

**Escuela Superior Politécnica Del Litoral**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción**

Diseño de una garra adaptativa de bajo costo basada en actuadores electromecánicos y eslabones rígidos

**Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero en Mecatrónica**

Presentado por:

Javier Alfredo Pagalo Guamán

Cristóbal Agustín Lara Vera

Guayaquil - Ecuador

Año: 2023

## **Dedicatoria**

El presente proyecto lo dedico a mis padres, Agustín Lara e Isabel Vera, quienes me brindaron los valores y ética necesaria para llegar a este punto, además de su constante apoyo a lo largo de toda mi carrera universitaria. Aún desde la distancia, sea de ciudades o de países, siempre han estado ahí para mí, con algún consejo o cualquier forma de apoyo.

A mis hermanas, Melissa Lara y Agustina Lara, quienes estuvieron siempre atentas a mi progreso y me brindaron el apoyo moral necesario para culminar exitosamente mi carrera.

A mis abuelitos, Cristóbal Lara y Nancy Torres, quienes me fomentaron los ideales de una buena persona, un buen hijo y en general, un buen miembro de la sociedad.

**Cristóbal Agustín Lara Vera**

## **Dedicatoria**

Dedico este proyecto a mis padres, Ana Guamán y José Pagalo, a mi hermana Jenny Pagalo, y a todos aquellos cuya influencia permitieron que me desarrollase tanto en mi carrera como en mi vida personal.

**Javier Alfredo Pagalo Guamán**

## **Agradecimientos**

Mis más sinceros agradecimientos a mis padres, Isabel Vera y Agustín Lara, por brindarme la oportunidad de centrarme enteramente en los estudios sin preocupación por variables adicionales. Por haberme enseñado los valores y éticas morales que me han llevado a ser la persona que soy actualmente y por su paciencia y apoyo en todo el transcurso de mi carrera.

Agradezco a mis amigos que estuvieron presentes desde el inicio de mi carrera, Brayan Escuraina, Karen Castro, Luis Alquina, Sofía España y Juan Sánchez, sin ellos esta trayectoria no hubiera sido igual.

A mis amigos que estuvieron en los últimos años de mi carrera, Dareck, Emely, Bangner, Victoria, Jonathan, Benjamín, Nicole, Jefferson, Ronald, José y Miguel, son grandes personas y un apoyo fundamental para este logro.

**Cristóbal Agustín Lara Vera**

## **Agradecimientos**

Agradezco a mi familia por su apoyo desinteresado, a mis amigos por su valiosa compañía y a mis tutores por sus conocimientos impartidos.

Un agradecimiento especial al Dr. Marcelo Fajardo, al Dr. Mayken Espinoza, al Dr. Carlos Saldarriaga, al Dr. Francis Loayza y al Dr. Francisco Yumbla por haberme dado la oportunidad de pertenecer a un equipo de trabajo en cada etapa de mi carrera y permitirme forjar mi camino hacia el punto en el que estoy ahora. La influencia de cada uno de ustedes ha sido esencial en mi crecimiento personal y profesional.

A Joseph Ávila y Hopkins Herbas, por acompañarme en cada idea o proyecto que se nos ocurriera, por ayudarme a dar el gran paso en múltiples situaciones y por enseñarme que el trabajo duro siempre rinde sus frutos. Pero, sobre todo por ser mis mejores amigos.

**Javier Alfredo Pagalo Guamán**

### **Declaración expresa**

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Javier Alfredo Pagalo Guamán* y *Cristóbal Agustín Lara Vera* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Javier Pagalo Guamán



Cristóbal Lara Vera

## **Evaluadores**

.....  
**Efraín Terán, M.Sc.**

PROFESOR DE LA MATERIA

.....  
**Francisco Yumbra, Ph.D.**

PROFESOR TUTOR

## Resumen

Este proyecto se enfoca en el diseño de una garra adaptativa de tres dedos utilizando manufactura aditiva y actuadores electromecánicos, con el propósito de ofrecer una solución económica y eficiente para su integración con un brazo robótico ABB en el mercado ecuatoriano. Durante la fase de desarrollo, se emplearon materiales de impresión 3D, como filamento de PLA para elementos mecanismos rígidos y TPU en las membradas para distribuir la presión sobre unos sensores de fuerza resistivos. Se utilizaron análisis de esfuerzos y simulaciones para evaluar la resistencia de los materiales y optimizar el diseño de la garra adaptativa de manera gradual. Se aseguró que el mecanismo se integrara eficazmente con el brazo robótico y pueda ser controlado de manera precisa por medio de un control PID. Además, se consideró fundamental la disponibilidad de repuestos en el mercado local para garantizar un mantenimiento sencillo y económico. Se realizaron pruebas en el brazo robótico y la garra diseñada pudo sujetar objetos como una lata de soda y un lápiz de manera efectiva. Los resultados demostraron que la garra adaptativa logró realizar diferentes tipos de agarre con éxito, presentando una contribución significativa al campo de la manipulación robótica en el mercado ecuatoriano.

**Palabras Clave:** garra adaptativa, manufactura aditiva, sensor de fuerza resistivo, brazo robótico, control PID.



### ***Abstract***

*This project focuses on the design of a three-finger adaptive gripper using additive manufacturing and electromechanical actuators, with the purpose of providing a cost-effective and efficient solution for integration with an ABB robotic arm in the Ecuadorian market. During the development phase, 3D printing materials such as PLA filament for rigid mechanical components and TPU for the membranes to distribute pressure on resistive force sensors were employed. Stress analysis and simulations were used to assess material strength and gradually optimize the design of the adaptive gripper. It was ensured that the mechanism could integrate effectively with the robotic arm and be precisely controlled through a PID controller. Furthermore, the availability of spare parts in the local market was considered essential to guarantee easy and cost-effective maintenance. Tests were conducted on the robotic arm, and the designed gripper was able to effectively grasp objects such as a soda can and a pencil. The results demonstrated that the adaptive gripper successfully achieved various types of grasping, making a significant contribution to the field of robotic manipulation in the Ecuadorian market.*

***Keywords:*** *adaptive gripper, additive manufacturing, force sensor resistor, robotic arm, PID control.*

## Índice general

Resumen.....	I
<i>Abstract</i> .....	II
Índice general.....	III
Abreviaturas.....	VI
Simbología.....	VII
Índice de figuras.....	VIII
Índice de tablas.....	X
Índice de planos.....	XI
Capítulo 1.....	1
1.    Introducción.....	2
1.1    Descripción del problema.....	4
1.2    Justificación del problema.....	7
1.3    Objetivos.....	8
1.3.1    Objetivo general.....	8
1.3.2    Objetivos específicos.....	8
1.4    Marco teórico.....	8
1.4.1 <i>Grippers</i> en la industria.....	9
1.4.2    Descripción general de un <i>gripper</i> adaptativo.....	12
1.4.3    Tipos de <i>gripper</i> en base a su sistema de actuación.....	13

1.5	Estado del arte.....	16
Capítulo 2 .....		18
2.	Metodología.....	19
2.1	Requerimientos de diseño.....	19
2.2	Selección de alternativas de solución .....	20
2.3	Proceso de diseño .....	23
2.4	Diseño conceptual.....	23
2.5	Parámetros de diseño mecánico.....	25
2.5.1	Restricciones de diseño en base a rangos de desplazamiento.....	25
2.5.2	Selección de motores .....	27
2.5.3	Sistema de engranajes para transmisión de movimiento .....	30
2.5.4	Estimación de la fuerza máxima de agarre .....	31
2.5.5	Especificación del material de construcción y datos inherentes.....	33
2.6	Parámetros de diseño electrónico.....	33
2.6.1	Selección de sensores.....	33
2.6.2	Selección de actuadores .....	35
2.6.3	Selección de controlador.....	37
2.7	Parámetros de control.....	38
2.7.1	Selección de controladores ( <i>driver</i> ) para los motores DC .....	38

2.8	Consumo energético de la garra.....	39
Capítulo 3 .....		41
3.	Resultados y análisis .....	42
3.1	Diseño mecánico .....	42
3.2	Sistema de control de diversos tipos de agarre .....	49
3.3	Sistema electrónico de la garra.....	52
3.4	Simulación y pruebas en robot real .....	54
3.5	Análisis de costos .....	57
Capítulo 4 .....		59
4.	Conclusiones y recomendaciones.....	60
4.1	Conclusiones.....	60
4.2	Recomendaciones .....	62
Referencias .....		63
Apéndices .....		67

### Abreviaturas

ESPOL	Escuela superior politécnica del litoral
USD	<i>United states dollar</i>
PLA	Poliácido láctico
ABS	Acrilonitrilo butadieno estireno
TPU	Poliuretano termoplástico
3D	Tres dimensiones
FSR	<i>Force sensor resistor</i>
GDL	Grados de libertad
RPM	Revoluciones por minuto
PWM	<i>Pulse width modulated</i>
PPR	<i>Pulses per revolution</i>
PCB	<i>Printed circuit board</i>
PID	Control proporcional integral derivativo
PD	Control proporcional derivativo
GPIO	<i>General purpose input/output</i>

**Simbología**

mm	Milímetro
cm	Centímetro
m	Metro
mV	Milivoltios
V	Voltio
mA	Miliamperios
A	Amperio
N.m	Newton-metros
DC	Corriente directa
kg	Kilogramos
kgf	Kilogramos-fuerza
N	Newton
s	Segundos
h	Horas
kp	Constante proporcional
ki	Constante integral
kd	Constante derivativa
MPa	Megapascal

## Índice de figuras

Figura 1.1 Interacción brazo-mano robótica y humano .....	2
Figura 1.2 Robot industrial usando un <i>gripper</i> al vacío para levantar cajas .....	3
Figura 1.3 Garra adaptativa de dos dedos tomando objetos de formas distintas .....	5
Figura 1.4 Esquema gráfico de tipos de agarre de una garra adaptativa rígida .....	6
Figura 1.5 Cantidad de tipos de <i>grippers</i> producidos por manufactureras .....	7
Figura 1.6 <i>Gripper</i> manipulador de alimentos húmedos .....	9
Figura 1.7 <i>Gripper</i> de cuatro dedos para manipulación delicada.....	10
Figura 1.8 <i>Gripper</i> industrial para ensamblado de vehículos .....	11
Figura 1.9 <i>Gripper</i> especializado en recolección de manzanas .....	12
Figura 1.10 <i>Gripper</i> de vacío con visión por cámara .....	14
Figura 1.11 Pinza neumática para elementos pequeños.....	15
Figura 1.12 <i>Gripper</i> servo-eléctrico de la marca Robotiq .....	15
Figura 1.13 Agarres generales del <i>gripper</i> Robotiq.....	16
Figura 1.14 Agarre delicado basado en sensores del <i>gripper</i> “Barret Hand” .....	17
Figura 2.1 Metodología de diseño .....	23
Figura 2.2 Diseño conceptual .....	24
Figura 2.3 Rangos de desplazamiento en dedos del <i>gripper</i> .....	26
Figura 2.4 Dimensiones de micromotores Pololu.....	28
Figura 2.5 Curva del desempeño del motor seleccionado.....	29
Figura 2.6 Configuración del sistema de engranajes seleccionado .....	30
Figura 2.7 Conjunto propuesto para el movimiento de los GDL en los dedos.....	32

Figura 3.1	Diseño 3D de la garra de tres dedos adaptativa con eslabones rígidos.....	42
Figura 3.2	Visualización interna en el modelo 3D de la garra diseñada .....	43
Figura 3.3	Posicionamiento abierto de la garra en tres configuraciones básicas de agarre (plano, cilíndrico-esférico y de pinza) .....	44
Figura 3.4	Posicionamiento cerrado de la garra en configuraciones base .....	45
Figura 3.5	Volumen de trabajo máximo para cada configuración de agarre con contacto en la base de la palma.....	46
Figura 3.6	Análisis de esfuerzos de Von Mises para torque máximo del motor .....	47
Figura 3.7	Análisis de deformación parcial en la membrana de TPU.....	48
Figura 3.8	Diagrama de bloques del sistema de control de la garra .....	49
Figura 3.9	Posicionamiento cerrado de la garra impresa en las configuraciones plana, cilíndrica y de pinza .....	51
Figura 3.10	Posicionamiento cerrado de la garra impresa desde un ángulo distinto en las configuraciones básicas .....	51
Figura 3.11	Esquema electrónico de la garra .....	53
Figura 3.12	Simulación de la implementación de la garra diseñada en un brazo robótico .....	54
Figura 3.13	Posicionamiento abierto de la garra implementada en el brazo robótico en las configuraciones plana, cilíndrica y de pinza.....	55
Figura 3.14	Posicionamiento cerrado de la garra implementada en el brazo robótico en las configuraciones plana, cilíndrica y de pinza.....	55
Figura 3.15	Puesta en acción de la garra para la carga de objetos (lata cilíndrica y lápiz) .....	56
Figura 3.16	Prueba de los sensores de fuerza resistivos integrados en la garra .....	57



## Índice de tablas

Tabla 2.1	Requerimientos de diseño.....	19
Tabla 2.2	Criterios de selección.....	21
Tabla 2.3	Matriz de decisión de alternativas de solución .....	22
Tabla 2.4	Rango de movimiento en ejes de rotación del dedo .....	27
Tabla 2.5	Características de sensor de efecto Hall.....	34
Tabla 2.6	Características de sensor Flex redondo de fuerza resistivo.....	34
Tabla 2.7	Características de sensor Flex cuadrado de fuerza resistivo .....	35
Tabla 2.8	Características de micromotor GA12 – N20 .....	36
Tabla 2.9	Características de servomotor – 20 kg.....	37
Tabla 2.10	Características de driver TB6612FNG.....	38
Tabla 3.1	Parámetros PID de los actuadores de la garra.....	50
Tabla 3.2	Tabla de costos.....	58

## Índice de planos

PLANO 1 Garra adaptativa de tres dedos (partes)

PLANO 2 Garra adaptativa de tres dedos

PLANO 3 Base de la palma P1

PLANO 4 Base de la palma P2

PLANO 5 Base de la palma P3

PLANO 6 Unión falange – palma V1

PLANO 7 Unión falange – palma V2

PLANO 8 Unión de falanges

PLANO 9 Acople del motor

PLANO 10 Falange media P1

PLANO 11 Falange media P2

PLANO 12 Falange externa P1

PLANO 13 Falange externa P2

PLANO 14 Cúpula de la garra

PLANO 15 Membrana de los dedos

PLANO 16 Membrana de la palma

PLANO 17 Acople a brazo robótico

# Capítulo 1

## 1. Introducción

La mano humana es uno de los sistemas de manipulación más sofisticados y versátiles que existen en la naturaleza. Su capacidad para agarrar, manipular y sentir objetos ha sido fundamental para el desarrollo y la evolución de nuestra especie. Por ello, en el campo de la robótica, los diseñadores y científicos han buscado emular y superar las capacidades de la mano humana mediante el desarrollo de sistemas de agarre [1].

**Figura 1.1**

*Interacción brazo-mano robótica y humano [2]*



Estos sistemas de agarre o más conocidos como *grippers*, han jugado un papel muy importante en el desarrollo de la tecnología tanto científica como industrial debido a la gran variedad de materiales, tamaños y formas de los objetos que se manipulan dentro del ámbito industrial y académico [3]. A diferencia de la mano humana, los *grippers* pueden diseñarse para adaptarse a distintos entornos y situaciones en las que la mano humana no podría suplir. Realizar

acciones repetitivas, transportar elevadas cargas a una velocidad considerable de forma segura, así como tolerar ambientes de condiciones extremas son de las principales motivantes para el diseño y continuo estudio de los *grippers* [4].

En las últimas décadas, se han diseñado diversos tipos de *grippers* ajustándolos a las tareas presentadas en diferentes industrias. Aunque el sector automotriz ha sido uno de los sectores más dominantes en esta tecnología, hoy en día distintas áreas tanto en el sector industrial como científico han adoptado el uso de *grippers* para tareas complejas [5]. En el sector logístico con la manipulación de paquetes, cajas, contenedores y otros objetos durante los procesos de carga, tal como se observa en la **Figura 1.2**. En el sector alimenticio con la manipulación de productos frescos como frutas, verduras o envases de vidrio. Hasta en el sector médico con el manejo de muestras, equipos y otros materiales [6].

**Figura 1.2**

*Robot industrial usando un gripper al vacío para levantar cajas [7]*



Dada la amplia diversidad de objetos existentes con características distintas de forma y tamaño, se requieren múltiples modos de agarre para conseguir una correcta manipulación. Por lo que la capacidad de adaptarse a una amplia gama de objetos con diferentes características es esencial para satisfacer las demandas cambiantes de la industria y otros sectores [8]. Sin embargo, la incorporación de características adaptativas en los *grippers* tradicionales a menudo implica una complejidad adicional y un costo elevado, lo que limita su adopción generalizada.

En este contexto, el presente proyecto busca diseñar un *gripper* adaptativo, de bajo costo, que pueda ser acoplado en un brazo robótico ABB presente en los laboratorios de ESPOL y además debe garantizar un agarre con adaptabilidad suficiente para cumplir con los tres tipos de formas de agarre principales: cilíndrico, paralelo y esférico [3].

## **1.1 Descripción del problema**

La constante tecnificación de diversas áreas del sector productivo ha generado desafíos significativos en cuanto a la manipulación de objetos. La adquisición de *grippers* adaptativos se ha vuelto limitada debido a la creciente demanda de *grippers* industriales diseñados para aplicaciones específicas. Actualmente, el mercado está dominado por las garras de dos dedos debido a su facilidad de uso y garantía de agarre [5]. No obstante, diferentes sectores han comenzado a experimentar con la manipulación de objetos con formas más diversas que un *gripper* de dos dedos no puede abordar. De manera gradual, la necesidad de garantizar un agarre que se adapte a la variedad de formas de los objetos se ha vuelto un aspecto vital en la manipulación de objetos a nivel industrial y a nivel académico.

**Figura 1.3**

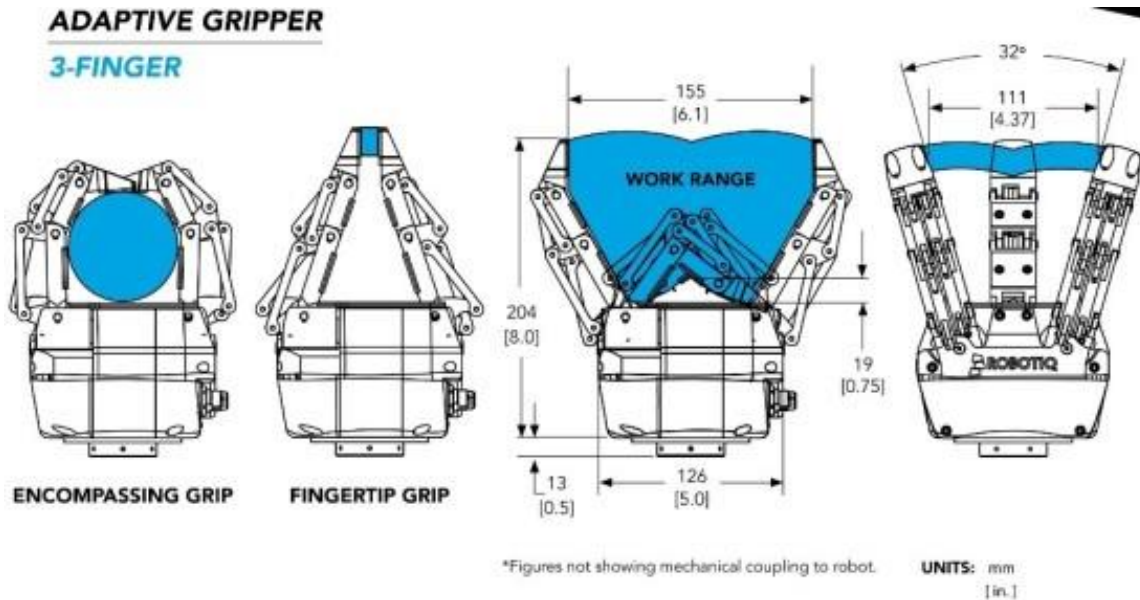
*Garra adaptativa de dos dedos tomando objetos de formas distintas [9]*



Como resultado, el diseño de garras adaptativas ha surgido como un mercado en constante crecimiento. Para mejorar la adaptabilidad de las garras, se ha determinado que añadir un tercer dedo es necesario, a pesar de que esto implique un aumento en el costo del producto [10]. Por lo tanto, aunque las garras adaptativas ofrecen una mejor destreza en el agarre y un mayor control sobre los dedos, su precio suele ser más elevado. La **Figura 1.4** muestra un gripper adaptativo con sus diferentes variantes de agarre.

**Figura 1.4**

*Esquema gráfico de tipos de agarre de una garra adaptativa rígida [11]*



Es importante reconocer que las garras adaptativas desempeñan un papel fundamental al permitir una manipulación más eficiente y precisa de objetos con formas y tamaños variados. Sin embargo, los costos asociados con su diseño y fabricación son una consideración importante para los consumidores y las industrias que buscan implementar esta tecnología. A pesar de ello, la inversión en garras adaptativas puede resultar rentable a largo plazo, al mejorar la productividad, la eficiencia y la seguridad en los procesos de manipulación industrial.

La impresión 3D es una de las herramientas de manufactura más accesibles hoy en día. Ha permitido que muchos diseñadores, ingenieros y científicos den vida a sus ideas y productos a un bajo costo. Por lo tanto, el presente proyecto se enfoca en diseñar una garra adaptativa de tres dedos que pueda ser impresa en 3D y sea accesible al público en general.



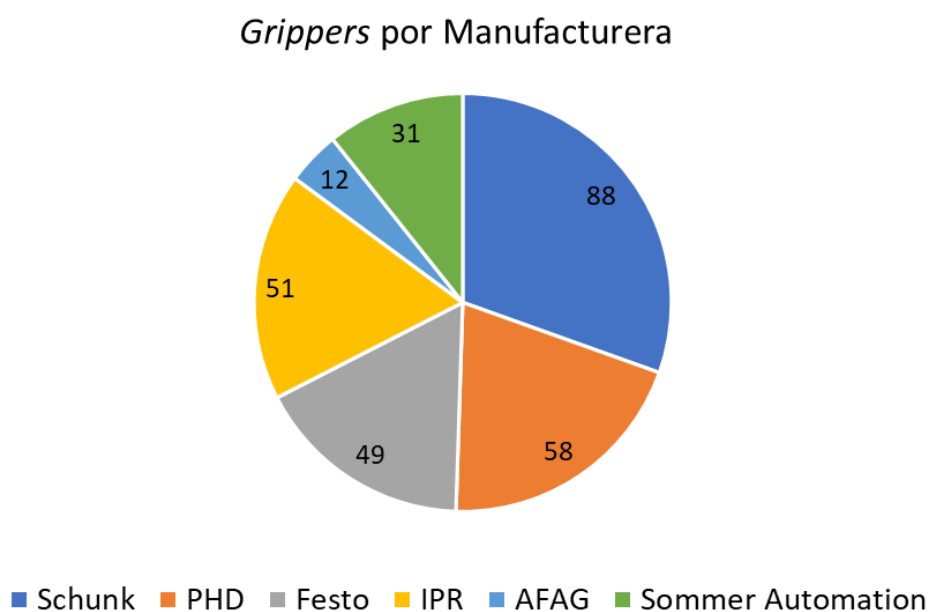
## 1.2 Justificación del problema

Se estima que para el 2033, la venta de *grippers* robóticos aumentará debido a la creciente demanda de robots industriales con tecnologías avanzadas [5]. En la actualidad, 289 tipos de *grippers* distintos son fabricados por manufactureras dedicadas a la automatización industrial, la

**Figura 1.5** muestra la distribución de *grippers* por manufacturera.

**Figura 1.5**

*Cantidad de tipos de grippers producidos por manufactureras [8]*



Por ello, se puede prever que el crecimiento de esta industria debido a las últimas tendencias ocasionará diversos desafíos y demanda de mejores capacidades de sujeción de objetos. El costo como actualmente corresponde a una limitante en la adquisición de estos equipos se volverá un problema mayor para los *grippers* adaptativos.

Contar con un diseño abierto al público de *gripper* adaptativo de fácil implementación gracias a la impresión 3D resulta ser una iniciativa valiosa para permitir que estos sistemas se sigan desarrollando en las empresas o en instituciones de educación superior. Además, se vuelve más rentable si no solo permiten el agarre adecuado de diferentes formas de objetos sino también de diferentes pesos gracias a la rigidez que se le atribuiría a su estructura.

### **1.3 Objetivos**

#### ***1.3.1 Objetivo general***

Diseñar un prototipo de una garra adaptativa de tres dedos, empleando manufactura aditiva y actuadores electromecánicos como medio alternativo y económico para su conexión con un brazo robótico.

#### ***1.3.2 Objetivos específicos***

1. Diseñar el mecanismo de una garra adaptativa de tres dedos que permita su integración con un brazo robótico de manera eficiente y segura.
2. Desarrollar un sistema de control que permita la manipulación de la garra de forma precisa y confiable.
3. Diseñar los puntos de contactos en la garra, mediante el uso de material flexible, para una correcta distribución de la presión en el agarre y sujeción de piezas.

### **1.4 Marco teórico**

El diseño mecánico de *grippers* ha sido un tema de investigación en múltiples áreas. Cada sector industrial presenta necesidades específicas, lo que ha impulsado la búsqueda de diseños de

*gripper* adaptados para satisfacerlas. Las industrias alimentaria, automovilística y agrícola son tres de las más involucradas en el tema de agarre robótico y de los cuales se habla a continuación.

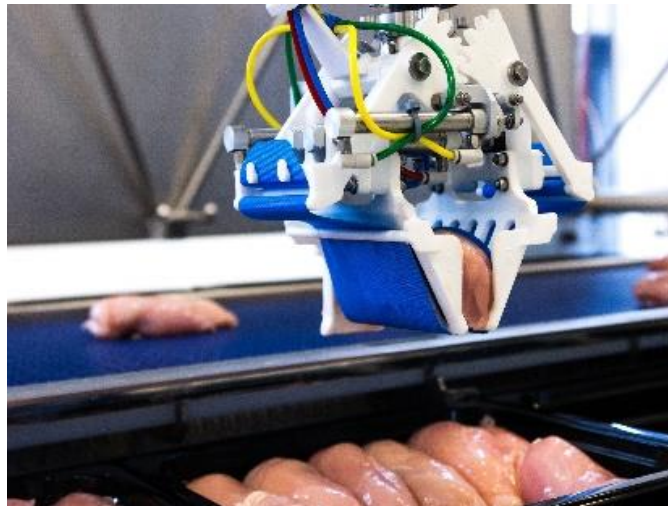
#### 1.4.1 *Grippers en la industria*

En la actualidad los *grippers* tiene múltiples aplicaciones industriales:

***Grippers en el sector alimentario.*** En las tareas de empaquetado de alimentos o traslado de productos para conectar diferentes estaciones, las operaciones de *pick and place* juegan un rol importante siendo estas realizadas por los robots [12]. Hay distintos productos u operaciones manuales tales como agarrar alimentos húmedos o superficies porosas que deben realizarse por operadores humanos [12] debido a la capacidad de agarre que requiere.

**Figura 1.6**

*Gripper manipulador de alimentos húmedos* [13]



Automatizar tales procesos suelen ser el principal objetivo de distintos negocios en este sector. En este contexto, el diseño de *grippers* adaptativos para la industria alimentaria es una de

las problemáticas más sustanciales que se ha abordado. En esta situación, se han elaborado *grippers* flexibles siguiendo estándares de inocuidad, de modo que se pueda satisfacer las necesidades de no alterar la forma del alimento y de no contaminar el entorno en el cual se desarrolla [12][14].

**Figura 1.7**

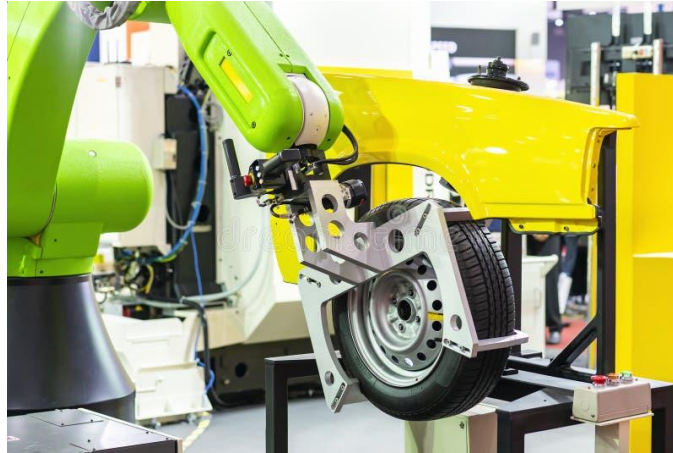
*Gripper de cuatro dedos para manipulación delicada [15]*



***Grippers en el sector automovilístico.*** Los *grippers* en este sector son usados para manipular partes de vehículos en operaciones de ensamblado y de transporte. Estas piezas pueden llegar a tener tamaños enormes por lo que se han tenido que diseñar *grippers* para suplir necesidades específicas de soporte de cargas pesadas y de agarre fuerte para evitar problemas de choque. Esto ha conducido al diseño de grandes estructuras de *grippers* metálicos con altas capacidades de carga [16] siendo en su mayoría de transmisión neumática o hidráulica.

**Figura 1.8**

*Gripper industrial para ensamblado de vehículos [17]*



***Grippers en el sector agrícola.*** Los *grippers* robóticos en este sector tienen que satisfacer necesidades específicas tales como adaptarse a la variedad de formas, proveer una precisión en su movimiento y una fuerza de agarre adecuada para evitar causar daños considerables a los productos agrícolas [18].

Los *grippers* suaves y biológicamente inspirados han sido de mayor utilidad para este sector gracias a que cuentan con materiales flexibles deformables capaces de adaptarse a las formas de los productos sin causar daño. Por otro lado, las garras adaptativas con múltiples sensores integrados y altos grados de libertad también suelen ser eficaces para estas situaciones dado su nivel de manejo y de retroalimentación de los estados actuales en el agarre de objetos [18].

**Figura 1.9**

*Gripper especializado en recolección de manzanas [19]*



#### ***1.4.2 Descripción general de un gripper adaptativo***

Los *grippers* o sistemas de agarre son mecanismos de manipulación usualmente ubicados al final de la cadena cinemática de un brazo robótico. Al actuar como efector final del brazo, el *gripper* estará en contacto con la pieza de trabajo el tiempo que este lo agarre y realice la actividad que corresponda. Por ello es de vital importancia el desarrollo de mecanismos que garanticen un agarre efectivo de los objetos [4].

Existen *grippers* capaces de adaptarse a la forma del objeto que deben agarrar, esta característica es llamada adaptabilidad. Y para obtener esta propiedad de agarre se debe tener un cuidadoso diseño que involucre tecnologías mecatrónicas. El uso de sensores táctiles y sistemas de visión integrados en las garras robóticas son una solución moderna para la obtención de adaptabilidad.

Una de las características comunes de las garras adaptativas es el control coordinado sobre las articulaciones del robot. En la mayoría de los casos, esto se puede conseguir cuando las

articulaciones son controladas por motores eléctricos dado que permite el uso de sensores *encoder* y por lo tanto la retroalimentación al sistema de la posición en la que el motor está ubicado [20].

Lo previamente mencionado ha permitido que la adaptabilidad sea un concepto que no solo aplica a estructuras flexibles. Sino que también se puedan utilizar estructuras rígidas que, al aumentar los grados de libertad al controlar las articulaciones con motores, se aumente el nivel de adaptabilidad. Entre estas estructuras se puede confiar en cadenas cinemáticas completamente restringidas, a pesar de que también se puede reducir el número de grados de libertad del *Gripper* si se incluyen cadenas cinemáticas menos restringidas con acoples de amortiguación [3].

#### ***1.4.3 Tipos de gripper en base a su sistema de actuación***

Los *grippers* poseen una amplia subdivisión tanto de estructura como de actuación, lo que genera que determinados modelos posean una mayor eficiencia para aplicaciones específicas.

***Grippers de vacío.*** La estructura de estos *grippers* se basa en una ventosa de goma o poliuretano, la cuál es utilizada para una mejor sujeción del objeto. Determinados modelos incluyen espuma como alternativa a las ventosas. Estos *grippers* son considerados como el estándar en fabricación a causa de la flexibilidad que ofrecen y seguridad de agarre de un elemento [21].

**Figura 1.10**

*Gripper de vacío con visión por cámara [22]*



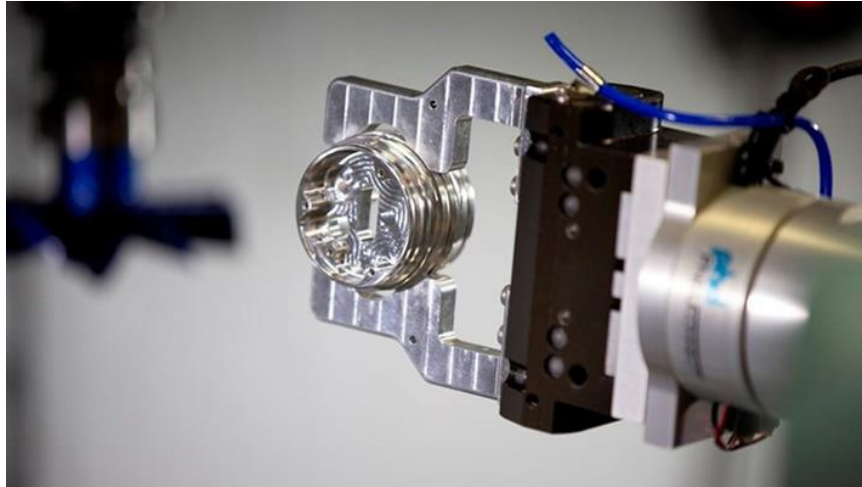
Este tipo de *gripper* suele ser implementado en aplicaciones donde la contaminación del ambiente puede generar inconvenientes, debido a que el aire limpio que permite la actuación del *gripper* es transportada a través de tubos y mangueras que mantienen el correcto funcionamiento del actuador sin interacción directa con el ambiente [23].

***Grippers neumáticos.*** Las pinzas neumáticas se imponen en el mercado debido a sus características de peso ligero y tamaño compacto. De esta forma, estos actuadores pueden ser implementados en espacios de trabajo reducidos o donde se desee una optimización de espacio [21]. Las pinzas neumáticas proveen del mismo beneficio que los *grippers* de vacío con respecto al aire limpio que circula. Por otro lado, las pinzas neumáticas se centran en actividades de apertura y cerrado directo del actuador por medio del accionamiento neumático [23].



**Figura 1.11**

*Pinza neumática para elementos pequeños [22]*



***Grippers servo-eléctricos.*** La pinza servo-eléctrica tiene una amplia acogida en el mercado debido a su fácil control permitiendo un alto nivel de flexibilidad en variadas aplicaciones. Con la desventaja de presentar menor fuerza que los modelos mencionados previamente, provee un mayor rango de tolerancias de material al manipular piezas. Adicionalmente, se benefician de no poseer líneas de aire facilitando su mantenimiento y garantizando un menor costo [21].

**Figura 1.12**

*Gripper servo-eléctrico de la marca Robotiq [22]*



## 1.5 Estado del arte

De los distintos modelos de *grippers* adaptativos, los tres más conocidos son los siguientes:

- ***Robotiq 3 finger gripper***

Es un *gripper* adaptativo de tres dedos creado por la empresa Robotiq. El diseño de los eslabones de los dedos sigue el de un mecanismo subactuado, el cual trabaja de forma pasiva al funcionamiento de los motores DC que lo controlan al inicio de la cadena cinemática de forma similar a unos tendones [24]. Poseen *encoders* de posición y velocidad los cuales permiten controlar el movimiento de agarre, así como sensores de fuerza en la yema de los dedos. Entre las características técnicas de esta garra están que pueden tener una abertura de pinzas de hasta 155 mm [25], una capacidad de carga de hasta 10 kg y está compuesto de un total de diez articulaciones y cuatro motores DC [20].

**Figura 1.13**

*Agarres generales del gripper Robotiq [25]*



- ***Barret hand***

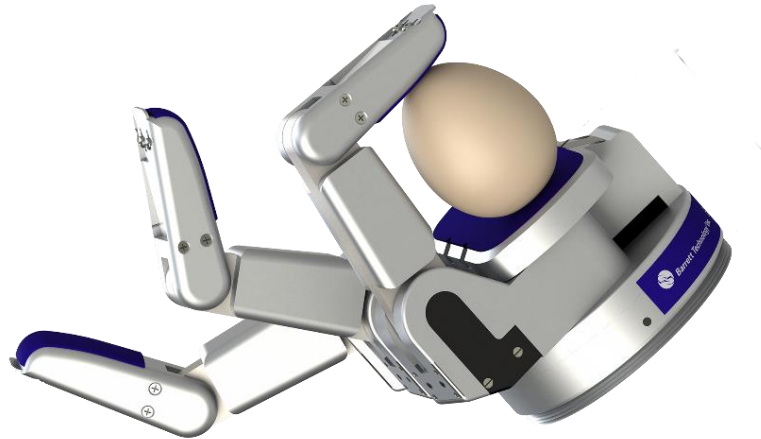
Es un *gripper* adaptativo de tres dedos creado por la empresa Barrett. El diseño de los eslabones sigue el de un mecanismo subactuado controlando cada uno de sus dedos compuestos por dos articulaciones con un solo motor DC por medio de relación de engranes. Posee *encoders*

de posición y sensores táctiles en la yema de sus dedos para el bloqueo del movimiento al contacto con los objetos [3].

Entre las características técnicas de esta garra están que puede tener una abertura de pinzas de hasta 187 mm, una capacidad de carga de hasta 6 kg y está compuesto por ocho articulaciones y cuatro motores DC [20].

**Figura 1.14**

*Agarre delicado basado en sensores del gripper “Barret Hand” [26]*



## **Capítulo 2**

## 2. Metodología

En el presente capítulo se presenta la metodología llevada a cabo para el cumplimiento de los objetivos planteados. Se abarcan conceptos que van desde los requerimientos de diseño proveídos por el cliente, las alternativas de solución propuestas, hasta los parámetros de diseño desde la perspectiva mecánica, electrónica y de control.

### 2.1 Requerimientos de diseño

Para realizar el diseño de una garra de tres dedos, se siguieron ciertas directrices proporcionadas por el cliente. La **Tabla 2.1** presenta de forma detallada estos requerimientos.

**Tabla 2.1**

*Requerimientos de diseño*

Tipo de requerimiento	Detalles del requerimiento
Mecánicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se tendría mínimo dos micromotores DC por dedo y estos deberían estar paralelos a los eslabones</li> <li>• Cada dedo debe permitir el uso de sensores de fuerza</li> <li>• Debe garantizar adaptabilidad a distintas formas de objetos</li> </ul>
Electrónico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Que funcione con energía de una fuente externa</li> <li>• Tener el mínimo cableado externo posible</li> </ul>
De Control	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Que se tenga una interfaz de control de los dedos</li> <li>• Que los dedos siempre regresen a su posición inicial previo al apagado.</li> </ul>

## 2.2 Selección de alternativas de solución

En base a la problemática establecida en el capítulo 1, se presentan a continuación, tres alternativas de solución centradas en el mecanismo de movimiento de los dedos del *gripper* para obtener al menos dos grados de libertad por cada dedo.

- *Alternativa uno*

Diseño del mecanismo interno del dedo de la garra, compuesto por un motor en la base que transmite el movimiento por medio de una relación de engranes diferente para cada articulación del dedo.

- *Alternativa dos*

Diseño del mecanismo interno del dedo de la garra, compuesto por dos motores ubicados internamente en la falange media del dedo, transmitiendo el movimiento individualmente a las articulaciones.

- *Alternativa tres*

Diseño del mecanismo interno del dedo de la garra, compuesto por dos motores anclados en la base, que transmiten el movimiento individualmente a cada articulación por medio de poleas.

Las tres alternativas propuestas fueron evaluadas en diferentes criterios, establecidos de tal forma que sirvieran de identificadores cuantitativos de la solución más viable respecto a la problemática planteada. En la **Tabla 2.2** se puede observar la ponderación de pesos correspondiente a cada criterio, los cuales son descritos a continuación.

- **Adaptabilidad:** Capacidad del dedo para poder adoptar diferentes posiciones mediante el movimiento de sus articulaciones.
- **Costo inicial:** Costo asociado a los elementos necesarios para la aplicación de las alternativas.
- **Transmisión de potencia:** El mecanismo elegido debe garantizar la menor pérdida de energía durante el proceso de transmisión de torque desde el eje del motor a la articulación.
- **Optimización de espacio:** El mecanismo elegido debe ser capaz de integrarse a la estructura del dedo ocupando la menor cantidad de espacio posible.
- **Precisión:** El mecanismo elegido debe permitir un agarre preciso de tal manera que se pueda controlar de mejor manera los grados de rotación del eje en la articulación.

**Tabla 2.2***Criterios de selección*

Criterio	Ranking	Peso relativo	Porcentaje
Adaptabilidad	1	6	38%
Precisión	2	4.5	28%
Transmisión de potencia	3	3	19%
Optimización de espacio	4	1.5	9%
Costo inicial	5	1	6%
<b>Peso total</b>		16	100%

En base al análisis realizado de las alternativas de solución en función de los criterios establecidos, tal y como se observa en la **Tabla 2.3**. Se seleccionó la Alternativa dos como la alternativa más viable con respecto a la solución de la problemática, debido a que se considera una opción que toma en cuenta la adaptabilidad base esencial en este proyecto, además de una precisión y transmisión de potencia adecuada en comparación con las demás alternativas.

**Tabla 2.3**

*Matriz de decisión de alternativas de solución*

	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4	Criterio 5	
<b>Descripción</b>	Adaptabilidad	Precisión	Transmisión de potencia	Optimización de espacio	Costo inicial	
	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4	Criterio 5	Total
<b>Peso</b>	6	4.5	3	1.5	1	16
<b>%</b>	38%	28%	19%	9%	6%	100%
	Calificación	Calificación	Calificación	Calificación	Calificación	
Opción uno	3	8	7	8	8	5.9
Opción dos	7	8	7	5	4	6.9
Opción tres	7	6	6	7	4	6.4

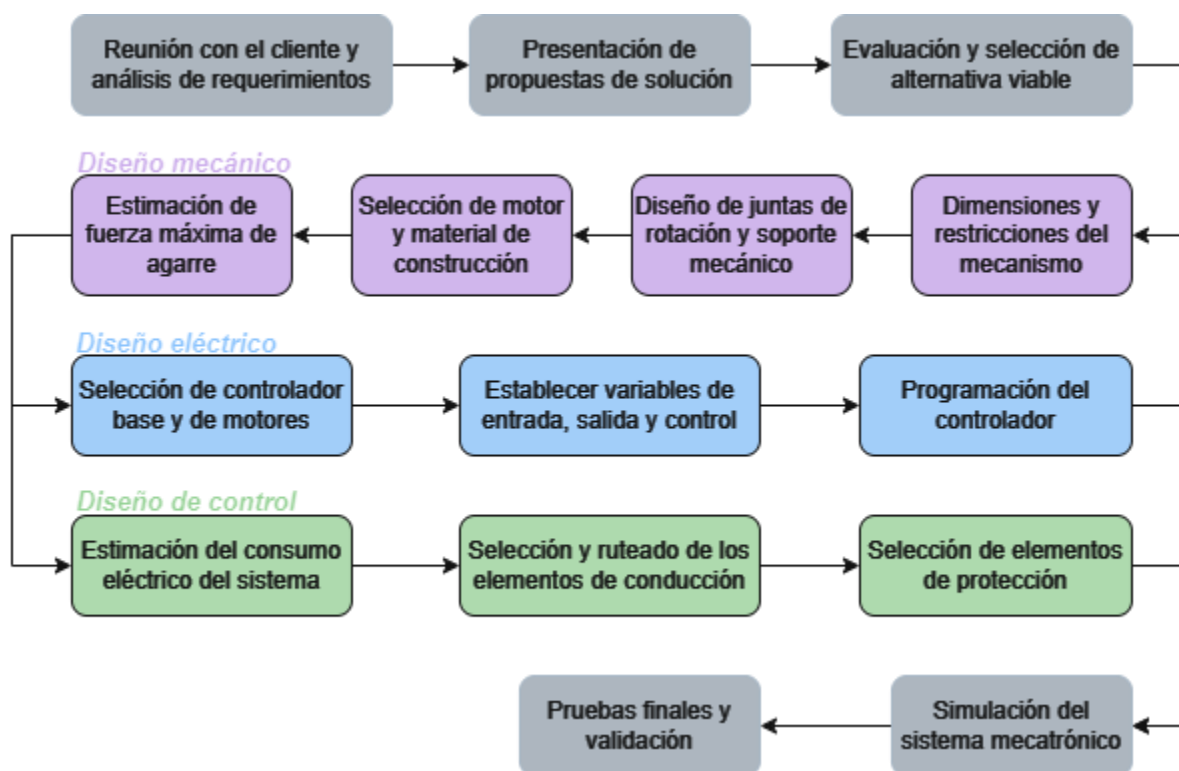


## 2.3 Proceso de diseño

Para la obtención del diseño final se atravesaron por varias etapas de desarrollo considerando las necesidades del cliente, además de los respectivos objetivos planteados inicialmente. En la **Figura 2.1** se pueden observar las etapas realizadas durante el diseño de la solución.

**Figura 2.1**

*Metodología de diseño*



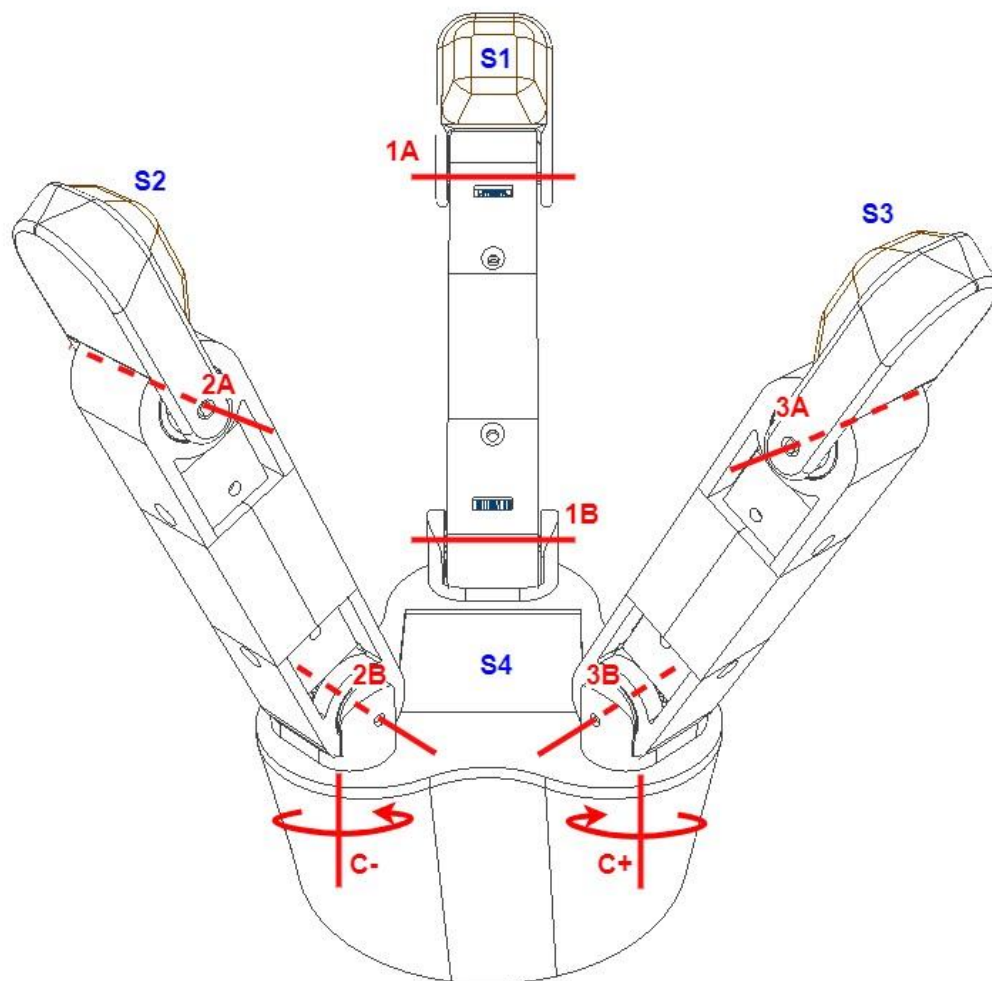
## 2.4 Diseño conceptual

En la **Figura 2.2** se ilustra una versión inicial de la solución propuesta, en la que se identifican los elementos principales que la conformarán. Se identifican cuatro sensores, tres

correspondientes a la detección de fuerza en la punta de los dedos y uno que detectará la fuerza de presión contra la palma de la garra (S4). Adicionalmente, se identifican los ejes de rotación de cada dedo y dos ejes de rotación adicionales (C+ y C-).

**Figura 2.2**

*Diseño conceptual*



Siguiendo los requerimientos solicitados por el cliente, se estableció una base de garra adaptativa en tres dedos en la configuración mostrada previamente. Como se mencionó en el

capítulo 1, es posible incrementar la adaptabilidad de la garra en función de los grados de libertad que posea. En el diseño conceptual presentado, se observa que cada dedo tiene al menos dos grados de libertad (GDL).

El diseño planteado considera que cada dedo tiene a disposición un sensor (S1 - S2 - S3) y dos motores (A - B) que permiten la rotación de su eje respectivo. Adicionalmente, se añadió un GDL adicional que permite que dos de los tres dedos puedan rotar sobre sí mismos, esta rotación se representa como C+ y C- en el esquema, la cual estará dada por un servo motor ubicado en la parte interna de la palma de la garra y un sistema de engranajes que permite la rotación de ambos ejes a la misma velocidad y en sentido contrario.

Finalmente, se establece que el diseño propuesto debe cumplir con la propiedad de modularidad para permitir un mejor ensamble, mantenimiento posterior y desarrollo individual de las piezas que compondrán el modelo.

## **2.5 Parámetros de diseño mecánico**

A fin de presentar un diseño final que satisfaga los requerimientos del cliente y cumpla los estándares de diseño de ingeniería, se tomaron en consideración varias restricciones mecánicas, además de realizar simulaciones de movimientos y cálculos asociados a la selección de elementos.

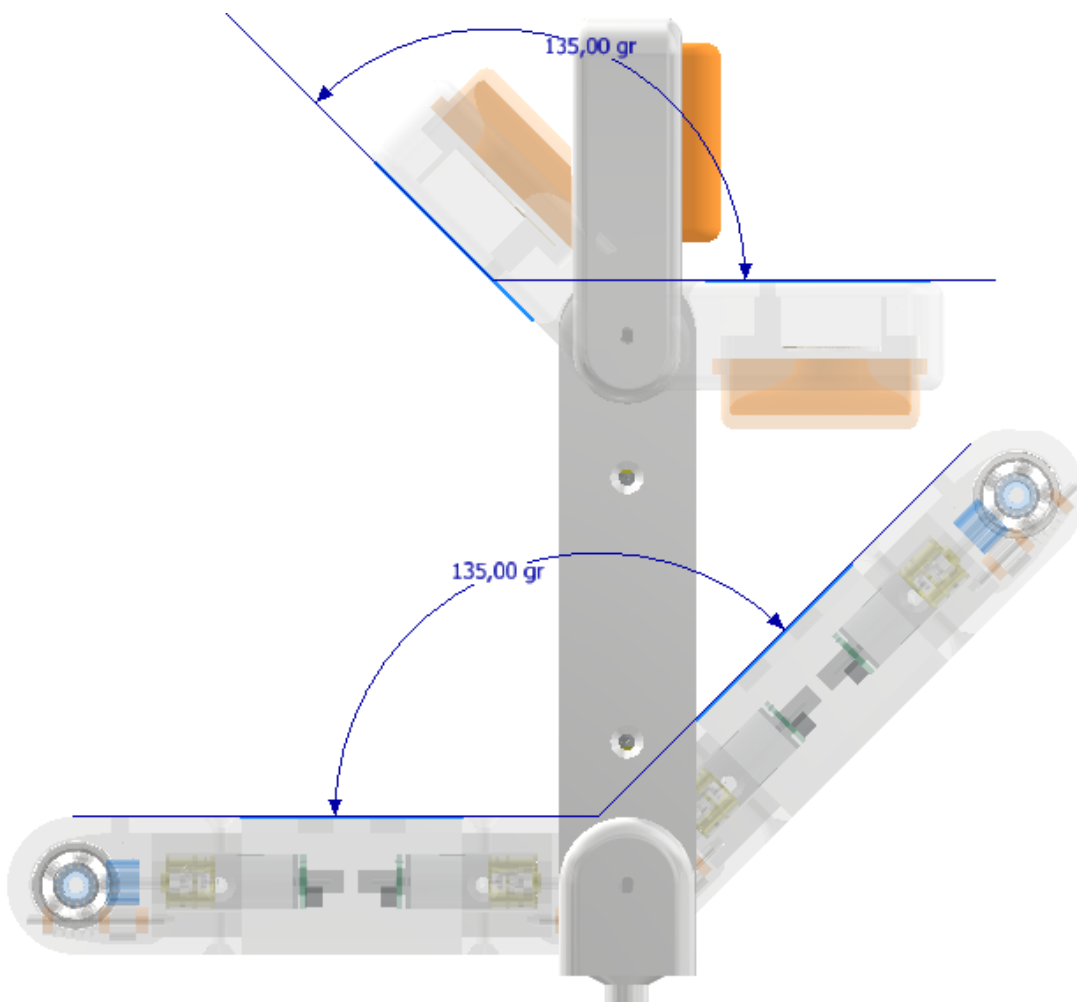
### ***2.5.1 Restricciones de diseño en base a rangos de desplazamiento***

En la **Figura 2.2** previamente ilustrada se puede observar la ubicación relativa de cada dedo de la garra diseñada, los mismos se encuentran separados entre ellos 120°, estando equitativamente distribuidos en la circunferencia imaginaria que los contiene.

Debido a la estandarización del diseño, cada dedo es semejante a los otros desde el eslabón final hasta la base de rotación sobre su propio eje. De esta forma, se subdividen los motores en A y B según el eje de rotación que están haciendo rotar y su eslabón asociado.

**Figura 2.3**

*Rangos de desplazamiento en dedos del gripper*



El motor A produce una rotación del eslabón final correspondiente a donde se ubica el sensor de fuerza, cuyo rango de movimiento va de 0° a 135°. Por otro lado, el motor B controla la

rotación del eslabón intermedio que conecta el eslabón final con la base de la palma, produciendo un movimiento de rotación al eslabón mencionado de  $0^\circ$  a  $135^\circ$ . Los rangos de movimiento asignados se rigen a la actuación de la garra con respecto a diferentes posicionamientos de agarre, como: plano, cilíndrico, esférico, entre otros.

Finalmente, el motor C es el encargado de producir la rotación sobre su propio eje a dos dedos, de forma paralela y en sentido contrario. En base a los agarres designados inicialmente, se estableció un rango de movimiento de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  para este eje de rotación.

**Tabla 2.4**

*Rango de movimiento en ejes de rotación del dedo*

Eje de rotación	Rango de movimiento
A	$[0^\circ, 135^\circ]$
B	$[0^\circ, 135^\circ]$
C	$[0^\circ, 90^\circ]$

### 2.5.2 Selección de motores

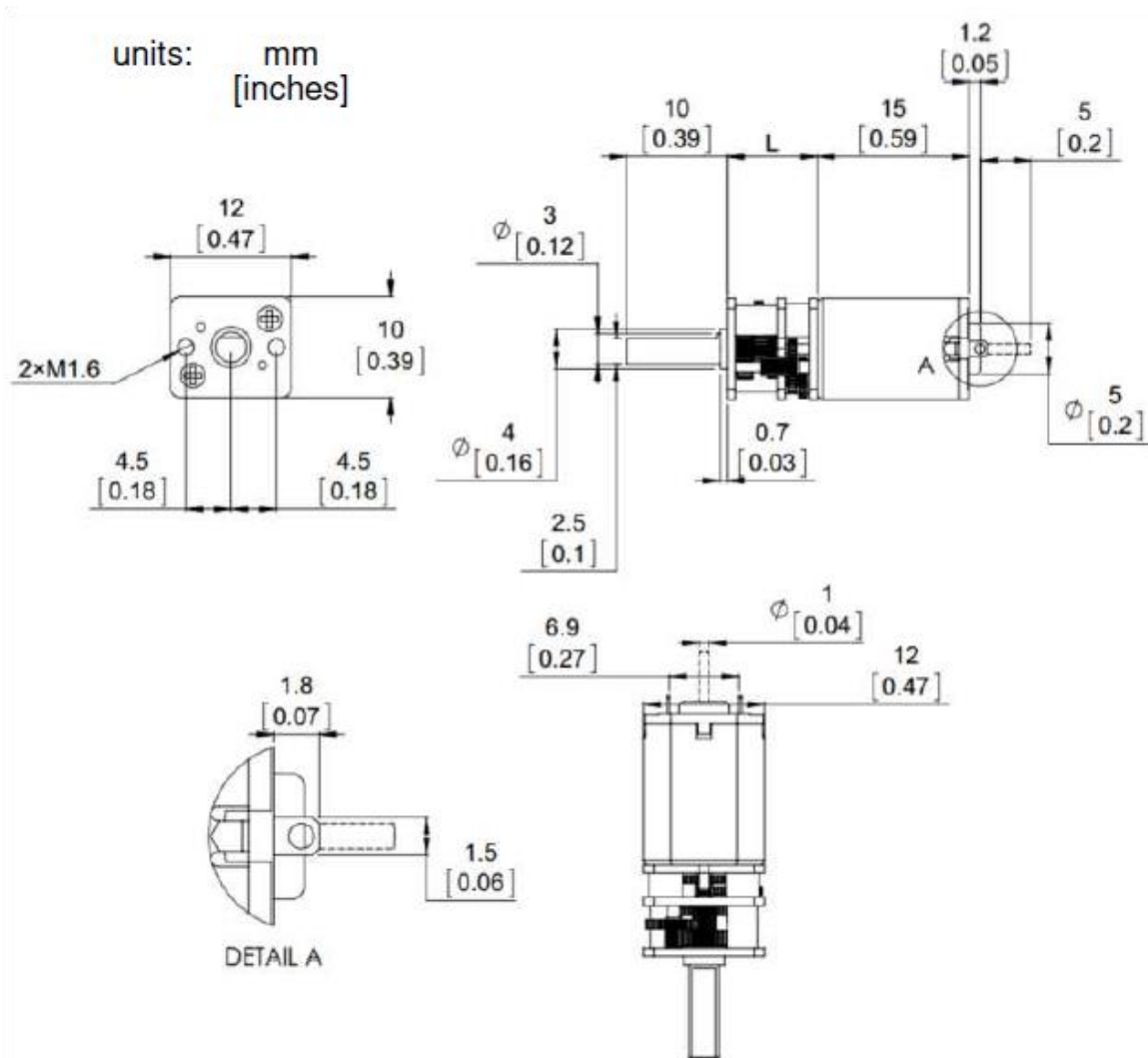
Para la selección del motor se tomaron en consideración 2 factores, dimensiones del motor y torque. Donde se tomó como base la familia de micromotor reductores Pololu que contiene una gran variedad de motores con diferencia de torques y velocidades, además de cumplir con el estándar de tamaño requerido.

**Dimensiones del motor.** Tras la selección de soluciones previamente planteada se consideró que los motores serán ubicados internamente en el eslabón medio que compone el

cuerpo de los tres dedos. Con esta premisa, y en base a los tamaños estándares de los *grippers* de tres dedos comerciales, se estableció que los motores deben poder ser introducidos en un área de  $2 \text{ cm}^2$ , sin exceder los 4 cm de largo incluido el eje. Las cuales, como se observa en la **Figura 2.4** son cumplidas por los motores mencionados.

**Figura 2.4**

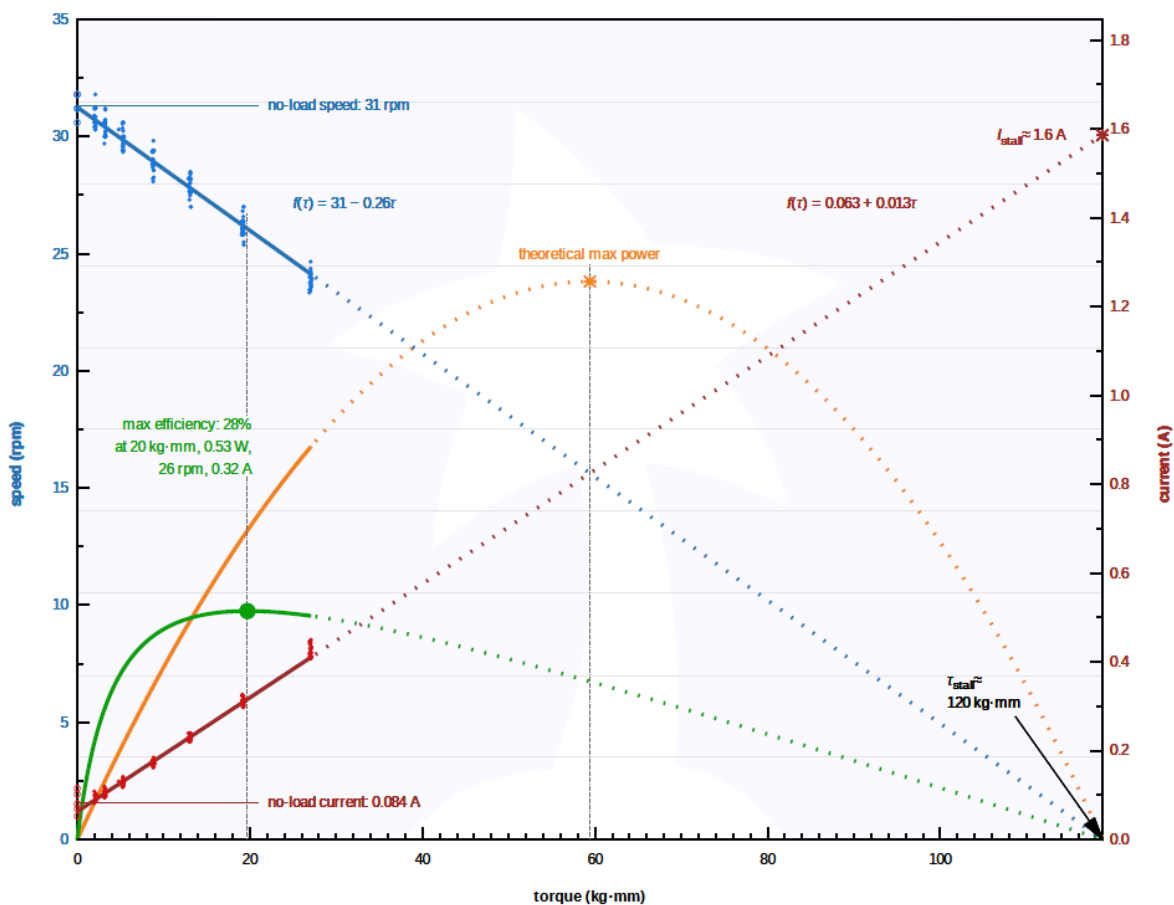
*Dimensiones de micromotores Pololu*



**Torque del motor.** Los cálculos correspondientes al torque necesario del motor en base a un objeto cilíndrico estándar se pueden observar en el **Apéndice A**, donde se estableció un torque mínimo de  $19.44 \text{ kgf} \cdot \text{mm}$ . Así mismo se observan 3 opciones dentro de la familia Pololu que corresponden a motores de 6V o 12V a 30 rpm, de los cuales se seleccionó el motor con eje metálico de 30 rpm a 6V por su disponibilidad en el mercado local.

**Figura 2.5**

*Curva del desempeño del motor seleccionado*



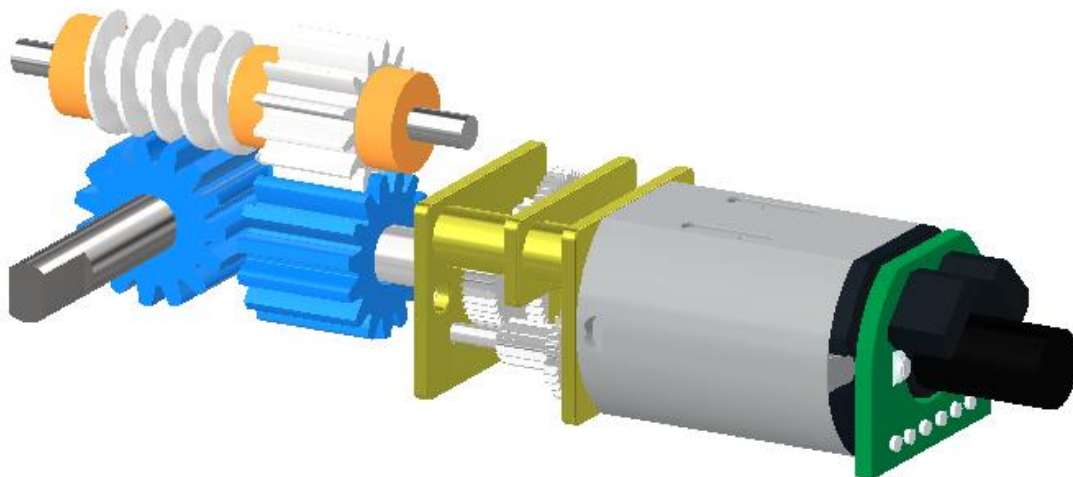
### 2.5.3 Sistema de engranajes para transmisión de movimiento

Para la transmisión de movimiento de los motores a los ejes de rotación en los dedos se consideraron 2 opciones. La primera requería ubicar el motor de forma paralela al eje, estableciendo un eje de rotación directo con el motor sin necesidad de un sistema de engranajes. La segunda opción, la cual fue escogida, optimizaba el espacio del eslabón donde se ubicaría el motor, de tal forma que el motor se encontraba perpendicular al eje de giro.

Por tal motivo se seleccionó una configuración de engranajes partiendo de engranajes rectos y tornillos sin fin disponibles en el mercado local, cuyo objetivo fue la transmisión en  $90^\circ$  de la rotación del eje del motor al eje de unión de los eslabones, tal y como se observa en la **Figura 2.6**.

**Figura 2.6**

*Configuración del sistema de engranajes seleccionado*





#### 2.5.4 Estimación de la fuerza máxima de agarre

Conociendo el torque máximo del motor seleccionado (20 kgf\*mm), por medio de la ecuación de torque, conociendo que la fuerza sobre el objeto a agarrar será a 35 mm del eje de rotación de dicha falange, se tiene la ecuación (2.1).

$$T = F * d \quad (2.1)$$

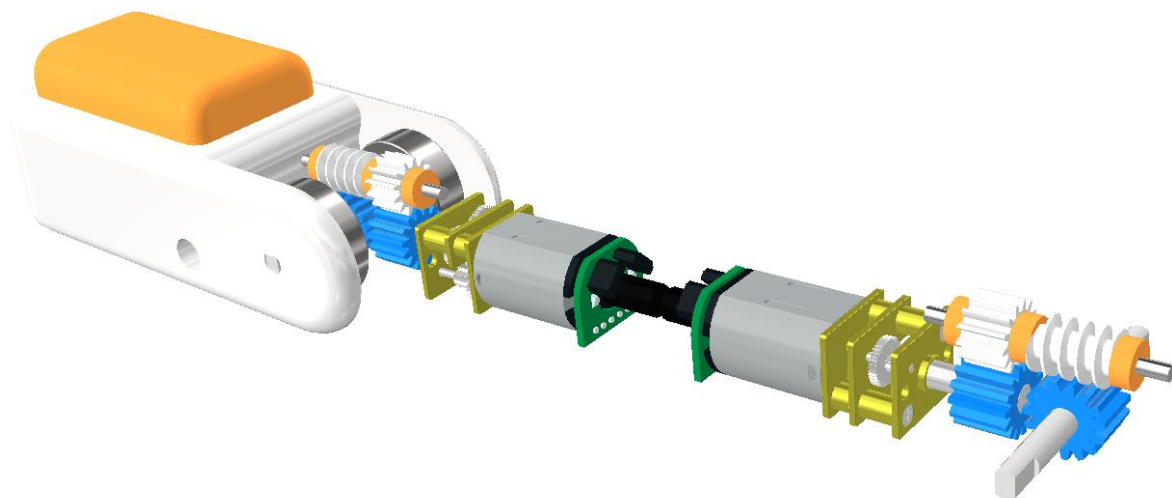
Donde “ $T$ ” corresponde al torque producido en el eje de rotación, “ $F$ ” es la fuerza aplicada sobre el objeto a agarrar y “ $d$ ” es la distancia perpendicular desde el eje de rotación al vector de fuerza aplicado. Para el presente análisis teórico se omitió la variación de torque producido por el sistema de engranajes en la transmisión de movimiento.

$$F = \frac{20 \text{ kgf} * \text{mm}}{35\text{mm}}$$

$$\boxed{F = 0.57 \text{ kgf}} \rightarrow \boxed{F = 5.6 \text{ N}}$$

**Figura 2.7**

*Conjunto propuesto para el movimiento de los GDL en los dedos*



### **2.5.5 Especificación del material de construcción y datos inherentes**

La base de construcción del diseño planteado es manufactura aditiva, empleando PLA (Poliácido láctico) como material estándar en los elementos rígidos diseñados, teniendo como material secundario al TPU (Poliuretano termoplástico), el cual será implementado en los elementos flexibles correspondientes a las membranas que estarán en contacto con los sensores de fuerza. El **Apéndice B** muestra en mayor detalle las especificaciones del material aplicadas.

## **2.6 Parámetros de diseño electrónico**

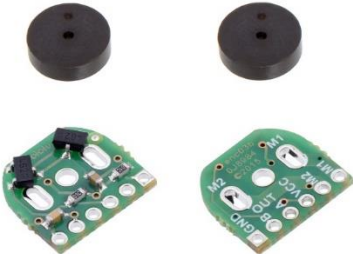
Los parámetros electrónicos que se consideraron con respecto al diseño del sistema de agarre son: posición angular de los actuadores y el estado de fuerza de los dedos. Esto se abordó por el ámbito electrónico puesto que se tratará con señales eléctricas de baja corriente. También se pretende controlar el encendido, apagado y cambio de velocidades de los actuadores, cuestión que se resolverá con la selección de un *driver* de motores DC.

### **2.6.1 Selección de sensores**

Para el funcionamiento de la garra se tienen dos tipos de sensores: De posición del motor y de fuerza de agarre.


El sensor de posición del motor viene integrado con el mismo motor proporcionado por el cliente. En este caso, el sensor de efecto Hall de dos fases proporcionó pulsos eléctricos que fueron usados para el cálculo de la posición del eje del motor. El **Apéndice E** muestra más detalles de su funcionamiento. Este sensor cuenta con las siguientes características:

**Tabla 2.5***Características de sensor de efecto Hall*

Figura	Características
	<p data-bbox="824 541 1166 569">Encoder: Hall de dos fases</p> <hr/> <p data-bbox="824 621 1182 648">Resolución Encoder: 7 PPR</p> <hr/> <p data-bbox="824 695 1166 722">Funcionan de 2.7 V a 18 V</p> <hr/> <p data-bbox="824 768 1312 873">Las salidas de la cuadratura A y B son señales digitales</p>

Por otro lado, el sensor de fuerza fue seleccionado en base a los modelos existentes en el mercado ecuatoriano.

**Tabla 2.6***Características de sensor Flex redondo de fuerza resistivo*

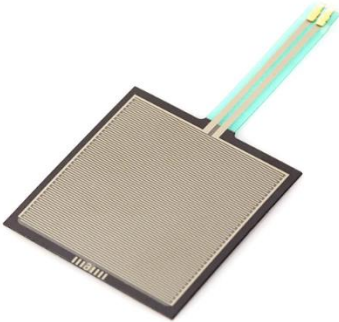
Figura	Características
	<p data-bbox="805 1392 1198 1419">Sensor Flex de fuerza resistivo</p> <hr/> <p data-bbox="805 1465 1349 1493">Área activa de 0.58 " de diámetro (1.5 cm)</p> <hr/> <p data-bbox="805 1539 1349 1717">El sensor variará su resistencia dependiendo de la cantidad de presión que se aplique en el área sensible.</p> <hr/> <p data-bbox="805 1764 1333 1864">Tiene un rango de detección de fuerza de 0.2 N a 20 N</p>

La finalidad de estos sensores es de conocer el estado de contacto de los dedos con los objetos a sostener. Estos sensores funcionan como una resistencia que varía conforme se aplique una presión. En el microcontrolador esta señal se recibe en forma de voltaje.

Para conocer el estado de contacto entre la palma y el objeto, se pretende usar el mismo tipo de Sensor Flex resistivo, pero con un área mayor, para que pueda abarcar todo el espacio correspondiente a la palma de la garra.

**Tabla 2.7**


*Características de sensor Flex cuadrado de fuerza resistivo*

Figura	Características
	Sensor Flex cuadrado resistivo
	Área de detección: 1.75×1.5'''
	El sensor variará su resistencia dependiendo de la cantidad de presión que se aplique en el área sensible.
	Puede sensar la fuerza aplicada en el rango de 100g – 10 kg.

### 2.6.2 Selección de actuadores


Los actuadores seleccionados corresponden a micromotores proveídos por el cliente. La función de estos micromotores es la de proveer movimiento a las articulaciones de los dedos de la garra. La **Tabla 2.8** muestran las siguientes características de estos micromotores.

**Tabla 2.8***Características de micromotor GA12 – N20*

Figura	Características
	Micromotor GA12-N20
	Voltaje de alimentación: 6V DC
	Consumo de corriente:
	Sin carga: 60 mA,
	Nominal: 200 mA, Pico 600 mA
	Velocidad de rotación: 30 RPM (6V)
	Relación en engranes: 488:1
Diámetro del eje: 3 mm, eje en forma de D	
Dimensiones: 40*12*10 mm	

Otro de los actuadores presentes en el funcionamiento de la garra es aquel que permita la apertura y cierre de los dedos de la garra con respecto al eje de la base. Este movimiento se puede conseguir con un servomotor y los mecanismos propuestos en la sección de diseño. Las propiedades del servomotor usado son las siguientes:

**Tabla 2.9***Características de servomotor – 20 kg*

Figura	Características
	Servomotor DS3218 de 20 kg
	Funciona con voltajes desde 5V hasta los 7.4 V
	Consume desde 100 mA a 2A
	Posee tres pines para conexión con el controlador

### 2.6.3 Selección de controlador

Para la selección del controlador se consideró diversos factores, uno de los más limitantes fue la cantidad de conexiones necesarias que se ocuparían. Así mismo el tipo de señales a procesar juegan un papel importante en el diseño de la electrónica de la garra. Desde señales de pulsos por interrupción, señales PWM e incluso señales analógicas fueron necesarias de procesar para el funcionamiento adecuado del sistema. Por ello, el controlador que se seleccione debe ser robusto en cuanto a la cantidad de señales que permite recibir, así como en la variedad de estas.

En el **Apéndice D** se puede observar una tabla comparativa entre los diferentes parámetros considerados para una posible selección del controlador de la garra mecánica.

De donde teniendo en cuenta la cantidad de pines necesarios y la variedad de estos, el Arduino MEGA 2560 cumple con los requisitos necesarios para el correcto funcionamiento de la garra, con posibilidad de usar cualquier otro controlador como esclavo para ampliar su capacidad.

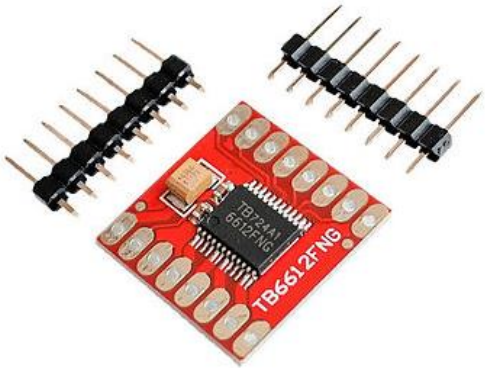
## 2.7 Parámetros de control

### 2.7.1 Selección de controladores (*driver*) para los motores DC

En base a los motores proveídos, se propuso la selección de un *driver*, esto puesto a que debían realizarse consideraciones de tamaño y consumo de corriente. La finalidad del *driver* es la de permitir un control de la dirección y velocidad del motor. Como preámbulo a la selección del *driver*, se realiza una comparativa de los *drivers* utilizados para controlar motores DC en la **Tabla C.1**, la cual se puede observar en el **Apéndice C**. De donde considerando lo antes mencionado y los precios, se decidió que el *driver* TB6612FNG de Toshiba sería la elección ideal para controlar los motores DC del presente proyecto. La **Tabla 2.10** detalla sus características.

**Tabla 2.10**

*Características de driver TB6612FNG*

Figura	Características
	<p data-bbox="878 1251 1305 1287">Dimensiones: 1.52 cm x 2,03 cm</p> <hr/> <p data-bbox="878 1360 1305 1396">Consumo de corriente max: 1.0 A</p> <hr/> <p data-bbox="889 1524 1294 1560">Voltaje de Potencia: 5 V – 15 V</p>



## 2.8 Consumo energético de la garra

En cuanto a la parte eléctrica, al trabajar en su mayoría con señales de control, el consumo energético no generará una alta demanda, por lo que el Arduino puede funcionar como fuente de alimentación de estos componentes, los cuales corresponden a los encoders, drivers de los motores y señales digitales. Por otro lado, los motores demandan una mayor cantidad de energía, por lo que se usó una fuente de alimentación externa con una mayor capacidad. La siguiente tabla presenta el consumo energético del sistema.

**Tabla 2.11**

*Detalles del consumo energético por componente*

Cantidad	Componente	Consumo Corriente (A)	Voltaje (V)	Potencia (Watts)	Potencia total (Watts)
6	Micromotor	0.2	5	1.0	6.0
6	Drivers de motor	0.0022	5	0.011	0.066
1	Servomotor	1.5	5	7.5	7.5
4	Sensor de fuerza resistivo	0.001	5	0.005	0.02
1	Arduino MEGA	0.2	12	2.4	2.4
				Total	15.986

Tal y como se mencionó, los motores DC y el servomotor son los componentes de mayor consumo. Para estos componentes que en conjunto acumulan 13.5 Watts, se usó una fuente de 5V y una capacidad de 3A. En resumen, el funcionamiento de la garra tiene un consumo energético de 15.99 Watts.

## **Capítulo 3**

### 3. Resultados y análisis

En este capítulo se presentan los resultados de la solución propuesta, tomando en cuenta los aspectos de diseño mecánico, diseño eléctrico y sistema de control, una simulación, la aplicación de un prototipo desarrollado siguiendo estos modelos y un análisis de costos del producto final.

#### 3.1 Diseño mecánico

**Figura 3.1**

*Diseño 3D de la garra de tres dedos adaptativa con eslabones rígidos*

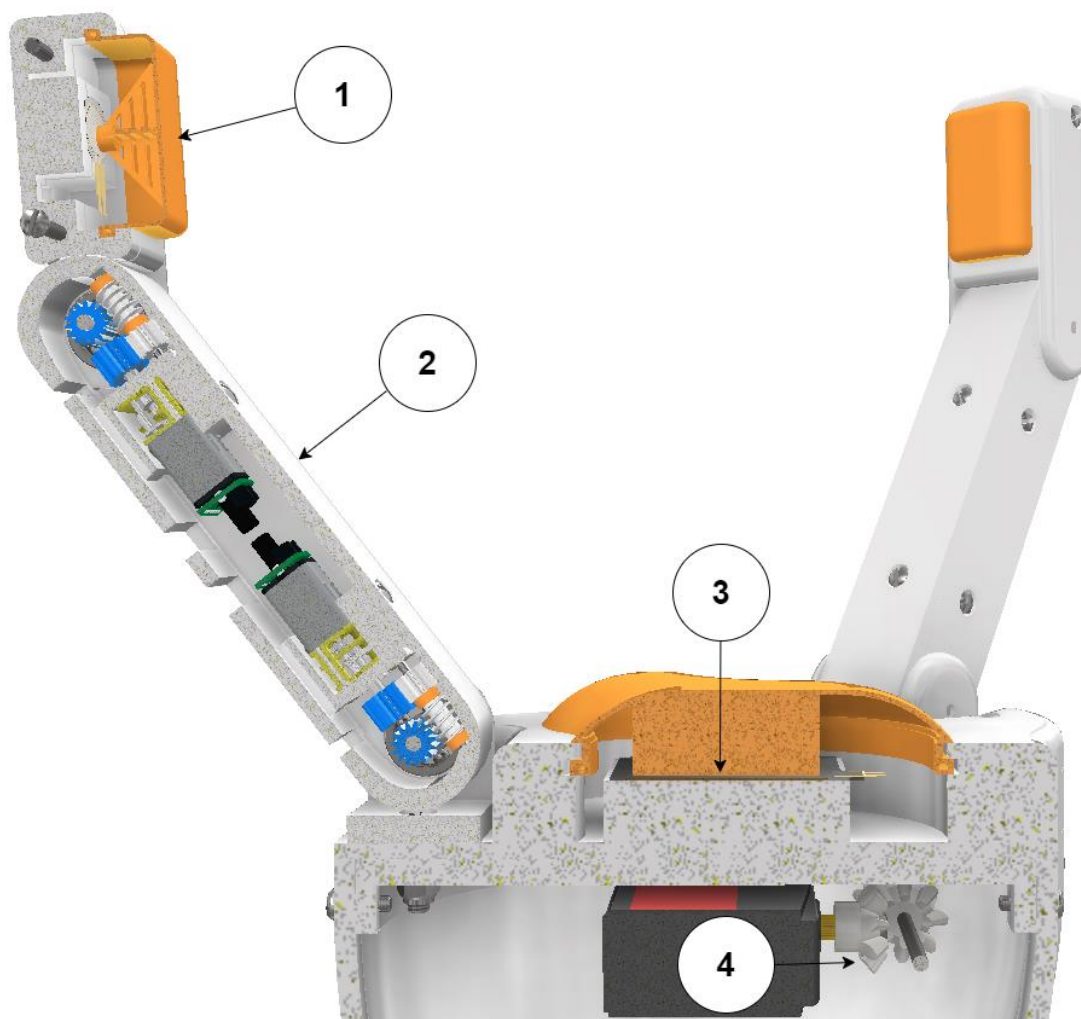


La garra diseñada observada en la **Figura 3.1** representa la solución planteada para la problemática enunciada en el capítulo 1. Las membranas representadas de color naranja fueron elaboradas en material flexible (TPU), mientras que los demás elementos fueron impresos en 3D con material rígido (PLA).

Los planos generales del modelo 3D se encontrarán en la sección de planos correspondiente al **Apéndice G**.

**Figura 3.2**

*Visualización interna en el modelo 3D de la garra diseñada*

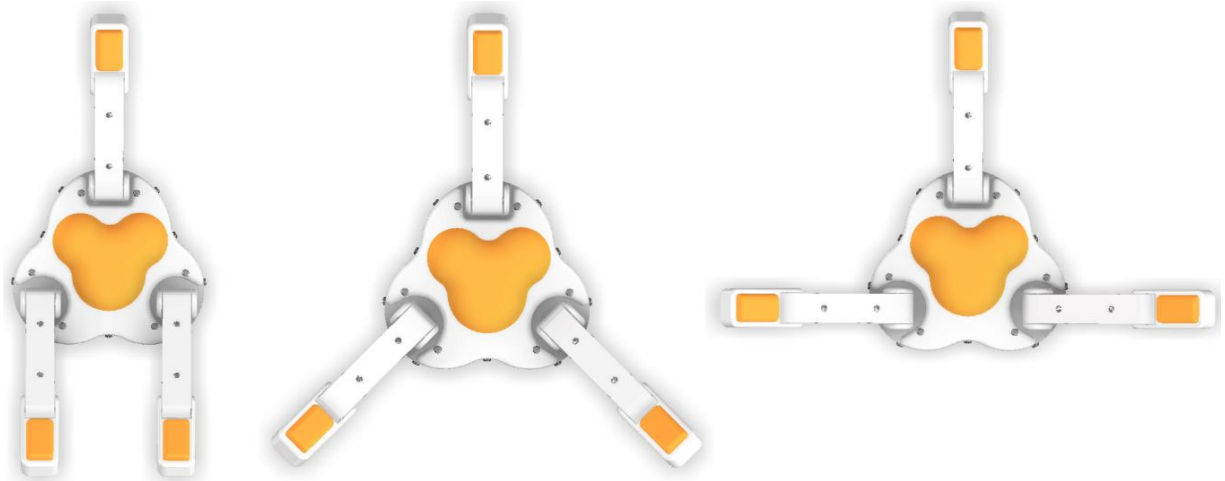


En la **Figura 3.2** se observa en el indicador 1 y 3 las membranas flexibles encargadas de distribuir la presión a los sensores de fuerza resistivos, en el indicador 1 se observa una estructura con espacios lineales, que facilitan la flexión del material, a diferencia del indicador 3 donde la flexión de la membrana en la palma estará dada por el *infill* o relleno con el cual se realizó su impresión 3D.

En el indicador 2 se muestra el mecanismo utilizado para el movimiento de los ejes de rotación en los dedos, tal como se mencionó en el capítulo 2. Finalmente, el indicador 4 muestra el mecanismo utilizado para lograr el giro sobre su propio eje de los dos dedos conectados por los engranajes cónicos y su eje principal.

### Figura 3.3

*Posicionamiento abierto de la garra en tres configuraciones básicas de agarre (plano, cilíndrico-esférico y de pinza)*



**Figura 3.4**

*Posicionamiento cerrado de la garra en configuraciones base*



Se realizó la simulación de posicionamiento de la garra en tres diferentes configuraciones que abarcan agarre plano, agarre cilíndrico o esférico y agarre de tipo pinza con un dedo extra para soporte adicional, tal y como se observa en la **Figura 3.3** y **Figura 3.4**.

Posteriormente, se extrajeron los volúmenes de trabajo correspondiente a cada tipo de agarre en el *gripper* diseñado, tal y como se observa en la **Figura 3.5**. En el agarre plano, se dispone de una anchura de 70 mm (entre los planos de las membranas), un largo de 140 mm y una altura estándar de 150 mm que será la misma en los tres tipos de agarre.

**Figura 3.5**

*Volumen de trabajo máximo para cada configuración de agarre con contacto en la base de la palma*



En el agarre cilíndrico-esférico, se dispone de un diámetro de 100 mm y la altura previamente mencionada. Finalmente, el agarre de tipo pinza presenta un volumen de trabajo de tipo rectangular con un largo de 85 mm (entre los planos de los dos dedos en pinza), un ancho de 100 mm (hacia el plano de la membrana del dedo extra) y la altura previamente mencionada.

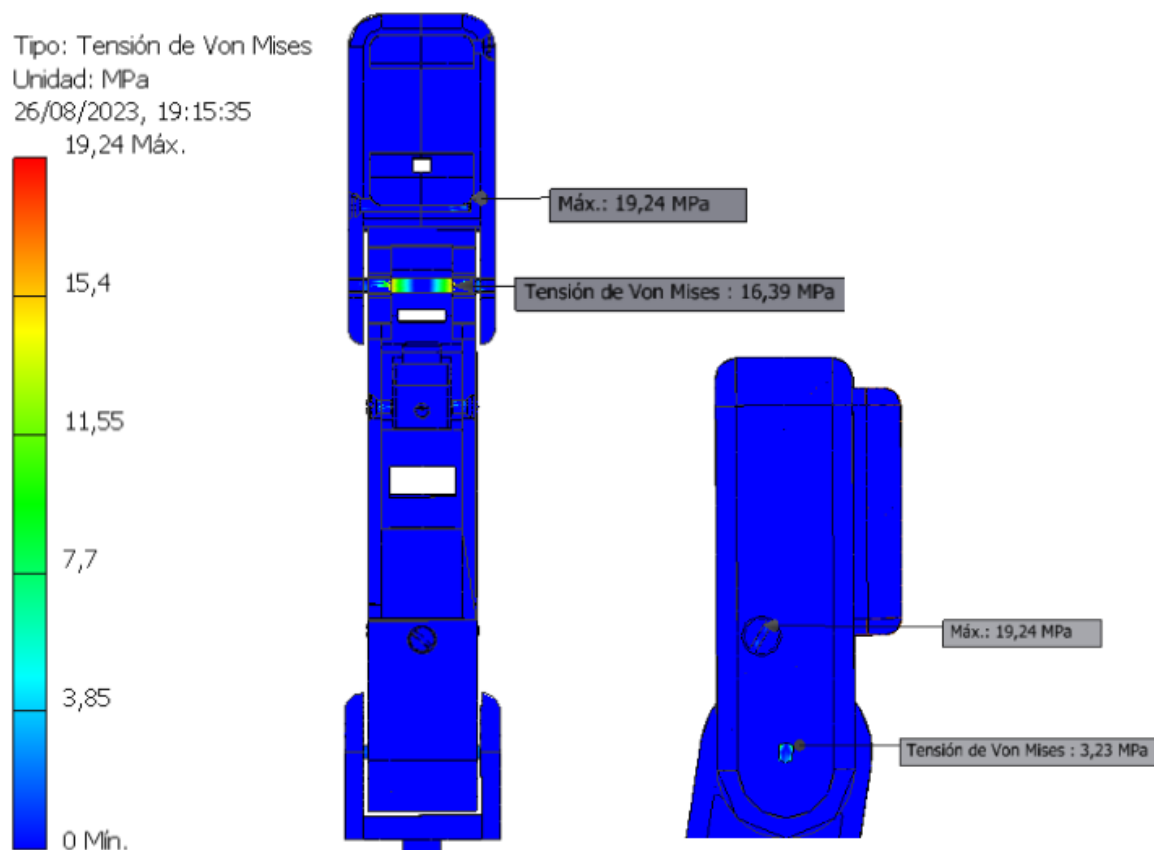
Adicionalmente, se toma en consideración que la altura de 150 mm es la necesaria para que el objeto de agarre tenga contacto con el sensor base en la palma y los sensores en los dedos, por lo que puede ser mayor o menor dependiendo del agarre que se desee.

Asimismo, es posible el agarre de objetos de mayor largo y anchura, lo cual está determinado por la distancia máxima entre los ejes de la falange media, siempre y cuando no se desee hacer contacto con el sensor base en la palma del *gripper*.



**Figura 3.6**

*Análisis de esfuerzos de Von Mises para torque máximo del motor*



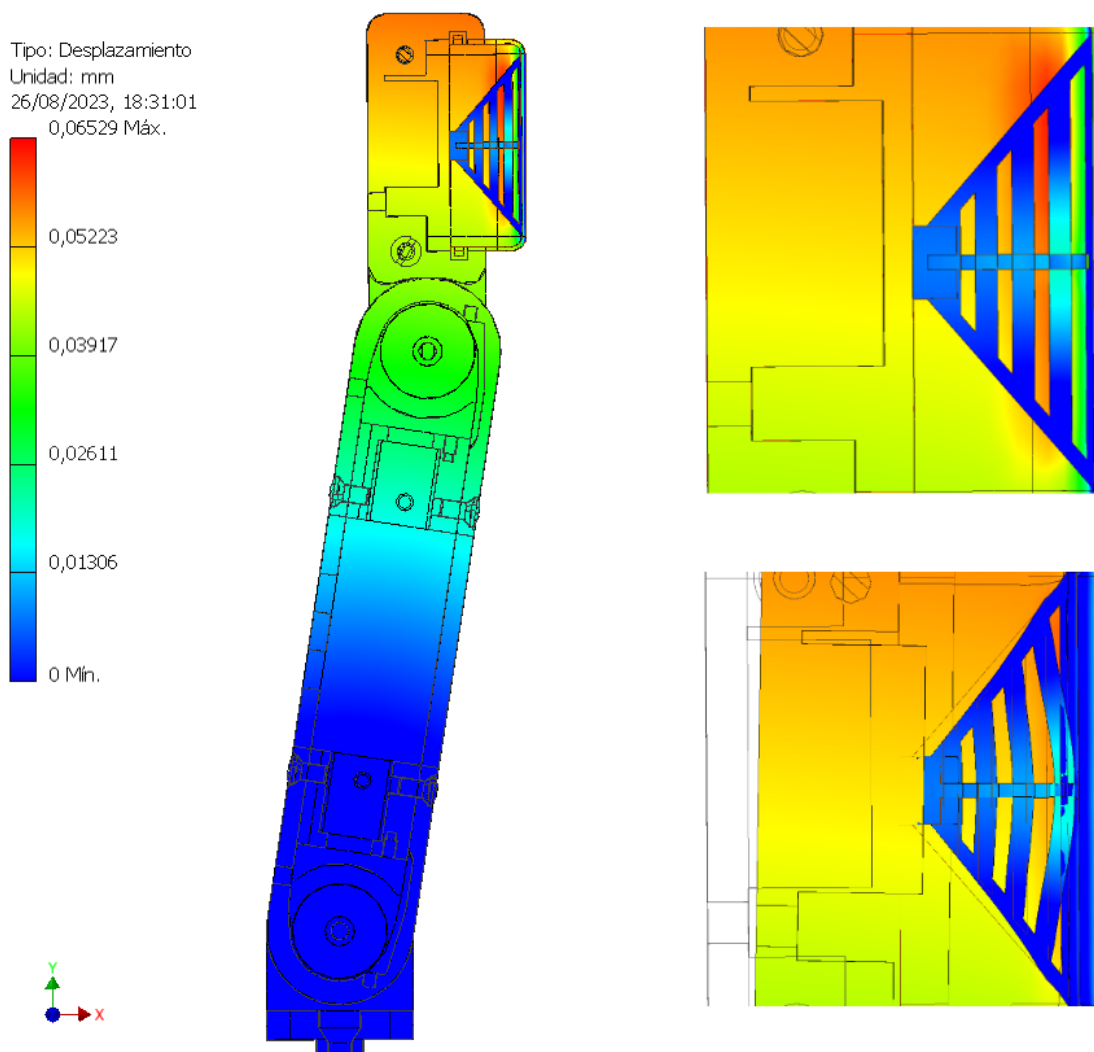
En la **Figura 3.6** se observa el análisis de esfuerzos realizados sobre uno de los dedos de la garra. Para dicho análisis se aplicó el torque máximo permisible por el motor seleccionado (196.133 N\*mm) sobre el eje de la falange externa (encargada de presionar los objetos).

El análisis fue realizado con la base de ABS como material de los eslabones rígidos en semejanza al material PLA utilizado y caucho en la membrana elástica en semejanza al material TPU.

Conociendo que el límite de tensión elástica del material ABS ronda los 32 MPa y el del acero inoxidable utilizado en el eje es cercano a los 200 MPa, las tensiones de Von Mises máximas en los puntos mostrados, se mantienen dentro del margen de seguridad.

**Figura 3.7**

*Análisis de deformación parcial en la membrana de TPU*



En la **Figura 3.7** se observa el análisis realizado en torno a la deformación de la membrana de TPU que hace contacto con la base sobre la que se encuentra el sensor de fuerza resistiva,

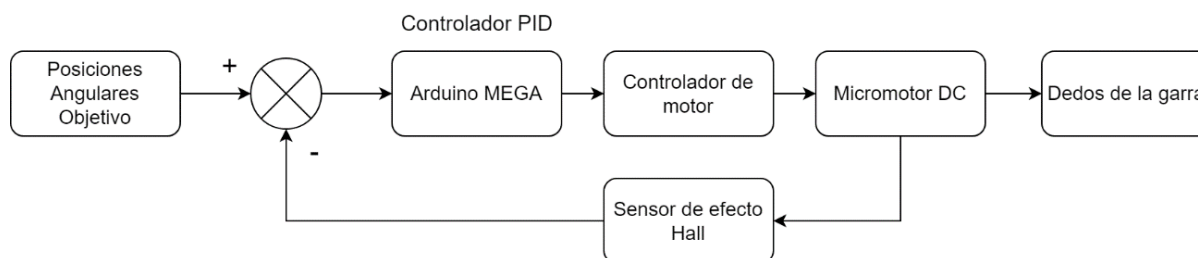
distribuyendo toda la fuerza ejercida sobre la membrana hasta el punto específico de contacto con el sensor.

### 3.2 Sistema de control de diversos tipos de agarre

Para controlar el agarre, se procedió a implementar un circuito de control a los motores de las articulaciones de cada dedo el cual aprovecha los sensores de efecto hall para conocer la posición angular del eje de carga. Se realizó la regulación de los valores de velocidad del motor por medio de un control PID, el cual por medio del Arduino detiene o compensa la energía que recibe el motor hasta alcanzar una posición angular específica. El diagrama de bloques del proceso se puede observar en la **Figura 3.8**.

**Figura 3.8**

*Diagrama de bloques del sistema de control de la garra*



- **Parámetros de control PID**

Los parámetros de control PID implementados en el sistema ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ), se obtuvieron por medio del método de Ziegler Nichols. Por la naturaleza de las funciones de la garra, se requería que no se tenga ningún *overshoot* en el sistema.

Por ello, luego de determinar el valor de la ganancia última y el periodo de oscilación del sistema al aumentar  $K_p$  y llevar a cero a los valores  $K_d$  y  $K_i$ . Se determinaron los valores de las ganancias restantes por medio de las ecuaciones de Ziegler Nichols.

Dado que el sistema variaba el estado de los motores por medio de *drivers* electrónicos que controlaban la velocidad, las ganancias del sistema tienen su base sobre un control PD para determinar  $K_d$ , y luego por medio del método manual iterativo se determina el valor de  $K_i$ . Los valores resultantes se pueden observar en la **Tabla 3.1**.

**Tabla 3.1**

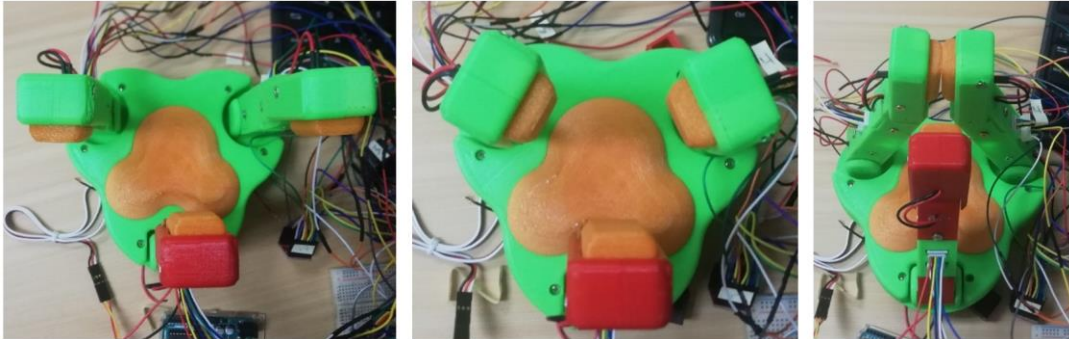
*Parámetros PID de los actuadores de la garra*

<b><math>K_p</math></b>	<b><math>K_i</math></b>	<b><math>K_d</math></b>
1.5	0.005	0.024375

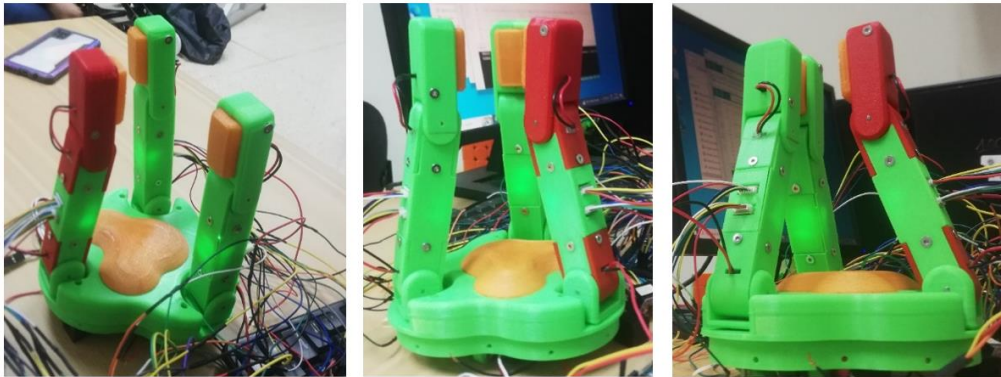
Por otro lado, la postura de los dedos de la garra es controlada por un servomotor a través del Arduino. Esto le proporciona la capacidad de realizar distintos tipos de agarre. La **Figura 3.9** y **Figura 3.10** muestran los distintos tipos de agarre previo a su implementación final.

**Figura 3.9**

*Posicionamiento cerrado de la garra impresa en las configuraciones plana, cilíndrica y de pinza*

**Figura 3.10**

*Posicionamiento cerrado de la garra impresa desde un ángulo distinto en las configuraciones básicas*



Como se muestra en la **Figura 3.9** y **Figura 3.10**, el servomotor permitió la rotación de los dedos en el eje perpendicular a la base de la garra. Esto permite adoptar las posturas de agarre plano, cilíndrico y de pinza. El código de control implementado en Arduino se puede observar en el **Apéndice F**.

### 3.3 Sistema electrónico de la garra

En la parte electrónica, se realizaron simulaciones en Proteus para evaluar el funcionamiento de los circuitos previo a su implementación. La **Figura 3.11** muestra el esquemático del circuito electrónico de la garra el cual se conforma por el Arduino Mega, seis motores DC con *encoder*, sus respectivos drivers, un servomotor y sensores que hacen referencia a los sensores de fuerza resistivos.

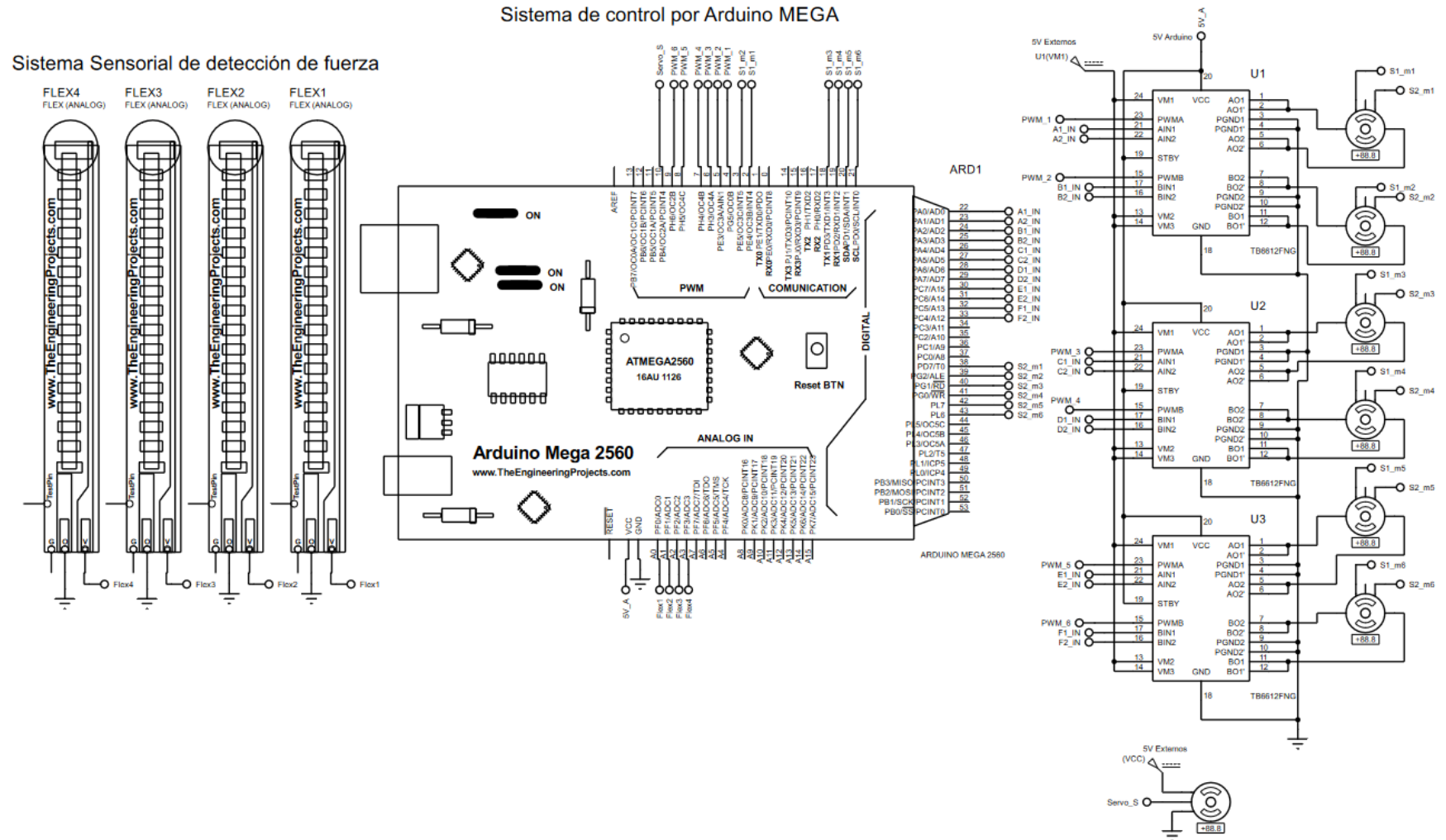
Describiendo brevemente el esquema de la **Figura 3.11**, el Arduino actúa como el cerebro del sistema, controlando los componentes y procesando la información de los sensores. El motor *driver* permite amplificar la señal del Arduino para alimentar y controlar los seis motores de manera eficiente variando su velocidad y dirección de forma independiente. El servomotor permite el ajuste de las posturas de la garra y se controla por medio de señales PWM. Los sensores de fuerza resistivos son dispositivos que cambian su resistencia en función de la flexión o deformación que experimentan. Estos sensores envían señales analógicas al Arduino que luego pueden ser procesadas para obtener información sobre el estado de la fuerza ejecutada por la garra.

Finalmente, dado que los motores pueden requerir una cantidad significativa de corriente, es necesario contar con una fuente de alimentación adecuada, en este caso de 5V – 3A. Esta fuente de alimentación es independiente para los motores y para la electrónica del Arduino con el fin de evitar problemas de interferencia.

Figura 3.11

Esquema electrónico de la garra

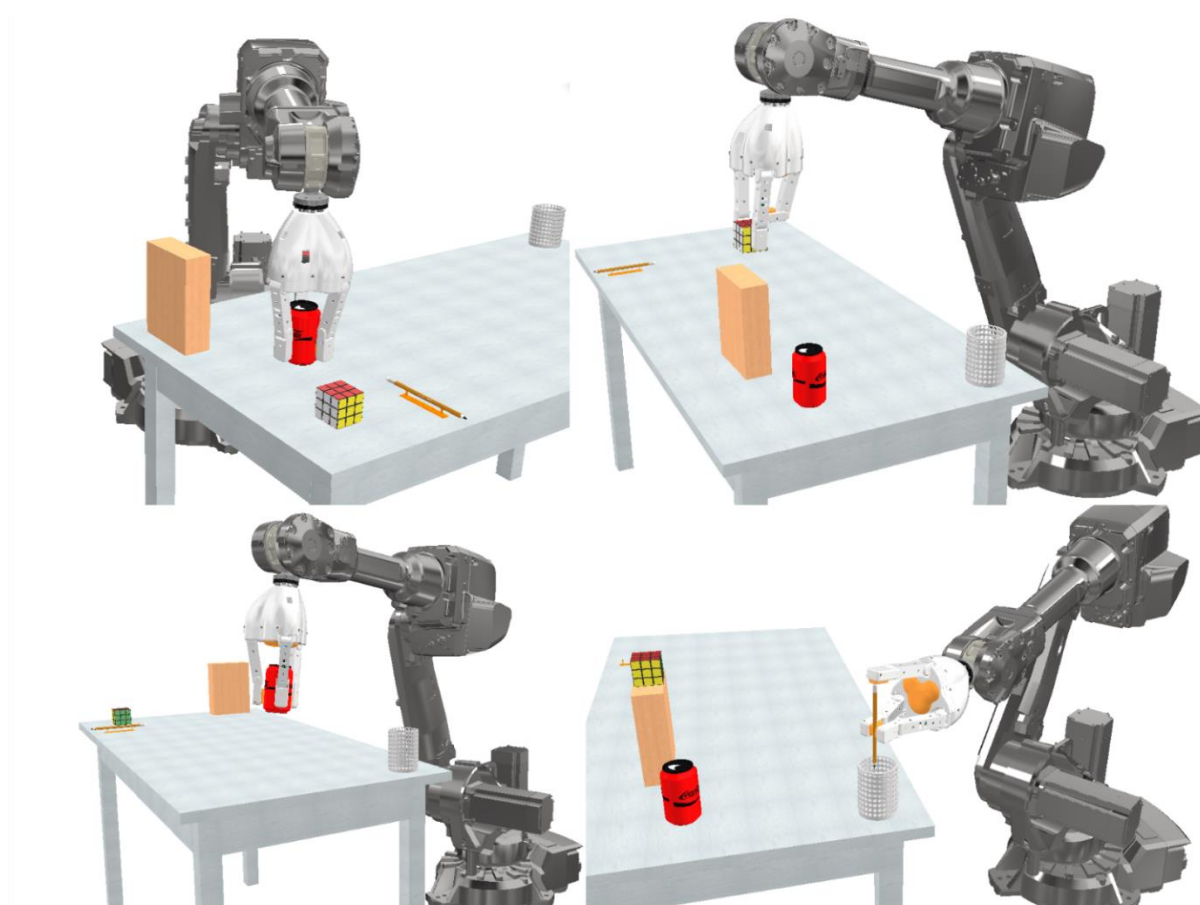
Sistema de movimiento por Actuadores Electromecánicos DC



### 3.4 Simulación y pruebas en robot real

**Figura 3.12**

*Simulación de la implementación de la garra diseñada en un brazo robótico*



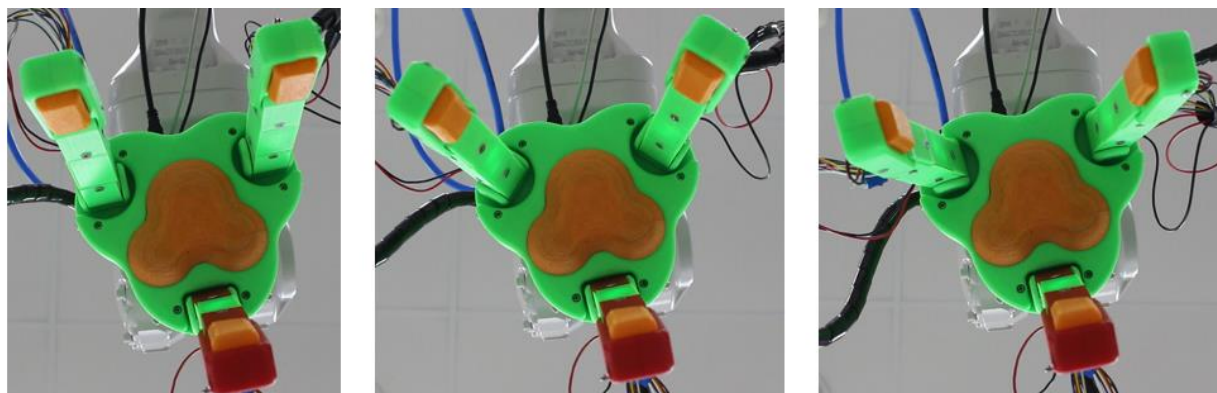
Se procedió a implementar un prototipo de la solución planteada, posterior a la simulación realizada de la integración de esta con un brazo robótico de la marca ABB del tipo IRB 2600 – variante de 12 kg y 1.65 m de altura. En la **Figura 3.12** se observan capturas de la simulación realizada, donde se manipulan objetos que comprueban los tipos de agarre base que permite la garra diseñada.



Para las siguientes figuras presentadas se hace énfasis en las tres configuraciones de agarre planteados previamente y su interacción con objetos. En la **Figura 3.13**, se aprecia la garra en posición abierta, resaltando su capacidad de adaptación a objetos de diversos tamaños.

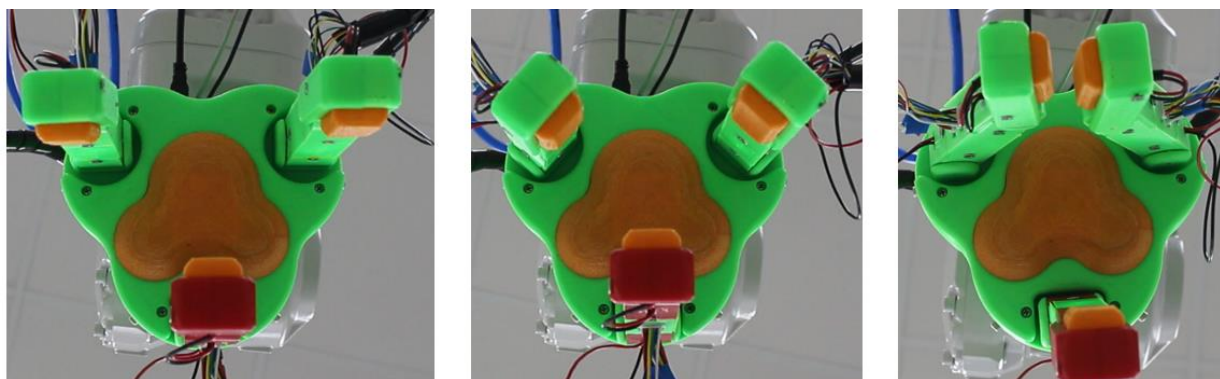
**Figura 3.13**

*Posicionamiento abierto de la garra implementada en el brazo robótico en las configuraciones plana, cilíndrica y de pinza*



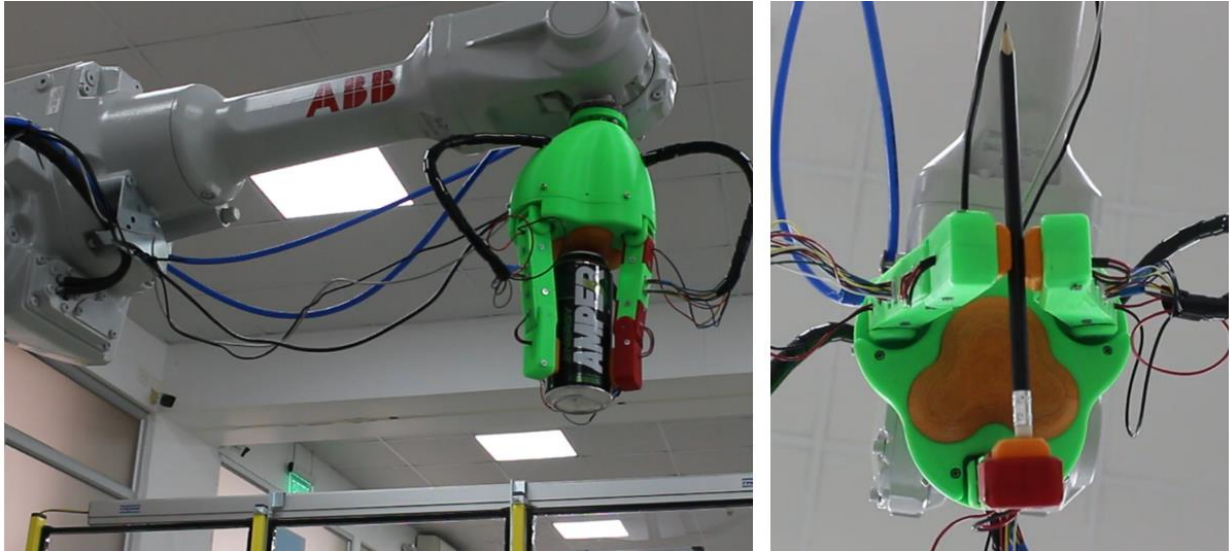
**Figura 3.14**

*Posicionamiento cerrado de la garra implementada en el brazo robótico en las configuraciones plana, cilíndrica y de pinza*



**Figura 3.15**

*Puesta en acción de la garra para la carga de objetos (lata cilíndrica y lápiz)*



En la **Figura 3.14** se enfoca la garra en su estado cerrado, destacando su estructura de agarre. En la **Figura 3.15**, la garra sostiene tanto una lata metálica como un lápiz, evidenciando su habilidad para manejar objetos con precisión y destreza, independientemente de su forma y material.

Finalmente, en la **Figura 3.16** se observa la comprobación realizada del funcionamiento de los sensores FSR integrados en la garra que interactúan con la deformación de sus membranas. Para la resistencia de 10 kOhms en el circuito de los sensores, se pudieron registrar fuerzas de 0.1 kgf hasta 10 kgf de forma manual, es decir con contactos ejercidos por el operador, que aseguran el correcto funcionamiento de los sensores dentro del rango de fuerzas permitido y ejercido por los actuadores internos.

**Figura 3.16**

*Prueba de los sensores de fuerza resistivos integrados en la garra*



### 3.5 Análisis de costos

El presente apartado detalla el análisis de costos para el proyecto en base a diferentes sistemas. Siendo estos el sistema mecánico, eléctrico y de control de la garra, los cuales se basan en los costos de los materiales de impresión 3D y componentes electrónicos. En la **Tabla 3.2** se muestra que los actuadores electromecánicos presentan un mayor costo, mientras que la parte sensorial del sistema presenta el segundo mayor costo.

**Tabla 3.2***Tabla de costos*

<b>Tipo de Sistema</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio Unitario</b>	<b>Precio Total</b>
Mecánico	Mecanizado de ejes	13	N/a	\$130
	Mecanizado de engranajes	28	N/a	\$280
	Rodamientos de bolas rígidos 605ZZP_KOYO / 5-14-5	12	\$5.50	\$66
	Rodamientos de bolas rígidos 694ZZP_KOYO / 4-11-4	2	\$11	\$22
	Rollo de filamento ABS y TPU +	2	\$50	\$100
	Impresión 3D	40h	\$2.50/h	\$100
	Pernos y anexos	N/a	N/a	\$31
Eléctrico y de Control	Micromotor DC GA12 N20 de 30 RPM, con encoder Pololu de efecto Hall	6	\$20	\$120
	Motor Driver de marca Sparkfun, modelo TF6612FNG	3	\$11	\$33
	Servomotor DS3218MG de 20 kg	1	\$13	\$13
	Arduino MEGA	1	\$20	\$20
	Packs de jumpers Hembra - Macho	2	\$2	\$4
	Fuente de Alimentación DC, 5V – 3A	1	\$12	\$12
	Sensor de Fuerza Resistivo Circular – FSR 402	3	\$13	\$39
Sensor de Fuerza Resistivo Cuadrado – FSR 406	1	\$40	\$40	
Gastos	Mano de obra de diseño	1	\$500	\$500
Varios	Instalación y puesta en marcha	1	\$100	\$100
			<b>Total</b>	<b>\$1610</b>

## Capítulo 4

## 4. Conclusiones y recomendaciones

### 4.1 Conclusiones

- En el desarrollo de la propuesta de solución planteada, se diseñó e implementó un mecanismo de unión de dos partes entre la garra robótica diseñada y el brazo robótico de la marca ABB del tipo IRB 2600 para la variante de 12 kg y 1.65 m de altura. Donde su parte principal se ajustaba a la geometría y puntos de anclaje del brazo ABB, dejando puntos de conexión que encajaban a presión y con pernos para asegurar su anclaje con la cúpula trasera de la garra diseñada. Una de las ventajas de este mecanismo es que se realizó de forma estándar e impreso en 3D, de tal manera que puede ser modificado para permitir el acople con otros tipos de brazos robóticos de forma rápida y segura.
- Con respecto a los puntos de contactos de garra diseñados, se generó una membrana impresa en TPU con parámetros y estructura interna específica, de tal forma que se obtuvo una interacción certera con los sensores de fuerza resistivo, que requerían una correcta distribución de la fuerza externa aplicada sobre su superficie de contacto. De la cual, en su implementación se comprobó que se logra un rango de detección de 0.1 kilogramos fuerza hasta 10 kilogramos fuerza, lo que demuestra que la selección de sensores establecidos permite un control total de la fuerza de contacto con objetos dentro del rango que pueden proveer los actuadores.
- El sistema de control desarrollado utilizando Arduino MEGA ha permitido lograr una manipulación precisa y fiable de la garra. Esto ha sido posible gracias a la incorporación de algoritmos de ajuste Proporcional-Integral-Derivativo (PID) de la posición angular de las articulaciones, los cuales aprovechan la retroalimentación proporcionada por los *encoders*

de los micromotores DC. Como resultado, diferentes posturas de agarre fueron evaluadas con y sin objetos, entre ellas las de agarre cilíndrico, plano y de pinzas. Además, para incrementar su confiabilidad, se incorporaron sensores resistivos en los dedos de la garra. Estos sensores tienen la capacidad de evaluar la cantidad de fuerza que se aplica sobre la superficie de los dedos, asegurando así la integridad tanto de la garra como de los objetos manipulados.

- Finalmente, el objetivo de diseñar un prototipo de garra adaptativa de tres dedos se ha logrado exitosamente a través de la utilización de la manufactura aditiva y de actuadores electromecánicos. Esta solución no solo ha demostrado ser una alternativa económica, sino que también ha demostrado ser altamente funcional y adaptable. El uso de la manufactura aditiva permitió la mejora continua del diseño mecánico al facilitar las pruebas de concepto sin recurrir a altos costos de prototipado. Por otro lado, la implementación de actuadores electromecánicos permitió ajustar los grados de libertad de la garra, otorgándole mayor movilidad y adaptabilidad de manera proporcional a la cantidad de actuadores que se utilicen. La combinación de estas tecnologías sumado a la electrónica de control ha permitido crear una garra versátil que pudo integrarse de manera eficiente con un brazo robótico ABB. Permitiendo que la computadora actúe como puente de comunicación entre el sistema de la garra y el brazo robótico, estableciendo los estados de agarre de los objetos evaluados.
- En última instancia, este prototipo de garra adaptativa ejemplifica cómo la ingeniería innovadora puede impulsar avances significativos en la automatización industrial y en la evolución de la robótica hacia una mayor flexibilidad y eficacia en entornos cambiantes.

## 4.2 Recomendaciones

- Teniendo en consideración los estados de apertura y cierre de la garra, es necesario tomar en cuenta el impacto del cambio de dirección en el movimiento de los motores sobre la retroalimentación del sistema y el tiempo de estabilización. Se propone que se modifiquen distintos parámetros de PID para ambas direcciones, es decir que varíen dependiendo del sentido de giro, mejorando así el sistema de control.
- Para implementaciones futuras se tiene la disponibilidad de mejora sobre la cúpula de la garra que contiene los elementos electrónicos de control. Se sugeriría una implementación de placas de circuito impreso (PCB) que optimice el espacio, reduciendo el volumen base de la garra. Adicionalmente, se podría adaptar un control especializado en la placa con micro Python, reemplazando el uso de microcontroladores comerciales como el Arduino MEGA implementado actualmente, pero manteniendo ciertas características en cuanto a las entradas/salidas e interrupciones disponibles. De esta forma, se lograría un control especializado únicamente para los actuadores y sensores de la garra diseñada.
- En base a la disponibilidad del medio se realizó el presente diseño y prototipado en materiales como TPU y PLA como el representativo al ABS sobre el que se hicieron análisis de tensión. Por otro lado, según el ambiente de aplicación de la garra, esta podría ser construida a base de materiales con mayor resistencia como lo es la fibra de carbono, que actualmente ya está disponible en filamentos para proveer diseños impresos en 3D con este material. Con esta implicación, de una estructura con mayor resistencia, se pueden incorporar variaciones de motores con mayor torque para incrementar el rango de presión-sujeción de los objetos.



### Referencias

- [1] T. J. Cairnes, C. J. Ford, E. Psomopoulou, and N. Lepora, “An overview of robotic grippers,” *IEEE Potentials*, vol. 42, no. 3, pp. 17–23, 2023, doi: 10.1109/MPOT.2023.3236143.
- [2] Shadow Robot, “Amazon’s CEO Jeff Bezos tries our tech!,” 2019. <https://www.shadowrobot.com/news/company-news/amazons-ceo-jeff-bezos-tries-our-tech/>.
- [3] J. Hernandez *et al.*, “Current Designs of Robotic Arm Grippers: A Comprehensive Systematic Review,” *Robotics*, vol. 12, no. 1, pp. 1–33, 2023, doi: 10.3390/robotics12010005.
- [4] G. Monkman, S. Hesse, R. Steinmann, and H. Schunk, *Robot Grippers*. Wiley, 2007.
- [5] Future Market Insights (FMI), “Robotic Grippers Market Outlook,” 2023. <https://www.futuremarketinsights.com/reports/robotic-grippers-market>.
- [6] K. Tai, A. R. El-Sayed, M. Shahriari, M. Biglarbegian, and S. Mahmud, “State of the art robotic grippers and applications,” *Robotics*, vol. 5, no. 2, 2016, doi: 10.3390/robotics5020011.
- [7] R. H. III, “How Artificial Intelligence Will Affect Supply Chains in the Next 5 Years.,” 2023. <https://www.linkedin.com/pulse/how-artificial-intelligence-affect-supply-chains-next-hilburn-iii/>.
- [8] L. Birglen and T. Schlicht, “A statistical review of industrial robotic grippers,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 49, no. January 2017, pp. 88–97, 2018, doi: 10.1016/j.rcim.2017.05.007.

- [9] Production Machining, “Robot Wrist Camera Helps Double Production,” 2018. <https://www.productionmachining.com/articles/robot-wrist-camera-helps-double-production>.
- [10] Revista de Robots, “Gripper y pinzas para robots industriales,” 2023. <https://revistaderobots.com/robots-y-robotica/gripper-y-pinzas-para-robots-industriales/>.
- [11] B. M. Tool, “ADAPTIVE ROBOT GRIPPER,” 2014. <http://www.bolee.com.hk/en/robotiq-3-finger-adaptive-robot-gripper/>.
- [12] Z. Wang, S. Hirai, and S. Kawamura, “Challenges and Opportunities in Robotic Food Handling: A Review,” *Front. Robot. AI*, vol. 8, no. January, pp. 1–12, 2022, doi: 10.3389/frobt.2021.789107.
- [13] MAREL, “Fileteado y creación de lotes inteligentes,” 2023. <https://marel.com/es/productos/fileteado-y-creacion-de-lotes-inteligentes>.
- [14] A. Connor, “A helping hand in the food industry,” *Science*, 2015. <https://www.delta.tudelft.nl/article/helping-hand-food-industry#>.
- [15] S. R. Inc., “mGrip modular soft gripping solution,” 2023. <https://www.automate.org/products/soft-robotics-inc/mgrip>.
- [16] N. Minsch, F. Nosrat-Nezami, T. Gereke, and C. Cherif, “Review on Recent Composite Gripper Concepts for Automotive Manufacturing,” *Procedia CIRP*, vol. 50, pp. 678–682, 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.04.175.
- [17] S. Petchang, “High technology & precision robot grip with automatic clamp or chuck for catch wheel and tire remove or assembly with car,” 2023. <https://www.dreamstime.com/high-technology-precision-robot-grip-automatic-clamp>

[chuck-catch-wheel-tire-remove-assembly-car-high-image154234974.](#)

- [18] B. Zhang, Y. Xie, J. Zhou, K. Wang, and Z. Zhang, “State-of-the-art robotic grippers, grasping and control strategies, as well as their applications in agricultural robots: A review,” *Comput. Electron. Agric.*, vol. 177, no. August, p. 105694, 2020, doi: 10.1016/j.compag.2020.105694.
- [19] G. Fruit, “Orchard harvest robots among the 13 tech companies participating in Western Grower’s automation initiative,” 2021. <https://www.goodfruit.com/orchard-harvest-robots-among-the-13-tech-companies-participating-in-western-growers-automation-initiative/>.
- [20] W. Chen, Y. Wang, Z. Xiao, Z. Zhao, C. Yan, and Z. Li, “Design and Experiments of a Three-Fingered Dexterous Hand Based on Biomechanical Characteristics of Human Hand Synergies,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 27, no. 5, pp. 2930–2941, 2022, doi: 10.1109/TMECH.2021.3124316.
- [21] T.I.E. Industrial, “Grippers For Robots,” 2017. [www.robots.com/articles/grippers-for-robots](http://www.robots.com/articles/grippers-for-robots).
- [22] <https://www.universal-robots.com/blog/types-of-grippers-used-in-manufacturing/>, last accessed: Jun 10, 2023.
- [23] Z. Samadikhoshkho, K. Zareinia, and F. Janabi-Sharifi, “A Brief Review on Robotic Grippers Classifications,” *2019 IEEE Can. Conf. Electr. Comput. Eng. CCECE 2019*, pp. 1–4, 2019, doi: 10.1109/CCECE.2019.8861780.
- [24] A. S. Sadun, J. Jalani, and F. Jamil, “Grasping analysis for a 3-Finger Adaptive Robot Gripper,” *2016 2nd IEEE Int. Symp. Robot. Manuf. Autom. ROMA 2016*, no. 3, 2017, doi:

- 10.1109/ROMA.2016.7847806.
- [25] ROBOTIQ, “3-Finger Adaptive Robot Gripper.” <https://robotiq.com/products/3-finger-adaptive-robot-gripper>.
- [26] Barrett, “Multi-fingered programmable grasper,” 2023. <https://advanced.barrett.com/barretthand>.
- [27] <https://www.mexpolimeros.com/coeficientes%20de%20fricción.html>, last accessed: Jul 20, 2023.
- [28] P. F. S.A, “Principios de funcionamiento del encoder cuadratura de efecto Hall para medición de velocidad en motores de corriente directa.” 2013. <https://www.puntofotante.net/FUNCIONAMIENTO-ENCODER-CUADRATURA-EFECTO-HALL.htm>.
- [29] J. Acosta y A. Ramón, *Comparación tecnológica de patrones de relleno en impresión 3D por extrusión usando simulación*. ESPOL, 2021. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/54726>

## **Apéndices**

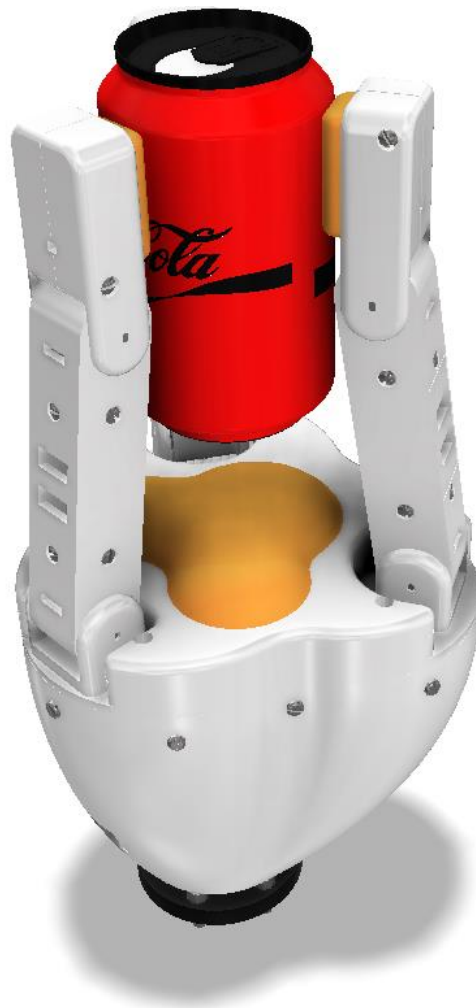
## **Apéndice A**

## Selección de motores

Para seleccionar los motores adecuados que realizarán las rotaciones planteadas, se analizó en primera instancia el torque requerido, de tal forma que se pudiera asegurar un rango de agarre mínimo en función del peso de los objetos. En primera instancia se consideró un agarre cilíndrico tal como se observa en la **Figura A.1** y **Figura A.2**, donde la fuerza aplicada desde los dedos de la garra hacia el objeto cilíndrico es idéntica.

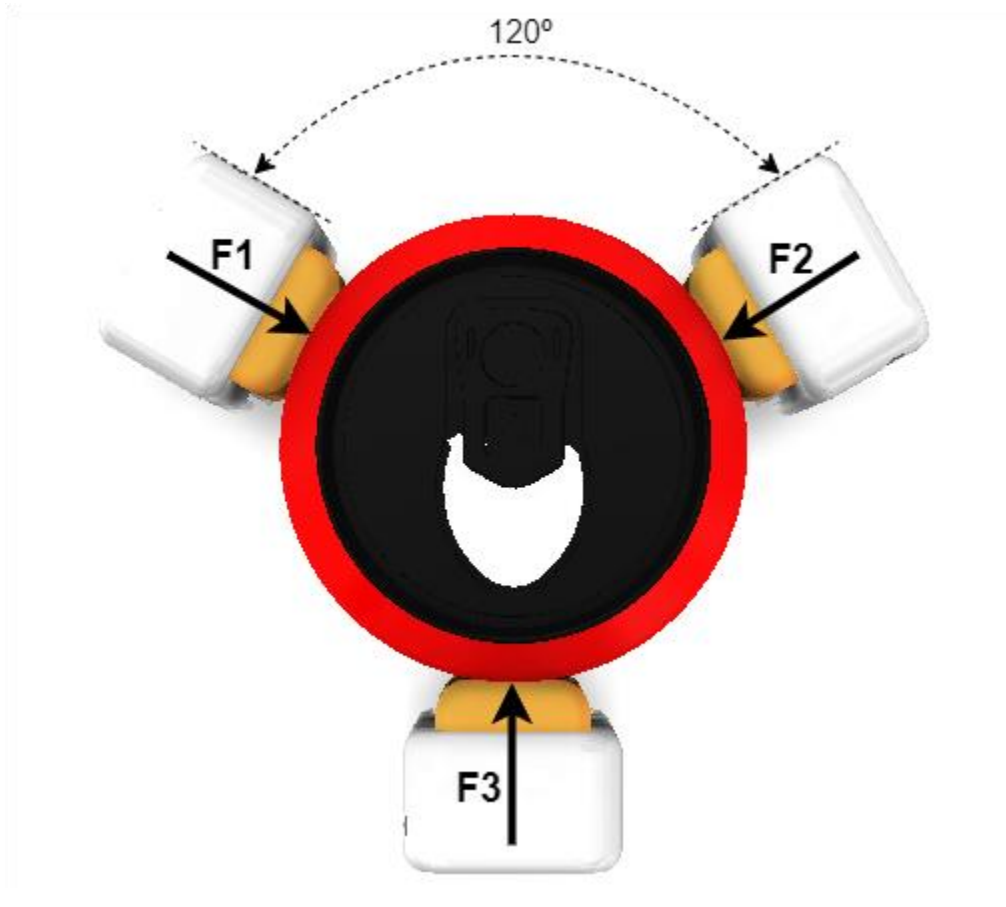
**Figura A.1**

*Agarre del gripper diseñado en objeto cilíndrico*



**Figura A.2**

*Representación de fuerzas aplicadas del gripper en objeto cilíndrico*



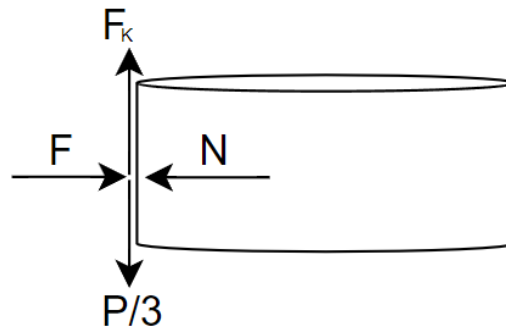
Conociendo que la fuerza aplicada por cada dedo hacia el objeto es idéntica y que los componentes de estas se anulan entre ellos, se puede simplificar el sistema con el contacto en un solo dedo y el objeto, reduciendo el peso del objeto a 1/3 que sería la porción del peso que le corresponde sujetar al dedo de la garra analizado, tal y como se observa en el diagrama de cuerpo libre de la **Figura A.3**. Adicionalmente, de lo mencionado previamente se tiene:

$$\overline{F1} = \overline{F2} = \overline{F3} = \overline{F} \quad (A.1)$$



**Figura A.3**

*Diagrama de fuerzas en un punto de contacto*



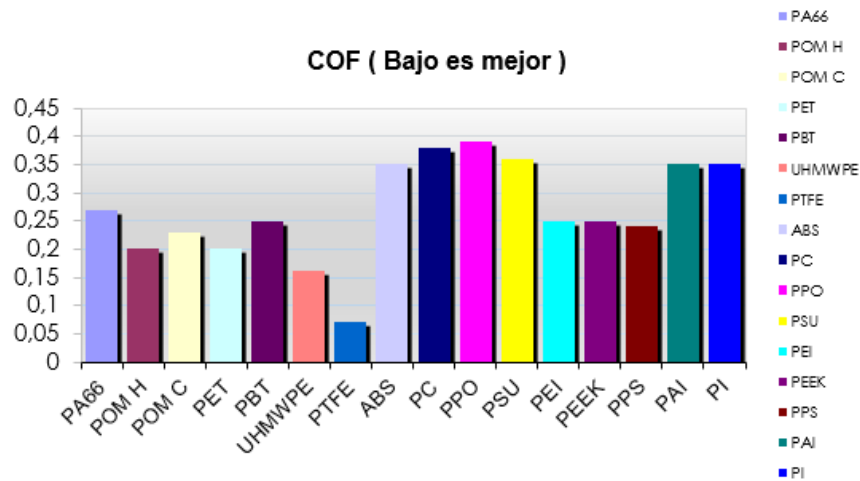
Antes de considerar las ecuaciones de fuerza para determinar el torque requerido por el motor a seleccionar, se consideran los siguientes valores:

Coefficiente de fricción estática  $\rightarrow \mu_k = 0.3$

El  $\mu_k$  se estableció en base a un valor conocido tomando como material de referencia al ABS, siendo un plástico comúnmente utilizado en la industria. Cabe destacar que el material final a utilizar será TPU y al ser impreso mediante manufactura aditiva, genera una superficie con mayor coeficiente de fricción estática a la establecida de referencia. De esta forma, se establecerá una selección de motor con unos requisitos teóricamente mayores que brindarán un factor de seguridad confiable al momento de su implementación.

**Figura A.4**

*Coefficientes de fricción de diferentes polímeros [27]*



Adicionalmente, cabe aclarar que el coeficiente de fricción es determinado por la interacción de 2 materiales en específico, en este caso aluminio y ABS. No obstante, el coeficiente de fricción seleccionado en la **Figura A.4** basado en el método de pruebas ASTM D1894, es el menor posible de la relación entre estos, donde el aluminio presenta un coeficiente de fricción superior a 0.4 en pruebas aluminio – aluminio. Para un valor más preciso se requerirían pruebas para determinar el coeficiente de fricción estático para las condiciones específicas y calidad de los materiales usados.

Finalmente se considera la masa del objeto cilíndrico estándar. Tomando en cuenta una lata de gaseosa estándar de 350 ml, su peso aproximado es de 378g. Por lo cual, se establecerá un peso base de 500 gramos del objeto cilíndrico, dando un margen aproximado del 32% sobre la masa original.

$$\sum F_x = 0$$

$$F = N \quad (\text{A.2})$$

$$P = m * g \quad (\text{A.3})$$

$$P = 0.50 \text{ kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 4.90 \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F_k = \mu_k * N \quad (\text{A.4})$$

$$\sum F_Y = 0$$

$$F_k = \frac{P}{3} \quad (\text{A.5})$$

$$\mu_k * N = 1.64 \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$0.30 * F = 1.64 \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F = 5.47 \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Considerando una aplicación de la fuerza en la falange externa a 35mm del eje de rotación movido por el motor, se tendría:

$$T = 190.45 \text{ N} * \text{mm}$$

$$T = 19.42 \text{ kgf} * \text{mm}$$

De esta manera, se establece un torque mínimo del motor de 19.42 kgf\*mm, de donde se enmarca una selección de 3 opciones que encajan con los requisitos de velocidad y tamaño mencionados en el apartado 2.5.2 de selección de motores y se presentan en la **Tabla A.1**.

**Tabla A.1**

*Selección de motores Pololu con el torque requerido*

**Performance summary and table of contents**

Motor Type	Rated Voltage	Pololu Item #	Gear Ratio	No Load		At Maximum Efficiency					Max Power	Stall Extrapolation <sup>(2)</sup>		Graph Page
				Speed	Current	Speed	Torque	Current	Output	Efficiency		Torque	Current	
				RPM (±20%)	mA (±50%)	RPM	kg-mm	A	W	%	W	kg-mm	A	
Low-Power (LP 6V)	6 V	1100, 2200	4.995	2500	50	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>	0.37	0.5	0.36	
		1099, 2201	9.96	1300		- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>	0.37	1.0		
		4780, 4781	15.25	860		640	0.40	0.11	0.27	40	0.37	1.7		4
		993, 2202	29.86	450		320	0.66	0.11	0.22	34	0.31	2.9		5
		1098, 2203	51.45	270		200	1.0	0.10	0.20	34	0.29	4.4		6
		2360, 2209	75.81	180		140	1.3	0.10	0.19	33	0.29	6.4		7
		992, 2204	100.37	130		100	1.7	0.10	0.17	28	0.25	7.4		8
		1097, 2205	150.58	90		67	2.6	0.11	0.18	28	0.25	11		9
		1096, 2206	210.59	65		46	4.1	0.12	0.19	27	0.25	16		10
		1095, 2207	248.98	54		39	4.2	0.11	0.17	26	0.23	17		11
		1094, 2208	297.92	45		34	4.4	0.09	0.15	27	0.22	20		12
		4790, 4791	379.17	36		29	5.4	0.08	0.16	34	0.27	29		13
		1596, 3058	986.41	13		10	12	0.09	0.12	24	- <sup>(1)</sup>	55		14
		Medium-Power (MP 6V)	6 V	2362, 2376	4.995	4400	80	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>		0.70
2363, 2377	9.96			2200		- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>	0.70	1.1		
4782, 4783	15.25			1400		1000	0.47	0.21	0.50	39	0.70	2.0	15	
2364, 2378	29.86			720		510	0.80	0.21	0.41	33	0.57	3.3	16	
2365, 2379	51.45			420		310	1.2	0.19	0.38	33	0.55	5.4	17	
2366, 2380	75.81			290		220	1.6	0.17	0.35	34	0.54	7.8	18	
2367, 2381	100.37			220		170	1.9	0.17	0.32	33	0.50	9.4	19	
2368, 2382	150.58			150		110	2.6	0.15	0.30	33	0.48	13	20	
2369, 2383	210.59			100		83	3.4	0.16	0.29	31	0.46	17	21	
2370, 2384	248.98			88		69	4.5	0.17	0.31	31	0.48	22	22	
2371, 2385	297.92			73		56	5.0	0.17	0.29	29	0.44	24	23	
4792, 4793	379.17			57		46	6.9	0.16	0.33	34	0.53	36	24	
2372, 3059	986.41			22		17	13	0.16	0.23	24	- <sup>(1)</sup>	67	25	
High-Power (HP 6V)	6 V			1000, 2210	4.995	6100	120	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>	1.6	1.1
		999, 2211	9.96	3100		2300	0.46	0.42	1.1	43	1.6	2.2	26	
		4784, 4785	15.25	2000		1600	0.58	0.37	0.95	42	1.5	3.0	27	
		1093, 2212	29.86	1000		830	1.0	0.36	0.89	41	1.5	5.7	28	
		998, 2213	51.45	590		490	1.5	0.32	0.75	38	1.3	8.6	29	
		2361, 2215	75.81	410		340	2.3	0.34	0.80	40	1.4	13	30	
		1101, 2214	100.37	310		250	2.9	0.33	0.73	37	1.3	17	31	
		997, 2386	150.58	210		170	3.9	0.31	0.68	37	1.2	24	32	
		996, 2216	210.59	150		120	5.0	0.32	0.62	32	1.1	30	33	
		995, 2217	248.98	120		100	5.5	0.30	0.59	32	1.1	34	34	
		994, 2218	297.92	100		87	6.5	0.31	0.58	31	1.1	40	35	
		4794, 4795	379.17	84		70	8.4	0.28	0.61	36	- <sup>(1)</sup>	55	36	
		1595, 2373	986.41	31		26	20	0.32	0.53	28	- <sup>(1)</sup>	120	37	
		High-Power, Carbon Brushes (HPCB 6V)	6 V	3060, 3082	4.995	6800	170	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>	1.3	0.9
3061, 3071	9.96			3300		2300	0.42	0.51	1.0	33	1.3	1.7	38	
4786, 4787	15.25			2100		1500	0.60	0.49	0.94	32	1.3	2.5	39	
3062, 3072	29.86			1100		840	1.0	0.43	0.85	33	1.2	4.5	40	
3063, 3073	51.45			650		490	1.6	0.42	0.80	32	1.2	7.4	41	
3064, 3074	75.81			430		330	2.5	0.43	0.87	34	1.3	11	42	
3065, 3075	100.37			330		260	3.3	0.44	0.86	33	1.3	16	43	
3066, 3076	150.58			220		170	4.1	0.39	0.73	31	1.1	20	44	
3067, 3077	210.59			160		120	5.9	0.40	0.74	31	1.1	28	45	
3068, 3078	248.98			130		100	6.6	0.40	0.71	29	1.1	32	46	
3069, 3079	297.92			110		85	7.4	0.42	0.65	26	1.0	34	47	
4796, 4797	379.17			85		68	10	0.40	0.71	30	- <sup>(1)</sup>	50	48	
3070, 3080	986.41			33		26	22	0.39	0.59	25	- <sup>(1)</sup>	110	49	
High-Power, Carbon Brushes (HPCB 12V)	12 V			3036, 3047	4.995	6800	100	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>	- <sup>(1)</sup>	1.5	0.9
		3037, 3048	9.96	3400		2500	0.43	0.25	1.1	37	1.5	1.7	50	
		4788, 4789	15.25	2200		1700	0.59	0.23	1.0	37	1.4	2.5	51	
		3038, 3049	29.86	1100		840	1.0	0.23	0.82	30	1.1	3.9	52	
		3039, 3050	51.45	650		500	1.5	0.22	0.79	31	1.1	6.7	53	
		3040, 3051	75.81	450		350	2.1	0.20	0.76	31	1.1	10	54	
		3041, 3052	100.37	330		260	2.9	0.21	0.78	31	1.1	13	55	
		3042, 3053	150.58	220		170	4.2	0.22	0.73	28	1.0	18	56	
		3043, 3054	210.59	160		120	5.6	0.21	0.71	28	1.0	25	57	
		3044, 3055	248.98	130		110	6.6	0.21	0.72	29	1.1	30	58	
		3045, 3056	297.92	110		87	7.3	0.21	0.65	26	1.0	33	59	
		4798, 4799	379.17	85		67	11	0.20	0.75	31	- <sup>(1)</sup>	50	60	
		3046, 3057	986.41	35		27	21	0.19	0.59	25	- <sup>(1)</sup>	100	61	

## **Apéndice B**

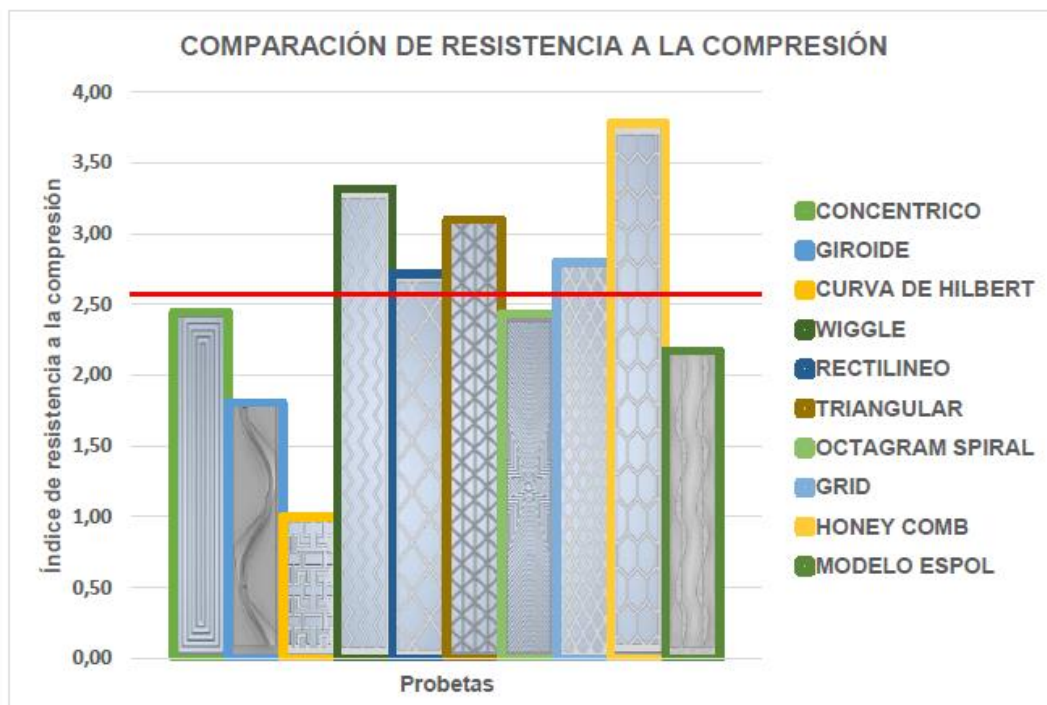
## Especificación del material de construcción

El diseño de los elementos modulares que componen toda el *gripper* tiene en consideración la etapa de producción, de tal forma que fueron diseñados considerando la forma óptima para su impresión 3D.

Adicionalmente, tomando de referencia el trabajo de tesis politécnica [29], y conociendo que la mayor parte de los elementos mecánicos de la garra se someterán a fuerzas de compresión. Se configuró la impresión de tal forma que el patrón de relleno utilizado otorgue la mejor resistencia a fuerzas de compresión (*Honey Comb*) en elementos rígidos con PLA, tal y como se observa en la **Figura B.1**.

**Figura B.1**

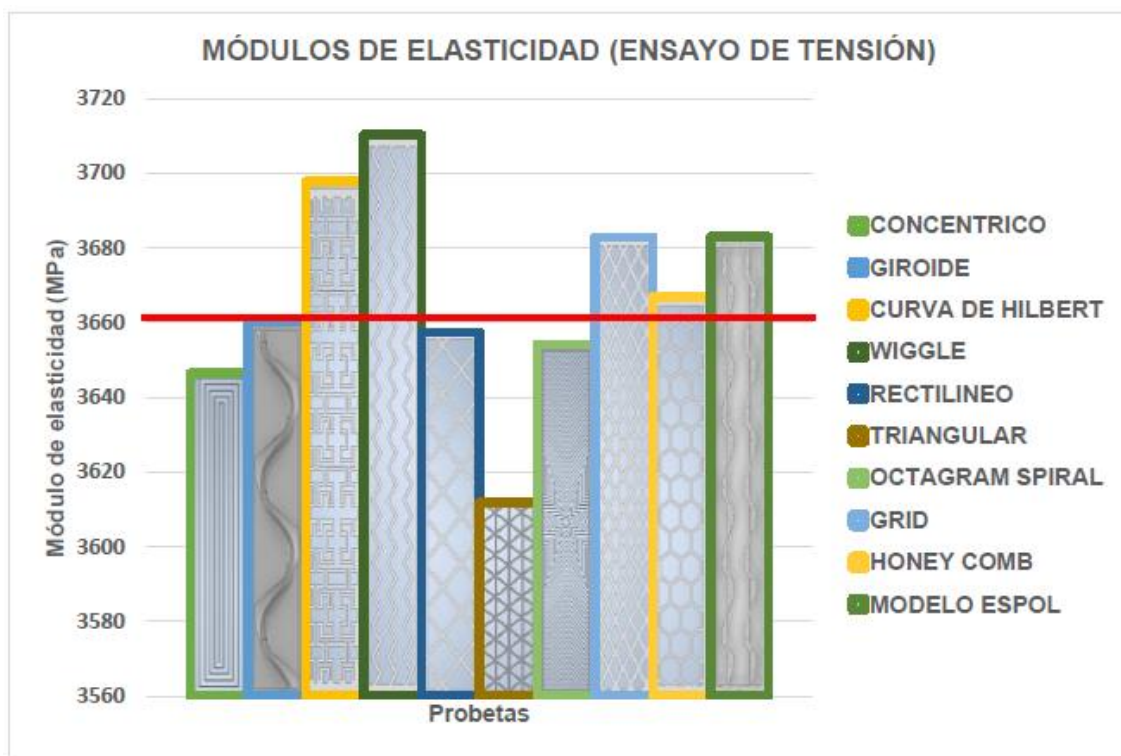
*Resistencia a la compresión para varios patrones de relleno [29]*



Así mismo se consideró la configuración de impresión que le permita a las membranas flexibles de TPU la mayor elasticidad en base a su relleno, el cuál es el relleno *Wiggle* observado en la **Figura B.2**.

**Figura B.2**

*Módulos de elasticidad para varios patrones de relleno [29]*



## **Apéndice C**



### Selección de *drivers* para motores DC

En la **Tabla C.1** se puede observar las comparativas de los drivers de motor en base a sus dimensiones, corriente de funcionamiento, cantidad de pines, voltaje de potencia (La proveída al motor) y precio.

**Tabla C.1**

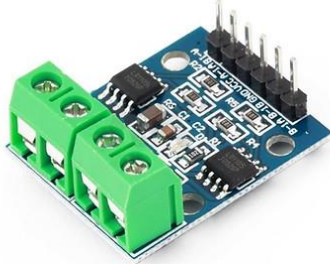
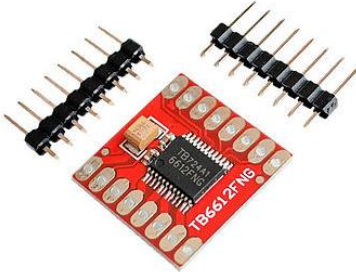
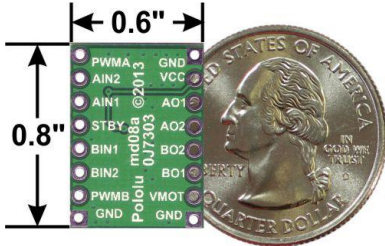
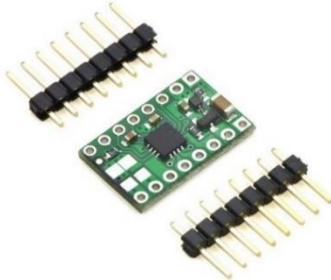
*Comparativa entre drivers de motores DC*

Nombre	Dimensiones de área	Corriente de funcionamiento	Cantidad de Pines	Voltaje de Potencia	Precio
Puente H L91106	3.1 cm x 2.2 cm	800 mA	10	2.5 V - 12V	\$3
TB6612FNG (Toshiba)	1.52 cm x 2.03 cm	1.0 A	16	5 V – 15 V	\$11
TB6612FNG (Pololu)	1.52 cm x 2.03 cm	1.0 A	16	4.5 V – 13.5V	\$12
DRV8833 (Pololu)	1.8 cm x 1.6 cm	1.5 A	16	2.7 V – 10.8 V	\$22

En la **Tabla C.2** se presentan las representaciones correspondientes a los drivers mencionados previamente.

**Tabla C.2**

*Figuras correspondientes a los drivers para motores DC*

Nombre	Figura
Puente H L91106	 A blue printed circuit board (PCB) motor driver module. It features a central integrated circuit (IC) labeled 'L91106'. The board has several pins along its edges, including a 5-pin header on the right and a 4-pin header on the left. Two green terminal blocks are attached to the front of the board for wire connections.
TB6612FNG (Toshiba)	 A small, red PCB motor driver module. It has a central black IC labeled 'TB6612FNG'. The board has two 5-pin headers on opposite sides. The PCB is populated with various surface-mount components.
TB6612FNG (Pololu)	 A small, green PCB motor driver module. It has a central black IC labeled 'TB6612FNG'. The board has two 5-pin headers on opposite sides. A US quarter coin is placed next to the module for scale. Dimension lines indicate the module's size: 0.6 inches in width and 0.8 inches in height. The pin headers are labeled: PWMA, AIN2, AIN1, STBY, BIN1, BIN2, PWMB, GND, GND, VCC, AO1, AO2, BO2, BO1, VMOT, GND.
DRV8833 (Pololu)	 A small, green PCB motor driver module. It has a central black IC labeled 'DRV8833'. The board has two 5-pin headers on opposite sides. The PCB is populated with various surface-mount components.

## **Apéndice D**

## Selección de controlador

En la **Tabla D.1** se puede observar una comparativa de entre los controladores con las características de lenguajes de programación, voltaje de funcionamiento, corriente de consumo, cantidad de pines y detalle de los pines.

**Tabla D.1**

*Comparativa de características de controladores*

Nombre del controlador	Lenguaje de programación	Voltaje de funcionamiento	Corriente de consumo	Cantidad de pines	Detalle de los pines
Arduino MEGA 2560	Arduino, C	7 - 12 V	Por cada pin E/S: 20mA, Para el pin 3.3V: 50 mA	54 E/S, 16 Analógicos	Posee 14 pines PWM, 6 Interrupciones
Rapsberry Pi Pico	C++, MicroPython	1.8 - 5.5 V	Cada pin hasta 93 mA	30 GPIO, 26 Disponibles	Todos soportan interrupciones, 8 soportan PWM
Rapsberry Pi 4	Python, MicroPython	5.1 V	Alrededor de 600 mA	40 pines, 26 GPIO	Todos soportan interrupciones, 4 soportan PWM Hardware, No Analógicos
Rapsberry Pi Zero	Python, MicroPython	5.1 V	Alrededor de 120 mA	40 pines, 26 GPIO	Todos soportan interrupciones, 4 soportan PWM Hardware, No Analógicos
ESP32	Arduino, MicroPython	2.2 – 3.6 V	Por cada pin: 30 – 50 mA	38 pines	16 son GPIO, 15 ADC y 26 PWM

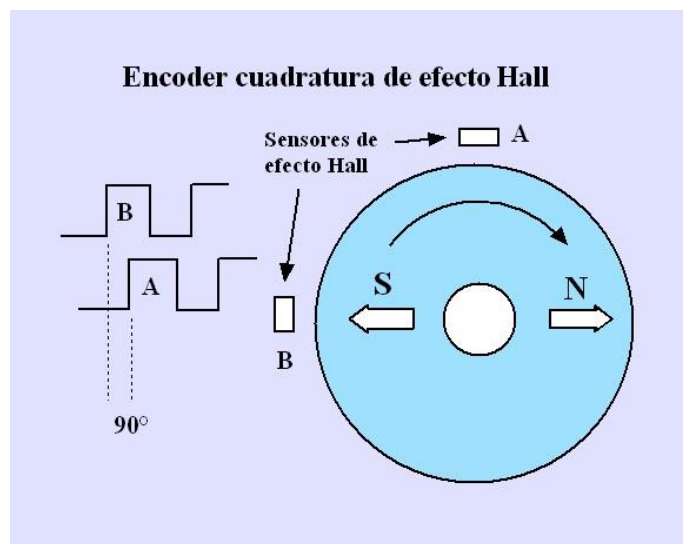
## **Apéndice E**

### Contador de Pulsos de encoder de cuadratura

La lectura de pulsos del motor se realiza por medio del sensor de efecto Hall. Para medir el sentido de giro se aprovechan las señales proveídas por el sensor las cuales están desfasadas un ángulo de 90 grados. Por lo tanto, realizando un conteo por medio del microcontrolador Arduino MEGA, se puede conocer cuáles de los dos pulsos se activa primero, y a partir de ahí obtener si el motor está girando en sentido horario o antihorario.

**Figura E.1**

*Esquema de funcionamiento del encoder de efecto Hall [28]*



En lo que respecta a la posición del eje de giro del motor, se realiza un proceso experimental contando el número de pulsos que se generan para que el eje final (de carga) complete una vuelta. Por lo tanto, se relaciona que un número de pulsos determinado completarán 360 grados en el eje de carga del motor, y a partir de ahí relacionar con ángulos comunes como 90, 60 y 30 grados.

## **Apéndice F**

## Código de control

El presente código de control está diseñado para ser implementado en un Arduino Mega.

```
#include <Servo.h>
Servo servoMotor;

// Definición de pines Analógicos a usar para los sensores de fuerza
const int numSensores = 4;
const int fsr_pins[numSensores] = {A0, A1, A2, A3};
const int fsr_limits[numSensores] = {5, 5, 5, 5};

// Definición de pines digitales a usar para los motores DC
const int numMotores = 6;

int ENCA[numMotores] = {2, 3, 18, 19, 20, 21};
int ENCB[numMotores] = {38, 39, 40, 41, 42, 43};
int IN1[numMotores] = {22, 24, 26, 28, 30, 32};
int IN2[numMotores] = {23, 25, 27, 29, 31, 33};
int PWM[numMotores] = {4, 5, 6, 7, 8, 9};

volatile int counter[numMotores] = {0};
int encoderPin2Value[numMotores] = {0};
bool isCW = true;

// Variables a usar en el control PID
volatile int posi[numMotores] = {0}; // Especificar posi como volatile
long prevT[numMotores] = {0};
float eprev[numMotores] = {0};
float eintegral[numMotores] = {0};
// Vector de posiciones angulares objetivos de los motores DC
int targets[numMotores] = {0, 0, 0, 0, 0, 0};
void setup() {
  Serial.begin(9600);

  servoMotor.attach(10); //Servomotor al pin 10 PWM

  // Configuración de los pines de los motores como salida
  for (int i = 0; i < numMotores; i++) {
    pinMode(IN1[i], OUTPUT);
    pinMode(IN2[i], OUTPUT);
    pinMode(PWM[i], OUTPUT);
  }
  for (int i = 0; i < numMotores; i++) {
    pinMode(ENCA[i], INPUT_PULLUP);
    pinMode(ENCB[i], INPUT);
  }
}
```



```

// Configuración de las interrupciones para el conteo de pulsos
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(ENCA[0]), doEncodeA0, RISING);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(ENCA[1]), doEncodeA1, RISING);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(ENCA[3]), doEncodeA2, RISING);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(ENCA[4]), doEncodeA3, RISING);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(ENCA[5]), doEncodeA4, RISING);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(ENCA[6]), doEncodeA5, RISING);}
void loop() {
  char option;
  //Solo se activa cuando se envía alguna opción ("s" para servomotor y "m" para los
micromotores DC)
  if (Serial.available()){
    option = Serial.read();
    // Servomotor
    if (option == 's') {
      Serial.print("Ingrese un angulo del servo: ");
      //Espera hasta que el usuario envíe su ángulo
      while (!Serial.available());
      int angulo = Serial.parseInt(); // Lee el número enviado por el monitor serial
      if (angulo >= 0 && angulo <= 180) {
        servoMotor.write(angulo); // Mueve el servomotor al ángulo especificado
        //delay(2000);
        Serial.print("Servo posicionado en el angulo: ");
        Serial.println(angulo);
      } else {
        Serial.println("Angulo no valido (debe estar entre 0 y 180).");}}
    //Micro motores DC
    else if (option == 'm') {
      int number;
      Serial.println("Digita los ángulos de los seis motores de la siguiente forma: 0,0,0,0,0,0");
      while (!Serial.available()); //Espera hasta que el usuario envíe los ángulos
      String post_data = Serial.readString();
      int prepos = 0;
      int pos = 0;
      for (int i = 0; i < numMotores; i++) { //Asigna los angulos a los micro motores en orden
        pos = post_data.indexOf(',',prepos);
        String preconteo = post_data.substring(prepos,pos);
        targets[i] += preconteo.toInt();
        prepos = pos+1;
      }
    }
  }
  else {
    Serial.println("Invalid option. Please enter 'a' or 'b'.");
  }
  while (Serial.available()) {
    Serial.read(); // Limpia el buffer de la comunicación serial
  }
}

```

```

//Define los valores obtenidos por los sensores de fuerza
int valoresSensores[numSensores];

for (int i = 0; i < numSensores; i++) {
  valoresSensores[i] = analogRead(fsr_pins[i]);
  if (i==3){
    valoresSensores[i] -=180;
  }
}
//Inicio del control PID
//Definición de constantes PID
float kp = 1.5;
float kd =0.024;
float ki = 0.005;

//Aplicación de ajuste de ángulo por PID en cada motor
for (int i = 0; i < numMotores; i++) {
  // time difference
  long currT = micros();
  float deltaT = ((float) (currT - prevT[i]))/( 1.0e6 );

  prevT[i] = currT;
  int pos = 0;
  noInterrupts(); //Desactivar las interrupciones temporalmente durante la lectura
  pos = posi[i];
  interrupts(); // Volver a activar las interrupciones
  int e = pos - targets[i];
  float dedt = (e - eprev[i]) / deltaT;
  eintegral[i] += e * deltaT;

  float u = kp * e + kd * dedt + ki * eintegral[i];

  // Potencia del motor
  float pwr = fabs(u);
  if( pwr > 255 ){
    pwr = 255;
  }
  // Dirección del motor
  int dir = 1;
  if(u<0){
    dir = -1;
  }

  setMotor(i, dir, pwr);
  eprev[i] = e;
}
}

```

```

void setMotor(int motorIndex, int dir, int pwmVal){
  analogWrite(PWM[motorIndex], pwmVal);
  if(dir == 1){
    digitalWrite(IN1[motorIndex],HIGH);
    digitalWrite(IN2[motorIndex],LOW); }
  else if(dir == -1){
    digitalWrite(IN1[motorIndex],LOW);
    digitalWrite(IN2[motorIndex],HIGH);}
  else{
    digitalWrite(IN1[motorIndex],LOW);
    digitalWrite(IN2[motorIndex],LOW); }
}
void doEncodeA0() //Es una función por motor ya que deben especificarse de forma individual
{
  encoderPin2Value[0] = digitalRead(ENCB[0]);
  if (encoderPin2Value[0] == 1) //Clock Wise direction
  {
    posi[0]++; }
  else //else, it is zero... -> Counter Clock Wise direction
  {posi[0]--; }
}
void doEncodeA1()
{
  encoderPin2Value[1] = digitalRead(ENCB[1]);
  if (encoderPin2Value[1] == 1)
  {
    posi[1]++;}
  else {
    posi[1]--;}
}
void doEncodeA2()
{
  encoderPin2Value[3] = digitalRead(ENCB[3]);
  if (encoderPin2Value[3] == 1)
  {
    posi[3]++;}
  else {
    posi[3]--;}
}
void doEncodeA3()
{
  encoderPin2Value[4] = digitalRead(ENCB[4]);
  if (encoderPin2Value[4] == 1)
  {
    posi[4]++;}
  else {
    posi[4]--;}
}
}

```

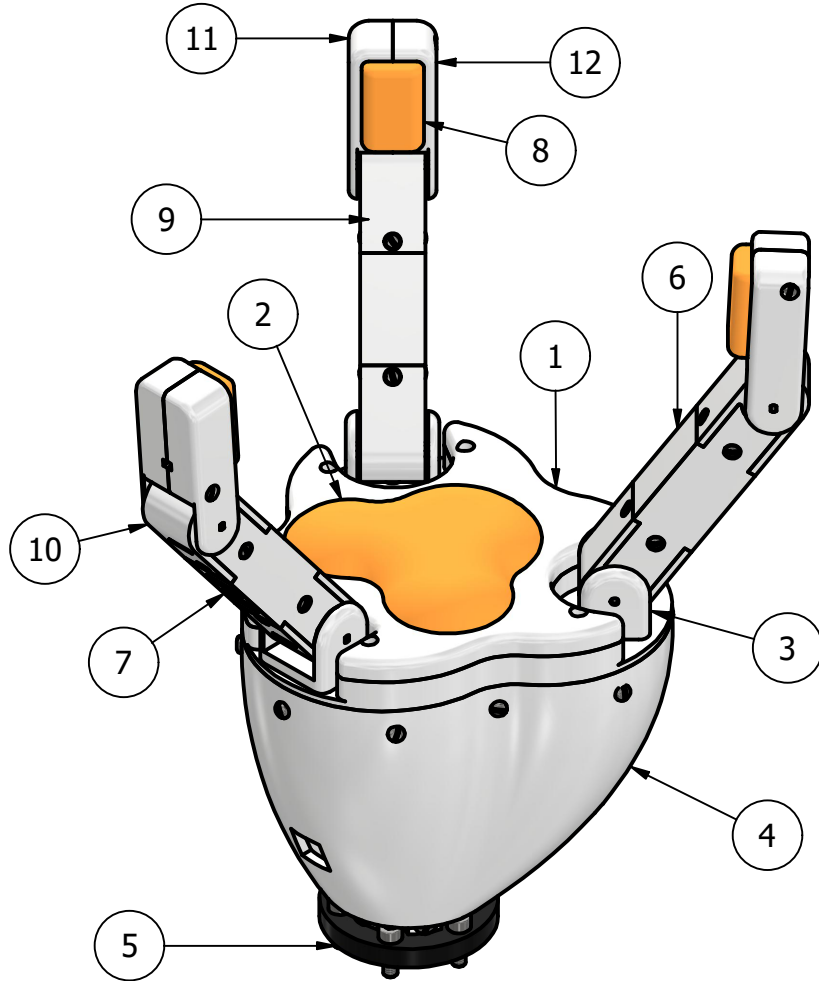
```
void doEncodeA4()
{
  encoderPin2Value[5] = digitalRead(ENCB[5]);

  if (encoderPin2Value[5] == 1)
  {
    posi[5]++;}
  else {
    posi[5]--;}
}
void doEncodeA5()
{
  encoderPin2Value[6] = digitalRead(ENCB[6]);

  if (encoderPin2Value[6] == 1)
  {
    posi[6]++;}
  else{
    posi[6]--;}
}
```

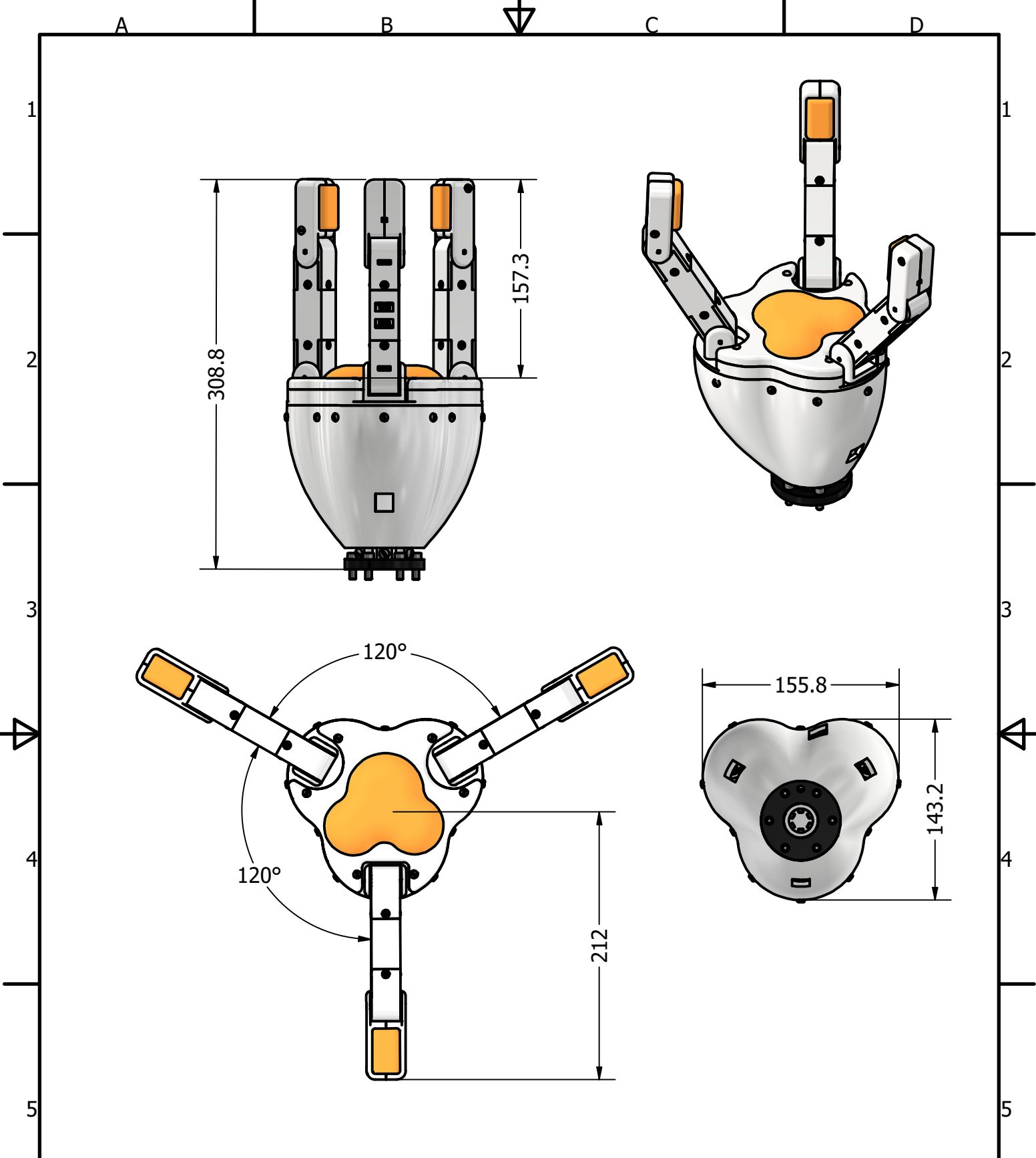
## **Apéndice G**

### **Planos mecánicos**



LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	DESCRIPCIÓN
1	1	Base de la palma
2	1	Membrana de la palma
3	2	Unión Falange - Palma
4	1	Cúpula de la garra
5	1	Acople a brazo robótico
6	3	Falange media P1
7	3	Falange media P2
8	3	Membrana de los dedos
9	6	Acople del motor
10	6	Unión de falanges
11	3	Falange externa P1
12	3	Falange externa P2

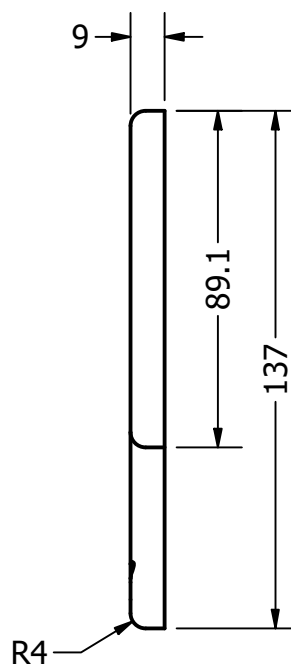
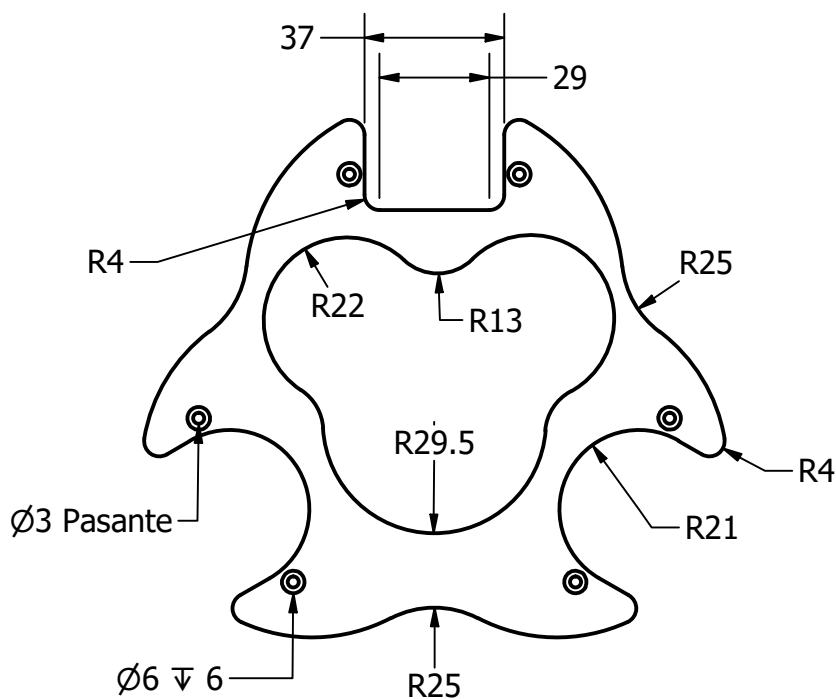
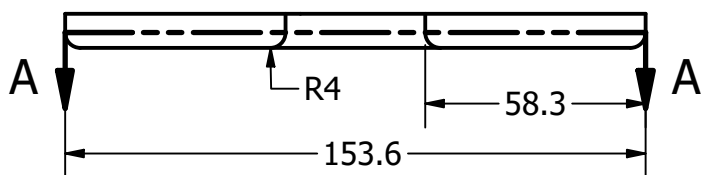
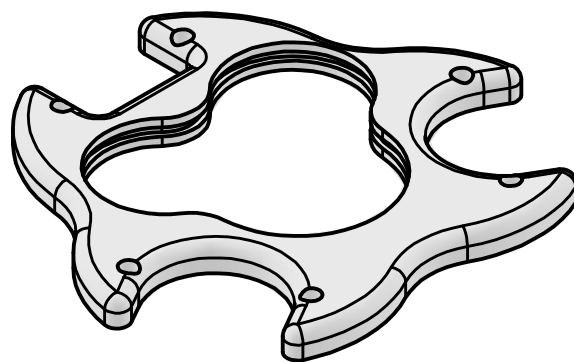
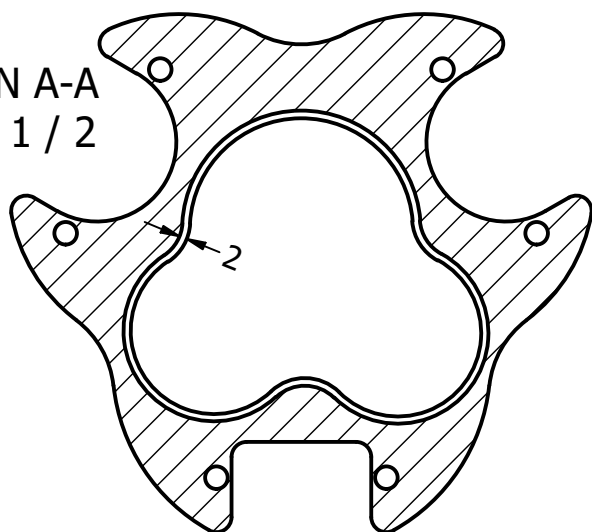
	NOMBRE	FECHA		
Dibujado	Cristóbal Lara Vera	26/08/2023		
	Javier Pagalo Guamán	26/08/2023		
Cliente	Ing. Francisco Yumbra	26/08/2023	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN	
ESCALA 3:8	DIBUJO			
	GARRA ADAPTATIVA DE TRES DEDOS (PARTES)		No 1	UNIDAD n/a



	NOMBRE	FECHA		
Dibujado	Cristóbal Lara Vera	26/08/2023		
	Javier Pagalo Guamán	26/08/2023		
Cliente	Ing. Francisco Yumbra	26/08/2023		
ESCALA 1:4	DIBUJO		FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN	
	GARRA ADAPTATIVA DE TRES DEDOS		Nº 2	UNIDAD mm



SECCIÓN A-A  
ESCALA 1 / 2



	NOMBRE	FECHA
Dibujado	Cristóbal Lara Vera	25/07/2023
	Javier Pagalo Guamán	25/07/2023
Cliente	Ing. Francisco Yumbra	25/07/2023

**espol** Escuela Superior  
Politécnica del Litoral

ESCALA  
1:2

DIBUJO

BASE DE LA PALMA P1

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN

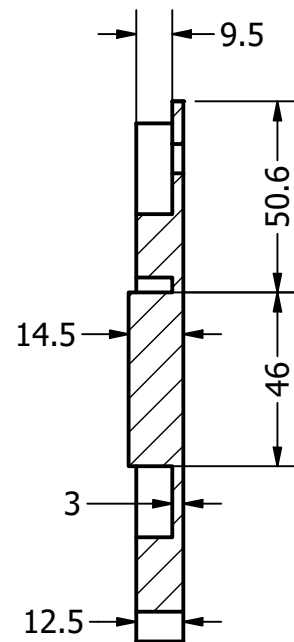
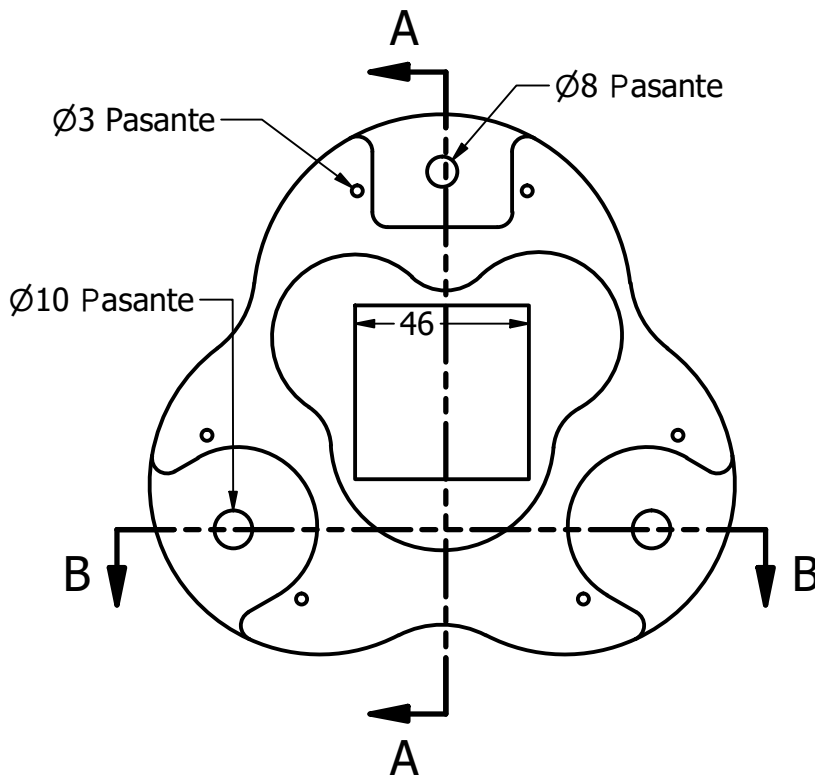
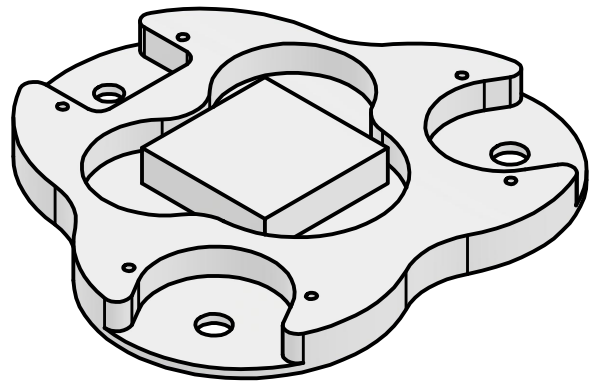
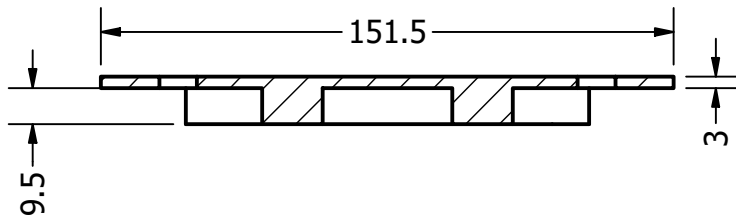


Nº 3

UNIDAD  
mm



SECCIÓN B-B  
ESCALA 1 / 2



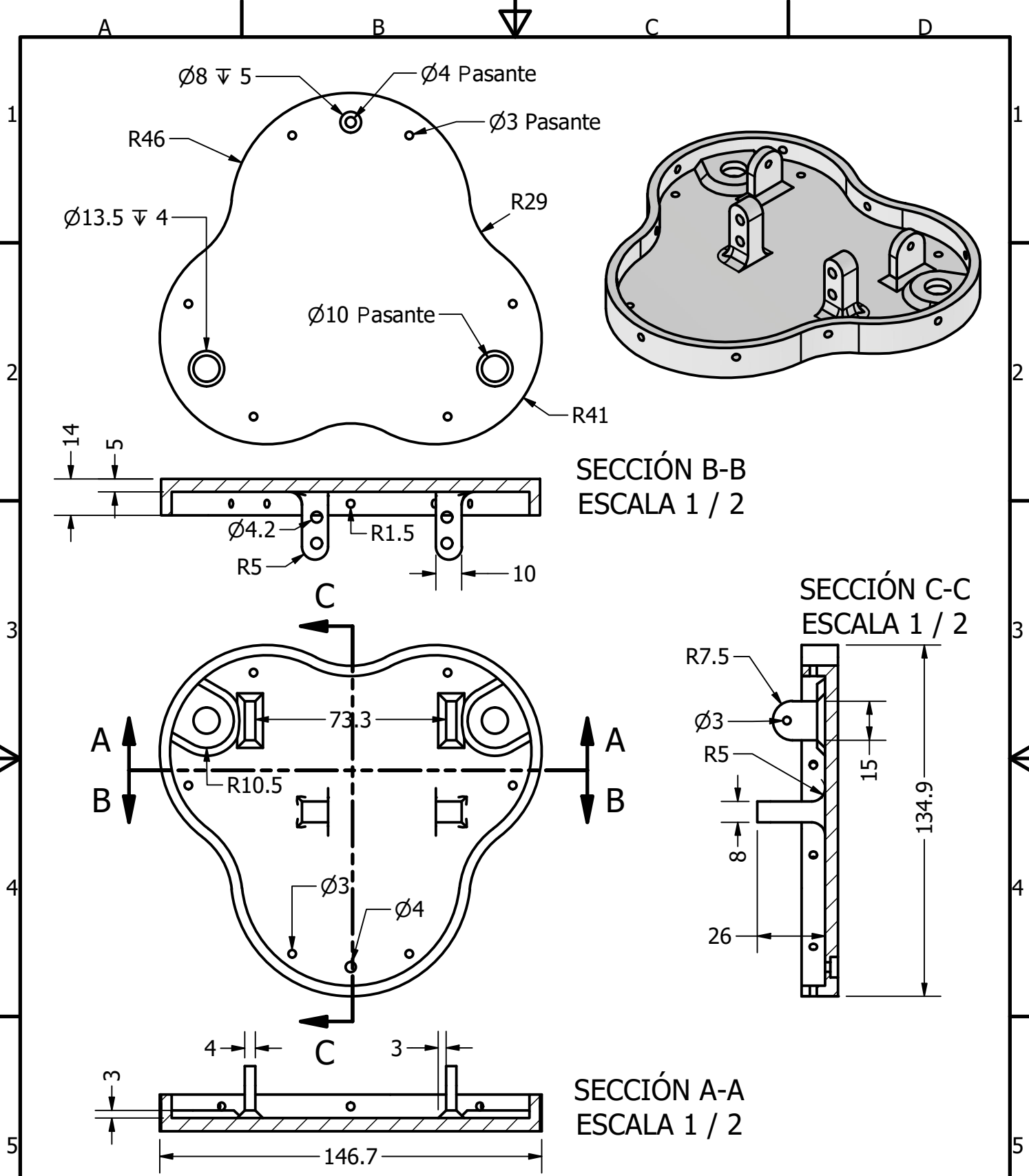
SECCIÓN A-A  
ESCALA 1 / 2

	NOMBRE	FECHA
Dibujado	Cristóbal Lara Vera	26/07/2023
	Javier Pagalo Guamán	26/07/2023
Cliente	Ing. Francisco Yumbla	26/07/2023

**espol** Escuela Superior  
Politécnica del Litoral

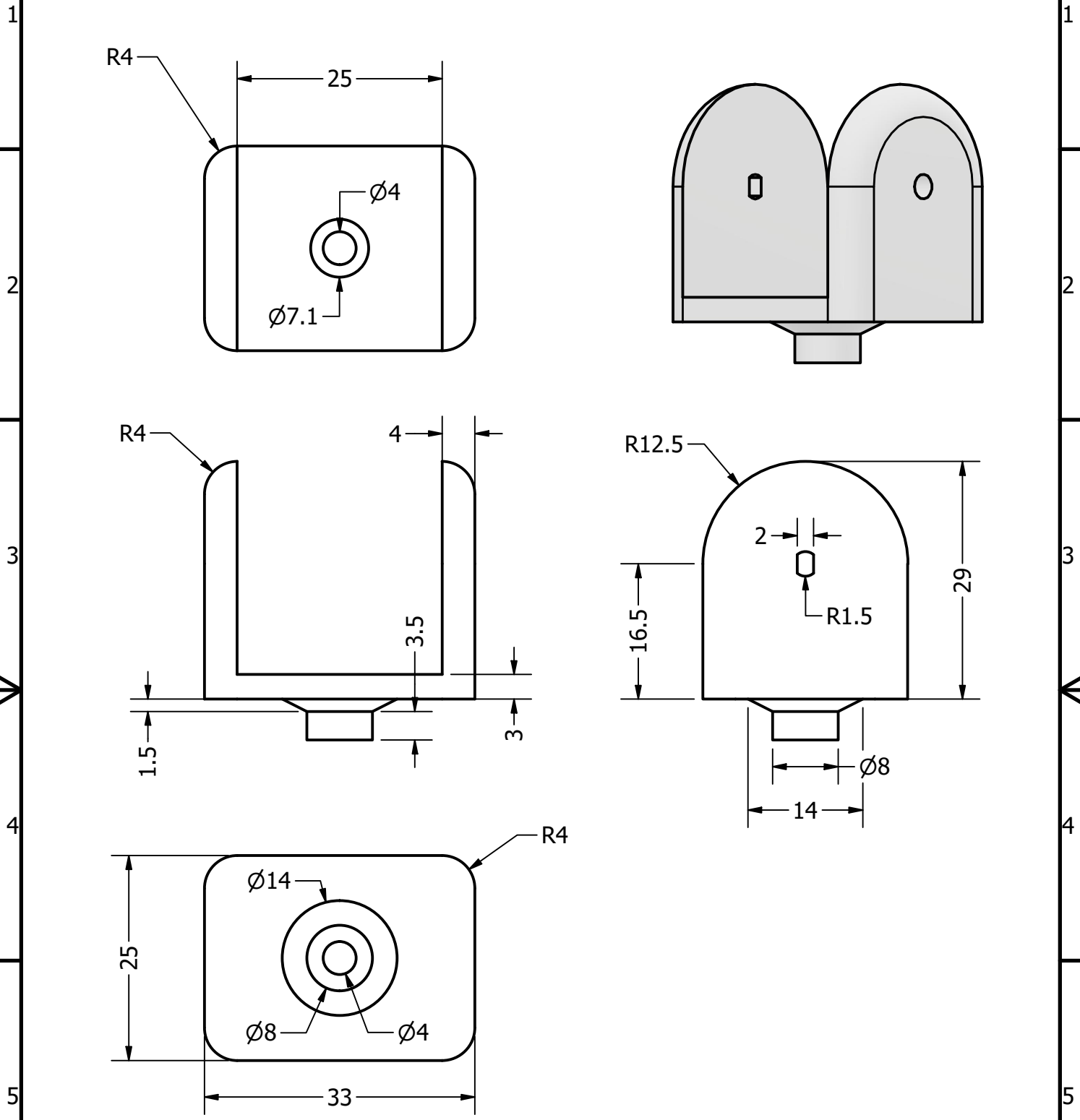
ESCALA 1:2	DIBUJO  BASE DE LA PALMA P2

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN	
Nº 4	UNIDAD mm



NOMBRE		FECHA			
Dibujado	Cristóbal Lara Vera	13/08/2023			
	Javier Pagalo Guamán	13/08/2023			
Cliente	Ing. Francisco Yumbra	13/08/2023			
ESCALA 1:2	DIBUJO			FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN	
BASE DE LA PALMA P3				Nº 5	UNIDAD mm

A B C D



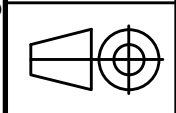
	NOMBRE	FECHA
Dibujado	Cristóbal Lara Vera	13/08/2023
	Javier Pagalo Guamán	13/08/2023
Cliente	Ing. Francisco Yumbla	13/08/2023

**espol** Escuela Superior  
Politécnica del Litoral

ESCALA  
3:2

DIBUJO  
UNION FALANGE - PALMA V1

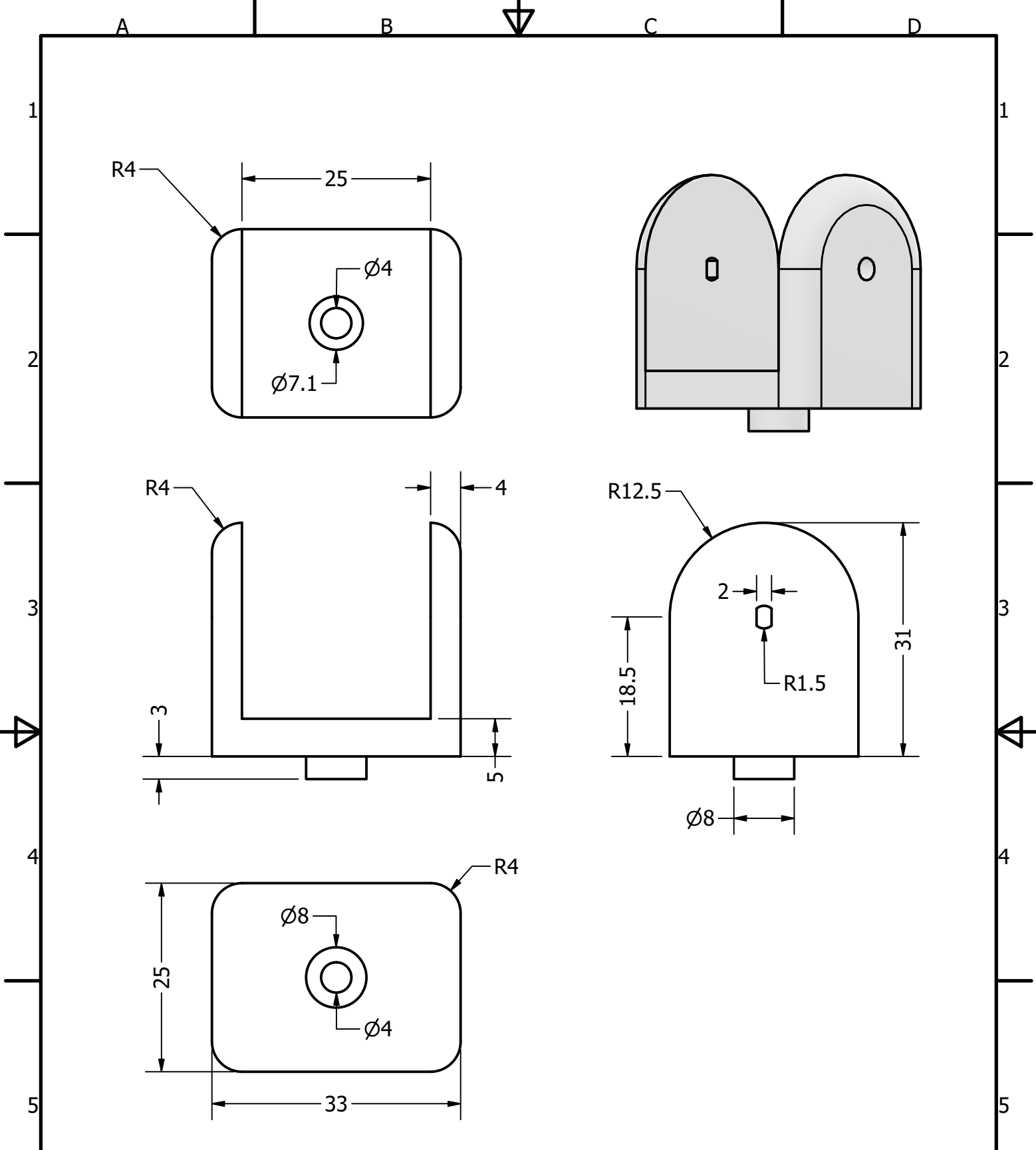
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN



Nº 6

UNIDAD  
mm

A B C D



	NOMBRE	FECHA
Dibujado	Cristóbal Lara Vera	13/08/2023
	Javier Pagalo Guamán	13/08/2023
Cliente	Ing. Francisco Yumbra	13/08/2023

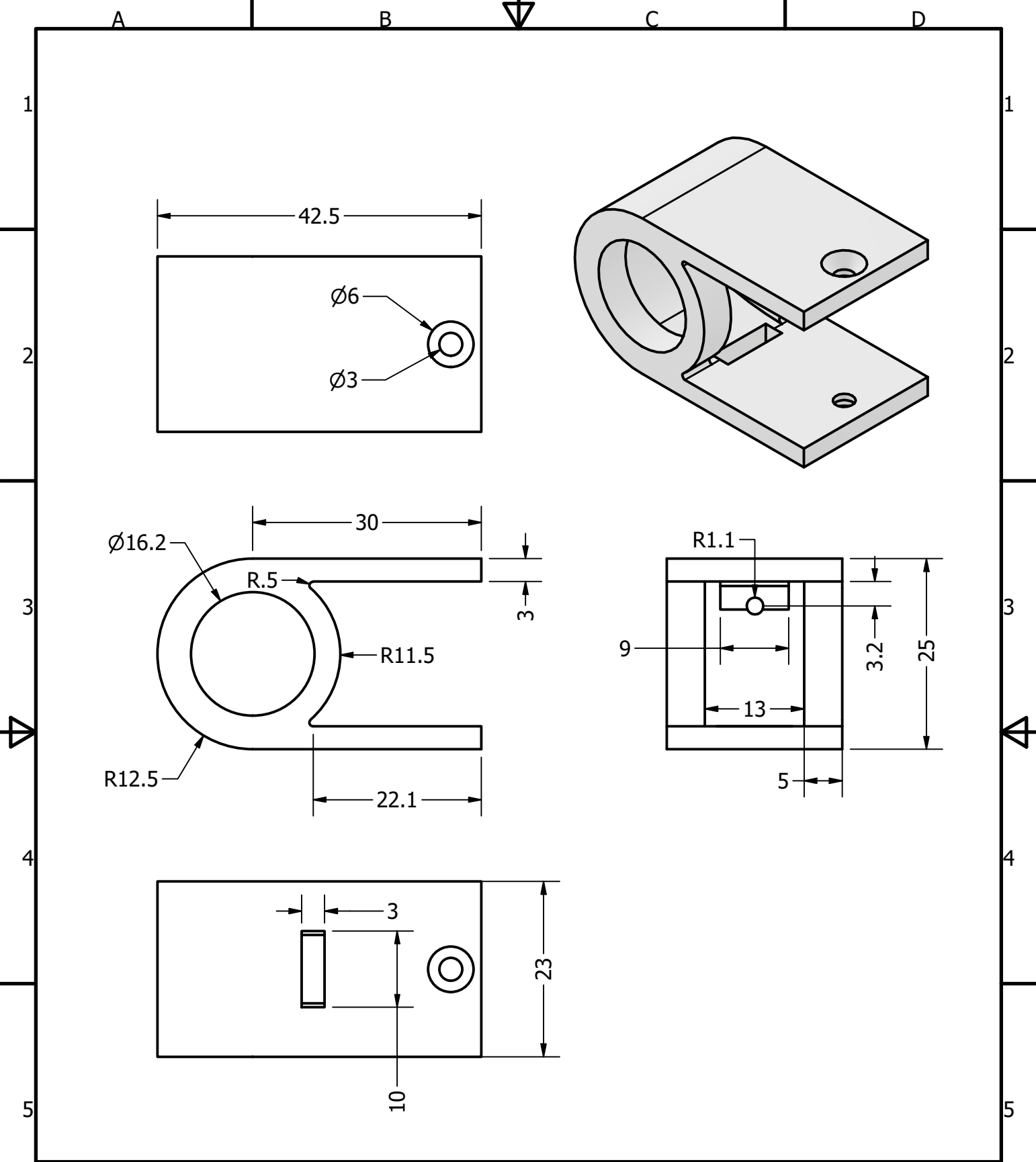
**espol** Escuela Superior  
Politécnica del Litoral

ESCALA  
3:2

**DIBUJO**

UNION FALANGE - PALMA V2

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN	
<b>Nº 7</b>	UNIDAD mm



	NOMBRE	FECHA	
Dibujado	Cristóbal Lara Vera	30/08/2023	
	Javier Pagalo Guamán	30/08/2023	
Cliente	Ing. Francisco Yumbra	30/08/2023	
ESCALA 3:2	DIBUJO		FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN
	UNION DE FALANGES		Nº 8
			UNIDAD mm

A B C D

A

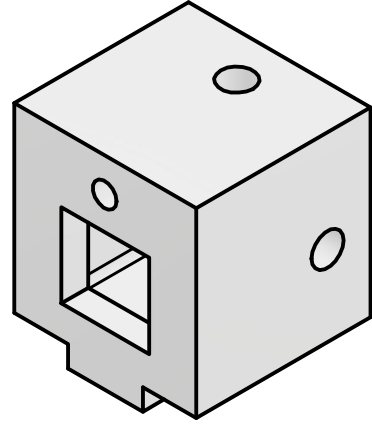
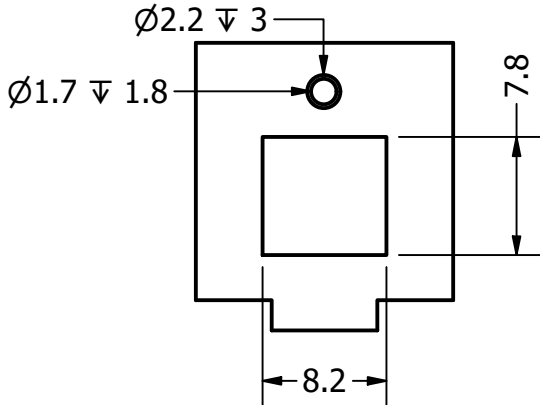
B

C

D

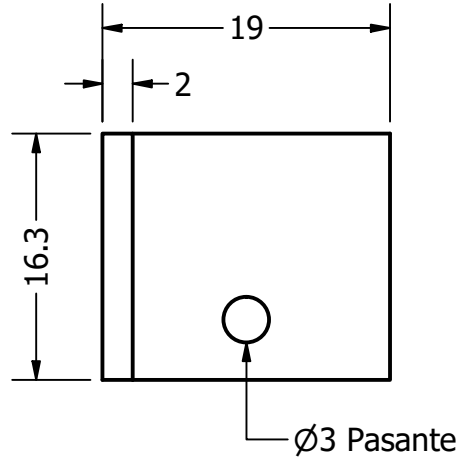
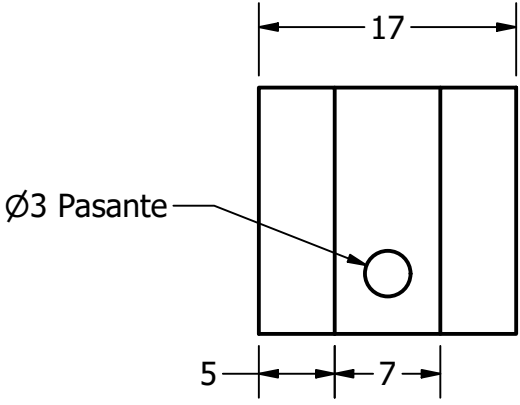
1

1



2

2

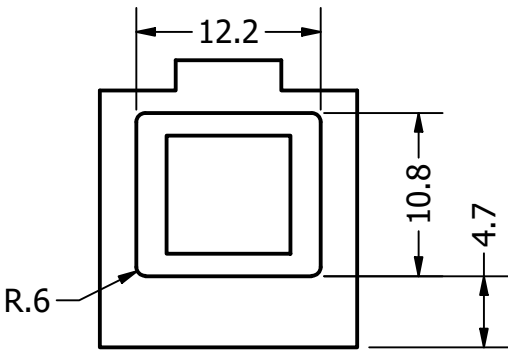


3

3

4

4



5

5

	NOMBRE	FECHA
Dibujado	Cristóbal Lara Vera	14/07/2023
	Javier Pagalo Guamán	14/07/2023
Cliente	Ing. Francisco Yumbra	14/07/2023



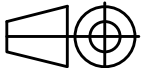
ESCALA  
2:1

DIBUJO  
  
ACOPLE DEL MOTOR

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN

6

6



Nº 9

UNIDAD  
mm

A

B

C

D

A

B

C

D

1

1

2

2

3

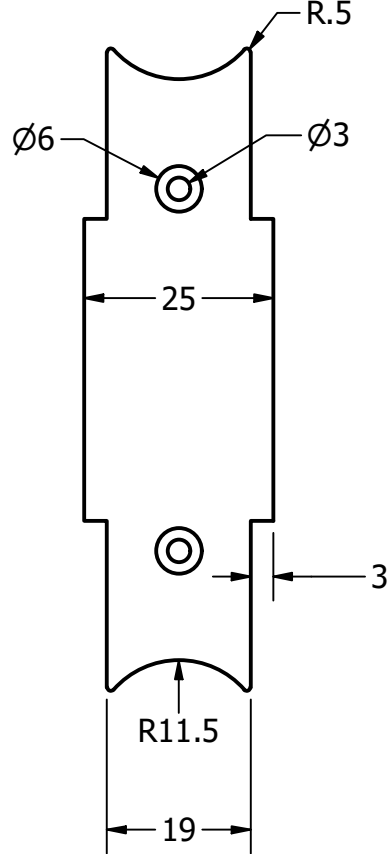
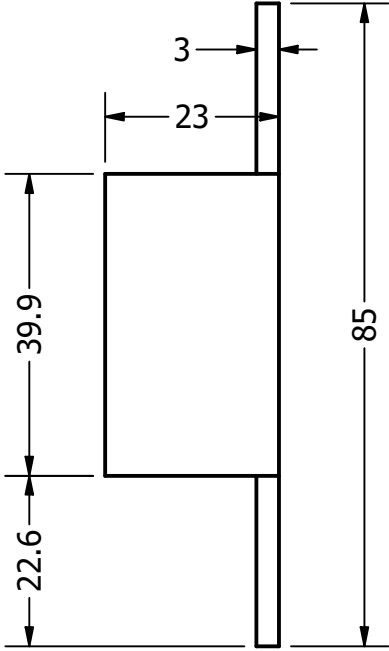
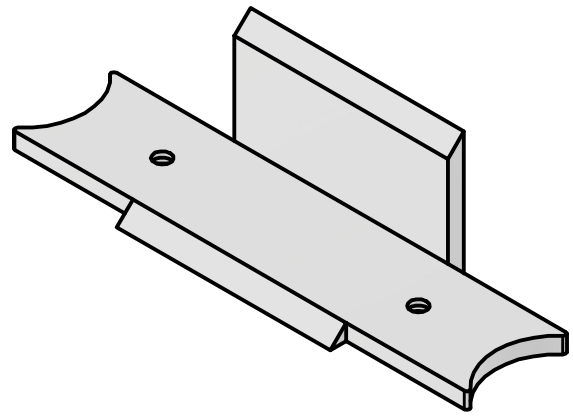
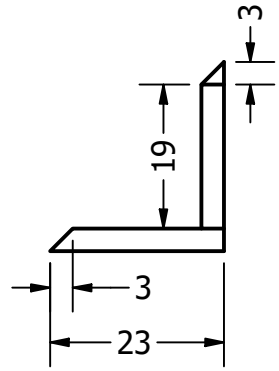
3

4

4

5

5



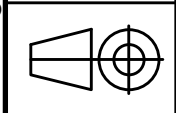
	NOMBRE	FECHA
Dibujado	Cristóbal Lara Vera	13/08/2023
	Javier Pagalo Guamán	13/08/2023
Cliente	Ing. Francisco Yumbra	13/08/2023

**espol** Escuela Superior  
Politécnica del Litoral

ESCALA  
1:1

DIBUJO  
FALANGE MEDIA P1

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN



Nº 10

UNIDAD  
mm

A

B

C

D

6

6

A

B

C

D

1

1

2

2

3

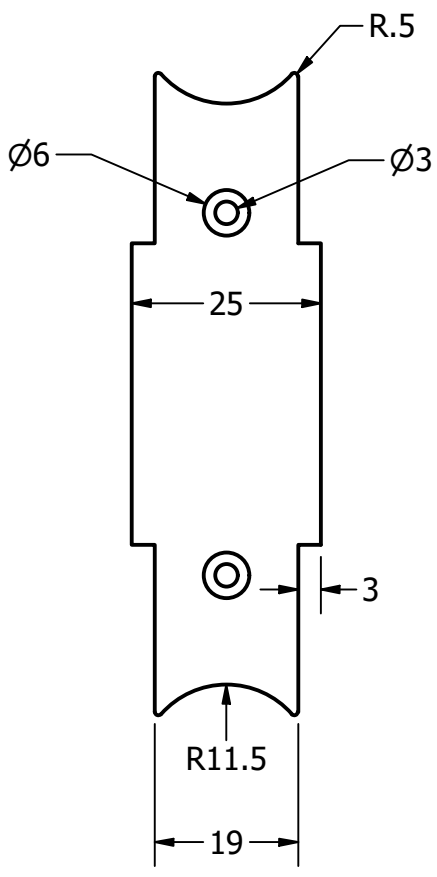
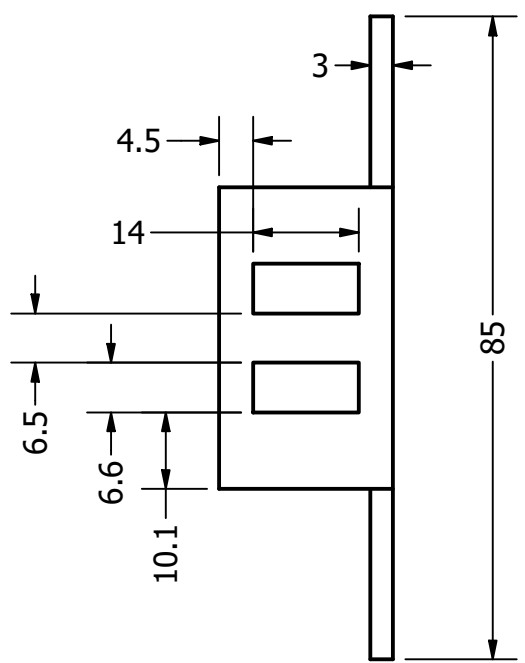
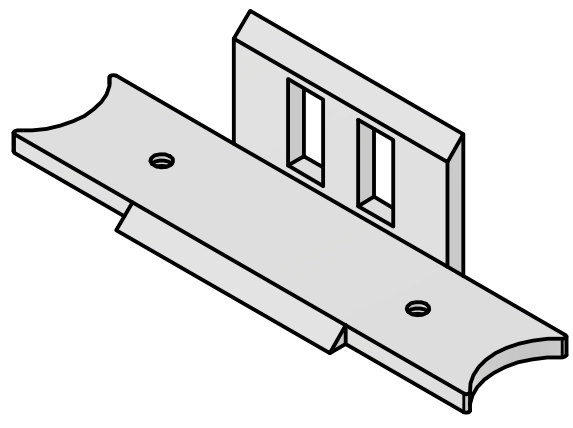
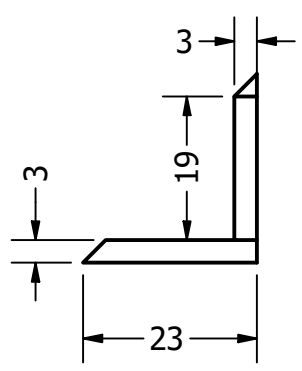
3

4

4

5

5



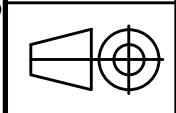
	NOMBRE	FECHA
Dibujado	Cristóbal Lara Vera	13/08/2023
	Javier Pagalo Guamán	13/08/2023
Cliente	Ing. Francisco Yumbra	13/08/2023

**espol** Escuela Superior  
Politécnica del Litoral

ESCALA  
1:1

DIBUJO  
FALANGE MEDIA P2

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN



Nº 11

UNIDAD  
mm

A

B

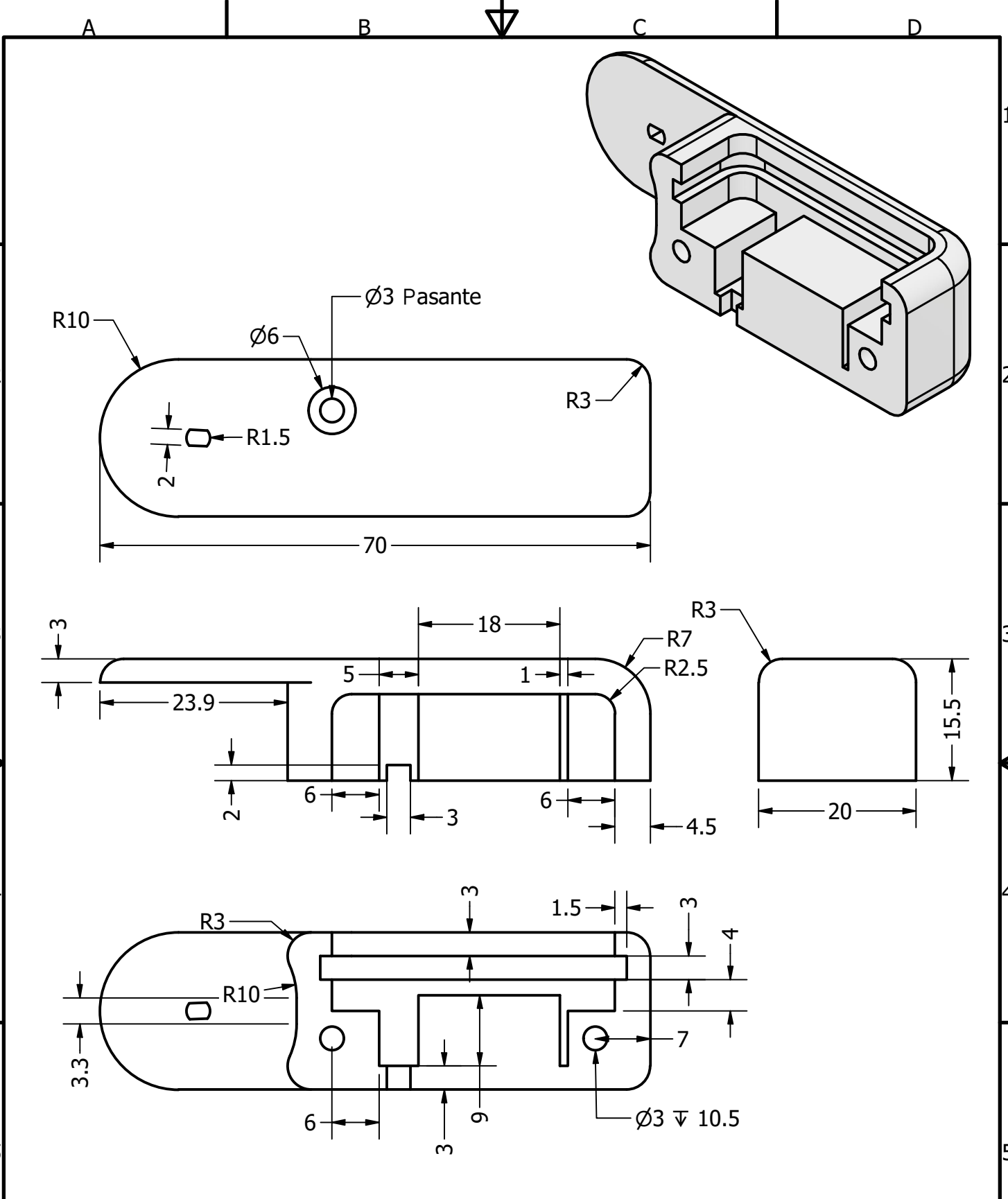
C

D

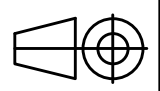
6

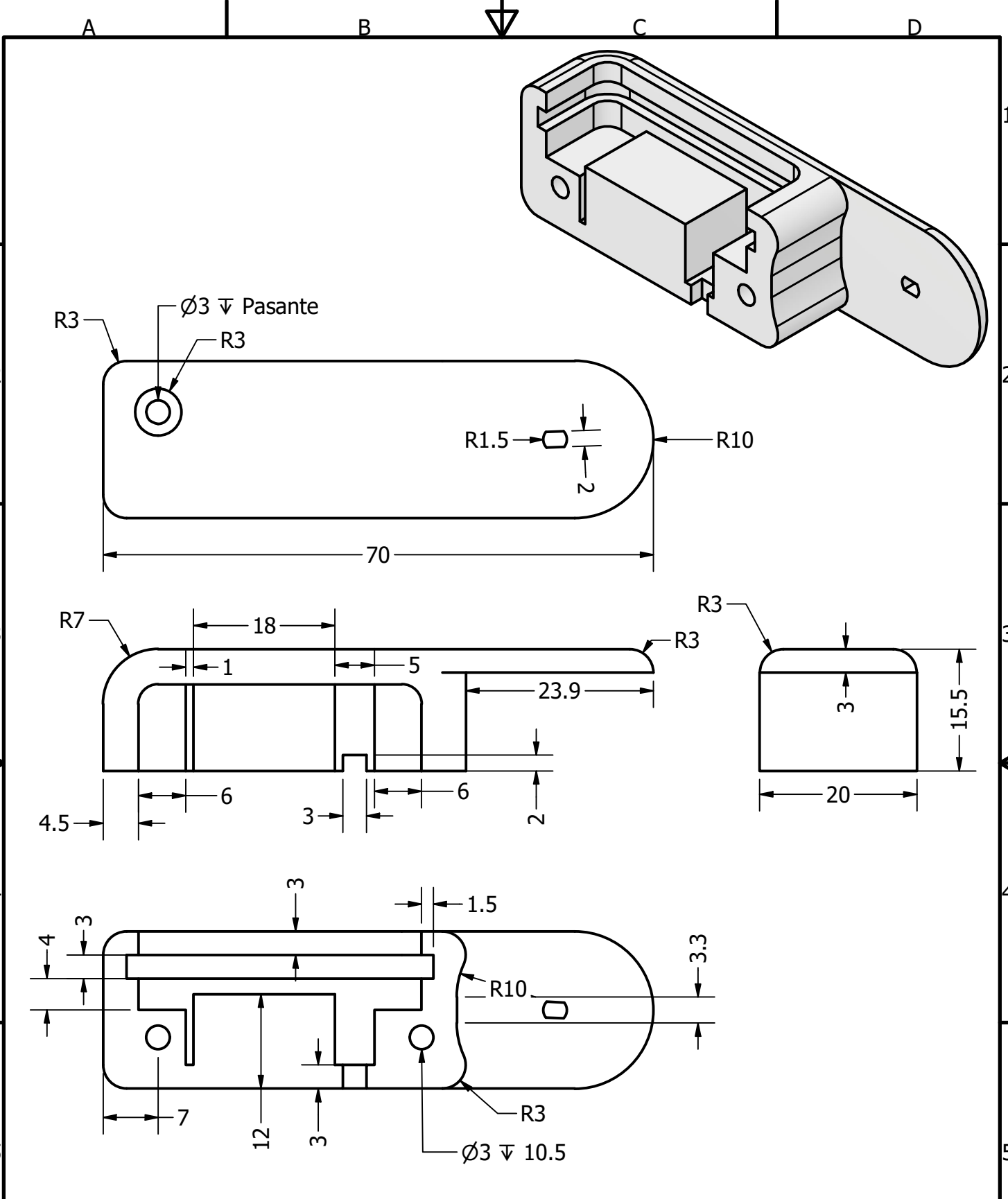
6





	NOMBRE	FECHA	
Dibujado	Cristóbal Lara Vera	25/07/2023	
	Javier Pagalo Guamán	25/07/2023	
Cliente	Ing. Francisco Yumbla	25/07/2023	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN
ESCALA 3:2	DIBUJO		<b>Nº 12</b>
	FALANGE EXTERNA P1		





	NOMBRE	FECHA	
Dibujado	Cristóbal Lara Vera	25/07/2023	
	Javier Pagalo Guamán	25/07/2023	
Cliente	Ing. Francisco Yumbra	25/07/2023	
ESCALA 3:2	DIBUJO		FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN
	FALANGE EXTERNA P2		Nº 13
			UNIDAD mm

A

B

C

D

1

1

2

2

3

3

4

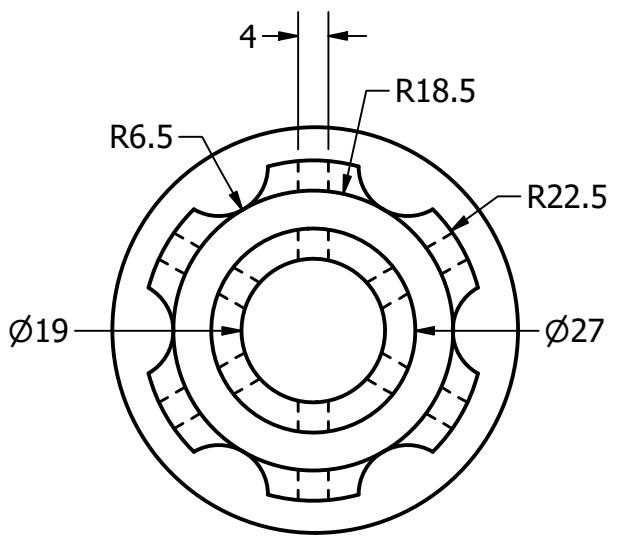
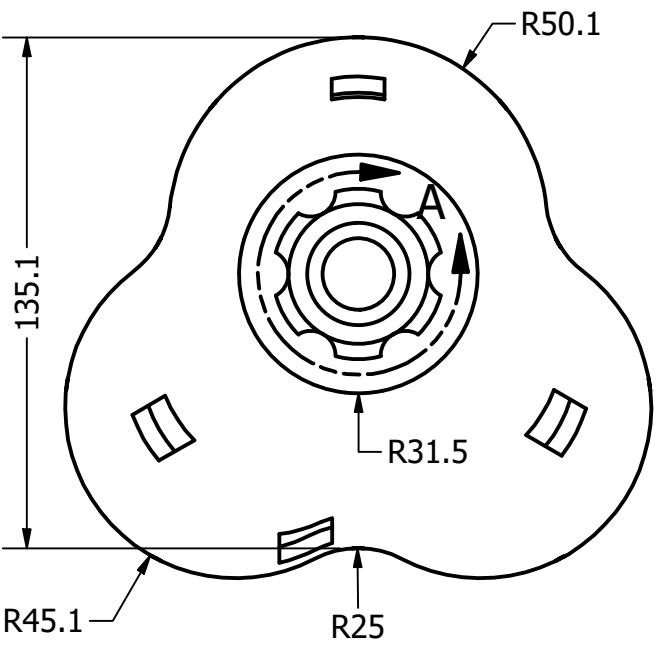
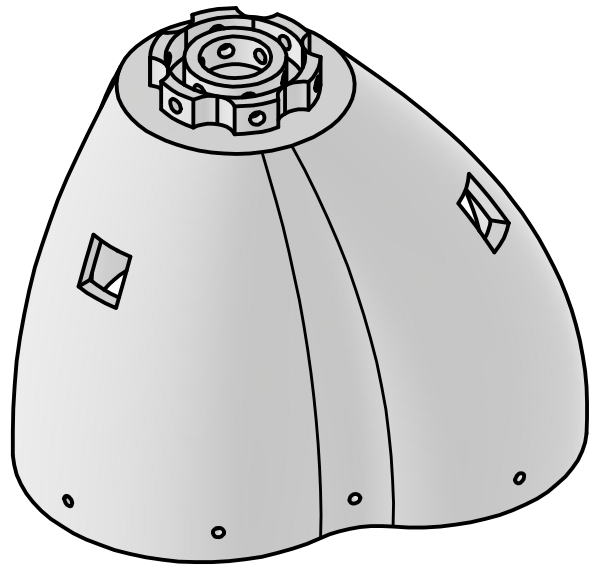
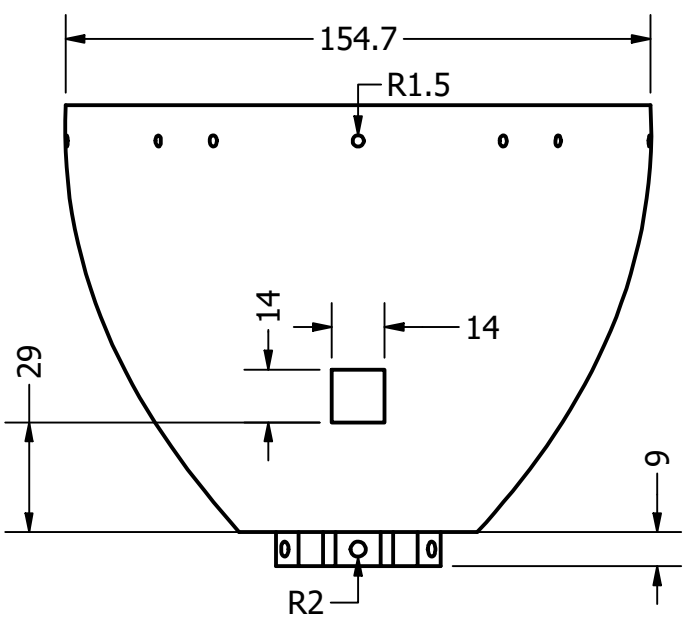
4

5

5

6

6



DETALLE A  
ESCALA 1 : 1

	NOMBRE	FECHA	 <b>Escola Superior Politécnica del Litoral</b>
Dibujado	Cristóbal Lara Vera	14/08/2023	
	Javier Pagalo Guamán	14/08/2023	
Cliente	Ing. Francisco Yumbla	14/08/2023	
ESCALA 1:2	DIBUJO		FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN
	CUPULA DE LA GARRA		Nº 14
			UNIDAD mm

A

B

C

D

A

B

C

D

1

1

2

2

3

3

4

4

5

5

6

6

R5

5.8

1

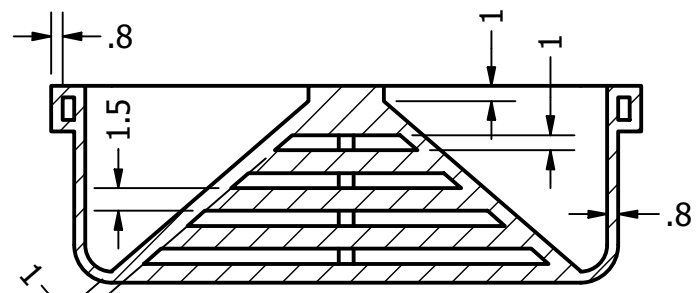
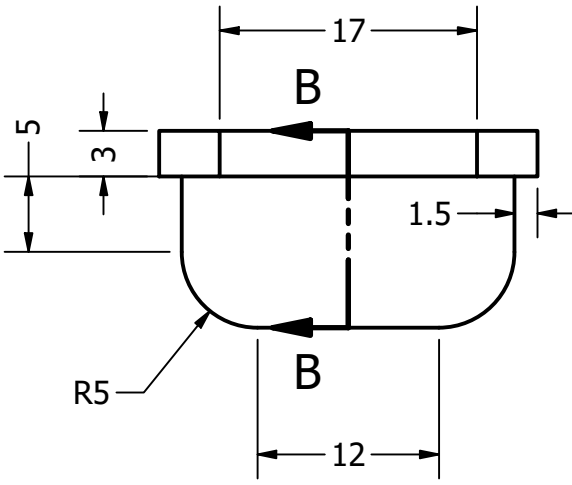
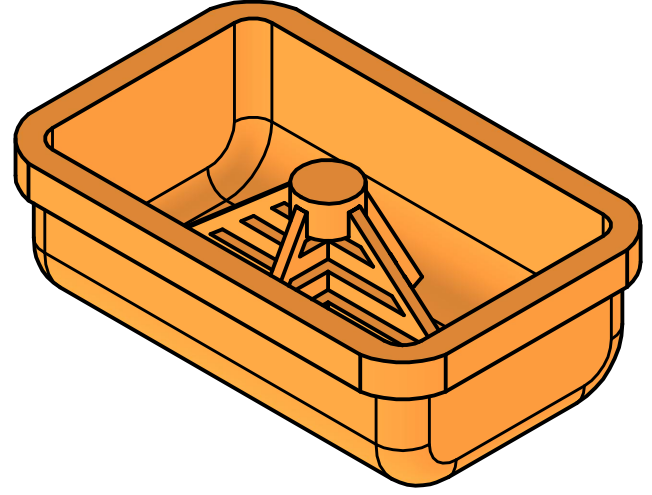
2.3

Ø5

13

39

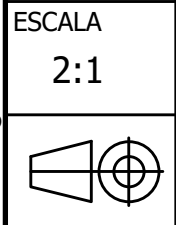
R1.8



SECCIÓN B-B  
ESCALA 2 : 1

	NOMBRE	FECHA
Dibujado	Cristóbal Lara Vera	03/08/2023
	Javier Pagalo Guamán	03/08/2023
Cliente	Ing. Francisco Yumbla	03/08/2023

**espol** Escuela Superior  
Politécnica del Litoral



ESCALA  
2:1

DIBUJO

MEMBRANA DE LOS DEDOS

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN

Nº 15

UNIDAD  
mm

A

B

C

D

A

B

C

D

1

1

2

2

3

3

4

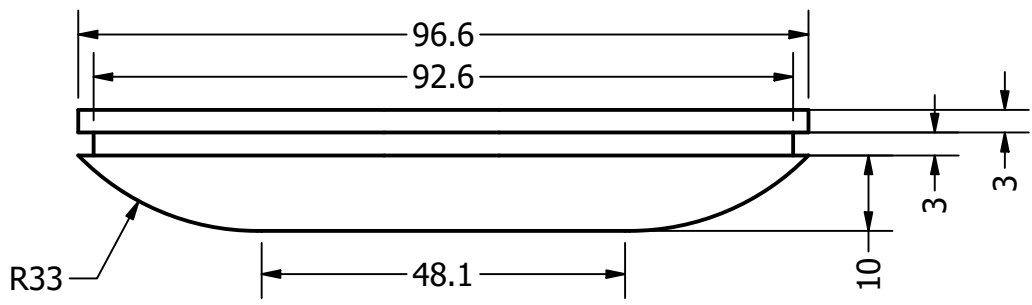
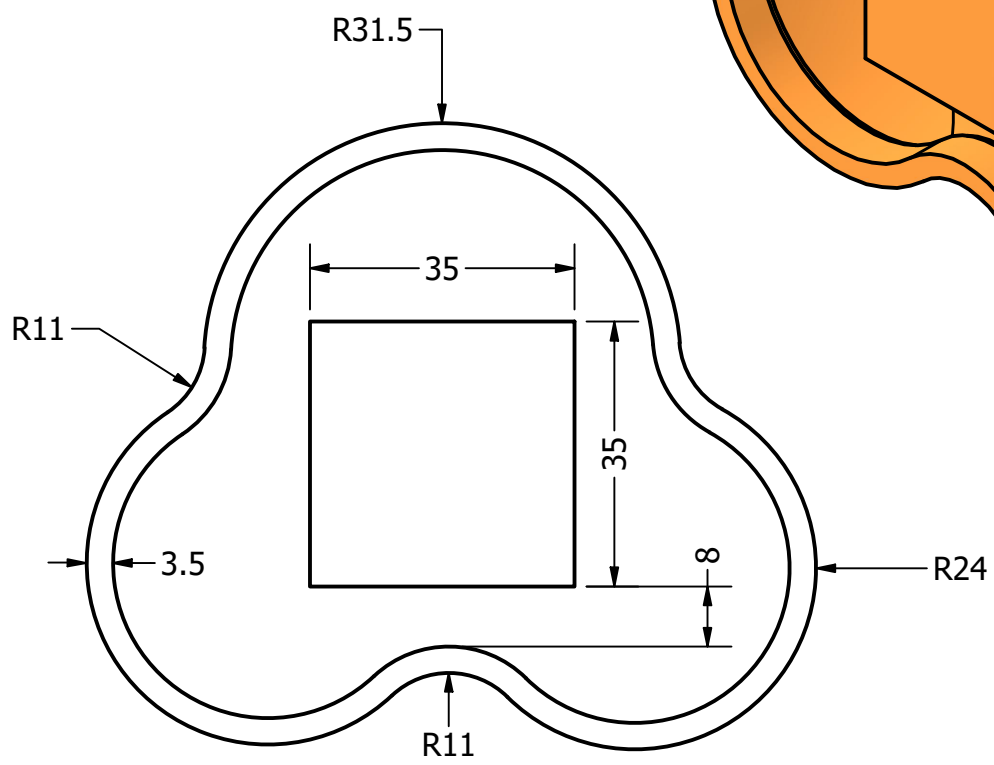
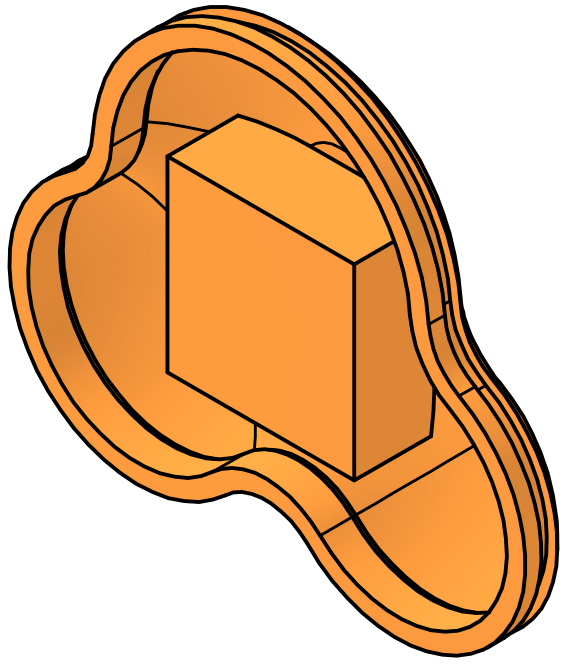
4

5

5

6

6



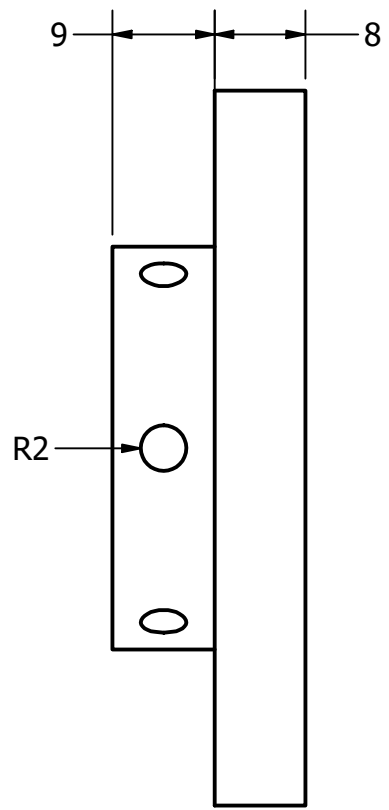
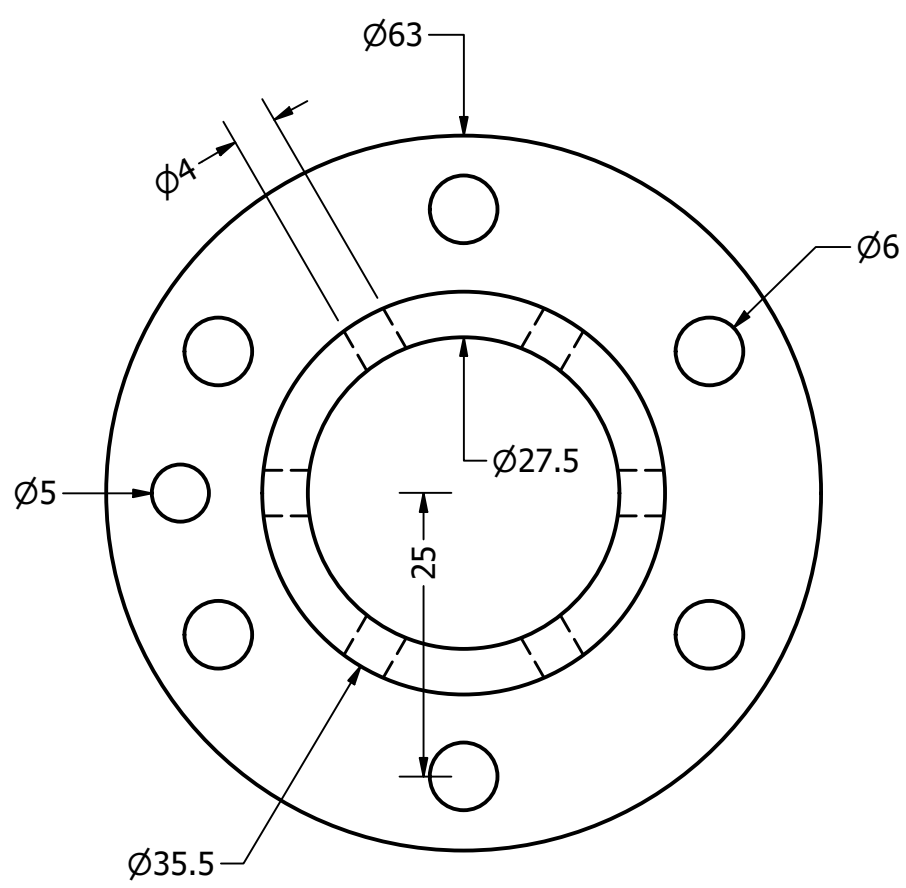
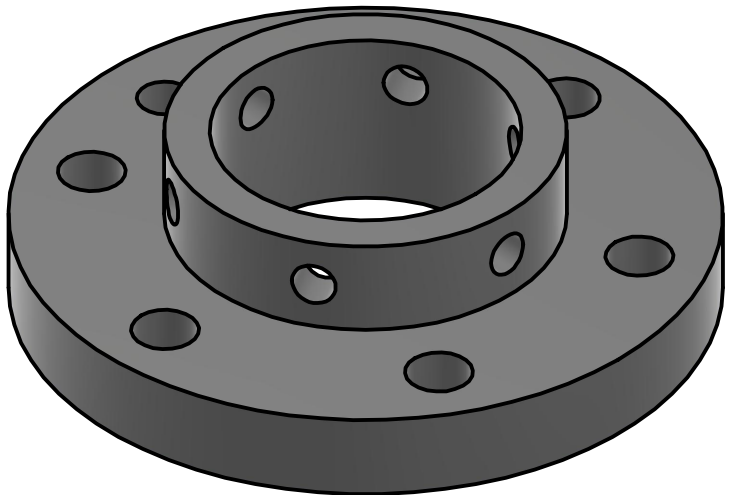
	NOMBRE	FECHA	
Dibujado	Cristóbal Lara Vera	05/08/2023	
	Javier Pagalo Guamán	05/08/2023	
Cliente	Ing. Francisco Yumbla	05/08/2023	
ESCALA 1:1	DIBUJO		FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN
	MEMBRANA DE LA PALMA		Nº 16
			UNIDAD mm

A

B

C

D



	NOMBRE	FECHA
Dibujado	Cristóbal Lara Vera	15/08/2023
	Javier Pagalo Guamán	15/08/2023
Cliente	Ing. Francisco Yumbla	15/08/2023

**espol** Escuela Superior  
Politécnica del Litoral

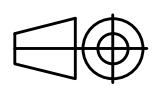
ESCALA  
3:2

DIBUJO  
ACOPLE A BRAZO ROBOTICO

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
Y CIENCIAS DE LA PRODUCCIÓN

Nº 17

UNIDAD  
mm



A B C D

1

1

2

2

3

3

4

4

5

5

6

6

A B C D