

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

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

Diseño de extremidades superiores para un robot de servicio, orientado a la  
interacción humano-robot

INGE-2792

**Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

**Ingenieros en Mecatrónica**

Presentado por:

Oswaldo Andres Alvarado Sotomayor

Dyllan Ricardo Bastidas Palacios

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

## Dedicatoria

---

El trabajo realizado en este documento se lo dedico principalmente a la persona que me permitió seguir con mis estudios a pesar de mi baja condición económica y es a mi abuelito Monfilio Sotomayor, quién lamentablemente en este momento no se encuentra presente entre nosotros.

También le dedico a una persona la cual he considerado mi segundo padre Gerardo Alvarado quien me ha apoyado en todo el camino de mi vida universitaria.

Además, les concedo este trabajo a mis padres Oswaldo Alvarado y Alejandra Sotomayor y a mi hermana Daniela Alvarado, los cuales nunca dudaron de mi capacidad para enfrentar los retos y siempre estuvieron apoyándome hasta los momentos más difíciles que se presentan a lo largo del camino de la vida.

**Oswaldo Alvarado**

## Dedicatoria

---

El presente trabajo se lo dedico a mis padres, William y Verónica, quienes han sido mi apoyo incondicional, motivándome siempre a superarme y a enfrentar con determinación cada obstáculo.

A mi hermana, Doménica, que es una de mis principales fuentes de inspiración.

A mis abuelos cuyo cariño y consejos me han impulsado a seguir adelante.

Especialmente le dedico este trabajo a mi niño interior que siempre soñó con ser ingeniero. A ese pequeño que nunca dejo de creer en sí mismo.

**Dyllan Bastidas P.**

## Agradecimientos

---

Quiero agradecer primeramente a Dios por concederme toda la sabiduría necesaria para superar cada obstáculo presente en mi carrera universitaria.

A toda mi familia, por ilustrarme los valores más esenciales y la fortaleza esencial para no dejarme rendir ante cualquier error cometido a lo largo de mi vida.

A mi segundo hogar ESPOL por formarme como una persona correcta y a seguir los valores de honestidad y respeto que son esenciales en cada momento y cada lugar donde me encuentre.

A mi compañero de tesis Dyllan Bastidas, que enfrentó el reto de tomar este proyecto junto a mí y a mi tutor el Ph.D. Dennys Paillacho que nos brindó el apoyo incondicional y ayuda en los momentos críticos en la realización del presente proyecto.

**Oswaldo Alvarado**

## Agradecimientos

---

Mi más sincero agradecimiento a Luisa Antonella, cuya presencia y motivación a lo largo de este camino han sido fundamentales para la culminación de este trabajo. Gracias por tu paciencia infinita y permanecer junto a mi en cada momento de estrés.

Al Ph.D. Dennys Paillacho, por su guía y conocimientos y al Ing. Joel Hidalgo, por su valioso apoyo y experiencia brindada.

A mi compañero de tesis, Oswaldo Alvarado, por compartir conmigo este camino lleno de retos y aprendizajes.

En especial, a mis amigos del Club de Mecatrónica, quienes hicieron de mi etapa universitaria una de las mejores experiencias de mi vida, brindándome su amistad, apoyo y momentos inolvidables. A todos ellos, mi más profundo agradecimiento.

**Dyllan Bastidas P.**

## Declaración Expresa

---

Yo/Nosotros Oswaldo Andrés Alvarado Sotomayor y Dyllan Ricardo Bastidas Palacios acuerdo/acordamos y reconozco/reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al/los autor/es que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 09 de octubre del 2024.

---

Oswaldo Andrés  
Alvarado Sotomayor

---

Dyllan Ricardo Bastidas  
Palacios

## Evaluadores

---

---

**Jonathan Roberto León Torres, M.Sc**

Profesor de Materia

---

**Dennys Paillacho Chiliza, Ph.D**

Tutor de proyecto

## Resumen

El presente proyecto se centra en el modelamiento de extremidades superiores para un robot de servicio capaz de interactuar con personas, en donde se aborda la problemática de proponer una solución orientada a la protección de los actuadores de sistema y al mismo tiempo incrementar el espacio de trabajo. La metodología utilizada incluye diseño mecánico, diseño de control y diseño de planos electrónicos de conexión, concluyendo con la implementación de uno de los brazos para la validación mediante pruebas de funcionamiento. Se realizaron pruebas experimentales para determinar propiedades mecánicas de la solución propuesta, la cual fue diseñada mediante impresión 3D, disminuyendo los costos de producción haciendo más asequible el producto final al mercado ecuatoriano. La solución final cuenta con dos brazos o extremidades robóticas de 3 grados de libertad cada uno, incluyendo material flexible en cada articulación presente en el brazo, la alimentación del sistema se realiza mediante una batería de litio de 12V logrando autonomía para los actuadores presentes en las articulaciones.

**Palabras Clave:** Flexibilidad, Seguridad, Impresión 3D, Grados de Libertad.

### ***Abstract***

*The present project focuses on modeling upper limbs for a service robot capable of interacting with people. It addresses the challenge of proposing a solution aimed at protecting the system's actuators while simultaneously increasing the workspace. The methodology includes mechanical design, control design, and the development of electronic connection schematics, concluding with the implementation of one of the arms for validation through functional tests. Experimental tests were conducted to determine the mechanical properties of the proposed solution, which was designed using 3D printing to reduce production costs, making the final product more affordable for the Ecuadorian market. The final solution consists of two robotic arms, each with three degrees of freedom, incorporating flexible material in each joint. The system is powered by a 12V lithium battery, providing autonomy for the actuators in the joints.*

*Keywords: Flexibility, Safety, 3D printing, Degrees of Freedom.*

## Índice general

Resumen .....	I
<i>Abstract</i> .....	II
Índice general .....	III
Abreviaturas .....	V
Simbología .....	VI
Índice de figuras .....	VII
Índice de tablas.....	IX
ÍNDICE DE PLANOS .....	X
Capítulo 1 .....	1
1.    Introducción .....	2
1.1    Descripción del Problema.....	3
1.2    Justificación del Problema.....	4
1.3    Objetivos.....	5
1.3.1    Objetivo general .....	5
1.3.2    Objetivos específicos.....	5
1.4    Marco teórico.....	6
1.4.1    Robótica de servicio antecedentes.....	6
1.4.2    Interacción Humano Robot .....	7
1.4.3    Robótica flexible .....	7
1.4.4    Fabricación aditiva .....	8
1.4.5    Sistemas de control existentes.....	10
Capítulo 2 .....	16
2.    Metodología .....	17
2.1    Selección de la alternativa de solución.....	17

2.1.1 Alternativa 1 .....	17
2.1.2 Alternativa 2 .....	17
2.1.3 Alternativa 3 .....	18
2.2 Proceso de diseño .....	19
2.3 Requerimientos del cliente .....	21
2.4 Diseño conceptual.....	21
2.5 Parámetros de diseño mecánico.....	22
2.6 Selección de forma componente flexible.....	24
2.7 Selección de motores .....	25
2.8 Definición de parámetros de control .....	27
2.8.1 Selección de la unidad de control.....	27
2.9 Control cinemático .....	28
Capítulo 3 .....	33
3. Resultados y análisis .....	34
3.1 Diseño mecánico.....	34
3.2 Análisis de rigidez de los elementos SEA .....	35
3.3 Análisis de carga estática de los elementos SEA .....	39
3.4 Sistema de control .....	41
3.5 Análisis de costos .....	46
3.6 Implementación del brazo con articulaciones flexibles.....	47
Capítulo 4 .....	49
4. Conclusiones y recomendaciones.....	50
4.1 Conclusiones.....	50
4.2 Recomendaciones .....	51
5. Referencias .....	52
Apéndices .....	54

### Abreviaturas

CIDIS	Centro de Investigación Desarrollo e Innovación de Sistemas Computacionales
DH	Denavit Hartenberg
DoF	Degrees of Freedom (Grados de Libertad)
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FIR	Federación Internacional de Robótica
IDE	Entorno de Desarrollo Integrado
LA	Lazo abierto
LC	Lazo cerrado
PETG	Polietileno tereftalato de glicol
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
SEA	Series Elastic Actuator (Actuador en serie Elástico)
TPU	Poliuretano termoplástico
VSA	Variable Stiffness actuator (Actuador de Rigidez Variable)

## Simbología

A	Amperio
F	Fuerza
K	Constante de rigidez
N	Newton
T	Torque
V	Voltio
$\Theta$	Rotación eje z
a	Traslación en x
$\alpha$	Rotación eje x
d	Traslación eje z
g	Gravedad
kg	Kilogramo
mg	Miligramo
mm	Milímetro
r	Distancia

## Índice de figuras

Figura 1.1. Maggie, robots de educación y entretenimiento.....	6
Figura 1.2. Modelo flexible en articulaciones del robot. ....	8
Figura 1.3. Modelo flexible en los eslabones del robot. ....	8
Figura 1.4. Sistema de lazo cerrad.....	12
Figura 1.5. Diagrama de bloques del Controlador PID.....	13
Figura 1.6. Diagrama de bloques del controlador en espacio de estados.....	15
Figura 2.1. Metodología del Proyecto Integrador. ....	20
Figura 2.2. Diseño conceptual.....	21
Figura 2.3. Experimento de tiempo versus carga de motor sin componente flexible. ....	22
Figura 2.4. Experimento de tiempo versus carga de motor con componente flexible. ....	22
Figura 2.5. Experimento de rigidez torsional. ....	24
Figura 2.6. Motor Dynamixel AX-12A. ....	25
Figura 2.7. Placa de expansión OpenCM485. ....	28
Figura 2.8. Representación de la cinemática directa e inversa.....	28
Figura 2.9. Representación de las rotaciones del mecanismo. ....	29
Figura 3.1. Diseño 3D del brazo robótico acoplado al robot de servicio Walter. ....	34
Figura 3.2. Diseño 3D del brazo robótico acoplado al robot de servicio Walter. ....	35
Figura 3.3. Gráfica Torque vs desplazamiento SEA semicírculos simétricos (ondulado) .....	36
Figura 3.4. Gráfica Torque vs desplazamiento SEA círculos asimétricos (anillo).....	37
Figura 3.5. Gráfica torque vs desplazamiento SEA anillo-barra.. ....	38
Figura 3.6. Porcentaje de carga de motor con SEA semicírculos simétricos. ....	40
Figura 3.7. Porcentaje de carga de motor sin SEA.....	40
Figura 3.8. Cinemática directa del mecanismo.....	41
Figura 3.9. Posición del brazo simulado a $90^\circ$ en la segunda articulación.....	42
Figura 3.10. Posición del brazo real a $90^\circ$ en la segunda articulación.....	42
Figura 3.11. Posición del brazo simulado a $90^\circ$ en la segunda articulación.....	43
Figura 3.12. Posición del brazo real a $-90^\circ$ en la segunda articulación. ....	43
Figura 3.13. Posición del brazo simulado a $-90^\circ$ en la segunda articulación y $-90^\circ$ en la tercera articulación.....	44
Figura 3.14. Posición del brazo real a $-90^\circ$ en la segunda articulación y $-90^\circ$ en la tercera	

articulación.....	44
Figura 3.15. Implementación del sistema de brazo robótico. ....	48

## Índice de tablas

Tabla 1.1 Propiedades mecánicas del poliuretano termoplastico. ....	9
Tabla 1.2. Propiedades mecánicas del polietilenglicol modificado. ....	9
Tabla 2.1. Criterios de selección. ....	19
Tabla 2.2. Requerimientos de la alternativa de solución seleccionada ....	21
Tabla 2.3. Diversas estructuras de articulación flexible ....	23
Tabla 2.4. Características del motor dynamixel. ....	26
Tabla 2.5. Parámetros de cada eslabón del brazo robótico. ....	30
Tabla 2.6. Variables constantes D-H. ....	30
Tabla 3.1. Datos de diferente carga SEA semicírculos simétricos. ....	36
Tabla 3.2. Datos de diferente carga SEA círculos asimétricos. ....	37
Tabla 3.3. Datos de diferente carga SEA anillo-barra. ....	38
Tabla 3.4. Datos de posición del end effector a 90° en la segunda articulación. ....	45
Tabla 3.5. Datos de posición del end effector a -90° en la segunda articulación. ....	45
Tabla 3.6. Datos de posición del end effector a -90° en la segunda articulación y -90° en la tercera articulación. ....	45
Tabla 3.7. Análisis de costos del proyecto integrador. ....	46

## ÍNDICE DE PLANOS

INGE-2792-1	Vista Estallado de las Piezas.
INGE-2792-1.1	Plano mecánico soporte superior hombro sagital.
INGE-2792-1.2	Plano mecánico soporte posterior hombro sagital.
INGE-2792-1.4	Plano mecánico anillo interior SEA flexible.
INGE-2792-1.5	Plano mecánico soporte delantero hombro sagital.
INGE-2792-1.6	Plano mecánico base posterior.
INGE-2792-1.7	Plano mecánico SEA flexible hombro sagital.
INGE-2792-1.8	Plano mecánico base hombro sagital.
INGE-2792-1.10	Plano mecánico SEA flexible.
INGE-2792-1.11	Plano mecánico base SEA flexible.
INGE-2792-1.12	Plano mecánico anillo exterior SEA flexible.
INGE-2792-1.13	Plano mecánico base.
INGE-2792-1.14	Plano mecánico unión perfil-base.
INGE-2792-2	Plano eléctrico conexiones del sistema.

# Capítulo 1

## 1. INTRODUCCIÓN

Según la Federación Internacional de Robótica (FIR), la robótica de servicio mejorará nuestro estilo de vida. En diversas áreas de interés de sectores comerciales y privados se registró un crecimiento considerable entre los años 2022 y 2023. El uso de esta rama de la robótica en diversas áreas incremento un 30% alcanzando más de 205,000 unidades vendidas [1].

En el territorio ecuatoriano, la robótica social presenta una gran oportunidad de crecimiento y desarrollo tecnológico en entretenimiento y educación. En el año 2020, la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) participó en el Desafío PLAY de educación y economía creativa organizado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) presentando a LOLY-MIDI un robot social que tiene como objetivo motivar el desarrollo cognitivo y social de niños con necesidades educativas especiales, en este evento ESPOL obtuvo el cuarto lugar, por presentar la solución con mayor impacto en desafíos de inclusión en la educación [2].

El desarrollo de los robots de servicio capaces de interactuar con personas presenta un reto en el diseño de las extremidades del robot, ya que son áreas de mayor exposición con los usuarios por lo que muchos de sus actuadores internos son propensos a sufrir daños por manipulación externa no apropiada. Como consecuencia, se tiene pérdidas totales en la funcionalidad del motor afectando directamente al rendimiento del robot social.

## 1.1 Descripción del Problema

El diseño de un robot destinado a interactuar con personas presenta una problemática significativa ya que el uso de materiales rígidos o pesados en los brazos puede causar lesiones durante el contacto externo. Si el diseño no incorpora bordes suaves, flexibilidad o mecanismos de seguridad, el riesgo de daño de los motores aumenta considerablemente [3]. Por otro lado, un diseño mal ejecutado puede dificultar la precisión en los movimientos, lo que reduce la capacidad del robot para realizar interacciones seguras y efectivas con los humanos.

El Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación de Sistemas Computacionales (CIDIS) centro perteneciente a la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), ha desarrollado a Walter, un robot de servicio que promete facilitar interacciones humanas. Actualmente, el robot social cuenta con una capacidad limitada de movimiento ya que tiene brazos de un solo grado de libertad. Además, no cuenta con un diseño que garantice la protección de los motores, ni la seguridad de las personas que puedan interactuar con Walter, dando como resultado una baja eficiencia y poca seguridad.

## 1.2 Justificación del Problema

En la robótica de servicio el diseño del robot se centra en una sola necesidad, permitir que todo el sistema se integre de manera natural, es decir, que el robot pueda integrarse con el ambiente que lo rodea con la finalidad de facilitar interacciones humano-robot [4]. El diseño actual del robot va en contra de esta necesidad ya que es un brazo con un solo grado de libertad lo cual restringe su capacidad de movimiento, por lo que no puede cumplir su objetivo principal que es interactuar con los humanos de una forma adecuada.

Por lo que el incremento de los grados de libertad o, dicho de otra forma, el incremento de su capacidad de movimiento en los brazos surge como una necesidad emergente, con el propósito final de que el robot de servicio tenga más posibilidades de adaptación para expresar gestos básicos.

Por otro lado, la protección de los motores dentro de las articulaciones del brazo resulta importante ya que esto nos permite salvaguardar la vida útil del motor prolongándola aún más de lo habitual, por lo que el otorgarle flexibilidad al sistema o en este caso a los actuadores nos permite garantizar el buen rendimiento del brazo ante escenarios inesperados.

### **1.3 Objetivos**

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

Modelar las extremidades superiores de un robot de servicio, mediante el uso de una cadena cinemática usando materiales flexibles, para una interacción segura y dinámica en entornos domésticos y educativos.

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

- Diseñar las extremidades superiores flexibles del robot de servicio, para la interacción con humanos sin riesgo a accidentes.
- Desarrollar un sistema de control sincronizado de las extremidades superiores, mediante la codificación de funcionalidades básicas.
- Implementar el prototipo de alta resolución de un brazo robótico, para el análisis de funcionalidades básicas desarrolladas en el objetivo específico 2.

## 1.4 Marco teórico

### 1.4.1 Robótica de servicio antecedentes

La robótica de servicio surgió como una respuesta a la necesidad de asistencia en sectores no industriales, con el paso de los años la incorporación de estos en sectores educativos, comerciales y domésticos ha sido evidente ya que fueron diseñados con el propósito de servir al bienestar humano. Por otro lado, a diferencia de los robots industriales que trabajan en ambientes sistemáticos y controlados, los robots de servicio operan en ambientes cambiantes, teniendo que adaptarse a diferentes entornos de operación [5].

**Figura 1.1.**

*Maggie, robots de educación y entretenimiento. [5]*



### ***1.4.2 Interacción Humano Robot***

La interacción humano-robot actualmente constituye una amplia rama de investigación ya que al pertenecer a un campo multidisciplinario existen demasiados retos en los que se puede enfocar la funcionalidad del robot existente. Por tal motivo los paradigmas existentes al interactuar con un robot, las cuales se detallan a continuación [6].

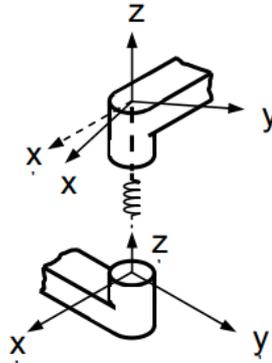
- Robot como herramienta: en este campo el robot se utiliza como una herramienta común para ejecutar tareas puntuales.
- Robot como extensión del cuerpo: en este campo los robots más utilizados son los exoesqueletos o prótesis que mejoran las habilidades del usuario.
- Robot como avatar: en este campo existe una telepresencia, donde la persona manipula al robot a su voluntad en otro entorno.
- Robot como compañero social: en este campo el robot tiene la habilidad de poder comunicarse con el usuario, creando la posibilidad de formar un vínculo.

### ***1.4.3 Robótica flexible***

La robótica flexible surge como solución para realizar tareas que requieran de gran esfuerzo, pero con un espacio limitado para su ejecución. Actualmente, sigue presentando un reto en su control puesto que estos robots incorporan elementos los cuales son difíciles de predecir. Por otro lado, conlleva grandes beneficios, otorgando un grado de flexibilidad a componentes rígidos mejorando en algunos casos las propiedades mecánicas del sistema [7].

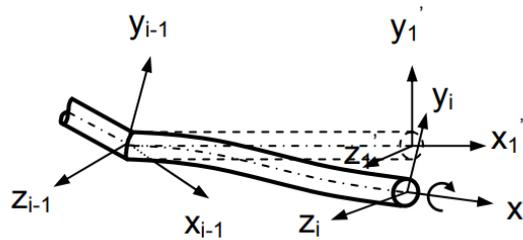
**Figura 1.2.**

*Modelo flexible en articulaciones del robot. [7]*



**Figura 1.3.**

*Modelo flexible en los eslabones del robot. [7]*



#### **1.4.4 Fabricación aditiva**

La fabricación aditiva o también conocida como impresión en 3D es un proceso que se utiliza para crear componentes físicos mediante la inserción de capas de material, una después de otra tomando como base un modelo digital. La fabricación aditiva es muy utilizada en la creación de prototipos pocos convencionales ya que ofrece una respuesta rápida y económica a diferentes profesionales interesados en el área, logrando rápidamente corregir modelos o diseños [8].

##### **1.4.4.1 Poliuretano termoplástico**

El poliuretano termoplástico o conocido por sus siglas en inglés TPU es un tipo de elastómero capaz de soportar compresión y tracción gracias a su gran flexibilidad lo que lo hace mucho mejor a comparación de otros filamentos utilizados en la fabricación aditiva [9].

Tabla 1.1.

*Propiedades mecánicas del poliuretano termoplástico. [10]*

<b>Propiedad</b>	<b>Método de Prueba</b>	<b>Valor Típico</b>
<b>Módulo al 100% (X-Y)</b>	ISO 37, GB/T 528	6.17 ± 0.19 MPa
<b>Resistencia a la tracción (X-Y)</b>	ISO 37, GB/T 528	30.0 ± 0.66 MPa
<b>Elongación a la rotura (X-Y)</b>	ISO 37, GB/T 528	586.8 ± 15.3 %
<b>Dureza Shore</b>	ISO 7619-1, GB/T 531.1	90A

#### ***1.4.4.2 Polietilenglicol modificado***

El polietilenglicol modificado o conocido por sus siglas en inglés PETG es un material con buenas propiedades mecánicas lo que le permite ser un material resistente e ideal para el prototipaje, ya que está diseñado para soportar grandes esfuerzos [11].

Tabla 1.2.

*Propiedades mecánicas del polietilenglicol modificado. [12]*

<b>Propiedad</b>	<b>Método de Prueba</b>	<b>Valor Típico</b>
<b>Módulo de Young (X-Y)</b>	ISO 527, GB/T 1040	1472 ± 270 MPa
<b>Módulo de Young (Z)</b>	ISO 527, GB/T 1040	1087 ± 79 MPa
<b>Resistencia a la tracción (X-Y)</b>	ISO 527, GB/T 1040	31.9 ± 1.1 MPa
<b>Resistencia a la tracción (Z)</b>	ISO 527, GB/T 1040	13.4 ± 2.0 MPa
<b>Elongación a la rotura (X-Y)</b>	ISO 527, GB/T 1040	6.8 ± 0.9 %
<b>Elongación a la rotura (Z)</b>	ISO 527, GB/T 1040	1.3 ± 0.2 %

<b>Módulo de flexión (X-Y)</b>	ISO 178, GB/T 9341	1174 ± 64 MPa
<b>Módulo de flexión (Z)</b>	ISO 178, GB/T 9341	N/A
<b>Resistencia a la flexión (X-Y)</b>	ISO 178, GB/T 9341	53.7 ± 2.4 MPa
<b>Resistencia a la flexión (Z)</b>	ISO 178, GB/T 9341	N/A
<b>Resistencia al impacto Charpy (X-Y)</b>	ISO 179, GB/T 1043	5.1 ± 0.3 kJ/m <sup>2</sup>
<b>Resistencia al impacto Charpy (Z)</b>	ISO 179, GB/T 1043	N/A

#### 1.4.5 *Sistemas de control existentes*

##### 1.4.5.1 *Sistema de control robusto*

En [13] Este tipo de sistema se basa en la obtención de un modelo matemático representativo de una planta o sistema el cual se requiere optimizar o controlar de acuerdo con los sensores o variables de entradas necesarias para su funcionamiento correcto y adecuado.

Existe un margen de error o incertidumbre entre la planta real y el modelo escogido, debido a que al momento de idealizar un modelo existen variaciones o comportamientos muy diferentes entre ellos, por lo que este sistema se ajusta a un funcionamiento adecuado para la planta real basándose en algunas ecuaciones denotadas a continuación:

$$\tilde{G}(s) = G(s)[1 + \Delta(s)]$$

$\tilde{G}(s)$  = modelo de la planta real que mantiene una incertidumbre  $\Delta(s)$

$G(s)$  = modelo de la planta nominal que se utiliza en el diseño del sistema de control.

La ecuación denotada anteriormente relaciona con un factor multiplicativo la planta real y la planta nominal. Aparte existe otro factor aditivo que se lo utiliza para previamente encontrar otra aproximación la cual se denota así:

$$\tilde{G}(s) = G(s) + \Delta(s)$$

Además, existe una estimación acerca de la incertidumbre previamente mencionada se hace el uso de una transferencia escalar de tipo:

$$\|\Delta(s)\|_{\infty} < \|W(s)\|_{\infty} = \max_{0 \leq \omega \leq \infty} |W(j\omega)|$$

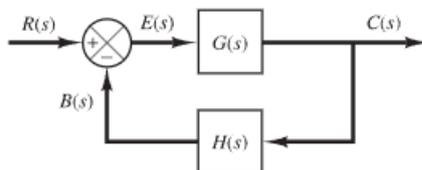
#### ***1.4.5.2 Sistema de control en lazo cerrado***

Por otro lado, este sistema se basa en la alimentación al controlador mediante la señal de error de actuación, es decir, la diferencia existente entre la señal de entrada al sistema y la señal que retroalimenta (que puede ser la propia señal de salida o una función propia de la señal de salida y sus derivadas y/o integrales). El propósito de este tipo de sistema se basa en ajustar la señal de salida de tal manera que se vaya reduciendo paulatinamente el error generado entre estas dos señales hasta llevarlo a un valor óptimo o más cercano entre ellos. La estructura de este tipo de sistema se basa en que la salida se realimenta al punto de suma del sistema, en donde se produce la comparación entre ésta y la señal de referencia o señal entrante [13].

A continuación, se expone el diagrama de bloques que representa el sistema en lazo cerrado:

Figura 1.4.

*Sistema de lazo cerrado. [13]*



En términos matemáticos, el modelo presentado anteriormente en la Figura 1.2 se la puede representar en términos de función de transferencia de modo que la relación entre  $C(s)$  y  $R(s)$  queda de la siguiente manera:

$$C(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} R(s)$$

Esta relación indica que el sistema depende claramente tanto de la función de transferencia en lazo cerrado como del comportamiento de la entrada del sistema.

#### **1.4.5.3 Sistema de control en lazo abierto**

Cuando el efecto de salida de una planta o un sistema no afecta sobre la acción de control de un actuador se denomina un sistema de control de lazo abierto. Es decir, en este tipo de sistema no se mide la salida ni se realiza una realimentación para su debida comparación con la señal de entrada como lo hace el sistema de control de lazo cerrado.

Particularmente cada señal de referencia entrante se le atribuye una condición de operación fija; por lo tanto, la precisión de la actuación del sistema se depende de la calibración que se tenga en el actuador, así como también cuando se presentan perturbaciones en el proceso afecta instantáneamente la condición de operación lo que hace que el sistema no realice la tarea adecuadamente.

En términos matemáticos la función de transferencia de este sistema de control viene representada de la siguiente forma:

$$\frac{B(s)}{E(s)} = G(s)H(s)$$

La ecuación previamente mencionada detalla el cociente de la señal de realimentación  $B(s)$  ante la señal de error  $E(s)$  dando como resultado lo esperado.

#### 1.4.5.4 Sistema de control proporcional-integral-derivativo

El sistema de control detalla una combinación de las acciones proporcionales, integrales y derivativas del sistema propuesto el cual se lo denomina por sus siglas PID.

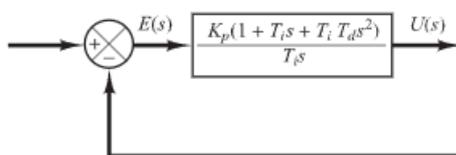
La estructura se la maneja de la siguiente ecuación:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

En donde,  $K_p$  vendría a ser la ganancia proporcional,  $T_i$  la ganancia o tiempo integrales y  $T_d$  la ganancia derivativa o tiempo derivativo. A continuación, se presenta el diagrama de bloques detallado del sistema [13].

**Figura 1.5.**

*Diagrama de bloques del controlador PID. [13]*



La unión de cada una de las combinaciones permite ajustar adecuadamente las medidas de ganancias del sistema proporcionando mejoras en la respuesta a una entrada de referencia, así como también ajustarse mediante combinaciones a perturbaciones que pueden ocurrir en el sistema, ya que en la realidad se observan variaciones entrantes en el sistema de producción [13].

#### 1.4.5.5 Sistema de control en espacio de estados

El sistema presentado mantiene la particularidad de trabajar con ecuaciones diferenciales traducidas a la asignación en espacio de estados, es decir, se basa en que la complejidad del sistema lo traducen a matrices dependiendo del sistema que se está estudiando. Para poder establecer la estructura del sistema se destacan definiciones esenciales para la comprensión [13].

- **Estado:** Se define como el conjunto de variables de estado que intervienen en el sistema que se está estudiando, determinando el comportamiento y funcionamiento.
- **Variable de estado:** Se define como las variables necesarias para determinar el funcionamiento completo de un sistema dinámico, denotándose que un determinado  $n$  variables representa un conjunto de variables de estado.
- **Vector de estado:** Se define como la cantidad de variables de estado que pueden representar las componentes de un vector  $\mathbf{v}$ . el cuál es el encargado de determinar el estado del sistema  $\mathbf{v}(t)$  en cualquier instante del tiempo.
- **Espacio de estados:** Se define como el espacio  $n$ -dimensional donde  $x_1, x_2, \dots, x_n$  son las variables de estado denotando el espacio de estados respectivo.

Las ecuaciones del sistema aparecen al haber realizado un estudio del modelo matemático del sistema incluyendo la linealización de las ecuaciones y permitiendo la simplificación de cada uno de ellos. A partir de aquí se presentan las ecuaciones características del sistema:

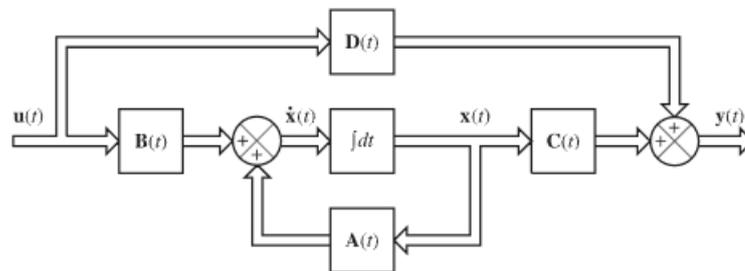
$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}(t)\mathbf{u}(t)$$

En donde A representa la matriz de estados, B la matriz de entrada del sistema, C la matriz de salida del sistema y D la matriz de transmisión directa. A partir de esto se puede encontrar el diagrama de bloques representante del sistema quedando de la siguiente forma:

**Figura 1.6.**

*Diagrama de bloques del controlador en espacio de estados. [13]*



## **Capítulo 2**

## **2. METODOLOGÍA**

Con base en la investigación desarrollada en el capítulo anterior, en este apartado se expone detalladamente el procedimiento seguido para alcanzar el objetivo establecido en el presente proyecto. Cada fase del estudio comprende una serie de pasos que deben cumplirse rigurosamente. Por ello, la descripción de cada uno de estos pasos resulta fundamental para la selección de una alternativa funcional y viable que permita resolver el problema planteado. En este proceso, se lleva a cabo la identificación de los requerimientos esenciales del sistema, seguida de la selección de los componentes mecánicos, eléctricos, electrónicos y de control necesarios para la construcción del diseño propuesto.

### **2.1 Selección de la alternativa de solución**

Con base a la problemática planteada en el apartado anterior, se han definido tres alternativas tentativas de solución para el desarrollo y control del brazo robótico con articulaciones flexibles, a continuación, se detalla cada una:

#### **2.1.1 *Alternativa 1***

Diseño y control de un brazo robótico compuesto por una cadena cinemática de eslabones, otorgándole flexibilidad al sistema.

#### **2.1.2 *Alternativa 2***

Diseño y control del brazo robótico con la implementación de un actuador en serie elástico (SEA), el cual le brinda cierta flexibilidad a la junta y el motor ejerciendo una interacción humano-robot.

### 2.1.3 *Alternativa 3*

Diseño y control del brazo robótico con la implementación de un actuador con rigidez variable (VSA), el cual brinda ajustes de rigidez y de la posición de forma independiente.

Una vez expuestas cada una de las alternativas de solución, se establecieron los criterios de selección que permitirán evaluar la alternativa más conveniente según la prioridad asignada a cada criterio. Esto se demuestra a continuación en la Tabla 2.1. A partir de esto se reflejará una pequeña explicación de cada uno:

- **Peso:** La cantidad de masa constituyente del implemento que tendría la junta para su funcionamiento.
- **Costo:** Constituye al menor valor del material y la fabricación de la pieza que estaría formando parte de la junta en cada parte del brazo.
- **Flexibilidad:** Capacidad de amortiguamiento que ejerce el elemento al momento de someterse a una carga externa.
- **Diseño:** Referente a la forma, tamaño o disposición de la solución final.
- **Control:** Facilidad de realizar movimientos suaves y continuos al establecerse cierto movimiento.

Tabla 2.1.

Criterios de selección.

Criterio	Peso	Costo	Diseño	Flexibilidad	Control	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Peso</b>	-	1	1	0.5	1	4.5	<b>0.3</b>
<b>Costo</b>	0	-	0	0	0	1	<b>0.066666667</b>
<b>Diseño</b>	0	1	-	0.5	0	2.5	<b>0.166666667</b>
<b>Flexibilidad</b>	0.5	1	0.5	-	1	4	<b>0.266666667</b>
<b>Control</b>	0	1	1	0	-	3	<b>0.2</b>
<b>Suma Total</b>						15	<b>1</b>

## 2.2 Proceso de diseño

Con base en los criterios establecidos, se evaluaron cada una de las alternativas propuestas anteriormente. Después del análisis efectuado, se decidió seleccionar la alternativa 2, pues resultó ser la opción más adecuada para el caso presentado. El principal motivo de la elección fue la viabilidad en fabricación, teniendo en cuenta los recursos locales y las tecnologías presentes. Como resultado, el diseño se mantuvo sencillo y adaptable, de tal manera que, en el caso de falla de algún componente sea fácil de reemplazar. Los resultados de la evaluación mencionada anteriormente se reflejan en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2.

Matriz de decisión de las alternativas de solución.

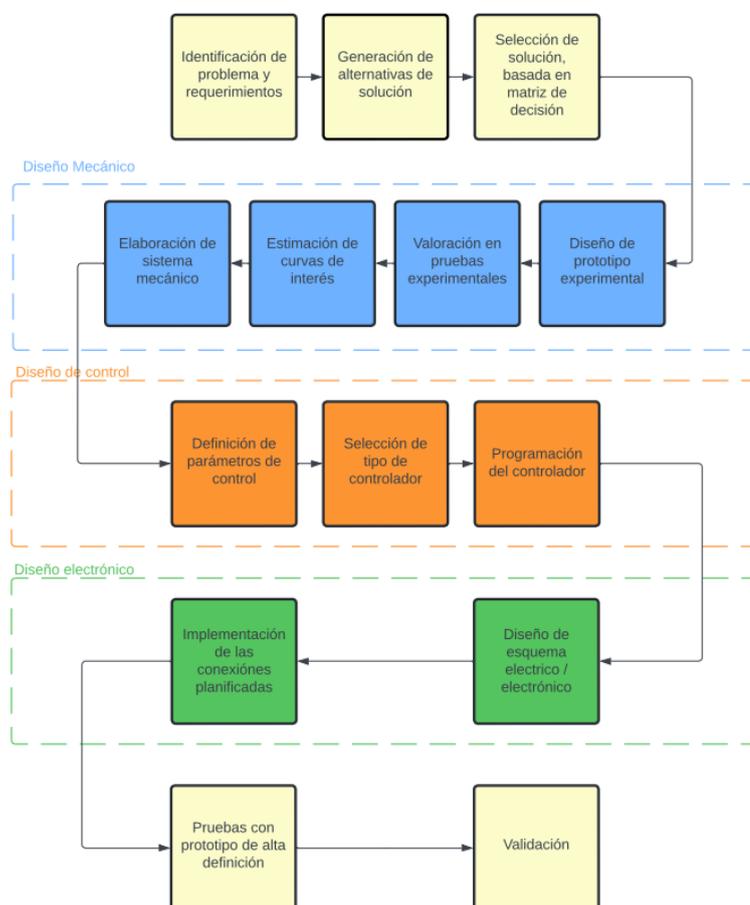
Conclusión	Peso	Costo	Diseño	Flexibilidad	Control	$\Sigma$	Prioridad
<b>Alternativa 1</b>	0.15	0.01666	0.02777	0.0444	0.0333	0.27222	3
<b>Alternativa 2</b>	0.1	0.0333	0.08333	0.111	0.08333	0.4111	1
<b>Alternativa 3</b>	0.05	0.01666	0.0555	0.111	0.08333	0.316666	2

Para alcanzar el objetivo final, fue necesario definir las etapas a realizar a lo largo del proyecto. Cada una de estas se fueron cumpliendo de manera progresiva, abordando las partes que forman el problema.

El seguimiento progresivo de la metodología del proyecto integrador nos permitió asegurar la satisfacción en su totalidad los requerimientos del cliente.

**Figura 2.1.**

*Metodología del Proyecto Integrador.*



## 2.3 Requerimientos del cliente

Tabla 2.2.

*Requerimientos de la alternativa de solución seleccionada.*

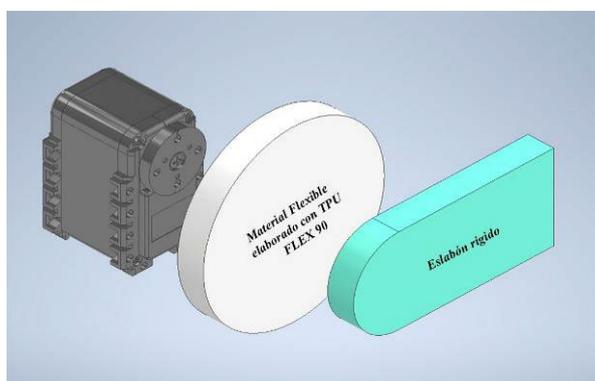
<b>Flexibilidad</b>	Capacidad de deformarse al someterse a una carga externa, sin perder su forma original al retirar la carga.
<b>Protección</b>	Se debe garantizar la seguridad integral de los actuadores del sistema.
<b>Costos</b>	Inversión acorde a la solución propuesta.
<b>Funcionalidad</b>	Los brazos deben funcionar adecuadamente sin presentar fallos.
<b>Tamaño</b>	Las dimensiones deben ser acordes a las proporciones del robot, manteniendo una estética limpia.

## 2.4 Diseño conceptual

En la Figura 2.2 se ilustra el diseño conceptual de la alternativa de solución propuesta en esta imagen se puede notar la inclusión de un material flexible siendo el TPU FLEX elaborado con impresión 3D, siendo este el componente principal o de interés.

Figura 2.2.

Diseño conceptual.



## 2.5 Parámetros de diseño mecánico

La implementación de un modelo de actuador elástico diferente a los convencionales que se pueden observar en proyectos similares representa un reto. Antes de comenzar con el proceso riguroso de diseño se implementó un prototipo simple, con el fin de corroborar que el material de poliuretano termoplástico flexible o TPU FLEX era capaz de absorber las cargas externas aliviando la fatiga en el eje del motor. En este caso se acoplo el motor a un estabón rígido, aplicando fuerza en el extremo del eslabón. Este experimento fue realizado para dos casos uno sin la implementación del material flexible como se observa en la Figura 2.3 y otro en donde se implementó el material Figura 2.4.

**Figura 2.3.**

*Experimento de tiempo versus carga de motor sin componente flexible.*



**Figura 2.4.**

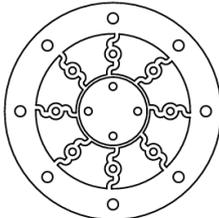
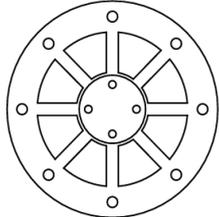
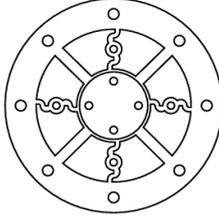
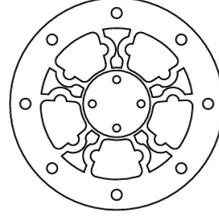
*Experimento de tiempo vs. carga de motor con componente flexible.*



Posterior al experimento se elaboraron diversos diseños estructurales de la articulación flexible, las cuales fueron establecidas para cumplir las expectativas del sistema que mantenía ciertos problemas al momento de ejercerse esfuerzos dentro de ellos. Es por ello, que en la Tabla 2.3 se presentan algunos de los diseños de las estructuras de articulación flexible:

**Tabla 2.3.**

*Diversas estructuras de articulación flexible.*

<b>Diseño</b>	<b>Figura</b>	<b>Características flexibles</b>
<b>SEA semicírculos asimétricos (anillos).</b>		Mucha flexibilidad
<b>SEA barras.</b>		Poca Flexibilidad
<b>SEA anillo- barra.</b>		Poca Flexibilidad por uniones rígidas
<b>SEA semicírculos simétricos (ondulado).</b>		Flexibilidad uniforme

Luego del diseño de las diferentes estructuras flexible se ejecutó experimentos basados en la rigidez torsional de los elementos para denotar el comportamiento que se tiene al momento de aplicar esfuerzos conocidos a cada uno de ellos, permitiendo además definir de manera más certera la selección del diseño ideal para nuestro sistema mecánico propuesto, este proceso lo podemos observar en la Figura 2.5.

**Figura 2.5.**

*Experimento de rigidez torsional.*



## **2.6 Selección de forma componente flexible**

A partir de las diversas estructuras de SEA se procedió a realizar pruebas experimentales de cada uno como se ven en el apartado anterior, de tal manera que ha resultado factible hacer el uso de resorte de torsión plano con unidades flexibles, el cual resultó el que mejor se acoplaba a los ajustes de las cargas y deformaciones con respecto al esfuerzo que se le aplicaba. A partir de esto, se hizo ciertas modificaciones al diseño de acuerdo con las dimensiones necesarias para la aplicación directa al robot de servicio sobre el cual se está trabajando.

## 2.7 Selección de motores

El mecanismo que conforma el brazo robótico no requiere esencialmente un torque elevado debido a que se centrará en la interacción con los humanos, por lo tanto, la dificultad se simplifica, ya que al no tener tareas como levantar o agarrar objetos posibilita escoger motores que sean capaces de realizar el movimiento de cada una de las partes fijas que lo componen.

**Figura 2.6.**

*Motor Dynamixel AX-12A. [14]*



Tabla 2.4.

Características del motor Dynamixel. [14]

<b>Modelo</b>	AX-12A	
<b>Series</b>	DYNAMIXEL	
<b>Voltaje de entrada</b>	Mínimo [V]	9.0
	Recomendado [V]	11.1
	Máximo [V]	12.0
<b>Características de desempeño</b>	Voltaje [V]	12.0
	Par de torque [N.m]	1.50
	Corriente de bloqueo [A]	1.5
	Velocidad sin carga [rpm]	59.0
	Corriente sin carga [A]	0.14
	Resolución [deg/pulse]	0.2930000000
	Step [pulse/rev]	1
<b>Resolución</b>	Angle [degree]	300
<b>Dimensiones (W x H x D) [mm]</b>	32 x 50 x 40	
<b>Peso [g]</b>	55.00	
<b>Relación de transmisión</b>	254	1

## 2.8 Definición de parámetros de control

Dentro de los parámetros de control que se busca emplear en el proyecto presente son: la velocidad y posición de cada una de las partes del sistema que compone, en este caso se está hablando de un sistema que presenta tres grados de libertad, lo cual hace referencia a las tres posiciones y velocidades de cada uno por separado, para poder cumplir con los movimientos suaves y precisos que deberá ejecutar.

### 2.8.1 Selección de la unidad de control

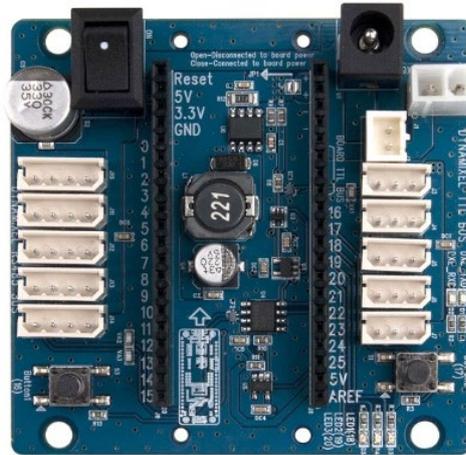
Una de las partes importantes es la correcta selección de la unidad de control, la cual va a ser la encargada de configurar los movimientos del brazo robóticos, de tal manera que sus señales de salida enviadas regirán en el funcionamiento de los motores de cada parte del sistema mecánico, lo que permitirá ejecutar los movimientos adecuados y sobre todo llegar a las posiciones deseadas que se establecerán dentro de la programación de este.

Por lo tanto, se escogió el computador con un entorno de programación, el cual presenta una flexibilidad y facilidad de realizar la estructura de código para el sistema compuesto por motores y la programación de éstos, de tal manera que se ejecute con seguridad las sentencias de programación activando la secuencia de funcionamiento de cada motor.

Por otro lado, se usará una placa electrónica de extensión denominada OpenCM485 la cual nos permitirá realizar la comunicación de los motores DYNAMIXEL previamente mencionados con el computador, para así poder llevar a cabo el debido control del sistema en conjunto y recopilar datos necesarios para monitorear el comportamiento que va llevando cada uno de los motores en su constante funcionamiento.

Figura 2.7.

Placa de expansión OpenCM485. [15]

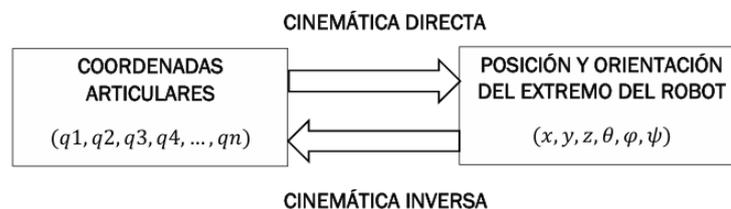


## 2.9 Control cinemático

En los apartados anteriores se estableció que el desarrollo de las actividades del robot será esencialmente a la interacción humano-robot, es por ello que se optó por el uso de un control cinemático, el cual consiste en la determinación de la posición y orientación del extremo final del brazo robótico con juntas flexibles con respecto a un marco de referencia establecido.

Figura 2.8.

Representación de la cinemática directa e inversa. [13]



Adicionalmente se estableció el uso de la convención de Denavit-Hartenberg, el cual presenta una metodología sencilla y útil para determinar la cinemática de cualquier robot cuya estructura queda en términos de las transformaciones homogéneas. El método se basa

en la determinación de parámetros de los eslabones del robot los cuales se insertan en una tabla para su correcta organización.

Cada uno de estos parámetros representan traslaciones y rotaciones que relacionan el sistema de referencia del elemento  $i-1$  con el elemento  $i$ . A continuación, se detallan cada uno de éstos:

- Rotación en un ángulo  $\theta$  sobre el eje z.
- Traslación de una distancia  $d$  sobre el eje z.
- Traslación de una distancia  $a$  sobre el eje x.
- Rotación en un ángulo  $\alpha$  sobre el eje x.

Para poder completar la tabla que nos provee el método DH, debemos conocer adecuadamente la representación de cada uno de las juntas que ejercen los movimientos, en este caso nuestro sistema se basa en 3 juntas revolutas las cuales se representan en la Figura 2.9, en donde se representa un sistema de baja resolución que abarca tanto los marcos de referencia “x”, “y” y “z” y a su vez el sentido de rotación orientado a cada parte de las juntas, a continuación se presenta la disposición de los elementos revoluta del mecanismo:

**Figura 2.9.**

*Representación de las rotaciones del mecanismo.*



Para nuestro mecanismo la Tabla 2.5 a continuación representa los parámetros relacionados con D-H representando cada uno de los grados de libertad que representa nuestro sistema presente.

**Tabla 2.5.**

*Parámetros de cada eslabón del brazo robótico.*

<b>D-H</b>	<b>z de partida</b>		<b>x de llegada</b>	
<b>i</b>	<b><math>\theta_i</math></b>	<b><math>d_i</math></b>	<b><math>a_i</math></b>	<b><math>\alpha_i</math></b>
<b>1</b>	q1	d1	a1	90
<b>2</b>	q2	d2	a2	90
<b>3</b>	q3	d3	a3	90

En este caso las variables constantes vienen reflejadas en las variables  $d_i$  y  $a_i$  a continuación en la Tabla 2.6 se indican los valores de las constantes previamente mencionadas.

**Tabla 2.6.**

*Variables constantes D-H.*

<b>Parámetro</b>	<b>Medida (m)</b>	<b>Medida (mm)</b>
<b>a1</b>	0,055	55
<b>a2</b>	0,143	143
<b>a3</b>	0,155	155

Para poder llevar a cabo la cinemática completa del mecanismo, se debe emplear cada una de las matrices de transformación homogéneas individuales de cada eslabón, denotando en la siguiente ecuación:

$$T = A_0^1 * A_1^2 * A_2^3$$

Desglosando más lo que conlleva cada una de las matrices de transformación tenemos lo siguiente:

$$A_i = \begin{pmatrix} \cos(\theta_i) & -\cos(\alpha_i) \sin(\theta_i) & \sin(\alpha_i) \sin(\theta_i) & a_i \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\alpha_i) \cos(\theta_i) & -\sin(\alpha_i) \cos(\theta_i) & a_i \sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Una vez teniendo la representación de las matrices de cada uno de los eslabones se multiplican las matrices de acuerdo con el orden de cada una de las juntas representantes de nuestro sistema para poder obtener finalmente la representación final de la cinemática completa de nuestro mecanismo. A continuación, se presentan cada una de las matrices de transformación correspondiente a nuestro mecanismo:

$$A_0^1 = \begin{pmatrix} \cos(q1) & \sin(q1) & 0 & a_1 \cos(q1) \\ \sin(q1) & -\cos(q1) & 0 & a_1 \sin(q1) \\ 0 & 0 & -1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$A_1^2 = \begin{pmatrix} \cos(q2) & \sin(q2) & 0 & a_2 \cos(q2) \\ \sin(q2) & -\cos(q2) & 0 & a_2 \sin(q2) \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$A_2^3 = \begin{pmatrix} \cos(q3) & -\sin(q3) & 0 & a_3 \cos(q3) \\ \sin(q3) & \cos(q3) & 0 & a_3 \sin(q3) \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Una vez obtenida cada una de las matrices correspondientes se calcula la cinemática total del sistema denotando que los valores de  $\cos(\theta_i)$  y  $\sin(\theta_i)$  se traducirán a la siguiente expresión  $c_{\theta_i}$  y  $s_{\theta_i}$  para mejorar la presentación de la matriz que se calculó.

A continuación, así se representa la multiplicación de nuestras matrices para la cinemática completa de nuestro mecanismo:

$$T_0^3 = \begin{pmatrix} c_{q1} & s_{q1} & 0 & a_1 c_{q1} \\ s_{q1} & -c_{q1} & 0 & a_1 s_{q1} \\ 0 & 0 & -1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} c_{q2} & s_{q2} & 0 & a_2 c_{q2} \\ s_{q2} & -c_{q2} & 0 & a_2 s_{q2} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} c_{q3} & -s_{q3} & 0 & a_3 c_{q3} \\ s_{q3} & c_{q3} & 0 & a_3 s_{q3} \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

## Capítulo 3

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, en el desarrollo de este capítulo se detallará el diseño en 3D del brazo robótico donde en cada articulación se sitúa el elemento flexible SEA acompañado de los servomotores, así como también las piezas estructurales que permiten el acoplamiento de los perfiles los cuales le dan el tamaño adecuado del brazo completo. Se mostrará además un análisis de los elementos SEA seleccionados y también a cargas estáticas sometidas, la implementación del brazo al robot de servicio en que se trabaja actualmente Walter y el análisis financiero que conllevó realizar el prototipaje e implementación del proyecto. Con respecto al sistema de control, se muestran las posiciones y gráficas de las coordenadas del efector final al colocar posiciones deseadas en cada articulación.

#### 3.1 Diseño mecánico

Figura 3.1.

*Diseño 3D del brazo robótico acoplado al robot de servicio Walter.*



En la figura 3.1 se ilustra el acople del brazo robótico al robot de servicio Walter con el conjunto de estructuras flexibles SEA dentro de cada articulación que contiene, el sistema del brazo se encuentra diseñado con 3 grados de libertad en el software Inventor.

El brazo se encuentra compuesto por los motores AX-12A los cuales se encargan de cada una de las articulaciones proporcionadas, la colocación de cada uno de estos fue referenciada al brazo humano, tomando en cuenta los movimientos de cada parte de éste. Además, cuenta con piezas impresas en 3D que permitieron realizar las conexiones de los elementos SEA a cada uno de los servomotores, así como también a los perfiles de aluminio que representan la composición del brazo completo. La longitud aproximada es de 353 mm lo cual es un tamaño considerable y adecuado de acuerdo con el tamaño del robot Walter el cual es cerca de 1200 mm. Denotando de tal manera que la parte del hombro al brazo superior tiene una medida de 55 mm, del brazo superior hasta la parte del codo tenga un tamaño de 143 mm y del antebrazo a la muñeca 155 mm. En la Figura 3.12 se puede apreciar cada una de las partes que componen el brazo robótico con las estructuras SEA en cada uno.

**Figura 3.2.**

*Diseño 3D del brazo robótico acoplado al robot de servicio Walter.*



### **3.2 Análisis de rigidez de los elementos SEA**

Para el escenario de la selección de tipo de sea, se estableció primeramente un conjunto de pruebas dinámicas donde cada elemento estructural SEA se le aplicaba ciertas cargas mediante un dinamómetro, el cual nos permitía establecer valores de cargas conocidas con el

objetivo de determinar deformaciones angulares y torques mediante el brazo de palanca de cada uno. A continuación, se presenta las tablas y figuras de cada uno de los SEA puestos a prueba.

**Tabla 3.1.**

*Datos de diferente carga SEA semicírculos simétricos (ondulado).*

<b>Fuerza</b>	<b>Distancia</b>	<b>Torque</b>	<b>Desplazamiento</b>	<b>Desplazamiento</b>	<b>Rigidez</b>
<b>[N]</b>	<b>[m]</b>	<b>[Nm]</b>	<b>en grados</b>	<b>en radianes</b>	<b>Resorte</b>
<b>4.8</b>	0.0038	0.1824	5	0,087266463	2,090150037
<b>1.6</b>	0.0038	0,0608	2.5	0,043633231	1,393433358
<b>6.8</b>	0.0038	0,2584	7.5	0,130899694	1,97403059
<b>10</b>	0.0038	0,38	10	0,174532925	2,177239621
<b>13.6</b>	0.0038	0,5168	12.5	0,218166156	2,368836708
<b>18</b>	0.0038	0,684	15	0,261799388	2,612687546

**Figura 3.3.**

*Gráfica Torque vs desplazamiento SEA semicírculos simétricos (ondulado).*

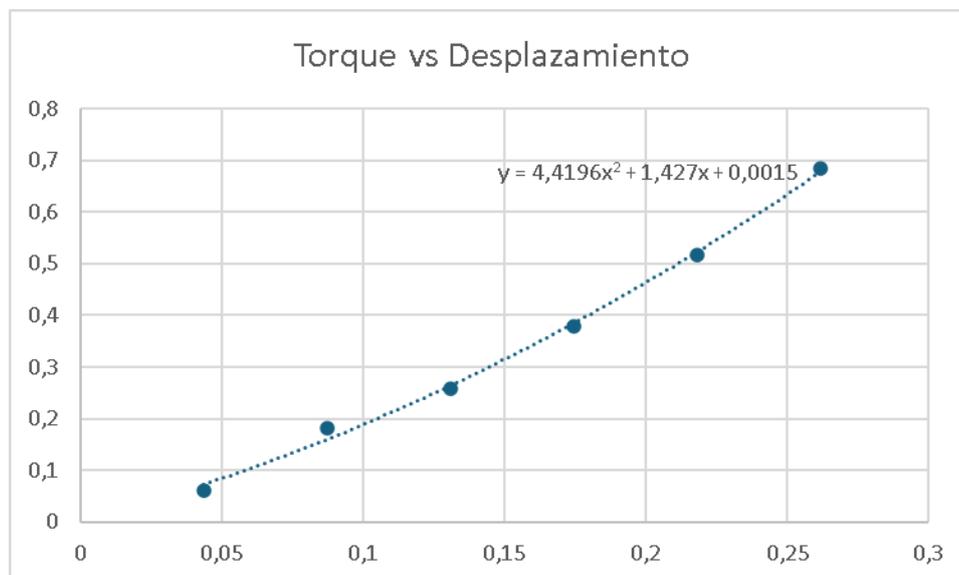


Tabla 3.2.

Datos de diferente carga SEA círculos asimétricos (anillo).

Fuerza [N]	Distancia [m]	Torque [Nm]	Desplazamiento en grados	Desplazamiento en radianes	Rigidez Resorte
4.8	0.0038	0.1824	16	0,27925268	0,653171886
1.6	0.0038	0,0608	10	0,174532925	0,348358339
10	0.0038	0,38	23	0,401425728	0,946625922
19.2	0.0038	0,7296	30	0,523598776	1,393433358

Figura 3.4.

Gráfica Torque vs desplazamiento SEA círculos asimétricos (anillo).

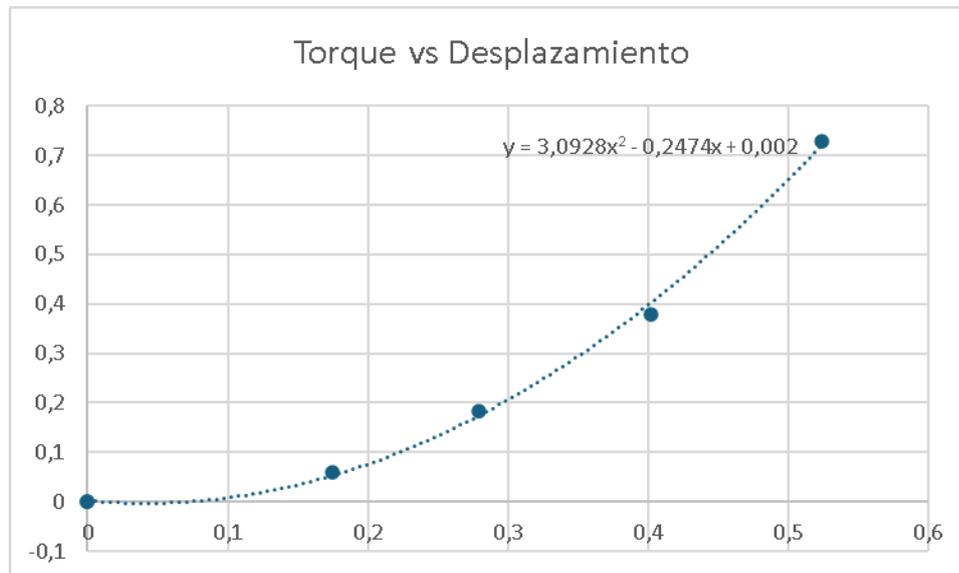


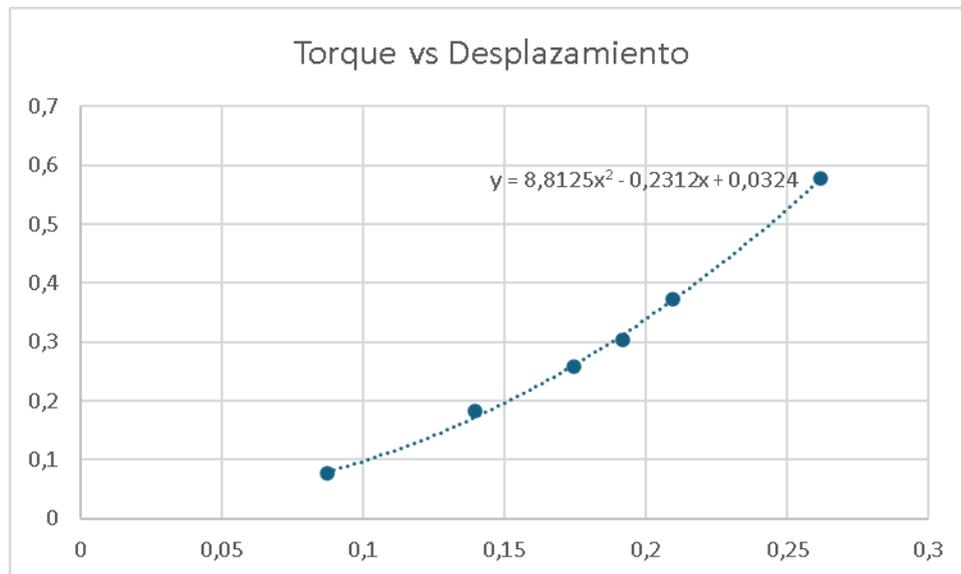
Tabla 3.3.

Datos de diferente carga SEA anillo-barra.

<b>Fuerza</b> [N]	<b>Distancia</b> [m]	<b>Torque</b> [Nm]	<b>Desplazamiento</b> en grados	<b>Desplazamiento</b> en radianes	<b>Rigidez</b> Resorte
<b>9.81</b>	0.0038	0.37278	12	0,20943951	1,779893391
<b>8</b>	0.0038	0.304	11	0,191986218	1,583446997
<b>6.8</b>	0.0038	0,2584	10	0,174532925	1,480522943
<b>2</b>	0.0038	0.076	5	0,087266463	0,870895849
<b>4.8</b>	0.0038	0.1824	8	0,13962634	1,306343773
<b>15.2</b>	0.0038	0,5776	15	0,261799388	2,206269483

Figura 3.5.

Gráfica torque vs desplazamiento SEA anillo-barra.



Como se mencionó en el capítulo anterior la Figura 2.5 ilustra el banco de pruebas que refleja la recolección de los datos para el análisis de cada uno de ellos, la prueba consiste en colocar cargas conocidas al SEA de tal manera que su brazo de palanca solo sea tomada en

cuenta el radio de su tamaño general, por lo tanto esto nos permitió tomar valores de fuerza, torque, desplazamientos angulares y la rigidez del sistema flexible, esto lo podemos corroborar en las Tablas 3.1, 3.2 y 3.3, donde cada uno arroja valores diferentes por la composición que tiene cada uno. A partir de los datos tomados, las Figuras 3.3, 3.4 y 3.5 nos denotan como es el comportamiento del SEA al ejercer torques elevados. Para poder establecer correctamente este análisis debemos acudir a la ecuación matemática de rigidez torsional:

$$K = T/\Theta$$

Al ser un sistema flexible se lo asemeja a este principio, al ejercer una fuerza sobre el resorte, este tiende a deformarse cierta cantidad, por lo tanto, cada una de las gráficas nos demuestra que al aplicarle una fuerza en su extremo y al realizar el brazo palanca considerando el torque, la deformación tiende a elevarse al cuadrado como vemos en cada una de las gráficas, por lo tanto, esto indica que a medida que se va aumentando una fuerza tiende a crecer mucho más la deformación por lo tanto esto no sería la parte ideal del proyecto. La figura 3.3 genera una excepción ya que puede ser considerada lineal, ya que su comportamiento no es tan polinómico como las anteriores es por ello por lo que esta forma de SEA viene a ser la indicada en el proyecto.

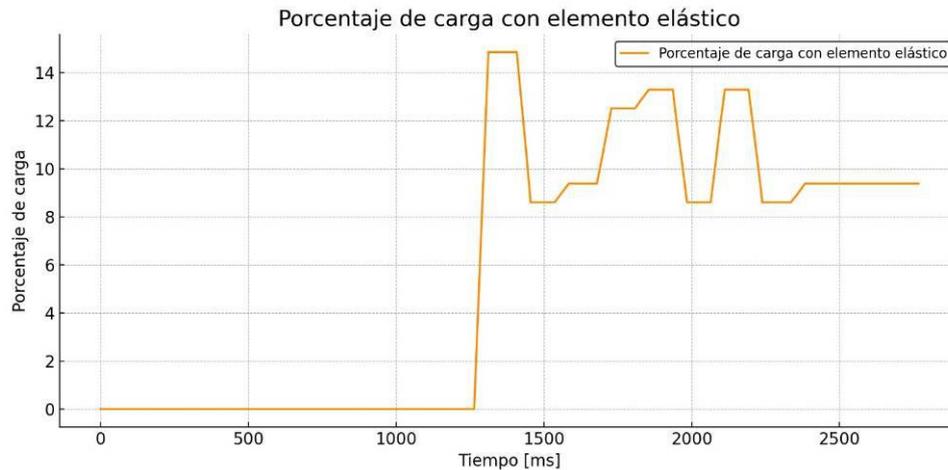
### **3.3 Análisis de carga estática de los elementos SEA**

Una de las partes fundamentales se basa en analizar el comportamiento de las cargas que soporta cada motor, es por ello por lo que, mediante la configuración interna que mantiene se pudo establecer los porcentajes de carga que presenta, además que se realizó la comparativa de cómo se estuvieron comportando cada uno de los SEA y sin el elemento flexible a cargas

estáticas conocidas. Las pruebas realizadas se dieron en base a una carga de 6 N aproximadamente, el cual generó las siguientes gráficas:

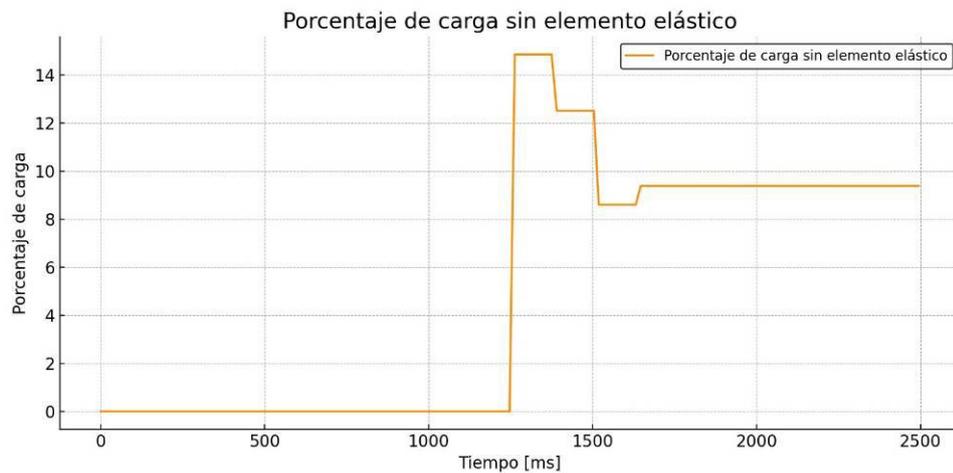
**Figura 3.6.**

*Porcentaje de carga de motor con SEA semicírculos simétricos.*



**Figura 3.7.**

*Porcentaje de carga de motor sin SEA.*



Dada la recolección de datos, el porcentaje de carga es un valor medido interno del motor AX-12A el cual representa que tanta carga se encuentra soportando en cada momento, básicamente las Figuras 3.6 y 3.7 denotan la presencia de una carga en un tiempo determinado, claramente se puede reflejar un comportamiento distinto al momento de añadirle el sistema flexible (SEA) y cuando se acopla directamente al eje del motor.

### 3.4 Sistema de control

Una de las partes fundamentales es el sistema de control, como se mencionó en el capítulo anterior se realizó el uso de un control cinemático directo usando la metodología de Denavit Hartenberg, de tal manera que nos permite de manera fácil y sencilla construir el modelo cinemático y calcular las posiciones del end effector mediante la multiplicación de matrices. A continuación, en la Figura 3.8 se visualiza el resultado de nuestro sistema aplicando esta metodología.

**Figura 3.8.**

*Cinemática directa del mecanismo.*

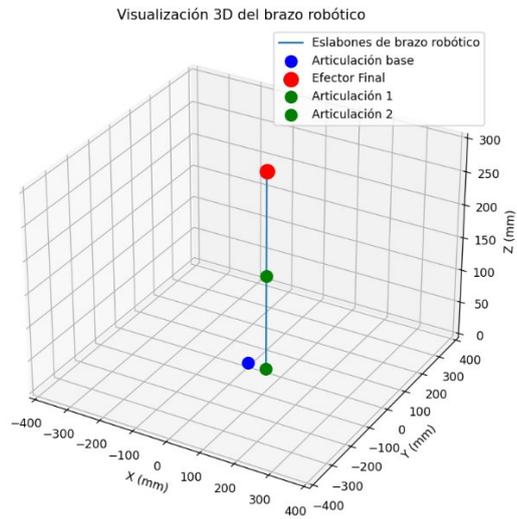
Matriz de transformación homogénea final:

$$\begin{bmatrix}
 s1*s3 + c1*c2*c3, & c1*s2, & c1*c2*s3 - c3*s1, & 55*c1 + 143*c1*c2 + 155*s1*s3 + 155*c1*c2*c3 \\
 c2*c3*s1 - c1*s3, & s1*s2, & c1*c3 + c2*s1*s3, & 55*s1 + 143*c2*s1 - 155*c1*s3 + 155*c2*c3*s1 \\
 c3*s2, & -c2, & s2*s3, & s2*(155*c3 + 143) \\
 0, & 0, & 0, & 1
 \end{bmatrix}$$

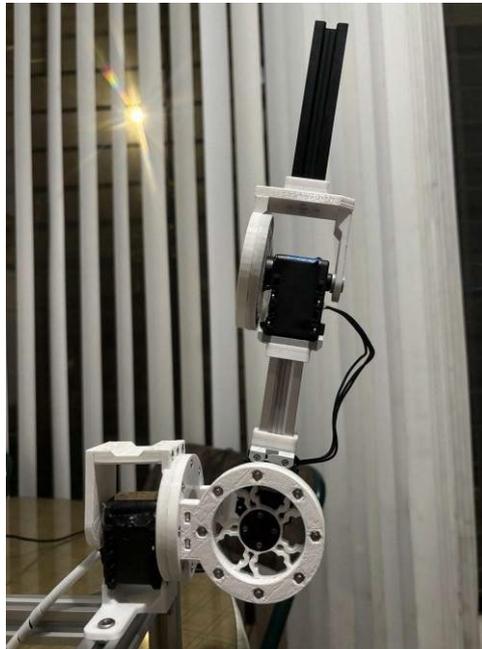
Adicionalmente la intersección de la última columna con las primeras 3 filas de la matriz previamente presentada representan la posición final de nuestro end effector, estas coordenadas son cartesianas las cuales comúnmente conocemos como “x”, “y”, “z”. Por otro lado, se realizó ciertas configuraciones necesarias para poder corroborar que el sistema real concuerda con el simulado usando Python y sus librerías que permitieron dibujar las posiciones de cada una de las juntas que mantiene el sistema, así como también los resultados numéricos de la simulación empleada, a continuación, se presenta los resultados:

**Figura 3.9.**

*Posición del brazo simulado a 90° en la segunda articulación.*

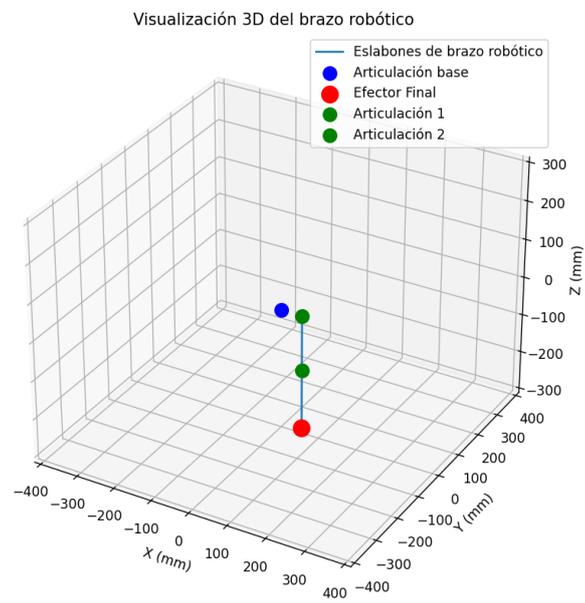
**Figura 3.10.**

*Posición del brazo real a 90° en la segunda articulación.*



**Figura 3.11.**

*Posición del brazo simulado a  $90^\circ$  en la segunda articulación.*

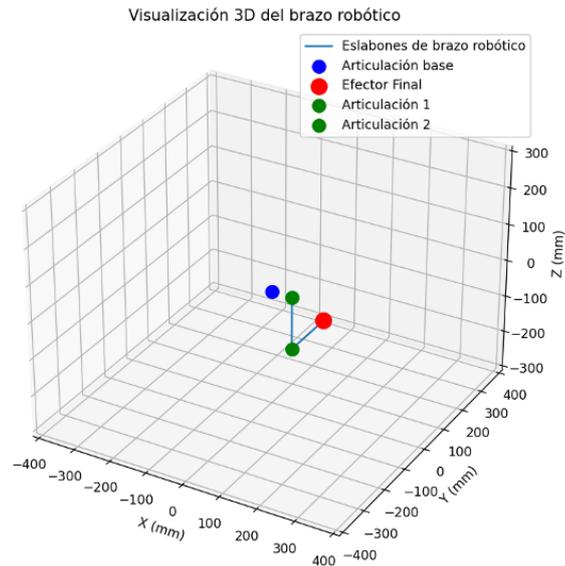
**Figura 3.12.**

*Posición del brazo real a  $-90^\circ$  en la segunda articulación.*



**Figura 3.13.**

*Posición del brazo simulado a  $-90^\circ$  en la segunda articulación y  $-90^\circ$  en la tercera articulación.*



**Figura 3.14.**

*Posición del brazo real a  $-90^\circ$  en la segunda articulación y  $-90^\circ$  en la tercera articulación.*



Por otro lado, las estructuras flexibles generan un desfase angular lo cual tiende a ser pequeño, generando un valor pequeño de desplazamiento. Es por ello por lo que existe cierta

discrepancia entre la posición final real y simulada. Los resultados presentes en las Tablas 3.4, 3.5 y 3.6 destacan los valores reales y simulados de las diferentes posiciones realizadas que se observan en las Figuras mostradas anteriormente, en el mismo orden.

**Tabla 3.4.**

*Datos de posición del end effector a 90° en la segunda articulación.*

	<b>Posición End-Effector real [mm]</b>	<b>Posición End-Effector simulado [mm]</b>
<b>Px</b>	62.5	55
<b>Py</b>	0	0
<b>Pz</b>	293	298
	<b>Ángulo desfase</b>	1.46629

**Tabla 3.5.**

*Datos de posición del end effector a -90° en la segunda articulación.*

	<b>Posición End-Effector real [mm]</b>	<b>Posición End-Effector simulado [mm]</b>
<b>Px</b>	61.4437	55
<b>Py</b>	0	0
<b>Pz</b>	-296.5	-298
	<b>Ángulo desfase</b>	1.042

**Tabla 3.6.**

*Datos de posición del end effector a -90° en la segunda articulación y -90° en la tercera articulación.*

	<b>Posición End-Effector real [mm]</b>	<b>Posición End-Effector simulado [mm]</b>
<b>Px</b>	55	55
<b>Py</b>	152	155
<b>Pz</b>	-145	-143
	<b>Ángulo desfase</b>	2.35

### 3.5 Análisis de costos

En la Tabla 3.7 se desglosan los costos considerados para el diseño mecánico y eléctrico, así como también costos de operación ya que se empleó el proceso de impresión 3D.

Como se puede observar, el mayor costo se centra en el sistema mecánico, principalmente debido a la adquisición de materiales y equipos necesarios para la construcción adecuada del sistema de brazo robótico final y la realización de las experimentaciones correspondientes para cada apartado. Es importante destacar que el costo total del sistema mecánico asciende a \$239.87, de los cuales los motores AX-12A representando el 68.72% denotando una gran diferencia del precio de los motores con respecto a los otros materiales ocupados.

**Tabla 3.7.**

*Análisis de costos del proyecto integrador.*

<b>Sistema</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio</b>	<b>Precio Total</b>
<b>Mecánico</b>	Filamento TPU	60 gramos	\$ 30	\$ 30
	Filamento PETG	130 gramos	\$ 20	\$ 20
	Dinamómetro	1	\$ 10	\$ 10
	Tornillos y tuercas M3	30	\$ 3.25	\$ 3.25
	Perfil de aluminio	1	\$ 9.02	\$ 9.02
	Tornillos y tuercas M2	30	\$ 2.75	\$ 2.75
	Motor AX-12A	3	\$ 54.95	\$ 164.85
<b>Eléctrico</b>	Tarjeta OpenCM485	1	\$ 48,96	\$ 48,96
<b>Varios</b>	Impresión 3D PETG	15 horas	\$ 3	\$ 45
	Impresión 3D TPU	7 horas	\$ 2	\$ 14

Cabe destacar además que para el tema eléctrico solo se hizo el uso de una tarjeta electrónica debido a que en su parte de control se la realiza mediante un software abierto parecido al IDE de Arduino. Con lo cual no conlleva ningún costo adicional para esta implementación. Por último, se consideró el trabajo que conlleva imprimir en 3D cada una de las piezas que forman parte del sistema en conjunto tomando en cuenta el tiempo que conlleva imprimir cada una de ellas y también por el tipo de filamento que se está usando.

### **3.6 Implementación del brazo con articulaciones flexibles**

Finalmente, uno de los retos más importantes fue la implementación del brazo robótico dentro de la estructura del robot de servicio Walter, en la cual se realizaron ciertas modificaciones internas para poder establecer un ajuste adecuado y seguro del brazo. Además, en el ensamble se le realizó modificaciones en la carcasa que rodea el tronco del robot debido a que la altura inicial de los brazos antiguos se encontraba desfasados unos centímetros por debajo del hombro, con lo que, para ajustarlo muy semejante al brazo humano, se realizaron ciertas modificaciones y poder tomar una apariencia mejor y llamativa para el público. A partir de ello, en la figura 3.15 se puede observar el brazo implementado en el robot de servicio Walter.

**Figura 3.15.**

*Implementación del sistema de brazo robótico.*



## Capítulo 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

Se logró modelar una de las extremidades superiores del robot de servicio Walter junto con los servomotores DYNAMIXEL AX-12A y el sistema flexible SEA acoplado en cada una de las articulaciones para el desarrollo de una interacción segura con un humano. El uso de software Inventor permitió elaborar las piezas en la etapa de diseño mecánico para constituir la estructura mecánica, así como también el ajuste de la cadena cinemática acoplando los servomotores y simulando en el entorno dinámico los diferentes movimientos que puede ejercer cada articulación independiente o el sistema completo.

El análisis de las pruebas de rigidez permitió establecer correctamente la selección de configuración del sistema flexible de tal manera que la relación entre el esfuerzo ejercido por alguna carga y el desplazamiento angular de éste sea lineal, ya que al mantener otro tipo de relación como cuadrática o exponencial resulta ser mayormente perjudicial debido al desfase elevado del sistema flexible lo que resulta menor precisión en puntos deseados del end effector.

El estudio de las cargas estáticas permitió establecer el comportamiento del efecto que mantiene dicha carga al ser aplicada al eje del motor y al sistema flexible, denotando que al estar influyendo directamente a un sistema rígido lo absorbe completamente el motor de tal manera que sus componentes internos sufren este impacto y reduce su vida útil hasta dañarlo completamente, mientras que el sistema flexible empieza a atenuar la señal de carga hasta llevarla a un valor constante denotando menor impacto al sistema interno del motor lo que lo hace ideal para evitar corromper el actuador en un tiempo relativamente corto.

La lógica del sistema de control se desarrolló mediante la programación de una tarjeta electrónica OpenCM485 el cual contiene una interfaz similar al IDE de Arduino, además se ejecutó la programación en Python para el desarrollo del control cinemático directo con el uso del método de Denavit Hartenberg permitiendo la validación de las posiciones de cada uno de las articulaciones así como también la posición del end effector y compararlas con el sistema real denotando un margen de error angular de casi  $2^\circ$  por el efecto del sistema flexible al soportar la carga del brazo en conjunto.

Se llevó a cabo la implementación del brazo robótico empleando la impresión 3D, para cada una de las piezas que permite la unión de los perfiles de aluminio que le daban la longitud al brazo y los motores, están constituidos por filamento PETG, así como también el acople del sistema flexible con cada eje del motor se elaboró con el mismo sistema de impresión, pero con el uso de filamento TPU flex el cual le otorga dar el efecto de flexibilidad al momento de presentarse una carga.

## **4.2 Recomendaciones**

El trabajo mencionado queda sujeto a mejorar las partes mecánicas del sistema o añadir cierto recubrimiento al brazo, para poder proteger las partes esenciales como son los actuadores en este caso los motores y también a calidad visual generar una mejor impresión a los espectadores.

Se recomienda implementar algún tipo de sensor o un instrumento de medición de coordenadas que permita enviar valores de posición en la parte final del brazo, debido a que al permanecer un sistema flexible existe cierto desfase angular lo que provoca que no mantenga un valor preciso en la posición final del end effector como lo señala la simulación del proyecto presente.

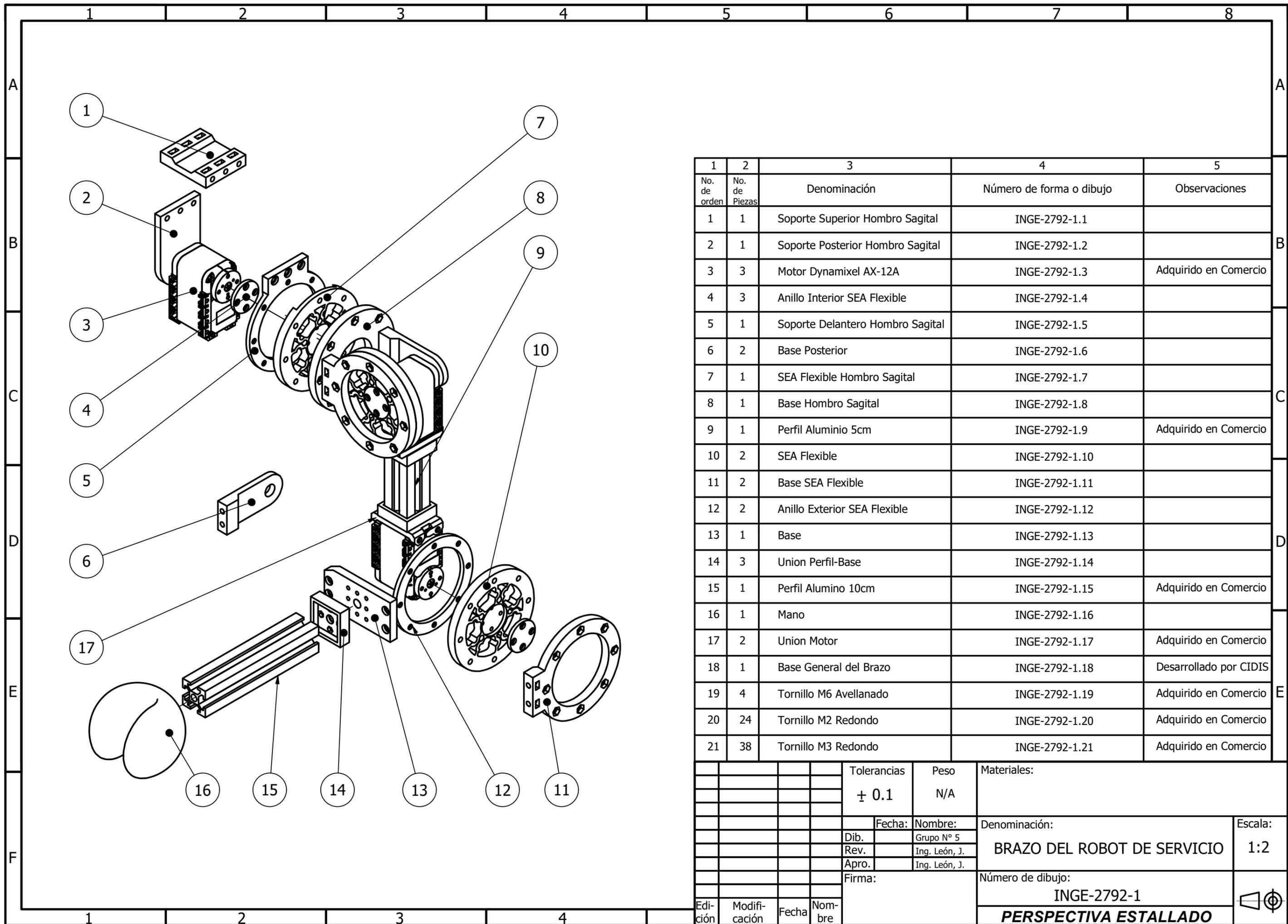
## 5. REFERENCIAS

- [1] (IFR), International Federation of Robotics, «World Robotics 2024 – Service Robots: Statistics, Market Analysis, and Case Studies,» VDMA Services GmbH, 2024.
- [2] Banco Interamerica de Desarrollo, «El BID anuncia los ganadores del Desafío PLAY de educación y economía creativa,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.iadb.org/es/noticias/el-bid-anuncia-los-ganadores-del-desafio-play-de-educacion-y-economia-creativa>.
- [3] J. R. Mercader Uguina, «Robótica y riesgos laborales,» *Archivos de Prevención de Riesgos Laborales.*, vol. 21, 2018.
- [4] K. Abad Sacoto, M. Sánchez Delgado, J. Crespo Cedeño y J. Alvarado Chang, «Sistemas de reconocimiento en la robótica social,» *Uniandes Episteme. Revista digital de Ciencia, Tecnología e Innovación.*, vol. 4, 2017.
- [5] R. Aracil, C. Balague y M. Armada, «Robots de Servicio,» *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial.*, vol. 5, 2008.
- [6] C. Breazeal, «Social interactions in HRI: The robot view,» *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part C: Applications and Reviews*, vol. 34, nº 2, 2004.
- [7] V. F. Batlle, «Robots flexibles: Hacia una generación de robots con nuevas prestaciones,» *Revista de la CEA*, vol. 3, nº 3, 2006.
- [8] Autodesk, «Fabricación Aditiva,» Autodesk, 2025. [En línea]. Available: <https://www.autodesk.com/es/solutions/additive-manufacturing>.
- [9] 3Dnatives, «Guía completa sobre el TPU: Todo lo que debes saber,» 3Dnatives, 4 Junio 2020. [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/guia-completa-tpu-04062020/>.
- [10] Polymaker, «PolyFlex™ TPU90 Technical Data Sheet (Version 5.1),» 2023. [En línea]. Available: <https://www.polymaker.com>.
- [11] Polymaker, «PolyLite™ PETG,» Polymaker, 2025. [En línea]. Available: <https://polymaker.com/product/polylite-petg/>.
- [12] Polymaker, «PolyLite™ PETG Technical Data Sheet (Version 5.2),» 2023. [En línea]. Available: <https://www.polymaker.com>.
- [13] K. Ogata, *Ingeniería de Control Moderna*, Madrid, España: Pearson, 2010.

- [14] ROBOTIS, «AX-12A,» 2025. [En línea]. Available:  
<https://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/ax/ax-12a/>.
- [15] ROBOTIS, «OpenCM 485 Expansion Board,» 2025. [En línea]. Available:  
<https://emanual.robotis.com/docs/en/parts/controller/opencm485exp/>.

## **Apéndices**

*Apéndice A*  
*Planos Mecánicos*



1	2	3	4	5
No. de orden	No. de Piezas	Denominación	Número de forma o dibujo	Observaciones
1	1	Soporte Superior Hombro Sagital	INGE-2792-1.1	
2	1	Soporte Posterior Hombro Sagital	INGE-2792-1.2	
3	3	Motor Dynamixel AX-12A	INGE-2792-1.3	Adquirido en Comercio
4	3	Anillo Interior SEA Flexible	INGE-2792-1.4	
5	1	Soporte Delantero Hombro Sagital	INGE-2792-1.5	
6	2	Base Posterior	INGE-2792-1.6	
7	1	SEA Flexible Hombro Sagital	INGE-2792-1.7	
8	1	Base Hombro Sagital	INGE-2792-1.8	
9	1	Perfil Aluminio 5cm	INGE-2792-1.9	Adquirido en Comercio
10	2	SEA Flexible	INGE-2792-1.10	
11	2	Base SEA Flexible	INGE-2792-1.11	
12	2	Anillo Exterior SEA Flexible	INGE-2792-1.12	
13	1	Base	INGE-2792-1.13	
14	3	Union Perfil-Base	INGE-2792-1.14	
15	1	Perfil Alumino 10cm	INGE-2792-1.15	Adquirido en Comercio
16	1	Mano	INGE-2792-1.16	
17	2	Union Motor	INGE-2792-1.17	Adquirido en Comercio
18	1	Base General del Brazo	INGE-2792-1.18	Desarrollado por CIDIS
19	4	Tornillo M6 Avellanado	INGE-2792-1.19	Adquirido en Comercio
20	24	Tornillo M2 Redondo	INGE-2792-1.20	Adquirido en Comercio
21	38	Tornillo M3 Redondo	INGE-2792-1.21	Adquirido en Comercio

				Tolerancias	Peso	Materiales:	
				± 0.1	N/A		
				Fecha:	Nombre:	Denominación:	Escala:
				Dib.	Grupo N° 5	BRAZO DEL ROBOT DE SERVICIO	1:2
				Rev.	Ing. León, J.		
				Apro.	Ing. León, J.		
				Firma:		Número de dibujo:	
						INGE-2792-1	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	<b>PERSPECTIVA ESTALLADO</b>			

1

2

3

4

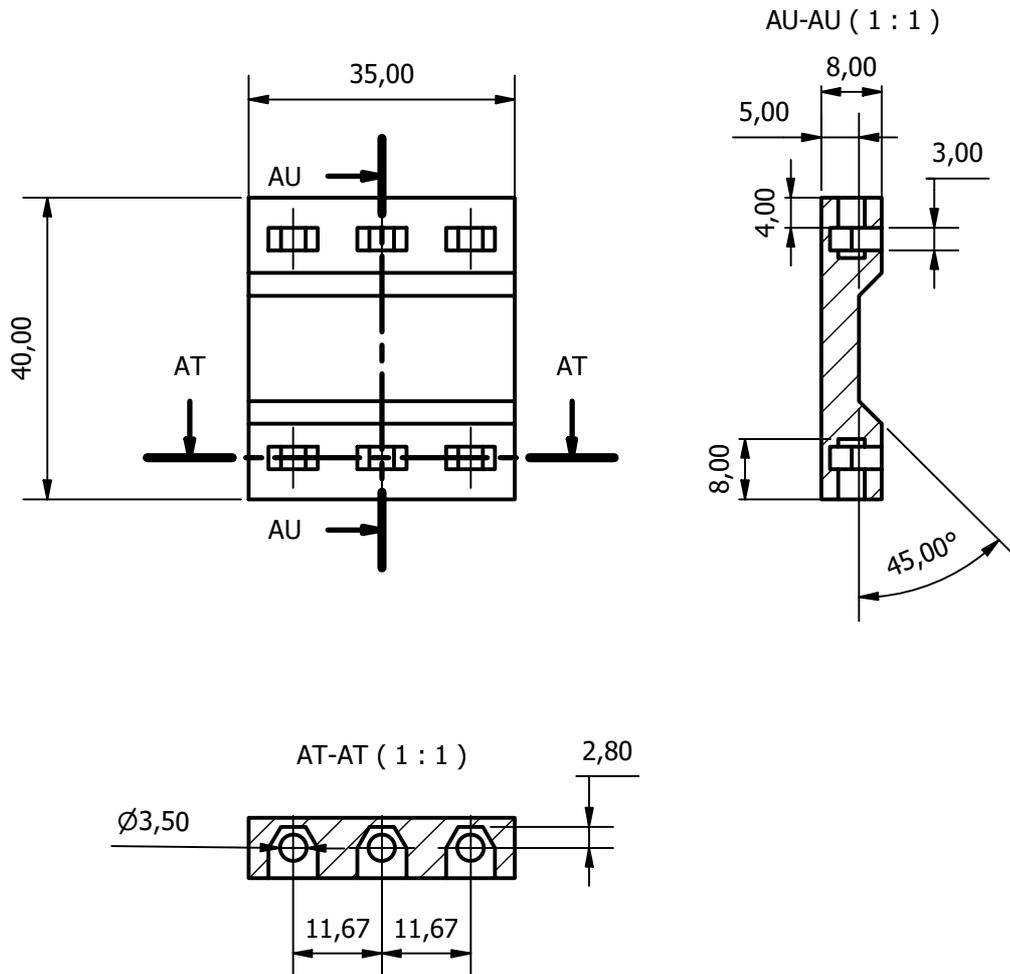
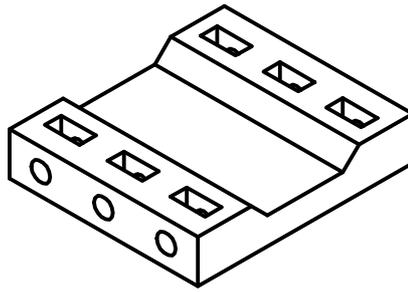
A

B

C

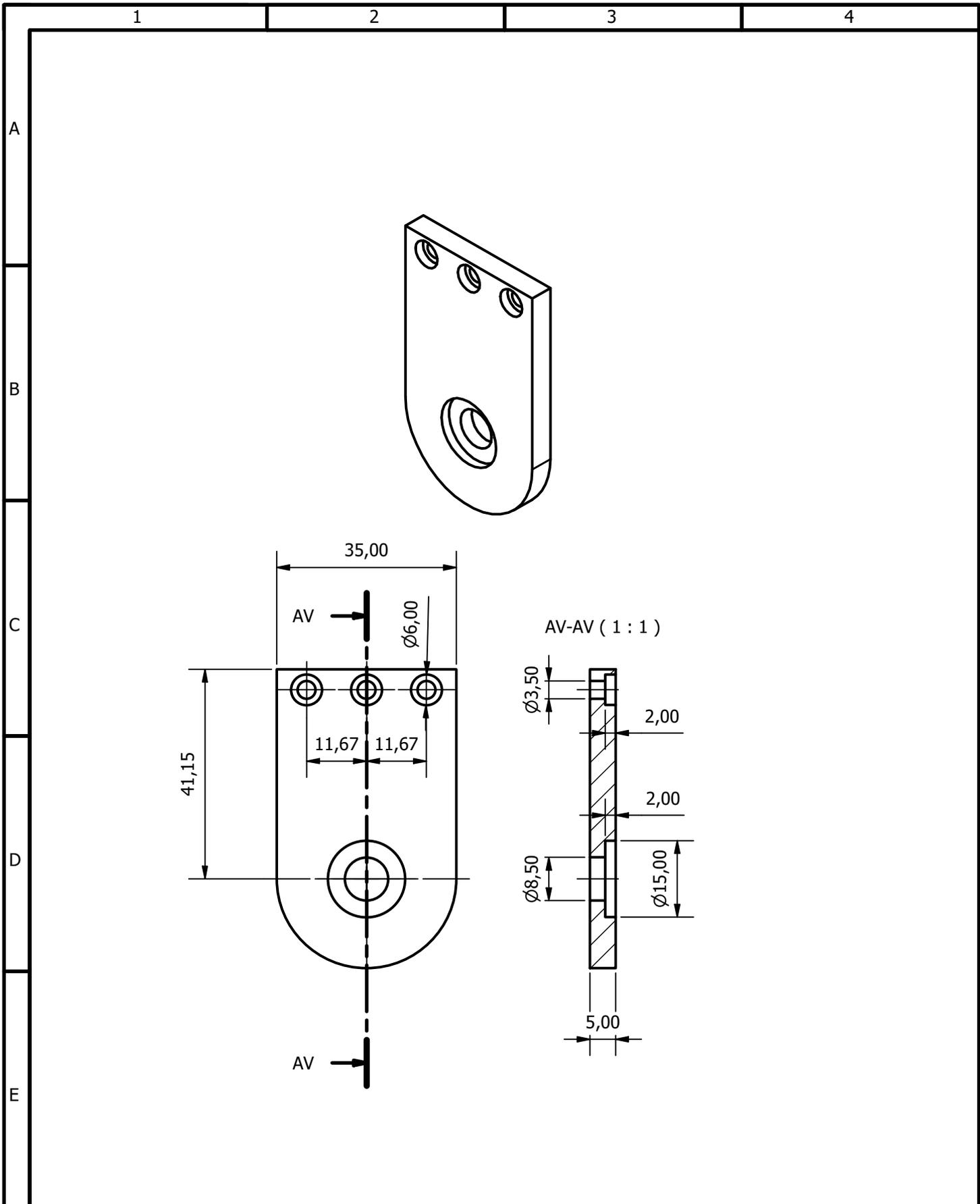
D

E

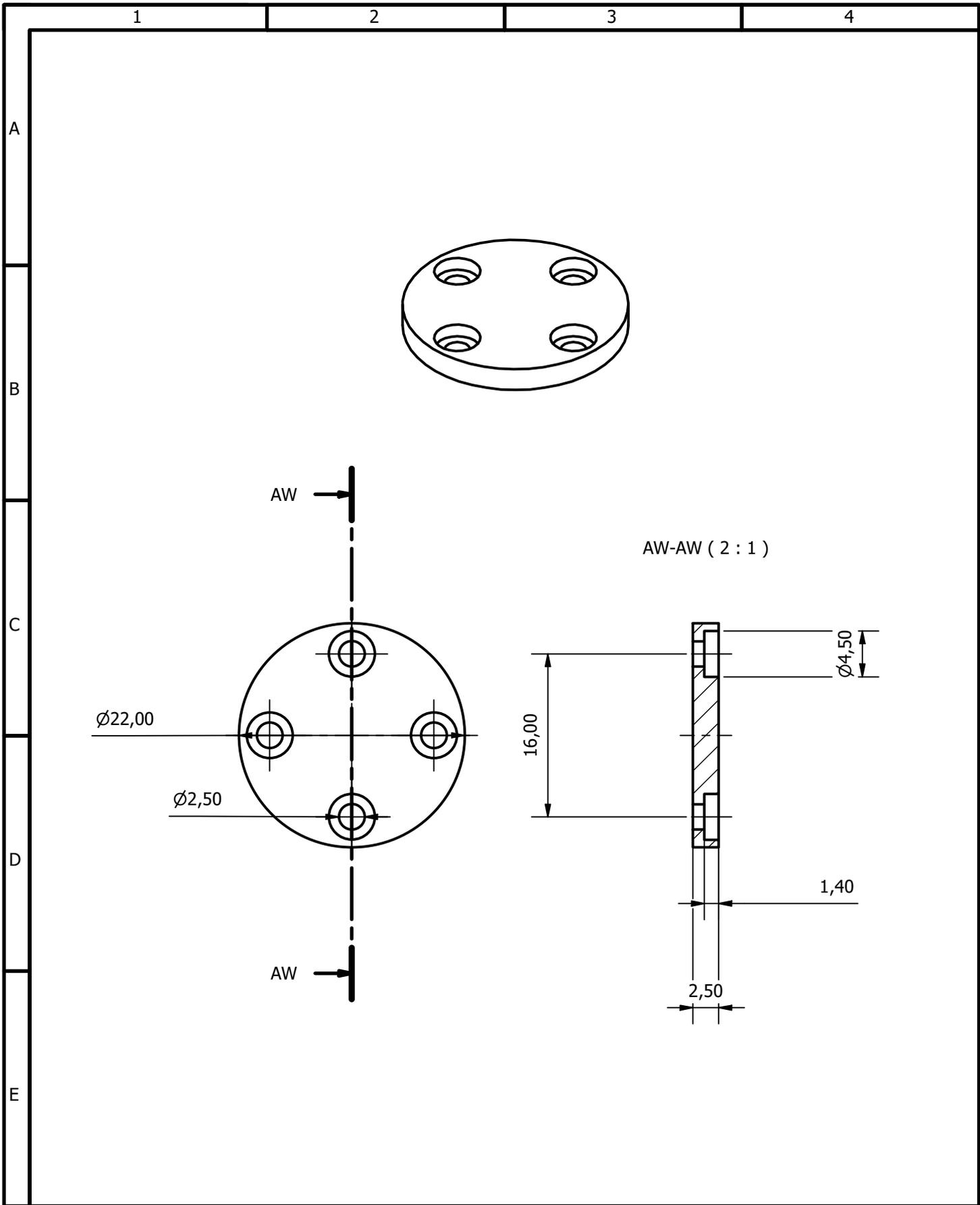


				Tolerancias	Peso N/A	Materiales: <b>FILAMENTO PETG</b>	
						Denominación:	Escala:
				Fecha:	Nombre:	<b>Soporte Superior Hombro Sagital</b>	1:1
				Dib.	Bastidas, D		
				Rev.	Ing. León, J		
				Apro.	Ing. León, J	Número:	
				Firma:		<b>INGE-2792-1.1</b>	
Edi- ción	Modifi- cación	Fecha	Nombre	<b>espol</b>		DISEÑO BRAZOS ROBOT DE SERVICIO	





				Tolerancias	Peso N/A	Materiales: <b>FILAMENTO PETG</b>	
						Denominación:	Escala:
				Fecha:	Nombre:	<b>Soporte Posterior Hombro Sagital</b>	1:1
				Dib.	Bastidas, D		
				Rev.	Ing. León, J		
				Apro.	Ing. León, J	Número:	
				Firma:	<b>espol</b>	<b>INGE-2792-1.2</b>	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			<b>DISEÑO BRAZOS ROBOT DE SERVICIO</b>	



				Tolerancias	Peso 0.001 kg	Materiales: <b>FILAMENTO PETG</b>	
						Denominación:	Escala:
				Fecha:	Nombre:	<b>Anillo Interior SEA Flexible</b>	2:1
				Dib.	Bastidas, D		
				Rev.	Ing. León, J		
				Apro.	Ing. León, J	Número:	
				Firma:	<b>espol</b>	<b>INGE-2792-1.4</b>	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			<b>DISEÑO BRAZOS ROBOT DE SERVICIO</b>	

1 2 3 4

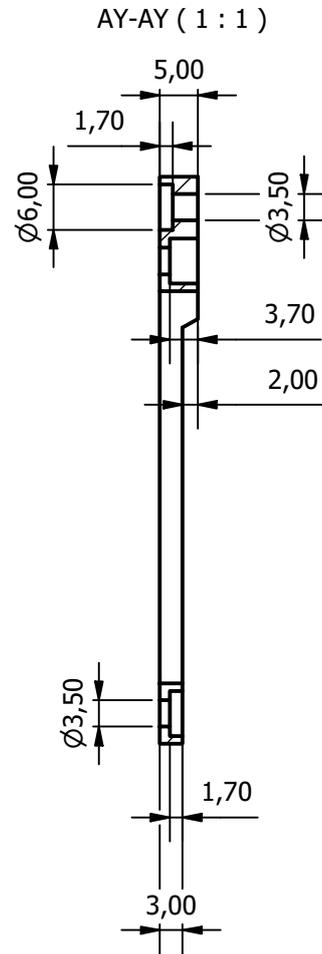
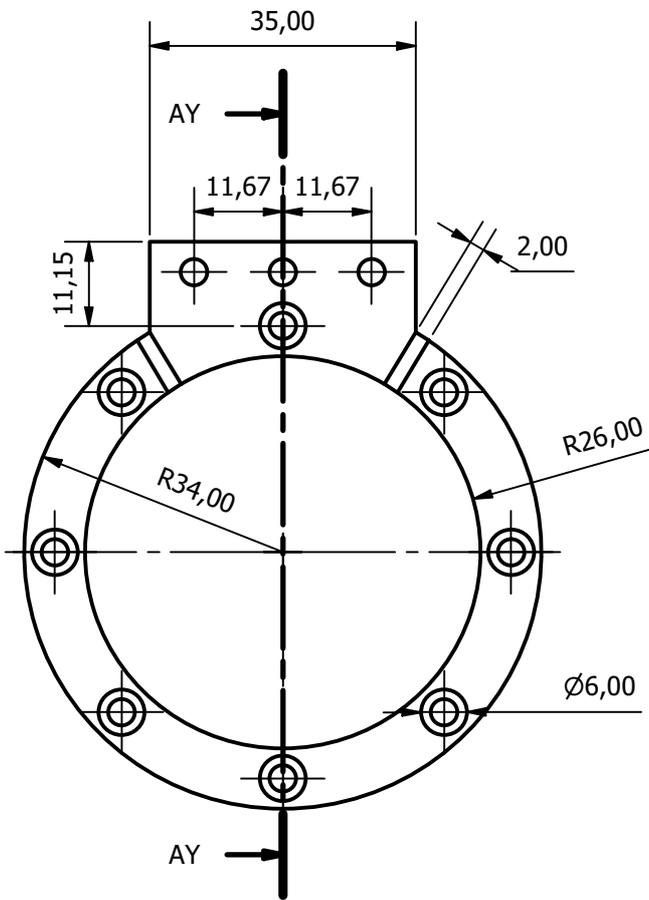
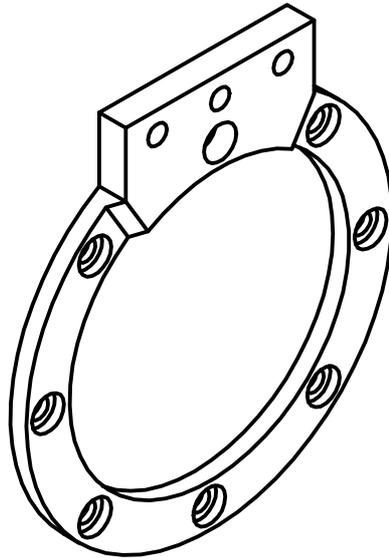
A

B

C

D

E



				Tolerancias	Peso N/A	Materiales: <b>FILAMENTO PETG</b>	
						Denominación:	Escala:
				Fecha:	Nombre:	<b>Soporte Delantero Hombro Sagital</b>	1:1
				Dib.	Bastidas, D		
				Rev.	Ing. León, J		
				Apro.	Ing. León, J	Número:	
				Firma:	<b>espol</b>	<b>INGE-2792-1.5</b>	
Edi- ción	Modifi- cación	Fecha	Nombre			<b>DISEÑO BRAZOS ROBOT DE SERVICIO</b>	

1

2

3

4

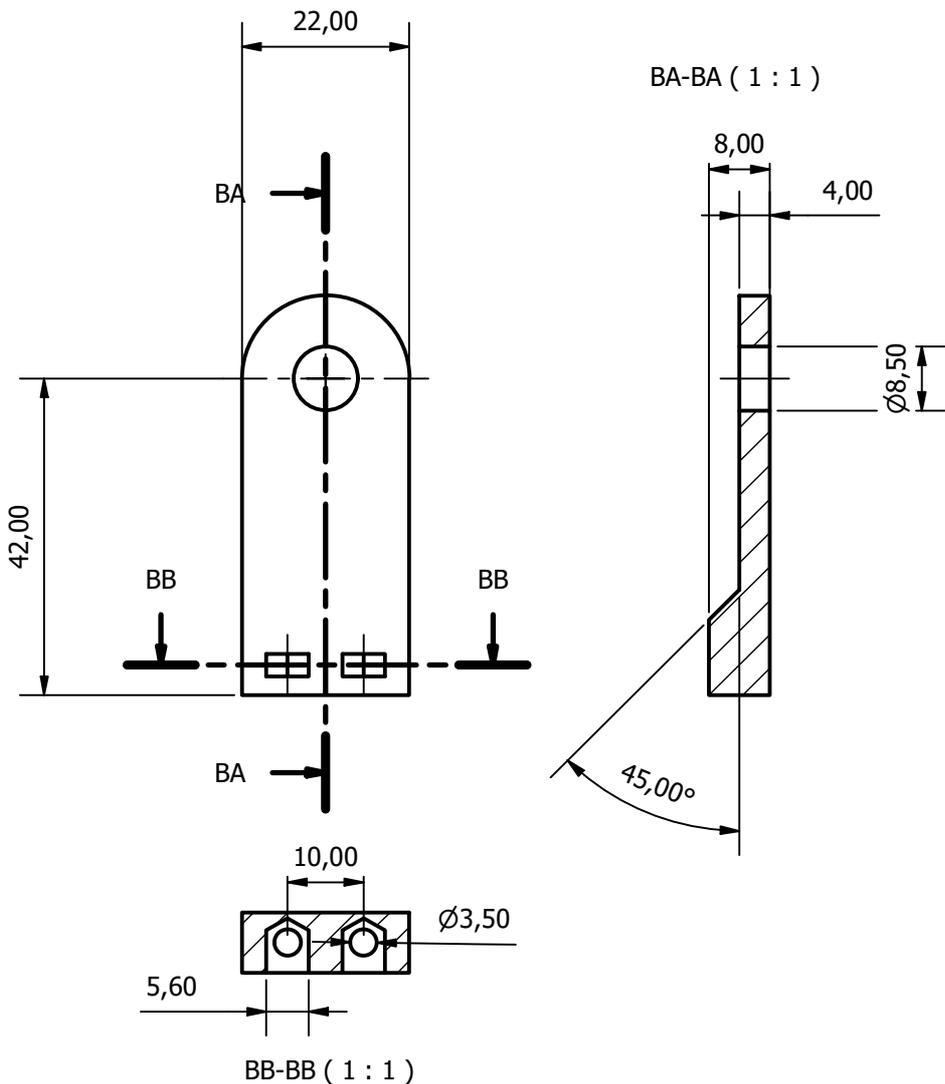
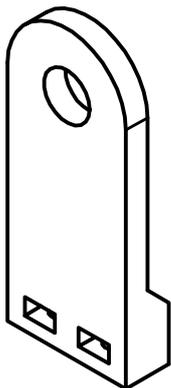
A

B

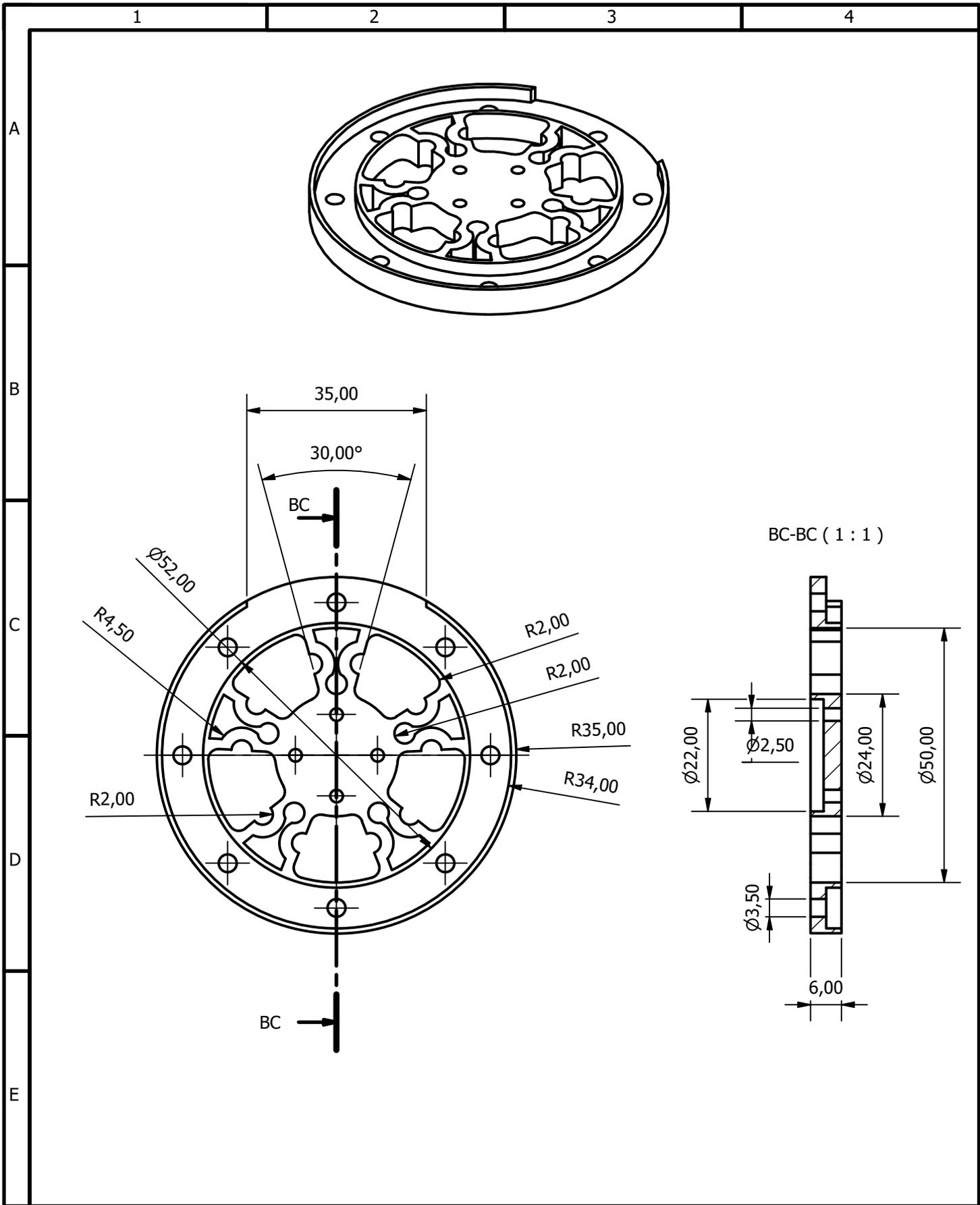
C

D

E



				Tolerancias	Peso N/A	Materiales: <b>FILAMENTO PETG</b>	
						Denominación:	Escala:
				Fecha:	Nombre:	<b>Base Posterior</b>	1:1
				Dib.	Bastidas, D		
				Rev.	Ing. León, J		
				Apro.	Ing. León, J		
				Firma:		Número:	
						<b>INGE-2792-1.6</b>	
Edi- ción	Modifi- cación	Fecha	Nombre			DISEÑO BRAZOS ROBOT DE SERVICIO	



				Tolerancias	Peso	Materiales:	
					N/A	FILAMENTO TPU	
				Fecha:	Nombre:	Denominación:	Escala:
				Dib.	Bastidas, D	SEA Flexible Hombro Sagital	1:1
				Rev.	Ing. León, J		
				Apro.	Ing. León, J		
				Firma:	Número:		
					INGE-2792-1.7		
Edición	Modificación	Fecha	Nombre		DISEÑO BRAZOS ROBOT DE SERVICIO		

1

2

3

4

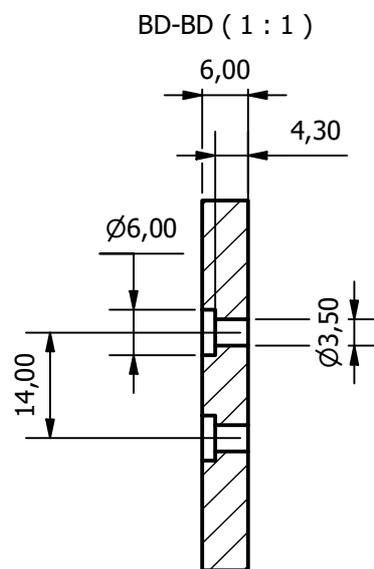
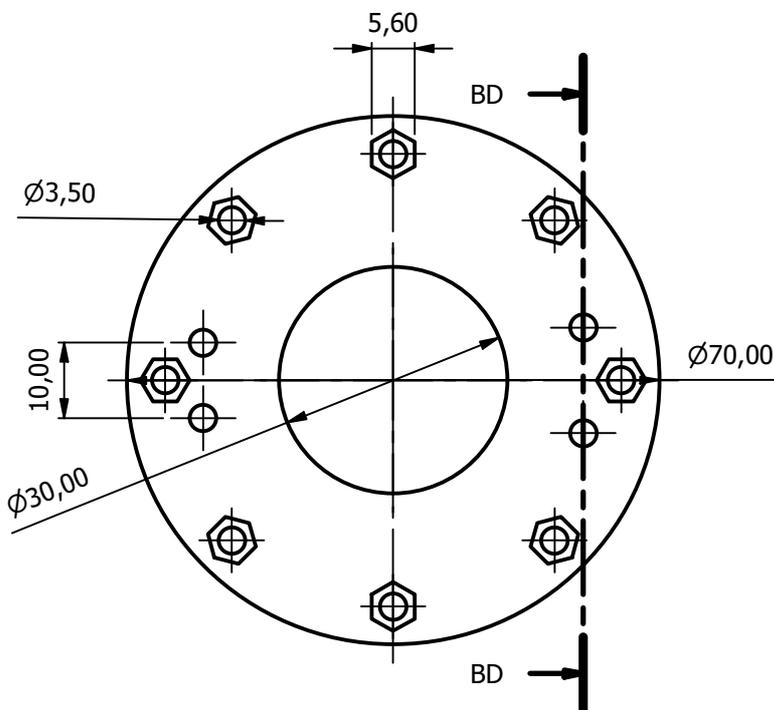
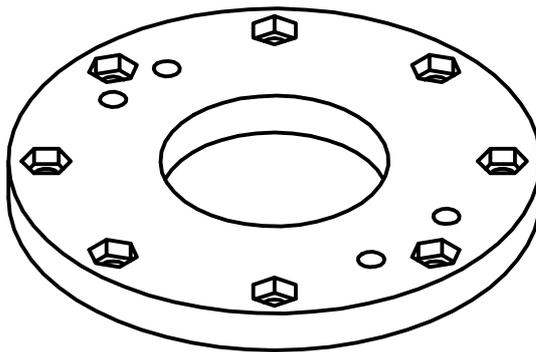
A

B

C

D

E



				Tolerancias	Peso N/A	Materiales: <b>FILAMENTO PETG</b>	
						Denominación:	Escala:
				Fecha:	Nombre:	<b>Base Hombro Sagital</b>	1:1
				Dib.	Bastidas, D		
				Rev.	Ing. León, J		
				Apro.	Ing. León, J	Número:	
				Firma:	<b>espol</b>	<b>INGE-2792-1.8</b>	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			<b>DISEÑO BRAZOS ROBOT DE SERVICIO</b>	

1

2

3

4

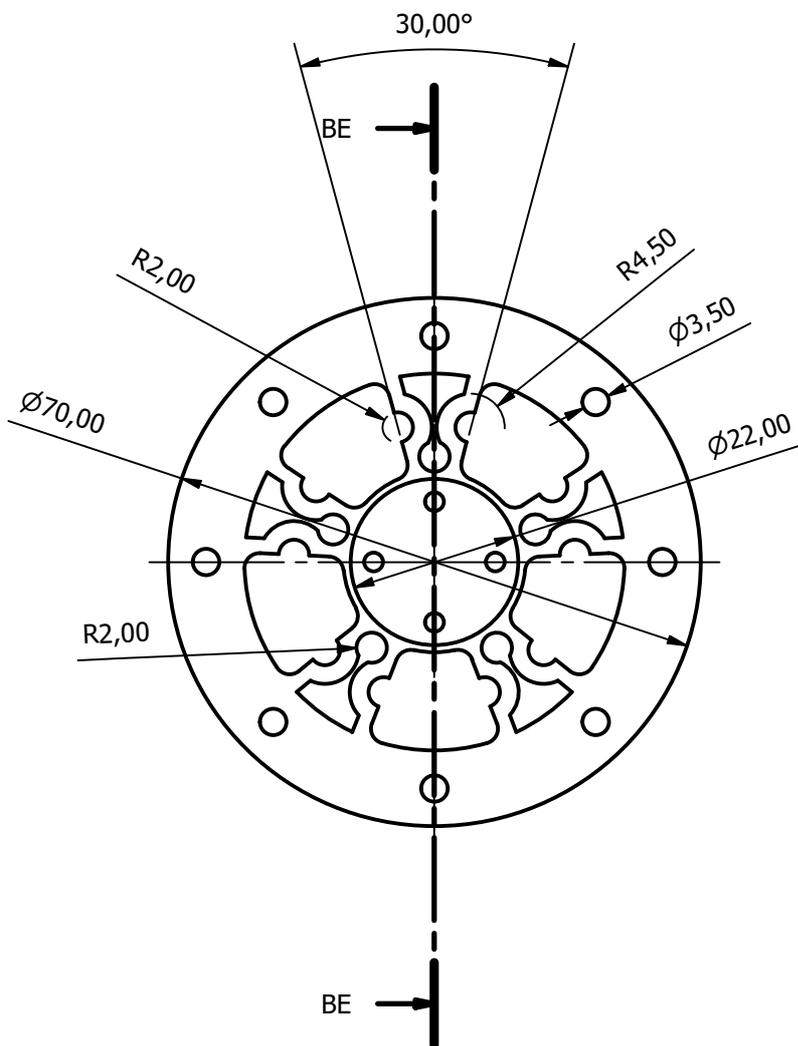
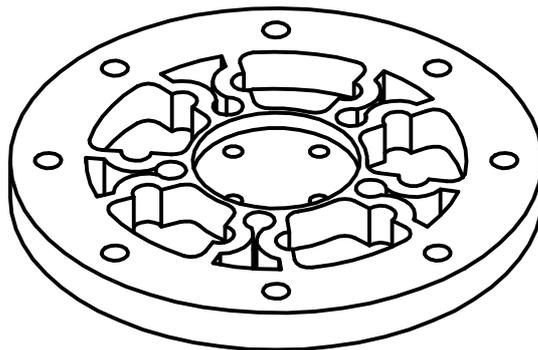
A

B

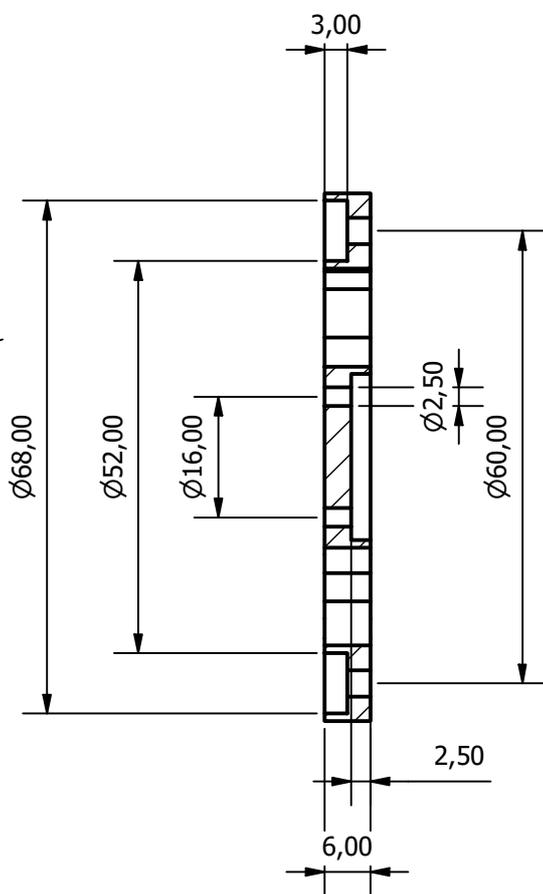
C

D

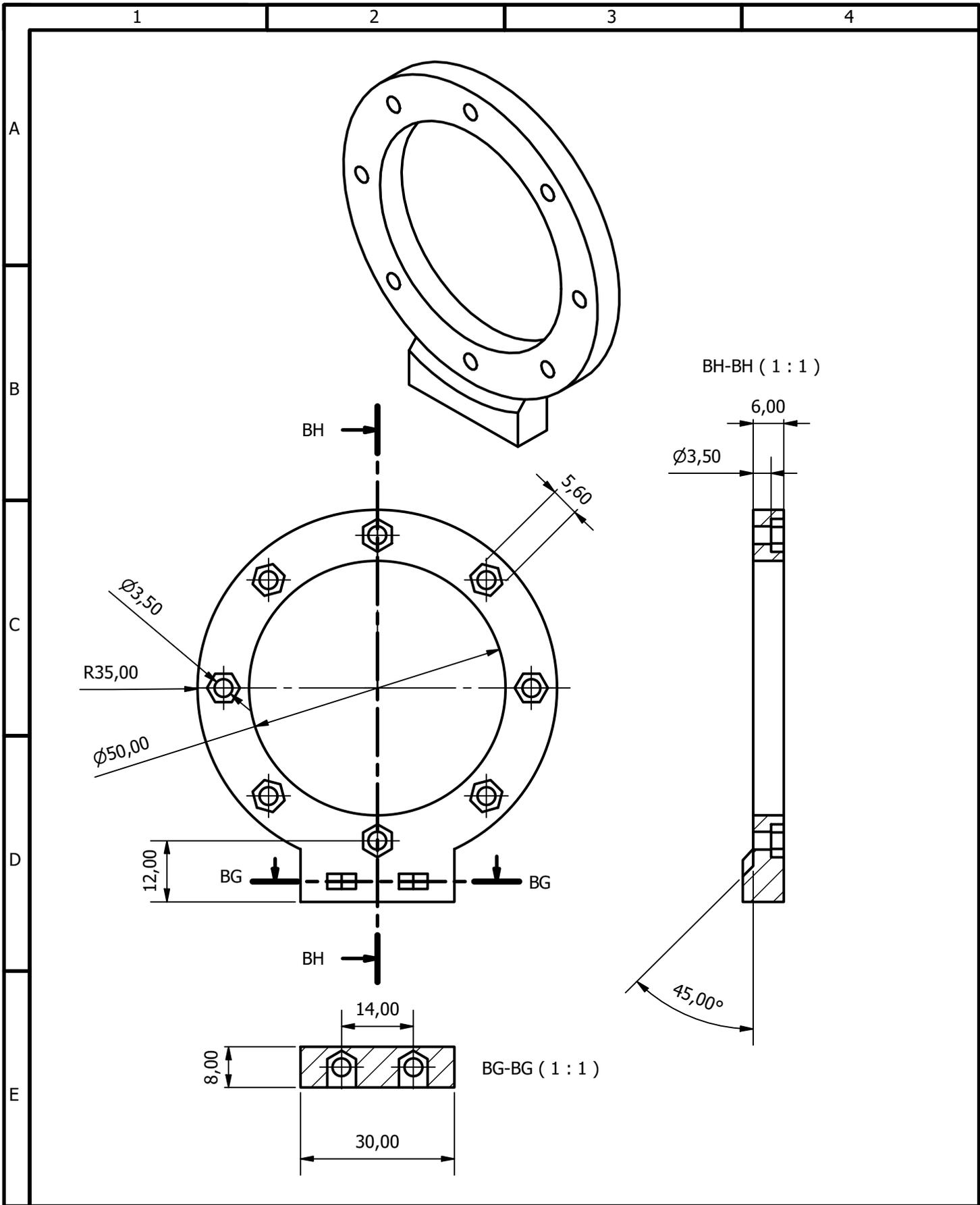
E



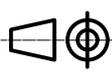
BE-BE ( 1 : 1 )



				Tolerancias	Peso 0.013 kg	Materiales: <b>FILAMENTO TPU</b>	
						Denominación: <b>SEA Flexible</b>	Escala: 1:1
				Fecha:	Nombre:		
				Dib.	Bastidas, D		
				Rev.	Ing. León, J		
				Apro.	Ing. León, J		
				Firma:		Número: <b>INGE-2792-1.10</b>	
Edi- ción	Modifi- cación	Fecha	Nombre				



				Tolerancias	Peso N/A	Materiales: <b>FILAMENTO PETG</b>	
						Denominación:	Escala:
				Fecha:	Nombre:	<b>Base SEA Flexible</b>	1:1
				Dib.	Bastidas, D		
				Rev.	Ing. León, J		
				Apro.	Ing. León, J	Número:	
				Firma:		<b>INGE-2792-1.11</b>	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	<b>espol</b>		DISEÑO BRAZOS ROBOT DE SERVICIO	



1

2

3

4

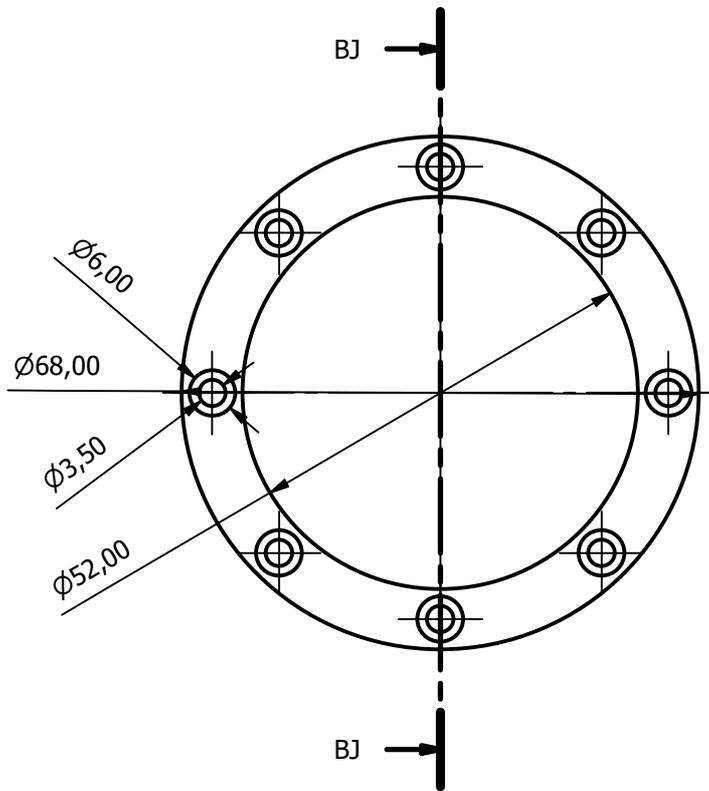
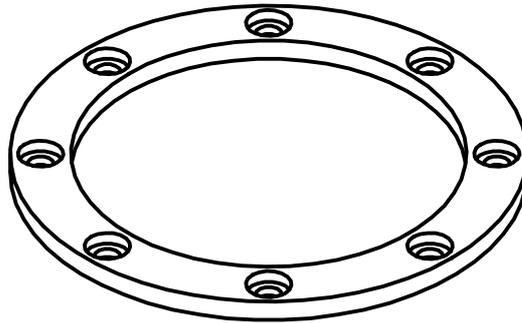
A

B

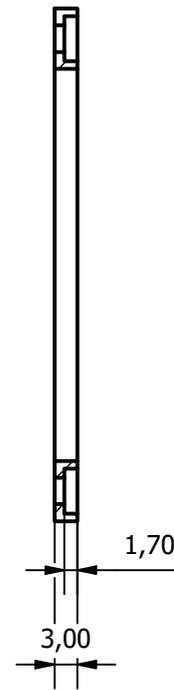
C

D

E



BJ-BJ ( 1 : 1 )



				Tolerancias	Peso 0.004 kg	Materiales: <b>FILAMENTO PETG</b>	
						Denominación:	Escala:
				Fecha:	Nombre:	<b>Anillo Exterior SEA Flexible</b>	1:1
				Dib.	Bastidas, D		
				Rev.	Ing. León, J		
				Apro.	Ing. León, J	Número:	
				Firma:	<b>espol</b>	<b>INGE-2792-1.12</b>	
Edi- ción	Modifi- cación	Fecha	Nombre			DISEÑO BRAZOS ROBOT DE SERVICIO	

1

2

3

4

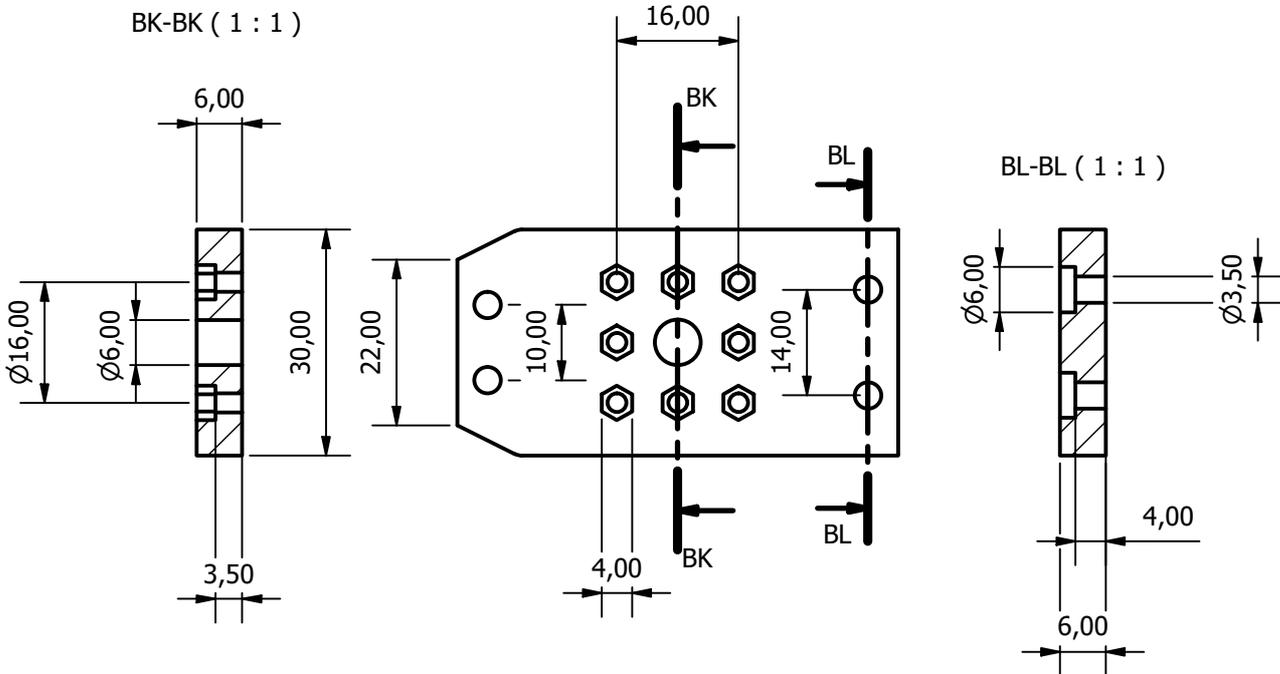
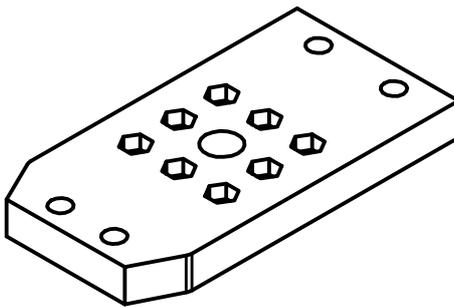
A

B

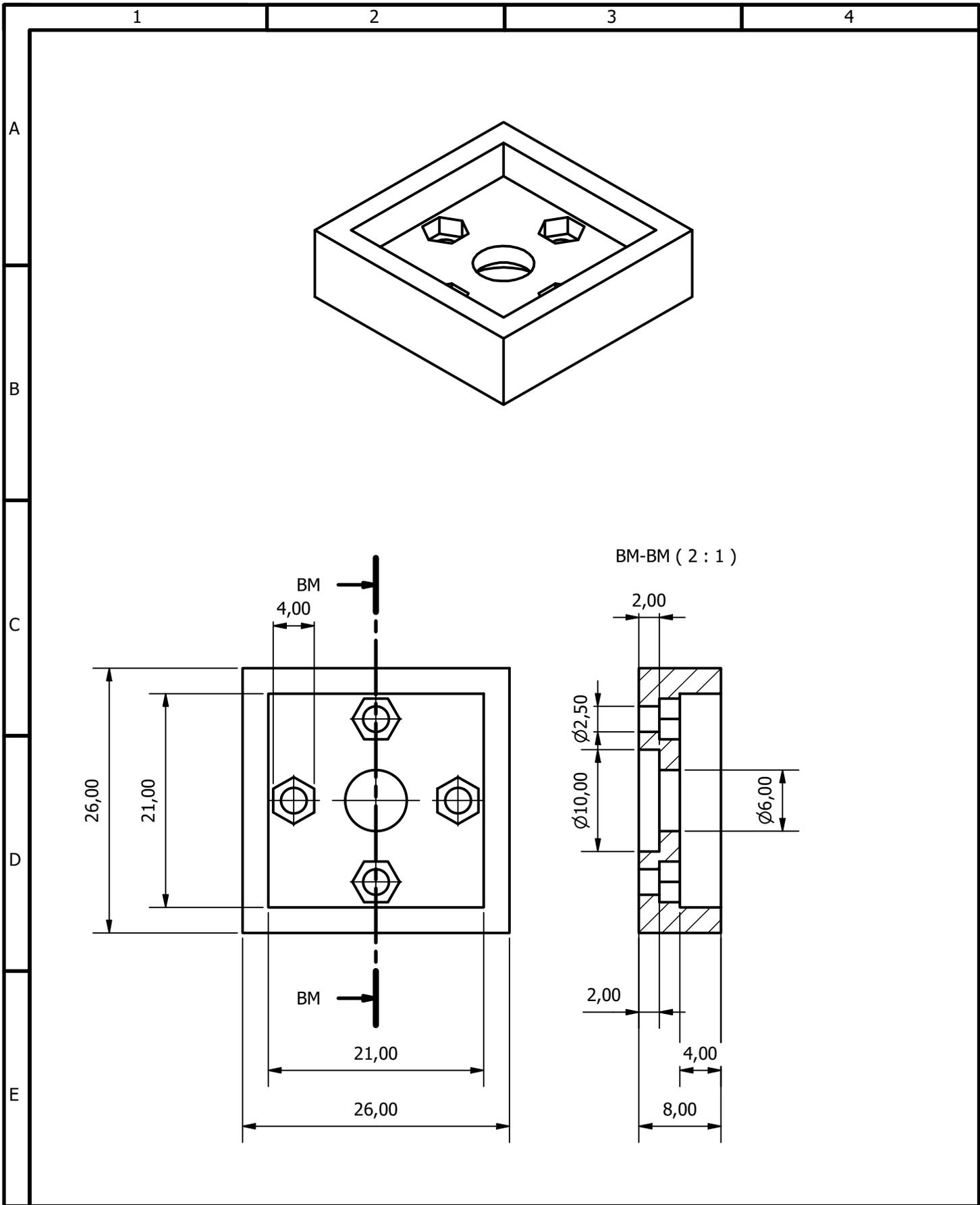
C

D

E



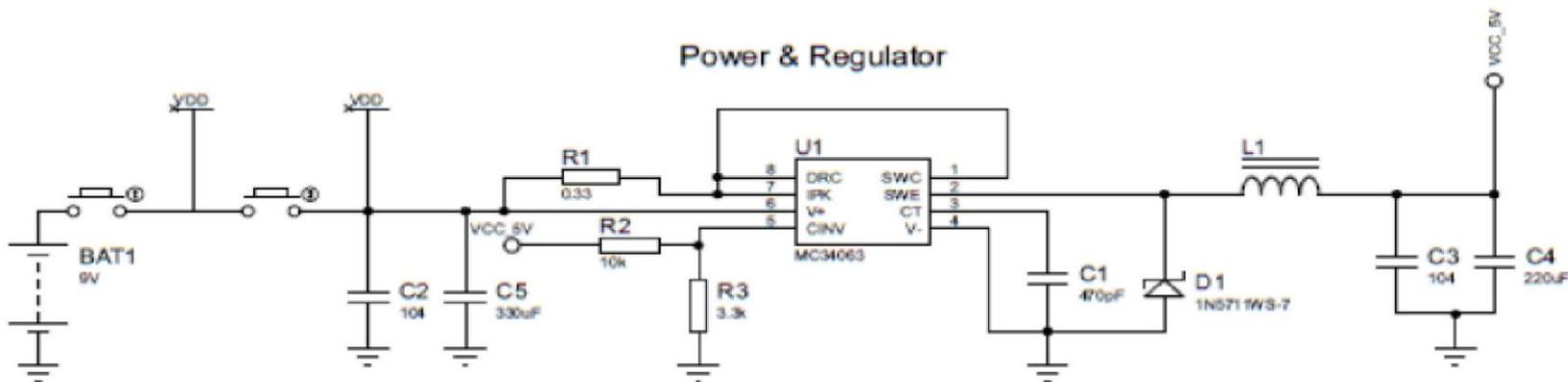
				Tolerancias	Peso N/A	Materiales: <b>FILAMENTO PETG</b>	
						Denominación: <b>Base</b>	Escala: 1:1
				Fecha:	Nombre:		
				Dib.	Bastidas, D		
				Rev.	Ing. León, J		
				Apro.	Ing. León, J		
				Firma: <b>espol</b>		Número: <b>INGE-2792-1.13</b>	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			<b>DISEÑO BRAZOS ROBOT DE SERVICIO</b>	



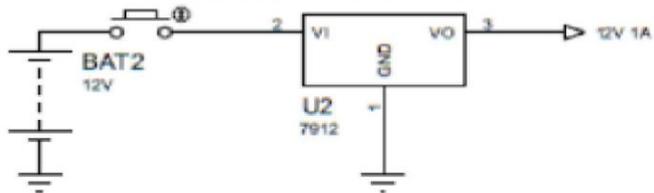
				Tolerancias	Peso	Materiales:	
					N/A	FILAMENTO PETG	
				Fecha:	Nombre:	Denominación:	Escala:
				Dib.	Bastidas, D	Unión Perfil-Base	2:1
				Rev.	Ing. León, J		
				Apro.	Ing. León, J		
				Firma:	Número:		
					INGE-2792-1.14		
Edición	Modificación	Fecha	Nombre		DISEÑO BRAZOS ROBOT DE SERVICIO		

***Apéndice B***  
***Plano eléctrico/electrónico***

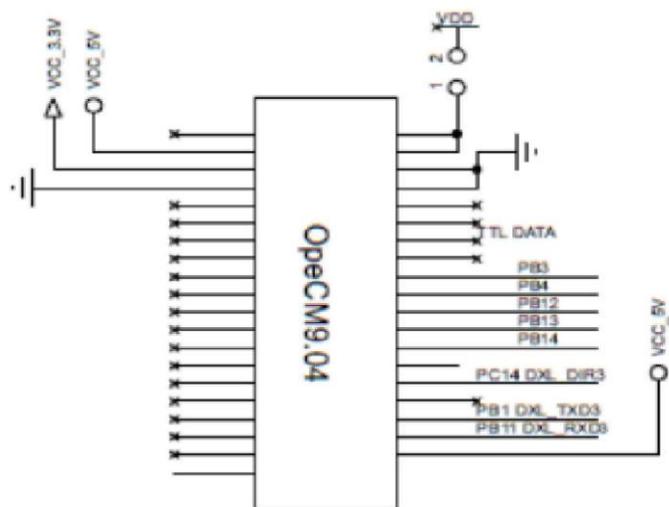
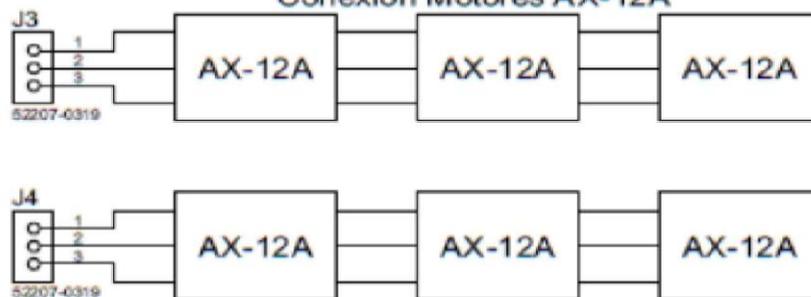
### Power & Regulator



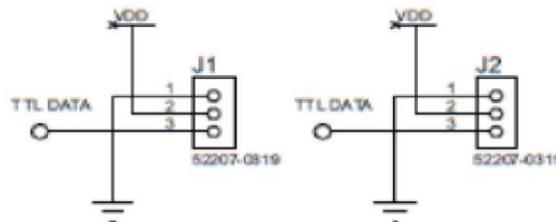
### Conexión Fuerza Motores



### Conexión Motores AX-12A



### TTL 3PIN CONNECTOR



INGE-2792-2	Nombre	Oswaldo Alvarado	Fecha	ESPOL
	Dibujado por:	Dyllan Bastidas	26/01/2025	
Folio: 1/1	Circuito eléctrico/electrónico			No.

## Apéndice C

### Recolección datos de carga

Figura C.1.

Codificación de recolección de datos de carga experimentales.

```
#define DXL_BUS_SERIAL1 1 //Dynamixel on Serial1(USART1) <-OpenCM9.04
#define DXL_BUS_SERIAL2 2 //Dynamixel on Serial2(USART2) <-LM101,BT210
#define DXL_BUS_SERIAL3 3 //Dynamixel on Serial3(USART3) <-OpenCM 485EXP

/* Dynamixel ID defines */
#define ID_NUM 1
/* Control table defines */
#define GOAL_POSITION 30
#define PRESENT_LOAD 40
#define MOVING 46

#define XL_MOVING 49

Dynamixel Dxl(DXL_BUS_SERIAL3);

byte isMoving = 0;
word presentLoad = 0;
int goalPosition = 0;
int contador = 0;

void setup() {
  // Dynamixel 2.0 Protocol -> 0: 9600, 1: 57600, 2: 115200, 3: 1Mbps
  Dxl.begin(3);
  Dxl.jointMode(ID_NUM); //jointMode() is to use position mode
}

void loop() {
  Dxl.goalPosition(ID_NUM, 512); //forward
  //Check if ID 1 dynamixel is still moving, 46 is moving control address
  //Please refer ROBOTIS support page

  //AX MX EX Series
  presentLoad = Dxl.readWord(ID_NUM, PRESENT_LOAD);
  SerialUSB.print(contador);
  SerialUSB.print(" ");
  SerialUSB.println(presentLoad);
  delay(1);
  contador = contador + 1;
}
```

<

## Apéndice D

### Codificación cinemática directa brazo derecho Figura D.1.

Implementación DH en brazo derecho primera parte.

```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
4
5 def dh_matrix(theta, d, a, alpha):
6     return np.array([
7         [np.cos(theta), -np.sin(theta)*np.cos(alpha), np.sin(theta)*np.sin(alpha), a*np.cos(theta)],
8         [np.sin(theta), np.cos(theta)*np.cos(alpha), -np.cos(theta)*np.sin(alpha), a*np.sin(theta)],
9         [0, np.sin(alpha), np.cos(alpha), d],
10        [0, 0, 0, 1]
11    ])
12
13 # Modificar los valores de theta
14 theta1 = 0 # Ángulo para la primera articulación (en grados)
15 theta2 = -90 # Ángulo para la segunda articulación (en grados)
16 theta3 = 0 # Ángulo para la tercera articulación (en grados)
17
18 # Actualizar configuración seleccionada
19 selected_config = [
20     (np.deg2rad(theta1), 0, 55, np.deg2rad(90)),
21     (np.deg2rad(theta2), 0, 143, np.deg2rad(90)),
22     (np.deg2rad(theta3), 0, 155, np.deg2rad(90))
23 ]
24
25 # Generar matrices D-H para cada articulación
26 matrices = []
27 transform = np.eye(4)
28 for theta, d, a, alpha in selected_config:
29     mat = dh_matrix(theta, d, a, alpha)
30     transform = transform @ mat
31     matrices.append(transform)
32
33 # Coordenadas de cada articulación
34 positions = np.array([transform[:3, 3] for transform in matrices])
```

Figura D.2.

Implementación DH en brazo derecho segunda parte.

```
33 # Coordenadas de cada articulación
34 positions = np.array([transform[:3, 3] for transform in matrices])
35
36 # Obtener la posición del efector final y calcular la distancia
37 end_effector_position = positions[-1]
38 base_position = np.array([0, 0, 0])
39 shortest_distance = np.linalg.norm(end_effector_position - base_position)
40
41 # Mostrar los resultados requeridos
42 print(f"\nÁngulos ingresados:")
43 print(f"Theta1: {theta1}°")
44 print(f"Theta2: {theta2}°")
45 print(f"Theta3: {theta3}°")
46
47 print(f"\nPosición del efector final (en mm):")
48 print(f"X: {end_effector_position[0]:.2f}, Y: {end_effector_position[1]:.2f}, Z: {end_effector_position[2]:.2f}")
49
50 print(f"\nDistancia más corta desde la base al efector final: {shortest_distance:.2f} mm")
51
52 # Gráfico en 3D
53 fig = plt.figure()
54 ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
55
56 # Graficar las posiciones
57 ax.plot(positions[:, 0], positions[:, 1], positions[:, 2], '-', label='Eslabones de brazo robótico')
58
59 # Destacar el efector final y la base
60 ax.scatter(0, 0, 0, color='blue', s=100, label='Articulación base') # Base
61 ax.scatter(positions[-1, 0], positions[-1, 1], positions[-1, 2], color='red', s=150, label='Efector Final')
62 for i, pos in enumerate(positions[:-1]):
63     ax.scatter(pos[0], pos[1], pos[2], color='green', s=100, label=f'Articulación {i + 1}')
64
65 # Etiquetas y configuración
66 ax.set_xlabel('X (mm)')
67 ax.set_ylabel('Y (mm)')
68 ax.set_zlabel('Z (mm)')
69 ax.set_title('Visualización 3D del brazo robótico')
```

### Figura D.3.

*Implementación DH en brazo derecho tercera parte.*

```
65 # Etiquetas y configuración
66 ax.set_xlabel('X (mm)')
67 ax.set_ylabel('Y (mm)')
68 ax.set_zlabel('Z (mm)')
69 ax.set_title('Visualización 3D del brazo robótico')
70 ax.legend()
71 ax.grid(True)
72
73 # Límites del gráfico
74 ax.set_xlim([-400, 400])
75 ax.set_ylim([-400, 400])
76 ax.set_zlim([-300, 300])
77
78 plt.show()
79
```

## Apéndice E

### Codificación cinemática directa brazo izquierdo

Figura E.1.

Implementación DH en brazo izquierdo primera parte.

```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
4
5 def dh_matrix(theta, d, a, alpha):
6     return np.array([
7         [np.cos(theta), -np.sin(theta)*np.cos(alpha), np.sin(theta)*np.sin(alpha), a*np.cos(theta)],
8         [np.sin(theta), np.cos(theta)*np.cos(alpha), -np.cos(theta)*np.sin(alpha), a*np.sin(theta)],
9         [0, np.sin(alpha), np.cos(alpha), d],
10        [0, 0, 0, 1]
11    ])
12
13 # Modificar los valores de theta
14 theta1 = 0 # Ángulo para la primera articulación (en grados)
15 theta2 = -90 # Ángulo para la segunda articulación (en grados)
16 theta3 = 0 # Ángulo para la tercera articulación (en grados)
17
18 # Actualizar configuración seleccionada
19 selected_config = [
20     (np.deg2rad(theta1), 0, -55, np.deg2rad(90)),
21     (np.deg2rad(theta2), 0, -143, np.deg2rad(90)),
22     (np.deg2rad(theta3), 0, -155, np.deg2rad(90))
23 ]
24
25 # Generar matrices D-H para cada articulación
26 matrices = []
27 transform = np.eye(4)
28 for theta, d, a, alpha in selected_config:
29     mat = dh_matrix(theta, d, a, alpha)
30     transform = transform @ mat
31     matrices.append(transform)
32
33 # Coordenadas de cada articulación
34 positions = np.array([transform[:3, 3] for transform in matrices])
35
36 # Obtener la posición del efector final y calcular la distancia
37 end_effector_position = positions[-1]
```

Figura E.2.

Implementación DH en brazo izquierdo segunda parte.

```
35
36 # Obtener la posición del efector final y calcular la distancia
37 end_effector_position = positions[-1]
38 base_position = np.array([0, 0, 0])
39 shortest_distance = np.linalg.norm(end_effector_position - base_position)
40
41 # Mostrar los resultados requeridos
42 print(f"Ángulos ingresados:")
43 print(f"theta1: {theta1}°")
44 print(f"theta2: {theta2}°")
45 print(f"theta3: {theta3}°")
46
47 print(f"Posición del efector final (en mm):")
48 print(f"X: {end_effector_position[0]:.2f}, Y: {end_effector_position[1]:.2f}, Z: {end_effector_position[2]:.2f}")
49
50 print(f"Distancia más corta desde la base al efector final: {shortest_distance:.2f} mm")
51
52 # Gráfico en 3D
53 fig = plt.figure()
54 ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
55
56 # Graficar las posiciones
57 ax.plot(positions[:, 0], positions[:, 1], positions[:, 2], '-', label='Eslabones de brazo robótico')
58
59 # Destacar el efector final y la base
60 ax.scatter(0, 0, 0, color='blue', s=100, label='Articulación base') # Base
61 ax.scatter(positions[-1, 0], positions[-1, 1], positions[-1, 2], color='red', s=150, label='Efector Final')
62 for i, pos in enumerate(positions[:-1]):
63     ax.scatter(pos[0], pos[1], pos[2], color='green', s=100, label=f'Articulación {i + 1}')
64
```

### Figura E.3.

*Implementación DH en brazo izquierdo tercera parte.*

```
65 # Etiquetas y configuración
66 ax.set_xlabel('X (mm)')
67 ax.set_ylabel('Y (mm)')
68 ax.set_zlabel('Z (mm)')
69 ax.set_title('Visualización 3D del brazo robótico')
70 ax.legend()
71 ax.grid(True)
72
73 # Límites del gráfico
74 ax.set_xlim([-400, 400])
75 ax.set_ylim([-400, 400])
76 ax.set_zlim([-300, 300])
77
78 plt.show()
```

## Apéndice F

### Configuración movimientos de los brazos

Figura F.1.

Definición de los 7 motores AX-12A.

```

#define DXL_BUS_SERIAL1 1 //Dynamixel on Serial1 (USART1)<- OpenCM9.04
#define DXL_BUS_SERIAL2 2//Dynamixel on Serial2 (USART2)<- LM101, BT210
#define DXL_BUS_SERIAL3 3//Dynamixel on Serial3 (USART3)<- OpenCM 485EXP

//BRAZO DERECHO
#define ID_NUM1 1
#define ID_NUM2 2
#define ID_NUM3 3
//BRAZO IZQUIERDO
#define ID_NUM4 4
#define ID_NUM5 5
#define ID_NUM6 6
char userInput;
//Creacion del objeto Dynamixel
Dynamixel Dxl(DXL_BUS_SERIAL3);
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  Dxl.begin(3);

  //First Motor
  Dxl.goalSpeed(ID_NUM1, 75); //Speed control 50 setting
  Dxl.jointMode(ID_NUM1); //Position mode

  //Second Motor
  Dxl.goalSpeed(ID_NUM2, 75); //Speed control 50 setting
  Dxl.jointMode(ID_NUM2); //Position mode

  //Third Motor
  Dxl.goalSpeed(ID_NUM3, 75); //Speed control 50 setting
  Dxl.jointMode(ID_NUM3); //Position mode

  //Four Motor
  Dxl.goalSpeed(ID_NUM4, 75); //Speed control 50 setting
  Dxl.jointMode(ID_NUM4); //Position mode

  //Five Motor
  Dxl.goalSpeed(ID_NUM5, 75); //Speed control 50 setting
  Dxl.jointMode(ID_NUM5); //Position mode

  //Six Motor
  Dxl.goalSpeed(ID_NUM6, 75); //Speed control 50 setting
  Dxl.jointMode(ID_NUM6); //Position mode
}

```

Figura F.2.

Función saludar2.

```

void saludar2(){
  Dxl.goalSpeed(ID_NUM1, 75);
  Dxl.goalPosition(ID_NUM1, 512);

  int b = ((120*3.14f/180.0f)*185) + 512;
  Dxl.goalSpeed(ID_NUM3, 75);
  Dxl.goalPosition(ID_NUM3, giroMotor(120));
  delay(2500);

  int c = ((-30*3.14f/180.0f)*185) + 512;
  int d = ((90*3.4f/180.0f)*185) + 512;

  int i = 0;
  while(1<=3){
    Dxl.goalSpeed(ID_NUM2, 75);
    Dxl.goalPosition(ID_NUM2, d);
    delay(900);
    Dxl.goalPosition(ID_NUM2, c);
    delay(900);
    i++;
  }
}

```

**Figura F.3.**

*Función posición inicial de los brazos.*

```
//Función Posición inicial brazo derecho
void posicionInicialDerecho(){
  DxI.goalSpeed(ID_NUM1, 75);
  DxI.goalSpeed(ID_NUM2, 75);
  DxI.goalSpeed(ID_NUM3, 75);
  DxI.goalPosition(ID_NUM1, 512);
  DxI.goalPosition(ID_NUM2, giroMotor(90));
  DxI.goalPosition(ID_NUM3, 512);
}

//Funcion Posición inicial brazo izquierdo
void posicionInicialIzquierdo(){
  DxI.goalSpeed(ID_NUM4, 75);
  DxI.goalSpeed(ID_NUM5, 75);
  DxI.goalSpeed(ID_NUM6, 75);
  DxI.goalPosition(ID_NUM4, 512);
  DxI.goalPosition(ID_NUM5, giroMotor(90));
  DxI.goalPosition(ID_NUM6, 512);
}
```

**Figura F.4.**

*Definición de función saludar levantando el brazo.*

```
//Función de saludar (levantando el brazo)
void saludar(){
  int i = 0;

  //Posición Brazo Izquierdo
  posicionInicialIzquierdo();

  //configurar AX-12A ID_NUM1 1 a 90°S
  DxI.goalSpeed(ID_NUM1, 75);
  DxI.goalPosition(ID_NUM1, giroMotor(90));
  //delay(2000);

  //configurar AX-12A ID_NUM2 2 a 90°
  DxI.goalSpeed(ID_NUM2, 75);
  DxI.goalPosition(ID_NUM2, 512);
  delay(2000);

  DxI.goalSpeed(ID_NUM3, 150);

  //Repetición saludo
  while(i<3){
    DxI.goalPosition(ID_NUM3, giroMotor(10));
    delay(900);
    DxI.goalPosition(ID_NUM3, giroMotor(120));
    delay(1000);
    i++;
  }
  //posicionInicial();
}
```

**Figura F.5.**

*Definición función dar la mano.*

```
//Función de dar la mano
void darMano(){

  //Posicion Brazo Izquierdo
  posicionInicialIzquierdo();

  //Posición del hombro
  DxI.goalSpeed(ID_NUM1, 75);
  DxI.goalPosition(ID_NUM1, giroMotor(45));
  //delay(2000);

  int i = 0;
  DxI.goalSpeed(ID_NUM3, 200);

  //Repetición de dar la mano
  while(i<=3){
    DxI.goalPosition(ID_NUM3, giroMotor(100));
    delay(500);
    DxI.goalPosition(ID_NUM3, giroMotor(60));
    delay(500);
    i++;
  }
}
```

**Figura F.6.**

*Definición función alzar pesas y configuración giro motor.*

```
//Función alzar pesas
void alzarPesa(){

    int i = 0;
    //Valores del motor del brazo
    int b = ((120*3.14f/180.0f)*185) + 512;

    DxI.goalSpeed(ID_NUM3, 100);
    DxI.goalSpeed(ID_NUM6, 100);

    //Repetición de alzar pesas
    while (i<5){
        DxI.goalPosition(ID_NUM3, giroMotor(120));
        DxI.goalPosition(ID_NUM6, giroMotor(120));
        delay(2000);
        DxI.goalPosition(ID_NUM3, 512);
        DxI.goalPosition(ID_NUM6, 512);
        delay(1500);
        i++;
    }
}

//VALOR DE GIRO DEL MOTOR
int giroMotor(int grado){
    return ((grado*3.14f/180.0f)*185)+512;
}
```

**Figura F.7.**

*Definición selección de función a realizar.*

```
void seleccionM (char m){
    switch(m){
        case 's':
            saludar();
            posicionInicialDerecho();
            posicionInicialIzquierdo();
            break;
        case 'm':
            darMano();
            posicionInicialDerecho();
            posicionInicialIzquierdo();
            break;
        case 'p':
            alzarPesa();
            posicionInicialDerecho();
            posicionInicialIzquierdo();
            break;
        case 'f':
            saludar2();
            posicionInicialDerecho();
            posicionInicialIzquierdo();
            break;
        default:
            SerialUSB.print("Ingrese una acción válida");
            break;
    }
}
```

**Figura F.8.**

*Ejecución y petición de la función a realizar.*

```
void loop() {
    posicionInicialDerecho();
    posicionInicialIzquierdo();
    SerialUSB.println("Ingrese una acción: ");
    char userInput = SerialUSB.read();
    seleccionM(userInput);
}
```