
### 4.3 Análisis del Agarre de una Botella de Plástico.

En la Figura 37 se puede apreciar las señales de cuatro sensores de fuerza al sujetar una embace de lata, esto debido a que los dedos que entran en contacto con el objeto son: índice, medio y anular. La botella de plástico tiene una curvatura en su estructura física evitando que el dedo meñique ejerza la suficiente presión.



**Figura 37.** Señal de presión obtenida con una botella de plástico.

En la Figura 38 se muestra el prototipo de mano robótica sujetando una botella de plástico, se puede apreciar que los dedos medio, índice, anular realizan la presión correspondiente para su sujeción.



**Figura 38.** Sujeción de una botella de plástico.

#### 4.4 Análisis del agarre de un rollo de papel

En la Figura 39 se puede observar la señal obtenida de los sensores de presión del prototipo de mano robótica cuando sujeta un rollo de papel higiénico. Se aprecia claramente que los cinco dedos de la mano están ejerciendo su presión correspondiente.



**Figura 39.** Señal de presión obtenida con un rollo de papel higiénico.

En la Figura 40 se puede observar que los dedos que entran en contacto con el rollo de papel higiénico son: pulgar, índice, medio y anular.

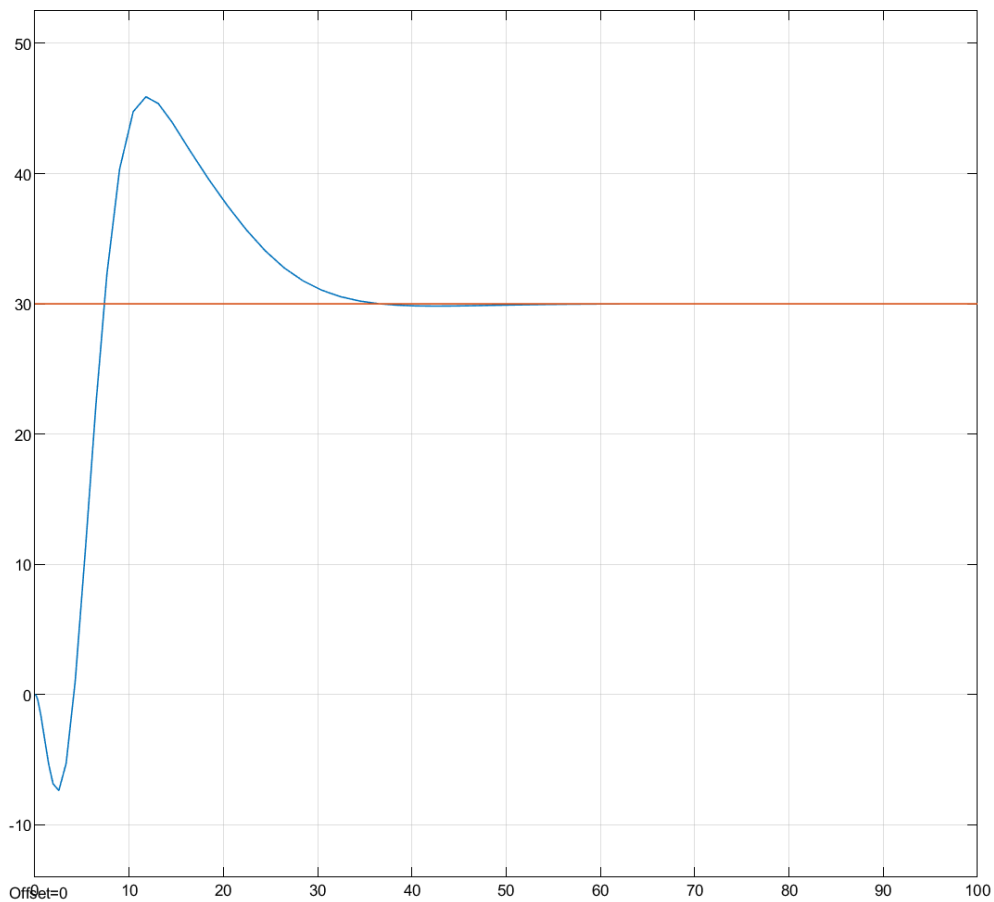




**Figura 40.** Sujeción de un rollo de Papel Higiénico.

#### **4.5 Prueba del control PID para la caja de cartón**

Esta prueba se realiza con la función de transferencia de la ecuación 3 y los valores de KP, KI y KD obtenidos mediante la Tabla 16 con un valor de SetPoint de 30, En la Figura 41 se tiene el control para la caja de cartón de los dedos con la que los sujeta.



**Figura 41.** Control caja de cartón.

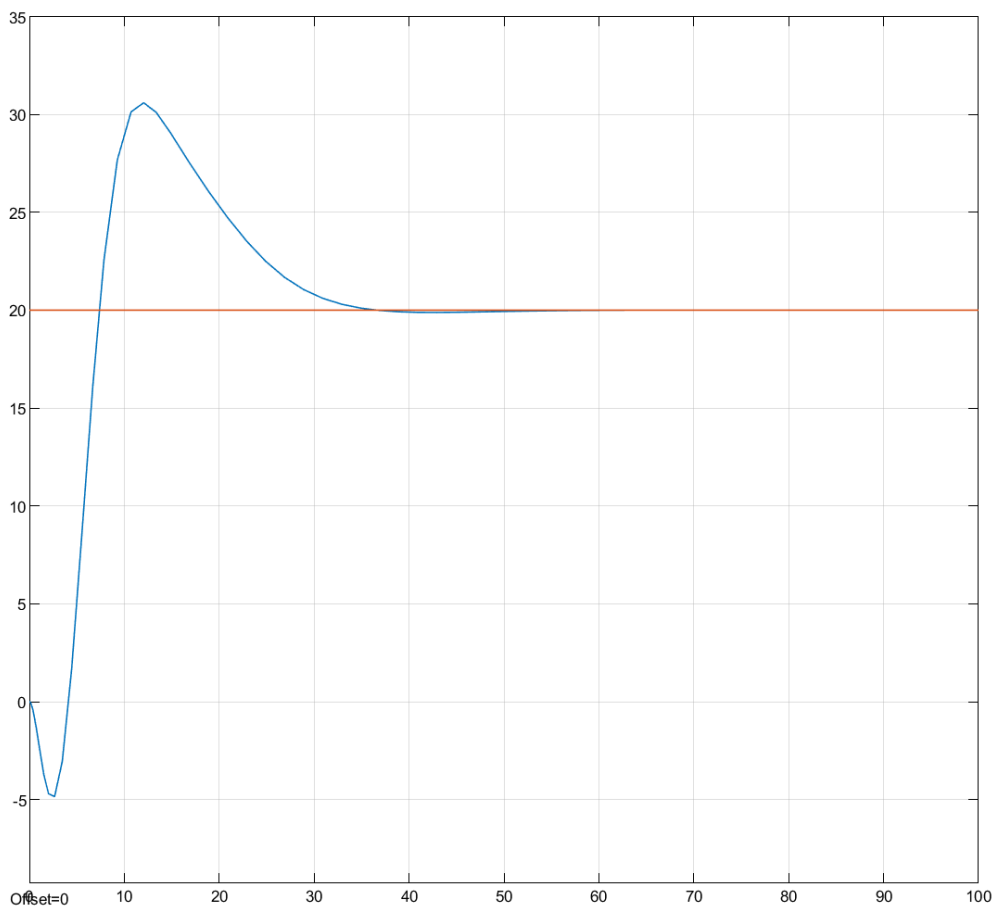
En la Tabla 17 se pueden apreciar el tiempo de subida, asentamiento y el error de la función de transferencia controlada y estable.

**Tabla 17:** Datos obtenidos del control de sujeción de caja de cartón.

Tiempo de Subida	Tiempo de Asentamiento	Error
3	30	1.98e-5

#### 4.6 Prueba del control PID para la botella de plástico.

Esta prueba se realiza con la función de transferencia de la ecuación 3 y los valores de  $k_p$ ,  $k_i$  y  $k_d$  obtenidos mediante la Tabla 16 con un valor de SetPoint de 20, En la Figura 42 se tiene el control para la botella de plástico de los dedos con la que los sujeta.



**Figura 42.** Control botella plástica.

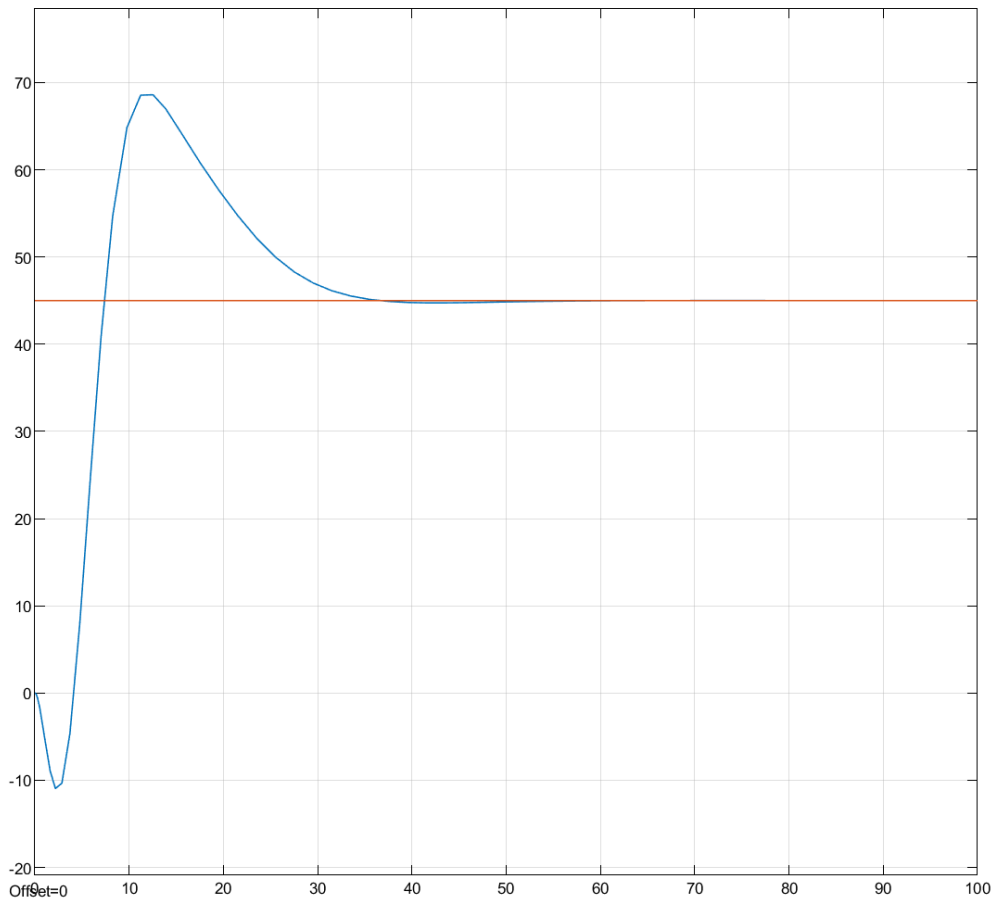
En la Tabla 18 se pueden apreciar el tiempo de subida, asentamiento y el error de la función de transferencia controlada y estable, para la sujeción de la botella plástica.

**Tabla 18:** Datos obtenidos del control de sujeción de botella plástica.

Tiempo de Subida	Tiempo de Asentamiento	Error
3.5	38	1.32e-5

#### 4.7 Prueba del control PID con papel higiénico

Esta prueba se realiza con la función de transferencia de la ecuación 3 y los valores de  $k_p$ ,  $k_i$  y  $k_d$  obtenidos mediante la Tabla 16 con un valor de SetPoint de 45, En la Figura 43 se observa el control para la botella de plástico de los dedos con la que los sujeta.



**Figura 43.** Control rollo de papel higiénico.

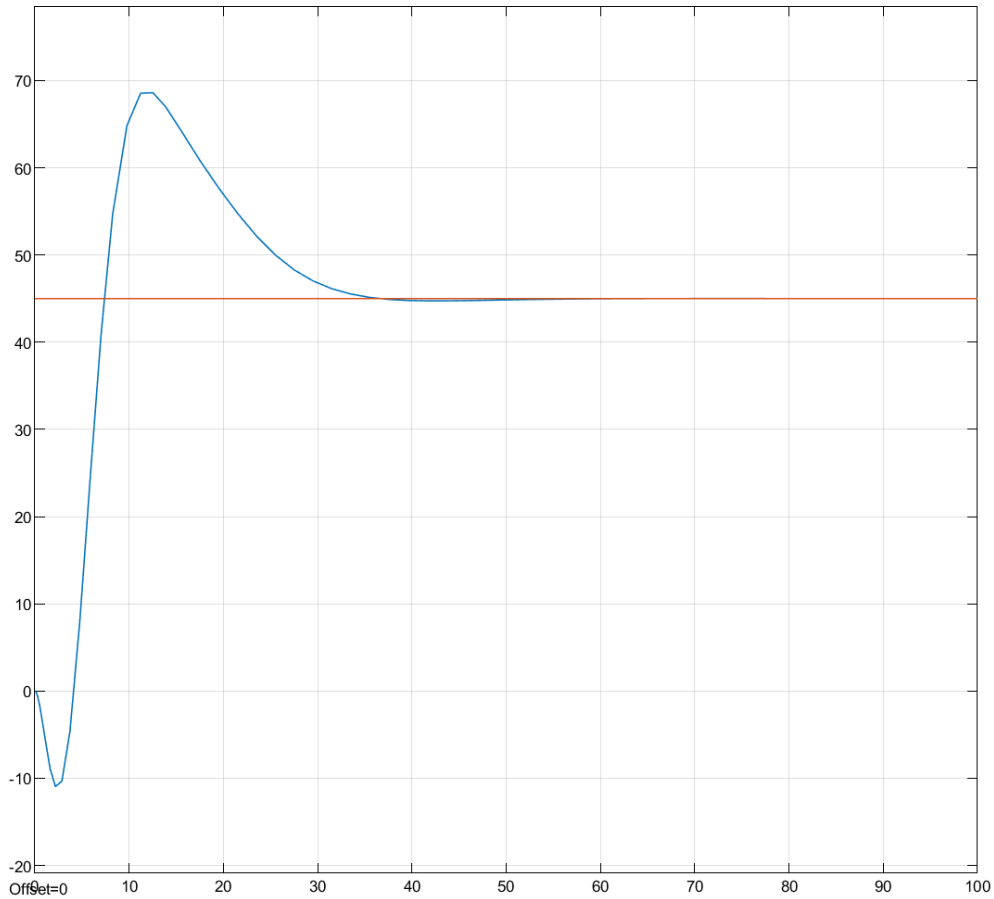
En la Tabla 19 se pueden apreciar el tiempo de subida, asentamiento y el error de la función de transferencia controlada y estable, para la sujeción de la botella plástica.

**Tabla 19:** Datos obtenidos del control de sujeción de botella plástica.

Tiempo de Subida	Tiempo de Asentamiento	Error
5	38.5	$2.97e-5$

#### 4.8 Prueba del control PID con envase de metal.

Esta prueba se realiza con la función de transferencia de la ecuación 3 y los valores de  $k_p$ ,  $k_i$  y  $k_d$  obtenidos mediante la Tabla 16 con un valor de SetPoint de 15, En la Figura 44 se muestra el control para el envase de metal.



**Figura 44.** Control rollo de papel higiénico.

En la Tabla 20 se pueden apreciar el tiempo de subida, asentamiento y el error de la función de transferencia controlada y estable, para la sujeción de la botella plástica.

**Tabla 20:** Datos obtenidos del control de sujeción de botella plástica.

Tiempo de Subida	Tiempo de Asentamiento	Error
4.33	33.2	9.90e-6

#### 4.9 Análisis de Costos y Precio.

Para la implementación del prototipo se ha tenido gastos económicos tanto para la parte mecánica como para la parte electrónica y de control.

#### 4.9.1 Construcción Mecánica

En la Tabla 21 se detallan los componentes para la construcción mecánica del prototipo, de la cual se obtiene un gasto de 180 dólares para la construcción de la mano robótica.

**Tabla 21:** Costos de los componentes mecánicos.

<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Precio total [\$]</b>
500 gramos	Impresión PLA	100
1litro	Impresión resina	80
<b>Total</b>		<b>180</b>

#### 4.9.2 Construcción Electrónica

En la Tabla 22 se detallan los componentes electrónicos para la construcción de la placa de control, estos precios se basan en el mercado ecuatoriano.

**Tabla 22:** Costos de los componentes electrónicos.

<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Precio Unitario [\$]</b>	<b>Precio total [\$]</b>
4	Servomotores	11	44
5	Sensores de presión FSR.	13	65
1	Galleta	1	1
10	Cables flexibles	0.1	1
5	Conectores	0.30	1.5
1	Soldadura	1.20	1.2
<b>Total</b>			<b>114.7</b>

#### 4.9.3 Costos de Mano de Obra

Se debe tomar en cuenta el salario básico de un ingeniero de Ecuador para poder establecer el precio del prototipo, en el Ecuador un ingeniero gana 600 dólares acorde al Ministerio de Trabajo y se detalla en la Tabla 23.

**Tabla 23:** Costos de la mano de obra.

<b>Mano de obra</b>	<b>Horas</b>	<b>Valor por hora [\$]</b>	<b>Total [\$]</b>
Diseño del prototipo	80	3,75	300
Construcción	40	3,75	150
<b>Total</b>			<b>450</b>

#### 4.8.4 Total del costo del prototipo.

Para obtener el costo total, se realiza la suma de los totales de la Tabla 21, Tabla 22 y Tabla 23, de esta manera se puede generar una tabla con los costos totales, esta se encuentra representada en la Tabla 24.

**Tabla 24:** Costos totales

<b>Nombre del costo</b>	<b>Valor [\$]</b>
Construcción Mecánica	180
Construcción electrónica	114.7
Mano de obra	450
<b>Total</b>	<b>744.7</b>

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se detallarán las conclusiones y recomendaciones que se obtuvieron a lo largo del desarrollo del prototipo.

#### 5.1 Conclusiones

- Se diseñó la mano robótica mediante el software de diseño Fusion 360 basándose en la estructura de una mano humana, considerando también los parámetros y medidas de los servomotores SG90, estos parámetros permitieron realizar el estudio estático del prototipo en donde se obtuvo el desplazamiento y el factor de seguridad mayor a 2, con lo cual se procedió a la impresión y construcción de la mano robótica.
- Se determinó la función de transferencia del prototipo para la correcta activación de los servomotores, mediante la identificación del sistema el cual se aproximó a un 75% de la función ingresada al Ident de Matlab.
- Se realizaron 4 pruebas para la obtención de valores de fuerza de los sensores que se aprecian en las figuras 33,35,37 y 39, lo que permitió determinar los valores de SetPoint para cada objeto utilizado, los cuales son empleados en el control PID.
- Con la función de transferencia obtenida mediante la identificación se diseñó un controlador PID, el cual se emplea para los 5 dedos de la mano robótica, este controlador presenta un tiempo de establecimiento de 30 a 38.5 segundos, con un error de menor a  $2.97e-5N$  en las 4 pruebas realizadas.

#### 5.2 Recomendaciones

- Se debe tener en cuenta un aislamiento adecuado para el circuito de control con respecto a los servomotores, debido a que estos pueden generar corrientes parásitas como resultado del electromagnetismo propio de estos dispositivos.
- Disminuir el tamaño del prototipo para que se asemeje más a una mano humana, y permita mejorar el sistema de control y sujeción.

- Incluir un modelo hermético que permita tener una mejor resistencia en contra del agua y del polvo



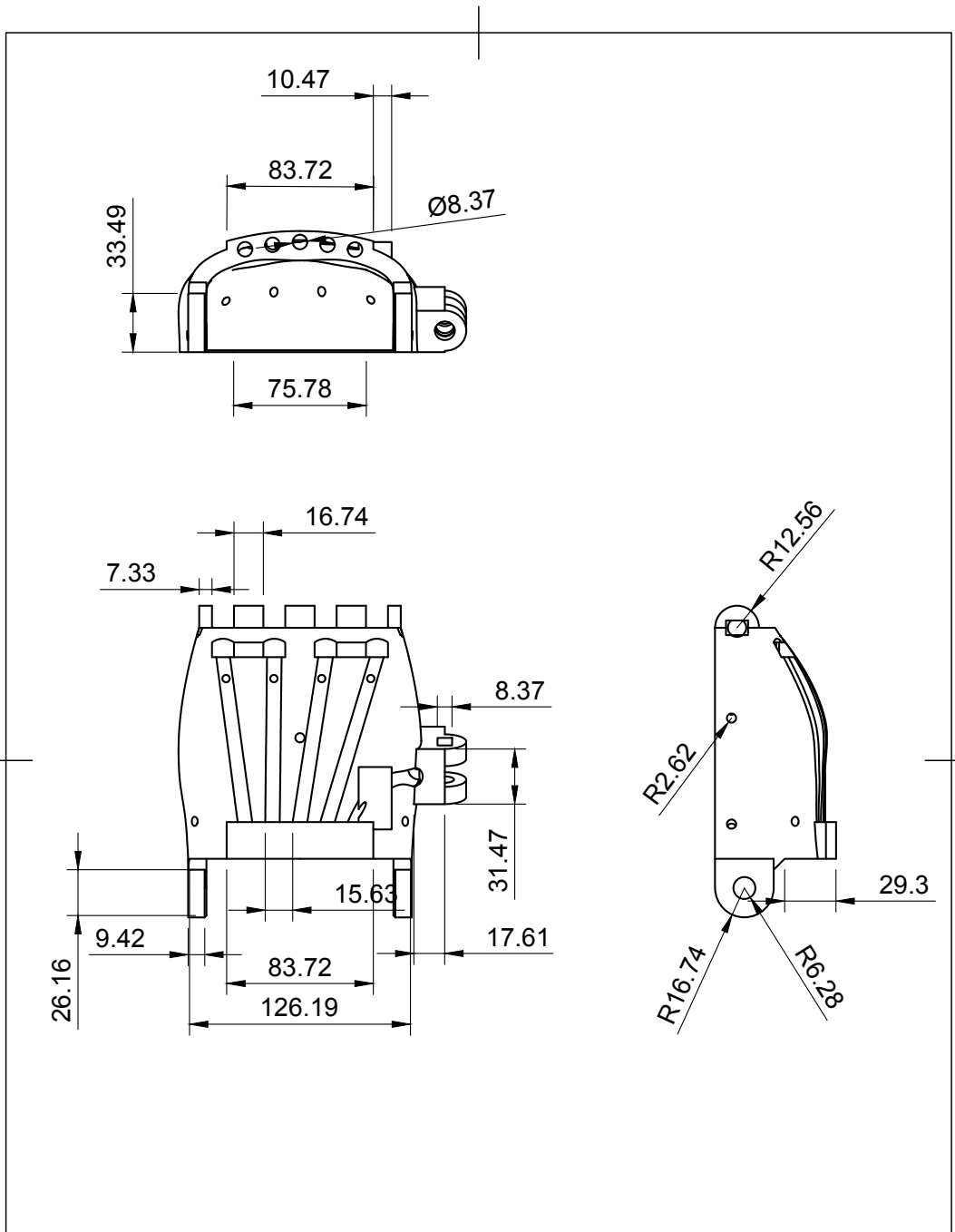
## BIBLIOGRAFÍA


- [1] CONADIS, «Consejo Nacional para la Igualdad de Discapacidades,» 2007. [En línea]. Available: <https://www.consejodiscapacidades.gob.ec/>. [Último acceso: 06 12 2021].
- [2] V. A. Pazmiño, «Repositorio de Tesis de Grado y Posgrado,» Agosto 2018. [En línea]. Available: <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/16104>. [Último acceso: 20 10 2020].
- [3] B. Mercedes y R. Erazo, «Diseño de prototipos tridimensionales de prótesis externa para reemplazo de pierna y pie por amputación infragenicular en humanos.,» 06 2016. [En línea]. Available: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/5844>. [Último acceso: 10 10 2020].
- [4] M. B. MONAR NARANJO y L. A. MURILLO MANTILLA, Artists, *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PRÓTESIS BIÓNICA DE MANO DE 7 GRADOS DE LIBERTAD UTILIZANDO MATERIALES INTELIGENTES Y CONTROL MIOELÉCTRICO ADAPTDA PARA VARIOS PATRONES DE SUJECCIÓN*. [Art]. Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE), 2015.
- [5] G. Gonzáles Badillo, D. I. Torres Uresti, V. E. Espinoza Lopez y G. Guerrero Mora, «Control de una prótesis de mano fabricada por impresión 3D utilizando señales electromiográficas y lógica difusa.,» de *MEMORIAS DEL XXIV CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM*, CAMPECHE, 2018.
- [6] J. M. Dorador González, «ROBÓTICA Y PRÓTESIS INTELIGENTES,» *Revista UNAM*, vol. 6, n° 1, pp. 02-15, 2014.
- [7] I. G. Páez Chingal y C. A. Gaviria López, «Prótesis subactuadas de manos humanas: una revisión,» *Ingenium*, vol. 18, n° 35, pp. 20-34, 2017.
- [8] C. A. Quinayás Burgos, Artist, *DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA PROTESIS ROBOTICA DE MANO FUNCIONAL, ADAPTADA A VARIOS AGARRES*. [Art]. Universidad de Cauca, 2010.
- [9] D. M. Andrade Zeas y D. A. Zuñiga Tenesaca, Artists, [Art]. Universidad Politécnica Salesiana, 2011.
- [10] S. Jacobsen, J. Wood, D. Knutti y K. Biggers, «The UTAH/M.I.T. Dextrous Hand: Work in Progress,» de *Robotics and Automation*, Taiwan, 2003.
- [11] N. Fukaya, S. Toyama, T. Asfour y R. Dillman, «Design of the TUAT/Karlsruhe humanoid hand,» de *Intelligent Robots and Systems*, Tokyo, 2000.

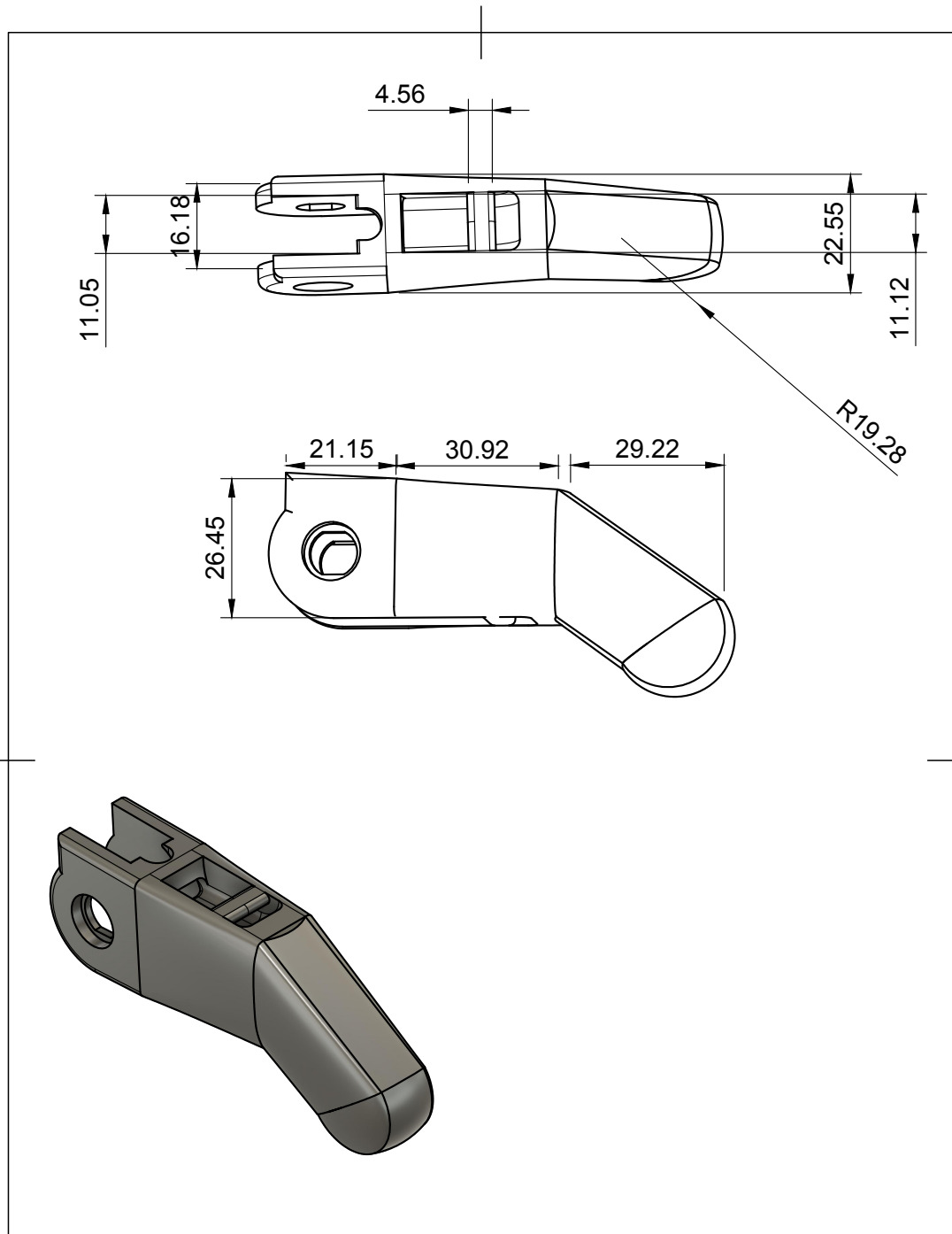
- [12] U. Kim, D. Jung, H. Jeong, C. Park, H. Jeong, J. Park, H.-M. Jung, J. Cheong, H. R. Choi y H. Do, «Integrated linkage-driven dexterous anthropomorphic robotic hand,» *Nature Communications*, vol. 12, 2021.
- [13] J. Loaiza y N. Arzola, «EVOLUCIÓN Y TENDENCIAS EN EL DESARROLLO DE PRÓTESIS DE MANO,» *Dyna*, vol. 78, n° 169, pp. 191-200, 2011.
- [14] F. Quíroz Guitiérrez, *Anatomía Humana*, Mexico: PORRUA, 1987, pp. 144-152.
- [15] I. G. Schlesinger, *Der mechanische aufbau der kunstlichen glieder*, Berlin: Springer, 1919, pp. 321-661.
- [16] S. T. Saponas, J. A. Landay y D. Morris, «Enabling Always-Available Input with Muscle-Computer Interfaces,» de *Proceedings of the 22nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, Victoria, 2009.
- [17] J. R. Napier, «The Prehensile Movements of the Humand Hand,» *The Journal of Bone and Joint Surgery*, vol. 38 B, n° 4, pp. 902-913, 1956.
- [18] T. Feix, D. Kragic, J. Romero, H.-B. Schmiemayer y A. M. Dollar, «The GRASP Taxonomy of Human Grasp Types,» *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, vol. 46, pp. 1-12, 2015.
- [19] O. Binivignat, A. Almagià, P. Lizana y E. Olave, «Aspectos Biométricos de la Mano de Individuos Chilenos,» *International Journal of Morphology*, vol. 30, n° 2, 2012.
- [20] T. Armstrong, «Biomechanics of Hand Work: Force.,» *The university of Michigan*, 2002.
- [21] E. T. Wolbrecht, J. B. Rowe, V. Chan, S. C. Ingemanson, S. C. Cramer y D. J. Reinkensmeyer, «Finger Strength, Individuation, and their Interaction:,» *Clin Neurophysiol*, vol. 4, n° 129, pp. 797-808, 2018.
- [22] «EE,» [En línea]. Available: [http://www.ee.ic.ac.uk/pcheung/teaching/DE1\\_EE/stores/sg90\\_datasheet.pdf](http://www.ee.ic.ac.uk/pcheung/teaching/DE1_EE/stores/sg90_datasheet.pdf). [Último acceso: 24 06 2022].
- [23] Microchip, «Microchip,» [En línea]. Available: [https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P\\_Datasheet.pdf](https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf). [Último acceso: 24 06 2022].
- [24] LEANSTAR, «Chipmall,» [En línea]. Available: <https://www.chipmall.com/datasheet/4699794.html>. [Último acceso: 24 06 2022].
- [25] I. Electronics, «trossenrobotics,» [En línea]. Available: <https://www.trossenrobotics.com/productdocs/2010-10-26-DataSheet-FSR402-Layout2.pdf>. [Último acceso: 10 08 2022].
- [26] A. García González, «djbolanos,» 02 12 2016. [En línea]. Available: <https://www.bolanosdj.com.ar/MOVIL/ARDUINO2/IntroServos.pdf>. [Último acceso: 10 06 2022].


[27] Arduino, «Arduino,» [En línea]. Available: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3>. [Último acceso: 24 06 2022].

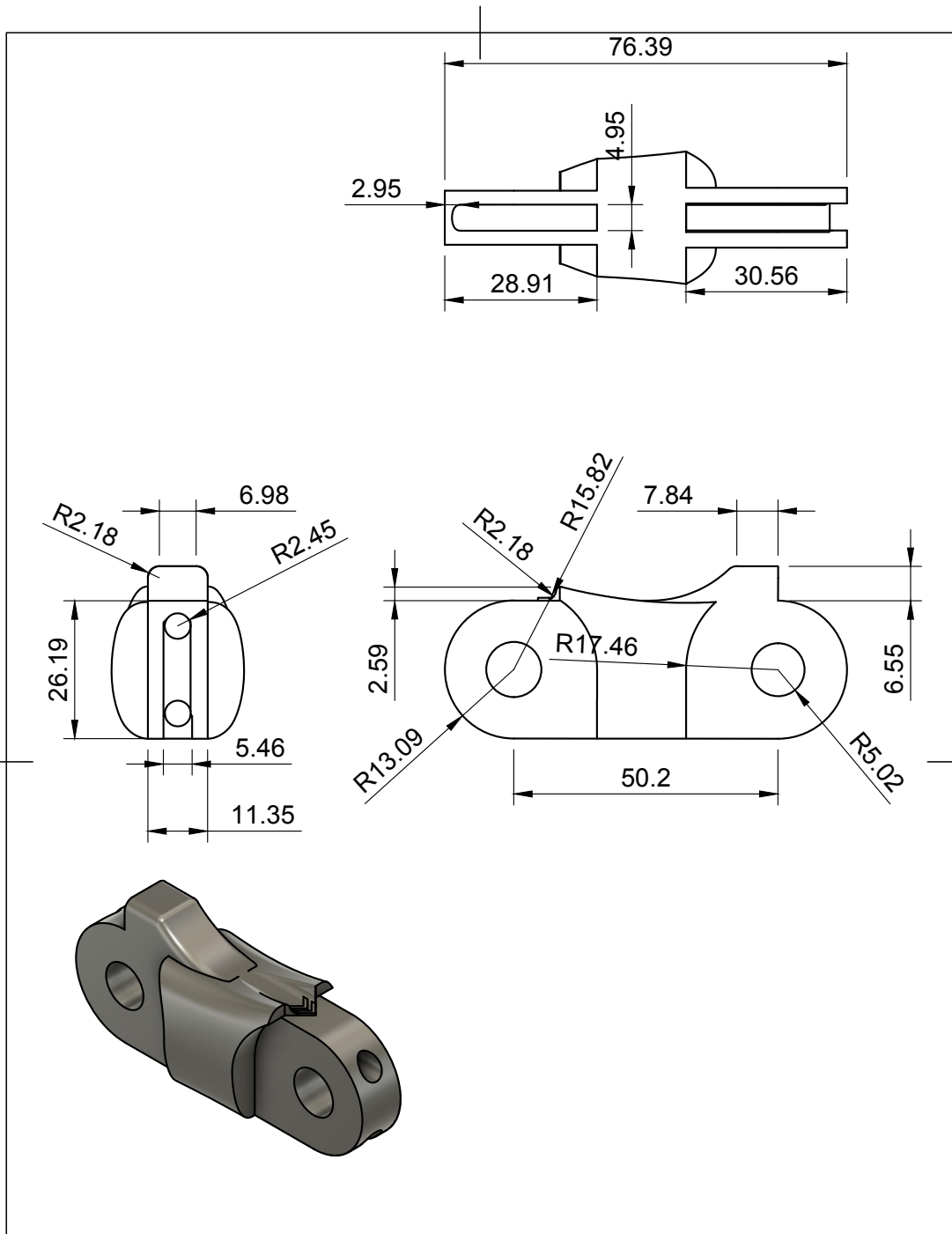
**ANEXO I**  
**PLANOS MECÁNICOS**




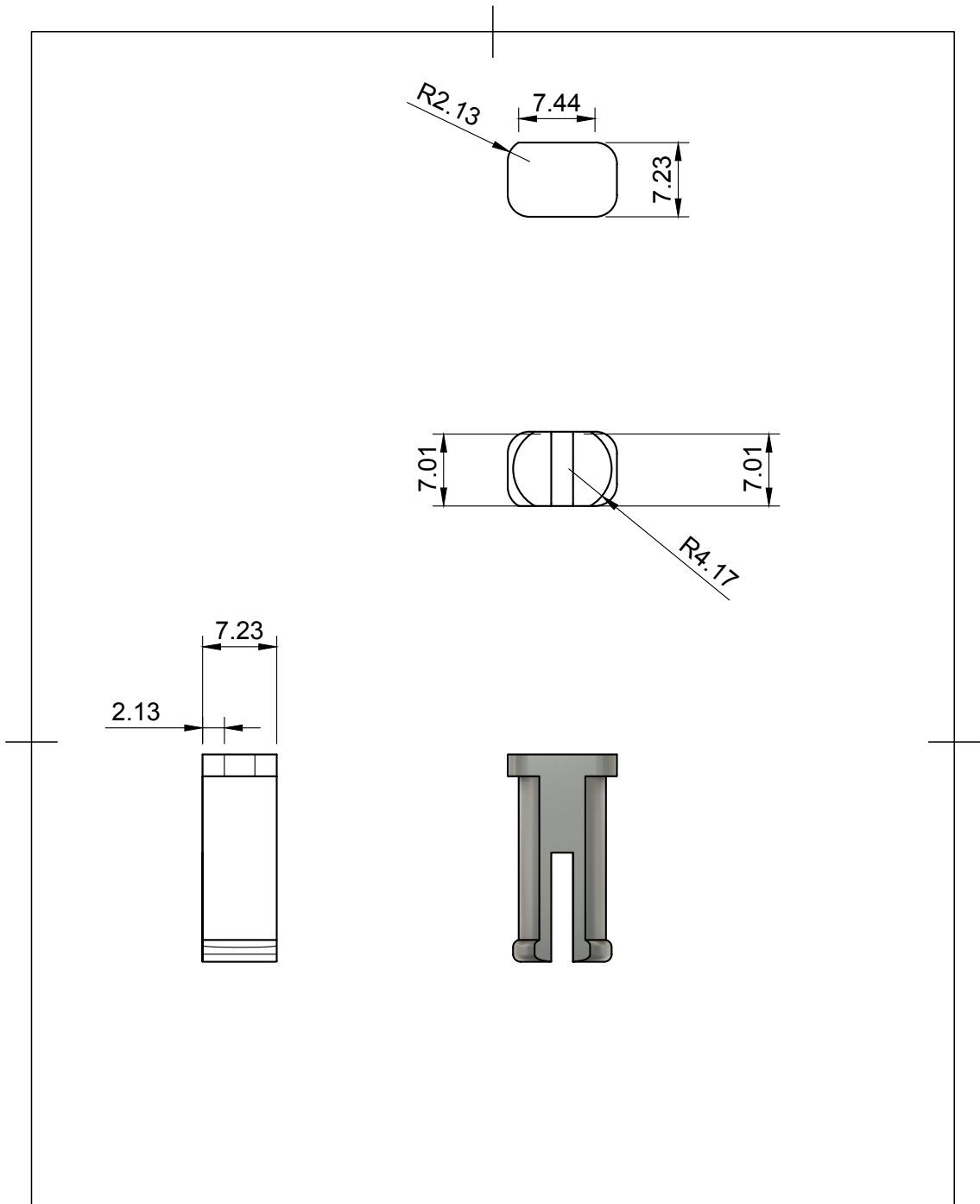
Tratamiento térmico	Ninguno	Material: Resina	Dim.brutas: NA	
Recubrimiento	Ninguno	Diseñó:	Luis Calache	2022-06-15
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA		Dibujó:	Luis Calvache Franklin Nicolalde	2022-06-15
Palma	Escala:	Revisión:	Ing. Ricardo Zapata	2022-06-15




Trataiento térmico:	Ninguno	Material: Resina	Dimesiones brutas: NA
Recubrimiento:	Ninguno	Diseño:	Luis Calvache
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA		Dibujo	Luis Calvache Franklin Nicolalde
Dedo	Escala: 1:1	Revisión	Ing.Ricardo Zapata

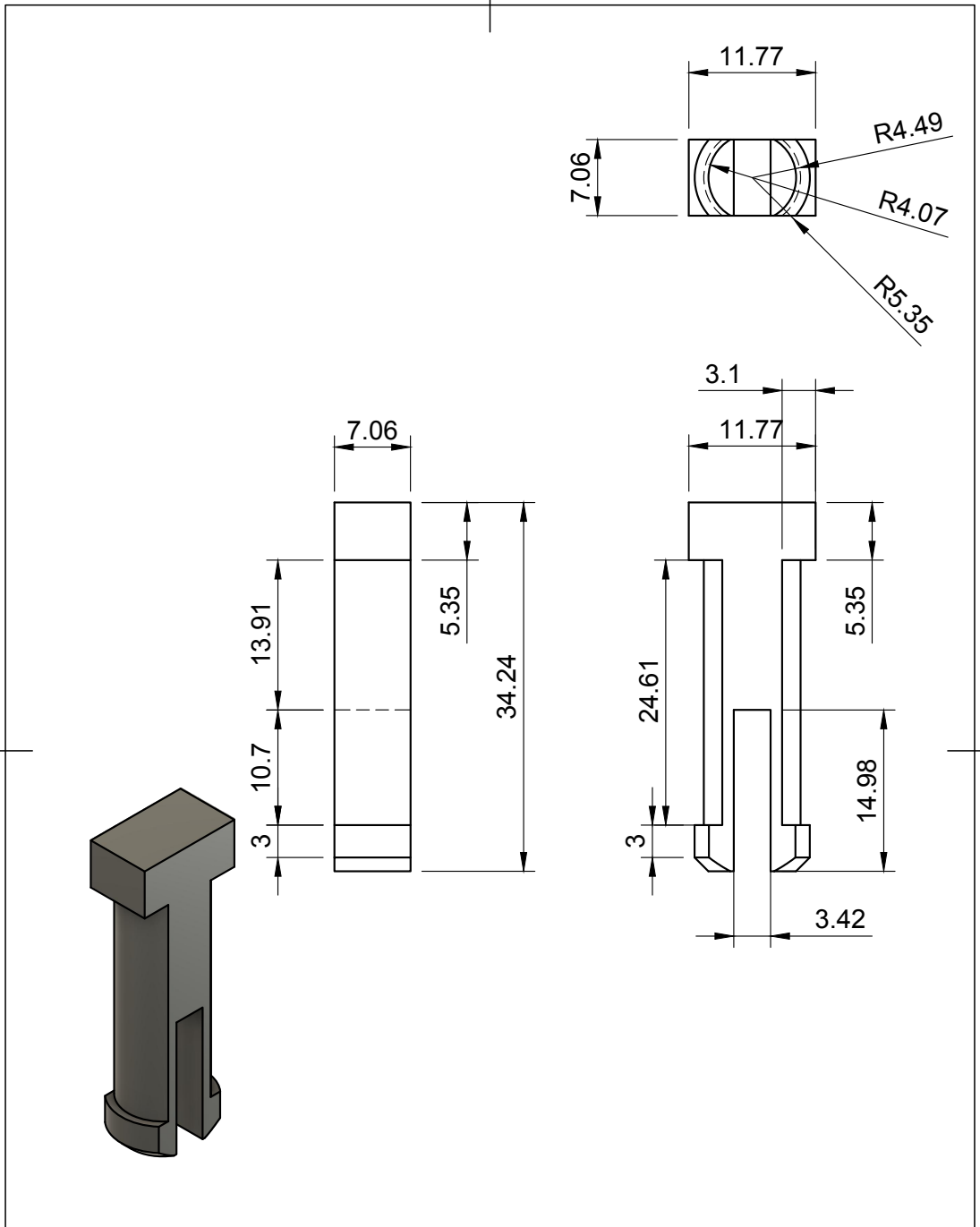



Tratamiento térmico	Ninguno	Material: Resina	Dim.brutas: NA	
Recubrimiento	Ninguno	Diseño:	Luis Calache	2022-06-15
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA		Dibujó:	Luis Calvache Franklin Nicolalde	2022-06-15
Union dedos con palma	Escala: 1:1	Revisión:	Ing. Ricardo Zapata	2022-06-15



Tratamiento térmico	Ninguno	Material: Resina	Dim.brutas: NA	
Recubrimiento	Ninguno	Diseñó:	Luis Calache	2022-06-15
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA		Dibujó:	Luis Calvache Franklin Nicolalde	2022-06-15
Pin 1	Escala: 2:1	Revisión:	Ing. Ricardo Zapata	2022-06-15





Tratamiento térmico	Ninguno	Material: Resina	Dim.brutas: NA	
Recubrimiento	Ninguno	Diseñó:	Luis Calache	2022-06-15
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA		Dibujó:	Luis Calvache Franklin Nicolalde	2022-06-15
Union dedos con Palma	Escala:	Revisión:	Ing. Ricardo Zapata	2022-06-15