

**DISEÑO OPTIMIZADO DE UN BRAZO ROBÓTICO ANTROPOMÓRFICO
VALIDADO POR SEÑALES BIOMECÁNICAS**

**ANDRÉS FELIPE ROZO MOSQUERA
DIEGO ALEJANDRO CASTAÑEDA HERRERA**

**Proyecto integral de grado para optar al título de:
INGENIERO MECÁNICO**

Orientadores:

LUIS MIGUEL IZQUIERDO

ING. ELECTRÓNICO

LEONEL ALVEYRO TERAN LLORENTE

ING. MECÁNICO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BOGOTÁ

2024

NOTA DE ACEPTACION

Nombre
Firma del Director

Nombre
Firma del Presidente Jurado

Nombre
Firma del Jurado

Nombre
Firma del Jurado

Bogotá D.C febrero de 2024

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la universidad y Rector del claustro

Dr. Mario Posada García Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García Peña

Vicerrectora Académica

Dra. María Fernanda Vega de Mendoza

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Vicerrectora de Investigaciones y Extensión

Dra. Susan Margarita Benavides Trujillo

Secretaria General

Dr. José Alfonso Macías Rodríguez

Decano de la Facultad de ingenieras

Dr. Naliny Patricia Guerra Prieto

Director del Programa de Ingeniería Mecánica

Dr. María Angélica Acosta Pérez

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

“A mis padres, por su inquebrantable apoyo y amor a lo largo de todos estos años. Su sacrificio y aliento han sido mi mayor motivación”

“A mis familiares y amigos que son una base fundamental mi vida por sus palabras de aliento y buenos deseos. Su energía positiva ha sido un impulso constante.”

Andres Rozo & Diego Castañeda.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	12
INTRODUCCIÓN	13
1. OBJETIVOS	16
1.1 Objetivo general	16
1.2 Objetivos específicos	16
2. MARCO TEÓRICO	17
2.1 El papel actual de los robots y los seres humanos	17
2.2 Tipos de robots asistenciales	17
2.3 Sistemas protésicos	17
2.4 Biomecánica de la extremidad superior	18
2.5 Grados de libertad	19
2.6 Características del cuerpo humano y sus movimientos.	19
2.7 Modelo Denavit–Hartenberg	22
2.8 Dimensiones antropométricas	24
2.9 Método heurístico	25
2.10 Brazos robóticos de referencia	26
<i>2.10.1 Diseño y desarrollo del prototipo de un brazo robótico antropomórfico controlado mediante un microcontrolador Arduino mega 2560</i>	26
<i>2.10.2 Diseño y construcción de un brazo robótico de 6 GDL</i>	27
<i>2.10.3 Estudio y prototipado de brazo robótico para personas con amputaciones y diseño de campaña de concienciación</i>	29
<i>2.10.4 Modelado y simulación de un brazo robótico mediante el uso de SimMechanics de MATLAB</i>	30
<i>2.10.5 Desarrollo de una prótesis de brazo robótico transhumeral multi-D</i>	31

3. DISEÑO DE BRAZO ROBÓTICO	33
3.1 Selección de materiales	33
3.2 Especificaciones de diseño	35
<i>3.2.1 Dimensionamiento humano</i>	35
<i>3.2.2 Componentes y funcionamiento</i>	36
3.3 Diseño CAD	37
<i>3.3.1 Croquizado de piezas y ensamble de brazos robóticos</i>	37
4. MODELO DE DENAVIT HARTENBERG PARA EL DISEÑO 3	42
5. SOLUCIÓN DENAVIT-HARTENBERG	45
6. TORQUES BIOMECÁNICOS DE REFERENCIA	48
6.1 Obtención de torques biomecánicos de referencia	50
7. SIMULACIÓN NUMÉRICA	52
7.1 Variables cinemáticas del brazo robótico	52
<i>7.1.1 Trayectorias angulares</i>	52
8. PROCESO DE OPTIMIZACIÓN	59
9. COMPARACIÓN UTILIZANDO LA MEDIDA DE ERROR CUADRÁTICO MEDIO	60
9.1 Comparación de los perfiles de torques	60
10. CONCLUSIONES	64
BIBLIOGRAFIA	66
ANEXOS	68

LISTA DE FIGURAS

	<i>Pág.</i>
Figura 1. Tipos de unión mecánicas	19
Figura 2. Planos y ejes del cuerpo humano	20
Figura 3. Movimientos de la extremidad superior del cuerpo humano figura	22
Figura 4. Denavit–Hartenberg para un brazo humano	23
Figura 5. Dimensiones antropométricas	25
Figura 6. Diseño prototipo brazo controlado mediante Arduino meda 2560	27
Figura 7. Aproximación del modelo propuesto por Denavit Hartenberg	28
Figura 8. Diseño CAD brazo 6 grados de libertad	29
Figura 9. Estudio y prototipado de brazo robótico para personas con amputaciones	30
Figura 10. Manipulador Robótico expresado en bloques	31
Figura 11. Brazo robótico transhumeral	32
Figura 12. Diseño inicial del brazo robótico antropomórfico	37
Figura 13. Segundo diseño de brazo robótico antropomórfico	39
Figura 14. Tercer diseño de brazo robótico antropomórfico	41
Figura 15. Coordenadas en relación al brazo robótico	43
Figura 16. Medidas de segmentos de posición	44
Figura 17. Posición del segmento final	47
Figura 18. Ilustración primera simulación	49
Figura 19. Ilustración segundo movimiento	50
Figura 20. Brazo robótico antropomórfico en Simscape Multibody Link	52
Figura 21. Cálculo de torque y entrada de movimiento	53
Figura 22. Trayectoria del brazo en la primera simulación	54
Figura 23. Trayectoria del antebrazo en la primera simulación	54
Figura 24. Animación de la simulación del tiempo de 0-3s	55
Figura 25. Ecuación del movimiento de flexión en el brazo	55

Figura 26.	Ecuación del movimiento de flexión en el codo	56
Figura 27.	Trayectoria del brazo en la segunda simulación	57
Figura 28.	Trayectoria del antebrazo en la segunda simulación	57
Figura 29.	Animación de la simulación realizada	59
Figura 30.	Iteraciones simuladas	61
Figura 31.	Perfiles de torque generados en la primera simulación del brazo	61
Figura 32.	Perfiles de torque generados en la primera simulación del antebrazo	62
Figura 33.	Perfiles de torque generados en la segunda simulación del brazo	62
Figura 34.	Perfiles de torque del antebrazo generados en la segunda simulación	63
Figura 35.	Vista Explosionada: Chapas Brazo 1.	69
Figura 36.	Vista Explosionada: Brazo 2.	70
Figura 37.	Plano del Brazo	71
Figura 38.	Plano del antebrazo	72
Figura 39.	Plano del Eje 1	73
Figura 40.	Plano Del Eje 2	74
Figura 41.	Plano articulación 1	75
Figura 42.	Plano articulación 2	76
Figura 43.	Plano Pinza	77
Figura 44.	Plano Hombro	78
Figura 45.	Plano Soporte	79
Figura 46.	Vista Explosionada: Brazo 3	80
Figura 47.	Plano Torso	81
Figura 48.	Plano Hombro 2	82
Figura 49.	Plano Brazo 2	83
Figura 50.	Plano Antebrazo 2	84
Figura 51.	Plano Articulación 1	85
Figura 52.	Plano Articulación 2	86

Figura 53.	Plano Eje 1	87
Figura 54.	Plano Eje 2	88
Figura 55.	Plano Pinza	89
Figura 56.	Plano Soporte	90

LISTA DE TABLAS

	<i>Pág.</i>
Tabla 1. Parámetros de Denavit-Hartenberg para segmentos del brazo	24
Tabla 2. Propiedades del PLA	35
Tabla 3. Características físicas del segundo diseño	38
Tabla 4. Características físicas del tercer diseño	40
Tabla 5. Validación modelo Denavit-Hartenberg para el diseño 3	42
Tabla 6. Modelo de miembro superior humano	48

RESUMEN

En este trabajo se busca diseñar un modelo 3D de un brazo robótico antropomorfo. Para ello se usaron señales biomecánicas de referencia con las cuales se compara los perfiles de torque producidos por las articulaciones más críticas y se revisó su comportamiento. A partir de implementar los modelos CAD en Matlab/Simulink y replicar los movimientos del brazo de referencia, se encontró que, aunque el error cuadrático medio es en la mayoría de los casos alto, los perfiles de torque producidos por los brazos antropomorfos siguen las formas de los torques de referencia. Así mismo, se obtuvieron diseños que son capaces de tener una diferencia mínima de torques en los puntos críticos, o máximos, con lo cual se obtiene un diseño capaz de representar un parámetro de diseño inicial para diferentes brazos.

Palabras clave: Brazo robótico antropomórfico, modelamiento CAD, Torque biomecánico, simulación en Matlab/Simulink.

INTRODUCCIÓN

Enfrentando las limitaciones cotidianas, las personas con discapacidad de movimiento en el miembro superior buscan soluciones que les permitan una mayor independencia. Para superar estas dificultades, se han desarrollado prótesis funcionales diseñadas específicamente para aquellas personas que experimentan carencia total o parcial de la extremidad superior. El enfoque principal de estas soluciones es proporcionar la capacidad de ejecutar movimientos y sostener objetos de manera efectiva.

La propuesta ante esta limitación consiste en la simulación de un brazo robótico antropomórfico asistencial. Que ofrezca una solución que impacte positivamente en su calidad de vida, pretendiendo contribuir al estado del arte mediante la presentación de diseño del brazo robótico que sirva como plataforma de pruebas para una variedad de movimientos específicos, promoviendo su integración y participación en diversas actividades cotidianas.

Este dispositivo se diseñará utilizando herramientas de software CAD y simulación numérica, por lo cual se es necesario obtener datos de variables biomecánicas como perfiles de torque de las articulaciones del brazo y la consideración de movimientos específicos. Estos datos se obtendrán por medio de artículos científicos, permitiendo así una reproducción eficaz de los movimientos del brazo humano. En donde la pregunta fundamental que surge es:

¿Cuál es el diseño de un brazo robótico antropomórfico para un movimiento específico, que se lleve a cabo mediante simulación numérica y cumpla de manera óptima con las señales biomecánicas de referencia?

Para recrear la simulación del brazo robótico, es indispensable primero tener en cuenta la trayectoria que han tenido con el paso del tiempo. Estos brazos robóticos tienen sus raíces en diversas industrias y su aplicación está en constante crecimiento, especialmente en el ámbito de la robótica asistencial en donde se comienzan a presentar avances para hacer cada vez más sencillo el uso de prótesis y órtesis que soporten y realicen todos los movimientos de un brazo humano. Algunos de los trabajos más relevantes del estado del arte que son referencia para el desarrollo de este proyecto son “Diseño y construcción de un brazo robótico de 6 GDL”[1] en donde se construye un prototipo con el fin de validar algoritmos de control. En este trabajo, se hace un estudio de la dinámica del cuerpo humano, se evalúan los esfuerzos con el modelo de Von Mises y se verifica

el funcionamiento del mismo a partir de diferentes movimientos. Este trabajo sirvió como referencia para el diseño del prototipo de este proyecto.

Así mismo, existen otros proyectos en los que se elaboran diversos modelos, como el trabajo titulado "Diseño y Desarrollo del prototipo de un brazo robótico articulado antropomórfico controlado mediante un microcontrolador Arduino Mega 2560" [2]. Este proyecto sirve como guía para la concepción e implementación del hardware de control, así como en la construcción del modelo físico del brazo robótico, semejante a otros proyectos. Ejemplos de ello son los estudios denominados "Desarrollo de un brazo robótico antropomórfico: Diseño base, elección de motores, electrónica de potencia y cálculo y simulación de la cinemática del robot" [3] y "Estudio y prototipado de brazo robótico para personas con amputaciones y diseño de campaña de concienciación" [4].

Estos trabajos anteriores proporcionan información detallada sobre el diseño de diversos modelos de brazos robóticos antropomórficos, abarcando desde la conceptualización hasta la construcción y control. Estas referencias brindan una visión integral de cómo se han llevado a cabo investigaciones en esta área específica, permitiendo obtener una comprensión global de las distintas líneas de acción que comparten estos trabajos de investigación.

El diseño mecánico de los componentes sólidos de un brazo robótico antropomórfico, orientado hacia la asistencia o rehabilitación física, influye significativamente en su comportamiento. En este contexto, el presente trabajo de investigación se propone el diseño mecánico a través de la comparación entre los resultados simulados obtenidos y los perfiles de torque biomecánicos de referencia, que permite definir un error a ser minimizado para la variable torque en cada articulación del dispositivo robótico. El objetivo principal es proponer un diseño con el cual se puedan generar perfiles de torque que sean próximos a la dinámica corporal, lo que tendrá un impacto significativo en una integración más armoniosa entre el usuario y el brazo robótico antropomórfico.

Con los resultados obtenidos en este proyecto, no solo se busca optimizar la funcionalidad del brazo robótico, sino también proponer una solución más económica y sostenible a largo plazo, al considerar la reducción proyectada en la necesidad de materiales. Además, se busca incrementar la eficiencia energética del dispositivo, ya que, al generar perfiles de torque más suaves y próximas del comportamiento biomecánico del brazo, los motores que van a accionar cada grado de libertad

tendrán un consumo de corriente menor, sin tantos picos, contribuyendo así a su viabilidad y practicidad en el contexto de la asistencia y rehabilitación física.

En el marco de este proyecto, se lleva a cabo una investigación de tipo exploratoria que se apoya en un método heurístico de optimización, es decir, basado en el ensayo y error. La fase inicial consiste en el diseño de un brazo robótico antropomórfico mediante el uso de software de modelado CAD. A través de una simulación numérica en la biblioteca Simscape de Matlab/Simulink, se obtienen los datos de torque para cada grado de libertad del dispositivo robótico con el fin de evaluar la funcionalidad del diseño propuesto e identificar posibles áreas de mejora.

El enfoque principal del estudio considera la optimización de forma heurística del diseño de los componentes mecánicos del brazo robótico proyectado para ejecutar movimientos de pinza o agarre, validando los torques obtenidos por medio de la comparación (error) con los perfiles de torque biomecánicos de referencia obtenidos por la realización de un movimiento de agarre de un brazo antropomórfico de un exoesqueleto en [5]. El objetivo específico será optimizar el diseño, buscando de esta manera garantizar un diseño óptimo en términos de comportamiento biomecánico y eficiencia energética, en la medida en que masas menores, exigirán menos potencia de los motores que controlan cada grado de libertad del dispositivo robótico. Este enfoque metodológico permitirá no solo validar la viabilidad del brazo robótico antropomórfico propuesto, sino también establecer cuáles son los parámetros de diseño que tiene mayor influencia en el proceso de optimización, en relación con la ejecución de un movimiento de agarre.

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo general:

Optimizar el diseño de un brazo robótico antropomórfico mediante simulación numérica validada por señales biomecánicas, considerando casos de estudio específicos.

1.2 Objetivos específicos:

Diseñar la estructura mecánica del brazo robótico antropomórfico utilizando herramientas de software de modelado CAD y de simulación numérica (Matlab/Simulink), considerando valores estándares aproximados de acuerdo con las referencias biomecánicas.

Obtener los datos de perfiles de torque biomecánicos de las articulaciones del brazo para movimientos específicos, utilizando bases de datos científicas o herramientas de simulación computacional de dinámica corporal humana.

Validar el comportamiento del brazo robótico antropomórfico diseñado mediante la comparación de los resultados computacionales obtenidos, cumpliendo de manera óptima las señales y los perfiles de torque biomecánicos de referencia, para los movimientos específicos considerados.

2. MARCO TEÓRICO

La robótica ha experimentado avances significativos en las últimas décadas, particularmente en el campo de las prótesis robóticas destinadas a asistir y mejorar la calidad de vida de personas con discapacidades físicas. En esta sección, se presenta un marco teórico enfocado en las prótesis robóticas para miembros superiores. El propósito es proporcionar información contextual que ofrezca una visión integral de las soluciones existentes y su nivel de madurez tecnológica. Asimismo, se busca identificar los desafíos que enfrentan los ingenieros dedicados a este campo, considerando problemáticas que podrían influir en futuros proyectos de diseño.

2.1 El papel actual de los robots y los seres humanos

Los robots fueron originalmente diseñados para ser utilizados en espacios industriales [[6], en donde su objetivo consiste en remplazar a los humanos en tareas tediosas y repetitivas, o en tareas cuya labor requiera una alta precisión. Sin embargo, la robótica se ha expandido hasta tal punto, de tener una interacción más próxima con los seres humanos, incluyendo tareas consideradas como robótica asistencial en donde se ayuda a realizar tareas físicas y cognitivas a los seres humanos.

2.2 Tipos de robots asistenciales

Los robots asistenciales tienen diferentes denominaciones dependiendo de su función [6]:

- Exoesqueletos robóticos: Amplían la fuerza del ser humano más allá de su capacidad natural. Una de las características de estos robots es que la estructura se corresponde a la anatomía del cuerpo humano.
- Robots ortésicos: Es aquel que se adapta a la anatomía del cuerpo humano y su función es restablecer las funciones perdidas o débiles. A diferencia del robot exoesqueleto, este se encarga solo de complementar y restablecer la función disminuida.
- Robots protésicos: Estos son los más conocidos, pues funcionan como prótesis, es decir un dispositivo electromecánico que sustituye los miembros perdidos tras alguna amputación. Estos permiten sustituir la función del miembro perdido de una forma más parecida a la función humana natural.

2.3 Sistemas protésicos

Al igual que la diversidad de tipos de robots asistenciales disponibles hoy en día, es relevante considerar la amplia gama de prótesis disponibles. Según la información proporcionada por

expertos en robótica y prótesis inteligentes [7], es fundamental comprender los distintos tipos de prótesis que se encuentran en este campo:

- **Prótesis mecánicas:** consisten en un conjunto de mecanismos que le permiten a su portador levantar algunos objetos de determinado tamaño al accionar un sistema mecánico de resortes. Para su uso se requiere que el portador sea capaz de realizar movimientos de expansión del pecho, depresión y elevación del hombro, abducción y aducción escapular y flexión glenohumeral para poder accionar el sistema.
- **Prótesis eléctricas:** Estas prótesis utilizan motores eléctricos para poder mover el dispositivo final. Su accionamiento y control puede realizarse por un pulsador, y entre sus desventajas se encuentran el peso del brazo, el mantenimiento y el cuidado contra la humedad.
- **Prótesis neumáticas:** son prótesis impulsadas por ácido carbónico comprimido para proporcionar la energía, pero poseen complicaciones en sus accesorios y riesgos asociados con el uso del ácido.
- **Prótesis mioeléctricas:** son prótesis eléctricas avanzadas que se controlan mediante una señal eléctrica producida por la contracción de los músculos en el cuerpo. Ofrecen alta rehabilitación, estética, fuerza, velocidad y posibilidades de combinación y ampliación. El control se basa en el registro de una señal eléctrica muy pequeña (EMG) producida por la contracción muscular, que se amplifica y procesa para controlar los motores en la prótesis y producir movimiento. Los sensores que registran la señal EMG se llaman electrodos y se colocan en la superficie de la piel.
- **Prótesis híbridas:** son prótesis que combinan la acción del cuerpo con el accionamiento eléctrico para producir movimiento en una sola prótesis. Son comunes en personas con amputaciones o deficiencias transhumerales y suelen incluir un codo accionado por el cuerpo y un dispositivo terminal controlado mioeléctricamente, como un gancho o una mano.

2.4 Biomecánica de la extremidad superior

En esta sección, se lleva a cabo una revisión de los análisis y descripciones relacionadas con la biomecánica del brazo humano. Inicialmente, se abordan los diversos tipos de articulaciones, grados de libertad inherentes al brazo humano y planos anatómicos para el estudio del movimiento. Posteriormente, se procede a detallar la cinemática y cinética de un brazo robótico en función de estos grados de libertad, con el fin de proporcionar una comprensión más amplia del funcionamiento y estructura del dispositivo robótico diseñado en este trabajo.

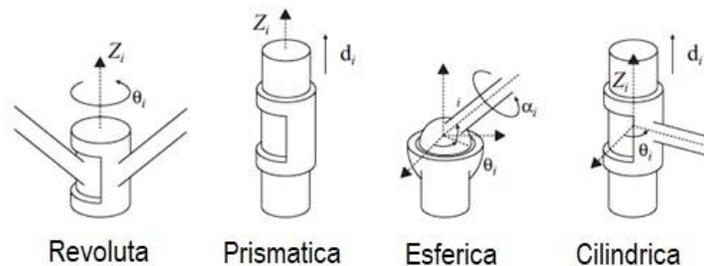
2.5 Grados de libertad

Los grados de libertad se utilizan para referirse a las capacidades de los robots en términos de movilidad, en este contexto implica el número de articulaciones o ejes de movimiento que tiene el robot [8].

Conforme ilustrado en la Figura 1, existen diferentes tipos de articulaciones las cuales son capaces de proporcionar diferentes grados de libertad. Con este conjunto de articulaciones se puede representar una amplia gama de movimientos incluyendo los movimientos de las extremidades del cuerpo humano.

Figura 1.

Tipos de unión mecánicas



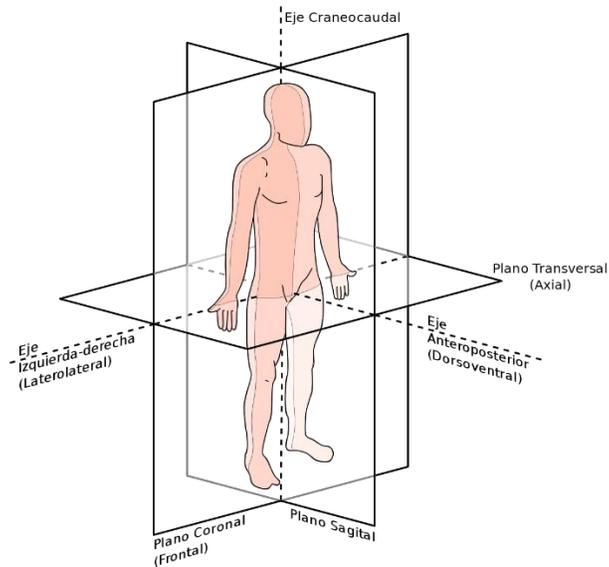
Nota. La figura representa los diferentes tipos de unión mecánicas con los que se puede construir robots de con diferentes grados de libertad. Tomado de [J. L. Pons, Wearable robots: biomechatronic exoskeletons. Wiley, 2008.]

2.6 Características del cuerpo humano y sus movimientos.

Según los principios de la biomecánica, se aborda la comprensión del movimiento humano mediante el análisis de las interacciones entre los huesos y la amplitud de movimiento de cada articulación en los tres planos anatómicos del cuerpo, según se ilustra en la Figura 2.

Figura 2.

Planos y ejes del cuerpo humano.



Nota. La figura muestra la nomenclatura usada para describir los planos sobre los que se ejecutan los movimientos humanos. Tomado de [“Figura 4. Abducción-Aducción - ADAYO PBO.” Accessed: May 12, 2023. [Online]. Available: <https://www.adayo-pbo.es/glosario/figura-4-abduccion-aduccion/#>]

- Plano frontal o coronal: divide el cuerpo en partes anterior y posterior.
- Plano transversal: divide el cuerpo en partes superior e inferior.
- Plano sagital o lateral: divide el cuerpo en partes derecha e izquierda.

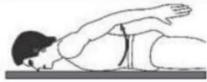
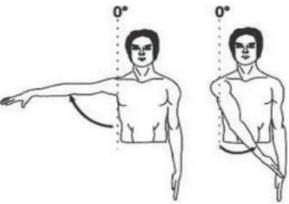
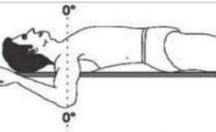
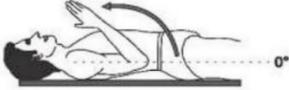
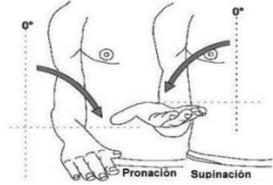
Los movimientos que se realizan en el cuerpo humano pueden ser caracterizados mediante los planos anatómicos representados en la Figura (2). Los movimientos que ocurren en el plano sagital son la flexión y la extensión. La flexión implica la reducción del ángulo entre huesos o partes del cuerpo, mientras que la extensión aumenta dicho ángulo en una articulación específica. Por otro lado, en el plano frontal o coronal, se consideran los movimientos de abducción, que se refiere a un desplazamiento hacia fuera de una extremidad, y de aducción, que constituye el movimiento opuesto, como se detalla en la Tabla 1.

En el plano transversal, ocurren los movimientos de supinación y pronación. La supinación es la rotación del antebrazo de modo que la posición de la palma de la mano queda en una posición mirando hacia arriba, mientras que la pronación es su contra parte., conforme ilustrado en la tabla

1 sección del antebrazo. Así mismo el ser humano posee diferentes limitaciones en tanto los rangos de acción de los movimientos mencionados anteriormente, por ende, es importante respetarlos en la ejecución de movimientos realizado por el robot, para así aproximarse a los perfiles de referencia.

Figura 3.

Movimientos de la extremidad superior del cuerpo humano figura

Referencia Anatómica	Articulación	Movimiento	Rango min/max	Ilustración
Brazo	Hombro (Glenohumeral)	Flexión	0°/150° a 170°	
		Extensión	0°/40°	
		Abducción	0°/160° a 180°	
		Aducción	0°/30°	
		Rotación externa	0°/70°	
		Rotación interna	0°/70°	
Antebrazo	Codo	Flexión	0°/150°	
		Extensión	0°/10°	
Antebrazo	Radiocubital proximal y distal	Pronación/ Supinación	0°/90°	

Nota. Esta tabla ilustra los movimientos realizados en la extremidad superior del cuerpo humano, así como sus rangos. Tomado de “Biomechanics of the Upper Limbs: A Review in the Sports Combat Ambit Highlighting Wearable Sensors” [A. B. Ortega et al., “Biomechanics of the Upper Limbs: A Review in the Sports Combat Ambit]

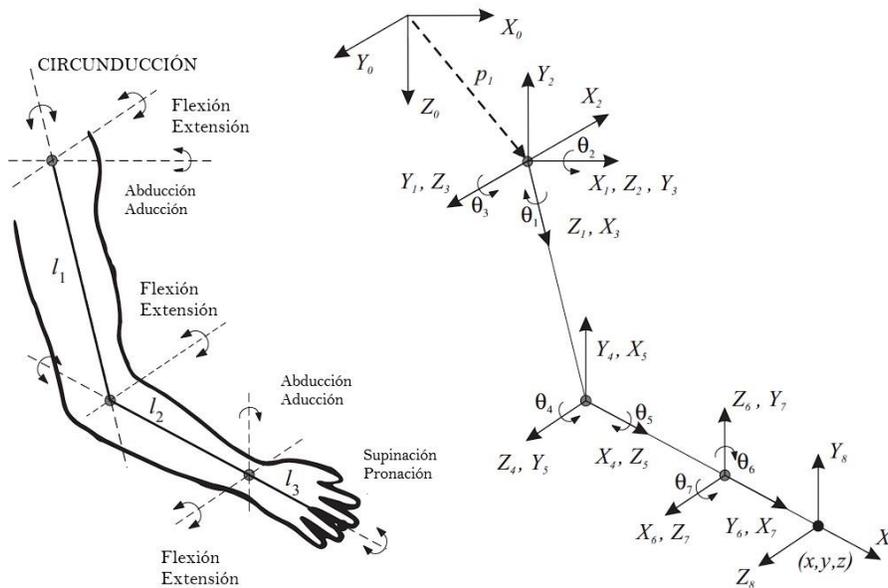
2.7 Modelo Denavit–Hartenberg

La convención Denavit–Hartenberg establece un algoritmo para la asignación de un conjunto de sistemas de coordenadas que están interconectados mediante transformaciones de traslación y rotación. Este algoritmo considera de manera precisa la cinemática específica de las articulaciones

del robot al determinar las transformaciones entre coordenadas consecutivas [7]. Para esto, es necesario discretizar un modelo que indique de forma precisa, la función que cumple cada articulación del cuerpo humano para poder relacionar esta información a un modelo en grados de libertad que sea capaz de representar la cinemática de los ejes de movimiento de todas las articulaciones. En base a Pons [6], se puede asumir un modelo de 7 Grados de libertad, el cual simplifica algunas articulaciones pero que de igual manera cumple con los movimientos básicos que debe realizar el brazo humano. Adicionalmente se presenta un modelo grafico de este tipo de brazo en la figura (4).

Figura 4.

Denavit–Hartenberg para un brazo humano.



Nota. Notación Denavit–Hartenberg para un brazo humano. Tomado de: [J. L. Pons, Wearable robots: biomechatronic exoskeletons. Wiley, 2008.]

Los grados de libertad (GDL) por articulación considerados en la Figura (4) corresponden a 3 GDL para el hombro, 2 GDL para el codo, y 2 GDL para la muñeca.

Tabla 1.*Parámetros de Denavit-Hartenberg para segmentos del brazo*

Parametros de Denavit-Hartenberg para los segmentos del brazo							
Articulación	β_1	Numero	α_i	a_i	d_i	θ_1	
Base	0	1 _(0→1)	0	a_0	d_0	0	
Hombro	(-90) Rotación Medial/ Rotación Lateral (+90)	2 _(1→2)	-90°	0	0	β_1+90°	
Hombro	(-180) Abducción/Aducción (+50)	3 _(2→3)	+90°	0	0	β_2+90°	
Hombro	(-180) Flexión/Extensión (+80)	4 _(3→4)	0	L_1	0	β_3+90°	
Codo	(-10) Extensión/Flexión (+145)	5 _(4→5)	+90°	0	0	β_4+90°	
Codo	(-90) Pronación/Supinación (+90)	6 _(5→6)	+90°	0	L_2	β_5+90°	
Muñeca	(-90) Flexión/Extensión (+70)	7 _(6→7)	+90°	0	0	β_6+90°	
Muñeca	(-15) Abducción/Aducción (+40)	8 _(7→8)	0	L_3	0	β_7	

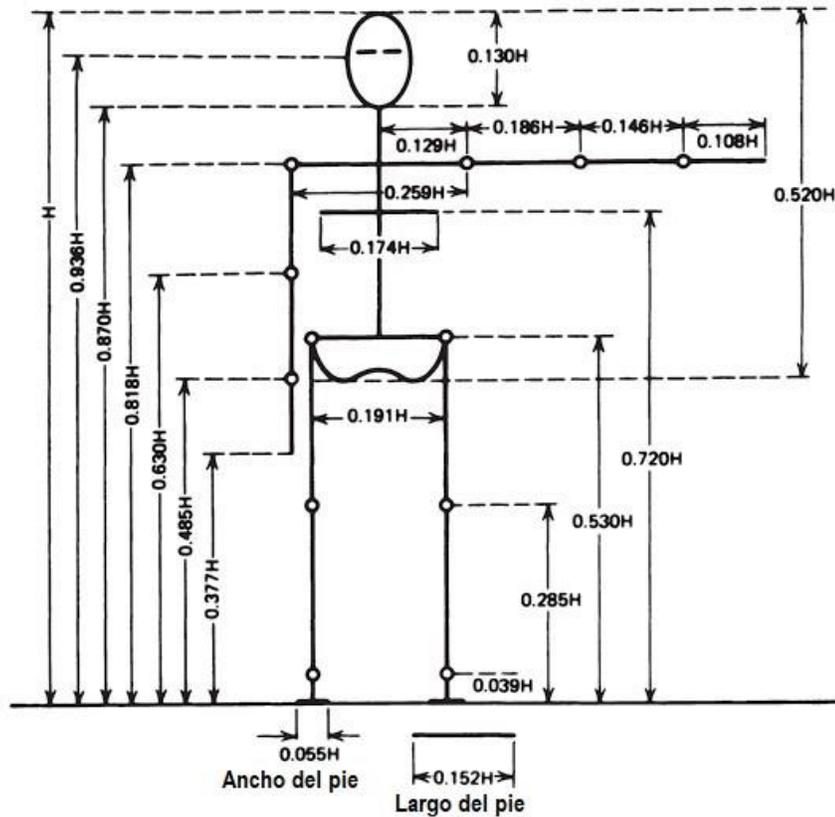
Nota. En esta tabla se muestran los parámetros Denavit–Hartenberg para los segmentos del brazo. Tomado de: [J. L. Pons, Wearable robots: biomechatronic exoskeletons. Wiley, 2008.]

2.8 Dimensiones antropométricas

Las dimensiones del cuerpo humano varían dependiendo de la persona, Drillis y Contini [11] estandarizaron un promedio de las medidas de los segmentos entre cada articulación, a partir de la altura H de la persona, donde el tamaño promedio de cada segmento corporal se puede apreciar en la Figura (5).

Figura 5.

Dimensiones antropométricas



Nota. Dimensión promedio en función la altura de cada extremidad del cuerpo humano. Tomado de [D. A. Winter, Biomechanics and motor control of human movement. Wiley, 2009.].

2.9 Método heurístico

En este trabajo, se considera un método heurístico basado en el error entre dos variables, que en esta investigación corresponde al perfil de torque en cada articulación del brazo robótico. El objetivo es minimizar el error entre el perfil de torque obtenido en la articulación considerada, y el perfil de torque biomecánico correspondiente obtenido del trabajo [5] y también, vía simulación en un software de dinámica corporal. La minimización del error se realiza ajustando el diseño de los componentes mecánicos que influyen la articulación.

El método heurístico basado en el error entre dos variables es una estrategia que utiliza enfoques heurísticos para abordar y minimizar las diferencias entre dos variables. Este enfoque puede ser aplicado en diversos contextos, como la optimización de procesos, la predicción de datos o la

mejora de modelos. La heurística se refiere a un método práctico y no necesariamente exacto para abordar problemas complejos. En este contexto, el error entre dos variables sugiere que hay una diferencia entre dos conjuntos de datos, mediciones o modelos, y el objetivo del método heurístico es reducir esta diferencia de manera eficiente.

El proceso típicamente involucra iteraciones y ajustes basados en la observación del error entre las dos variables. A través de estas iteraciones, se buscan soluciones que minimicen gradualmente este error hasta alcanzar un resultado satisfactorio o una convergencia aceptable.

Es importante destacar que la aplicación específica de un método heurístico basado en el error dependerá del contexto y de la naturaleza de las variables en cuestión. Ejemplos comunes incluyen algoritmos de optimización heurística, técnicas de ajuste de modelos y estrategias de corrección de datos. Este enfoque ofrece flexibilidad para abordar problemas en los que no es posible o práctico encontrar soluciones exactas.

2.10 Brazos robóticos de referencia

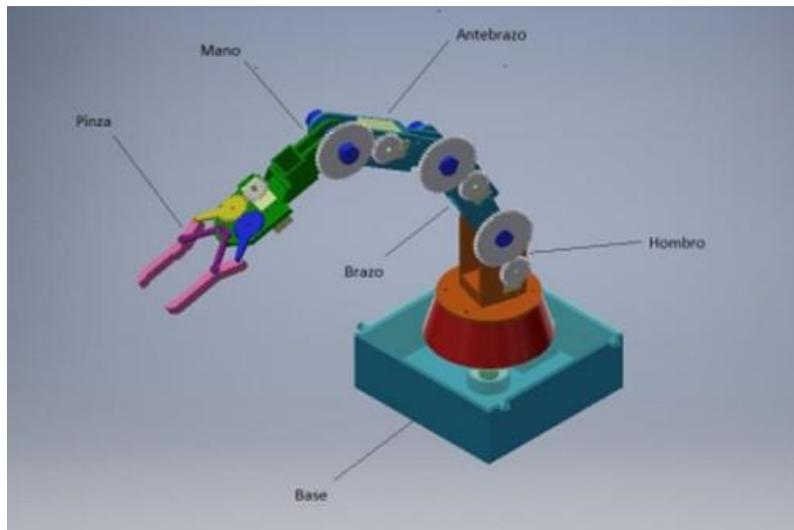
2.10.1 Diseño y desarrollo del prototipo de un brazo robótico antropomórfico controlado mediante un microcontrolador Arduino mega 2560

Este proyecto desarrollado por Vila Castellá [2] describe el proceso de diseño y construcción de un brazo robótico con cinco grados de libertad, caracterizado por su estructura antropomórfica que facilita movimientos precisos y fluidos. Este proyecto proporciona desde la selección inicial de los componentes hasta la implementación de la interfaz de usuario. El diseño detallado de cada componente y el ensamble total se realiza en Autodesk Inventor, asegurando la precisión y eficacia del montaje mediante simulaciones que modelaron su comportamiento mecánico. El diseño final del brazo robótico se presenta en la Figura (6).

El objetivo de tomar como referencia este proyecto es que como se habló anteriormente este abarca desde la visualización del diseño creado, hasta su construcción que presenta 5 grados de libertad, permitiendo así determinar los movimientos que puede recrear y la naturaleza con la que desempeña estos movimientos. Al mismo tiempo, demostrar que es factible construir un brazo robótico de alta calidad utilizando piezas y materiales económicos como lo es el PLA, material del cual está construido este brazo. Este enfoque resalta la viabilidad y accesibilidad de la tecnología robótica, abriendo nuevas posibilidades en el ámbito de la ingeniería y la automatización [2].

Figura 6.

Diseño prototipo brazo controlado mediante Arduino meda 2560



Nota. Diseño prototipo brazo controlado mediante Arduino meda 2560. Tomado de: [I. Villa Castellá, “Diseño y desarrollo del prototipo de un brazo robóticoantropomórfico controlado mediante arduino meda 2560,” 2018]

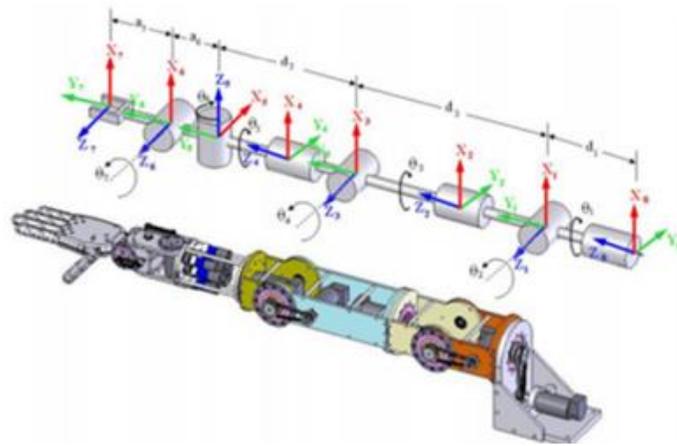
2.10.2 Diseño y construcción de un brazo robótico de 6 GDL

En este trabajo desarrollado por Cuesta Diego y Huerfano Jeison [1]se presenta el diseño y la construcción de un brazo robótico de 6 grados de libertad, elaborado mediante el uso de software de modelado CAD y prototipado usando una impresora 3D. El propósito principal es proporcionar una plataforma de práctica para verificar el rendimiento de diversas estrategias de control, incorporan un análisis matemático que evalúa las propiedades funcionales cinéticas del prototipo.

El proyecto contribuye al avance del trabajo al brindar un diseño CAD que provee información esencial para evaluar cinemática y trayectorias en el brazo robótico a simular, que crea una estructura sólida, garantizando un dimensionamiento adecuado y destacando su capacidad de movimiento con 6 grados de libertad. Permitiéndole desempeñar los movimientos de manera simulada con gran precisión, siendo estos aspectos que hemos tomado como referencia. Así como la elección del material PLA, el cual es idóneo siendo compatible con la impresión 3D y ofreciendo la rigidez necesaria. En las figuras (7) y (8) se representan el diseño y la construcción:

Figura 7.

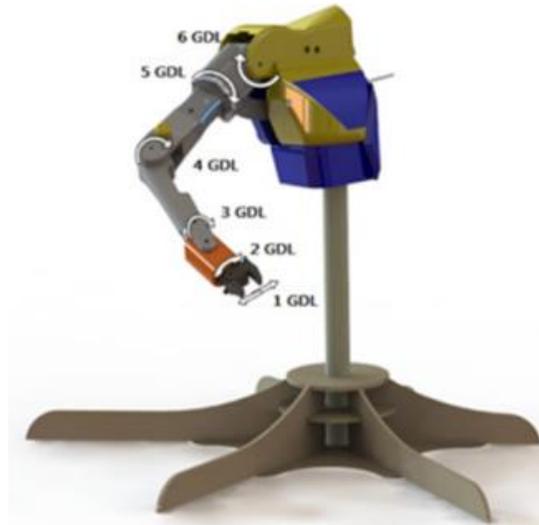
Aproximación del modelo propuesto por Denavit Hartenberg



Nota En esta figura se puede apreciar una aproximación robótica del modelo propuesto por Denavit Hartenberg. Tomado de [D. N. Cuesta C and J. R. Huerfano G, “Diseño y construcción de un brazo robótico de 6 GDL,” Enero-Junio, vol. 13, pp. 73–82, 2016]

Figura 8.

Diseño CAD brazo 6 grados de libertad



Nota. Modelo CAD. Tomado de: [D. N. Cuesta C and J. R. Huerfano G, “Diseño y construcción de un brazo robótico de 6 GDL,” Enero-Junio, vol. 13, pp. 73–82, 2016]

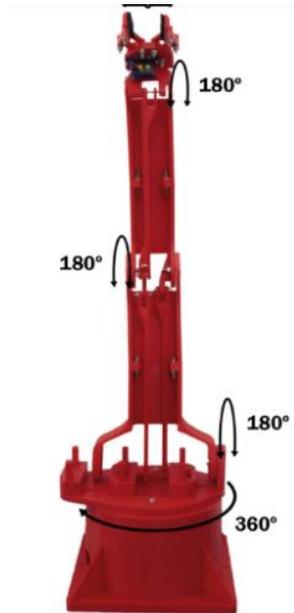
2.10.3 Estudio y prototipado de brazo robótico para personas con amputaciones y diseño de campaña de concienciación

Este estudio desarrollado por Téllez Bautista [4] se centra en el diseño de un brazo robótico destinado a pacientes con amputación en su miembro superior, y proporciona información valiosa para los campos de la ingeniería y la atención médica. Tomando de referencia así el diseño mecánico del brazo robótico, así como su proceso de impresión con PLA ofreciendo una buena resistencia a la tracción, calidad superficial, montaje y ensamblado.

De este modo destaca una significativa mejora gracias a la reducción de costos asociada al diseño y prototipado de prótesis mediante impresión 3D. Además, se aborda la investigación de técnicas de control de movimiento que incorporan sensores para optimizar su ejecución. Un aspecto importante de este trabajo es la inclusión de pruebas de prototipos con usuarios reales, permitiendo una evaluación exhaustiva de la funcionalidad y ergonomía del brazo robótico. Este enfoque integral no solo resalta los avances tecnológicos, sino que también garantiza la utilidad práctica y la adaptabilidad del dispositivo para mejorar la calidad de vida de los pacientes afectados [4].

Figura 9.

Estudio y prototipado de brazo robótico para personas con amputaciones



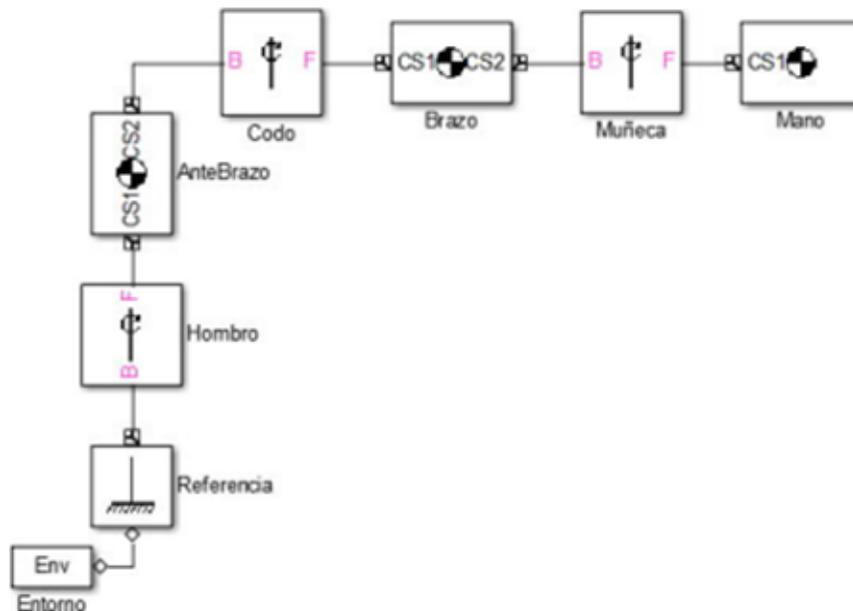
Nota. Prototipo y movimientos que podría realizar un brazo robótico. Tomado de: [T. Bautista and Blanca, “Estudio y prototipado de brazo robótico para personas con amputaciones y diseño de campaña de concienciación,” 2021.]

2.10.4 Modelado y simulación de un brazo robótico mediante el uso de SimMechanics de MATLAB

Sergio Velásquez, Jesús Luces y Ronny Velásquez [12] en este trabajo ilustran la aplicación de la simulación numérica en el diseño y análisis de sistemas mecánicos complejos, como es el caso de un brazo robótico. Utilizamos este artículo como guía ya que explica en detalle el uso de la herramienta SimMechanics de MATLAB (actualmente Simscape) para modelar y simular el comportamiento del brazo robótico bajo diversas condiciones, utilizando bloques para representar los elementos que componen el dispositivo robótico. Además, se evidencia la importancia de la simulación numérica al verificar los resultados a través de pruebas físicas, resaltando cómo esta metodología permite explorar distintas configuraciones y desarrollar estrategias de control antes de realizar los prototipos reales [12]. El modelo del brazo robótico implementado en el entorno de Simulink es presentado en la Figura (10).

Figura 10.

Manipulador Robótico expresado en bloques



Nota. Manipulador Robótico expresado en bloques de Simulink-Matlab. Tomado de: [S. Velásquez, J. Luces, and R. Velásquez, “Modelado y simulación de un brazo robótico mediante el uso de simmechanics de matlab,” Julio-Diciembre, no. 2, 2015.]

2.10.5 Desarrollo de una prótesis de brazo robótico transhumeral multi-D

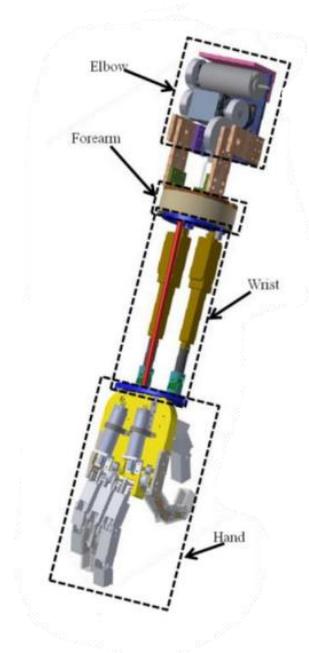
En este trabajo desarrollado por D.S.V. Bandara [13] se describe el diseño de una prótesis transhumeral antropomórfica que considera 15 grados de libertad, siendo 7 activos y 8 pasivos. La prótesis considera un mecanismo de muñeca basado en manipuladores paralelos y dedos sub actuados accionados intrínsecamente. Este desarrollo permite evidenciar y tener como referencia la eficacia del mecanismo en términos de generación de movimiento, llevando a cabo simulación de movimiento y análisis cinemático. Los resultados demostraron que los mecanismos son capaces de generar los movimientos requeridos.

Así mismo determinar cómo realizar una posible mejor en sistema de pinza, observando los dispositivos finales que pueden agarrar objetos de diferentes geometrías, mejorando la capacidad del usuario para realizar actividades cotidianas. Los autores realizaron análisis cinemáticos y simulaciones por computadora para investigar la efectividad del mecanismo propuesto y determinar su capacidad para generar el movimiento requerido por el brazo humano. Además, se

propone un nuevo parámetro v para evaluar el mecanismo adaptativo de los dedos y establece la adaptabilidad de las articulaciones de los dedos según la geometría de los objetos agarrados [13].

Figura 11.

Brazo robótico transhumeral



Nota. Diseño mecánico de una prótesis para el antebrazo humano. Tomado de: [D. S. V. Bandara, R. A. R. C. Gopura, K. T. M. U. Hemapala, and K. Kiguchi, “Development of a multi-DoF transhumeral robotic arm prosthesis,” *Med Eng Phys*, vol. 48, pp. 131–141, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.medengphy.2017.06.034.]

3. DISEÑO DE BRAZO ROBÓTICO

Durante la fase de diseño del brazo robótico se examinan detalladamente diversos parámetros, requerimientos y propuestas de diseño. Este capítulo incorpora las características y especificaciones que tienen como objetivo principal consolidar un diseño antropomórfico, conveniencia y eficiencia para el usuario.

3.1 Selección de materiales

Con el propósito de llevar a cabo el diseño de la estructura mecánica del brazo robótico antropomórfico, la elección del material para su construcción se basó en investigaciones previas, incluyendo la revisión de artículos científicos y proyectos de grado. Estos estudios se centran en el desarrollo de brazos robóticos modelados en 3d, conformado por materiales que impactan en la funcionalidad, durabilidad y cumplimiento de los objetivos biomecánicos a los que se quiere llegar. Aunque existen una variedad de materiales aptos para el FDM (Modelado por Deposición Fundida) o impresión 3D, dentro de estos materiales podemos encontrar una gran variedad de polímeros dentro de los cuales destacan el PLA y el ABS como los más utilizados. Esta preferencia se debe a su asequibilidad, facilidad de prototipado y otras características, que se analizaron para determinar cuál es el material apropiado para desempeñar dicha función.

- PLA (Ácido Poliláctico):

El PLA destaca como un polímero biodegradable y derivado de recursos renovables como el almidón de maíz o caña de azúcar [14], siendo una alternativa sólida a los polímeros convencionales de base petroquímica tanto en aplicaciones industriales como en medicinas [14]. De forma simultánea se distingue por su sencilla impresión en modelamiento 3D, aprovechando su baja retracción y temperatura para facilitar la elaboración de diseños precisos, en donde la plataforma de impresión puede calentarse desde temperatura ambiente hasta los 60°C[15], Presenta propiedades como su facilidad de impresión gracias a una baja temperatura de fusión de entre 160°C – 230°C[16]. En donde su eficiencia energética, es de un 25% y un 55% menor en comparación con polímeros derivados de fuentes petroquímicas [17]. Así mismo este no emite olores desagradables durante el proceso de impresión.

A nivel estético, el PLA ofrece una amplia variedad de colores los cuales tienen variabilidad de propiedades ya que análisis experimentales resaltan que el color del PLA puede impactar significativamente en características esenciales como la resistencia y la rigidez [18]. Del mismo modo ofreciendo acabados para proyectos personalizados. Sin embargo, su baja resistencia térmica

y mecánica en comparación con el ABS puede ser un factor a considerar en aplicaciones específicas.

- ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno):

El ABS compuesto por un 50% de Estireno y el otro 50% derivado entre el Butadieno y Acrilonitrilo [17], es un termoplástico derivado del petróleo, el cual es altamente utilizado en industrias gracias a su amplia resistencia química y durabilidad, que lo mantienen como un material especialmente para aplicaciones que requieren mayor resistencia a temperaturas e impactos [18].

Con una temperatura de fusión de 215°C - 250°C y para la plataforma de 90°C - 103°C [15], el ABS presenta una buena adherencia entre capas durante la impresión, generando objetos con mayor estabilidad estructural. Conservando su tenacidad a temperaturas extremas (-40° hasta 90°), fácil de mecanizar y estable a altas temperaturas (80-90°C) [16]. No obstante, es importante tener en cuenta que experimenta "warping" o deformación durante el enfriamiento, lo cual puede impactar la precisión del resultado final y su proceso de impresión puede ocasionar olores desagradables, así como la emisión de gases nocivos. Por último estéticamente es posible personalizarlo mediante la aplicación de pintura y unir partes del mismo material con adhesivos.

Material seleccionado:

Después de conocer las características que presentan estos dos polímeros, se determina que el PLA es la elección adecuada para construir la estructura mecánica del brazo robótico antropomórfico, ya que el PLA se encuentra clasificado dentro de los dispositivos implantables por sus propiedades biocompatibles. Mientras que el ABS sólo se usa en dispositivos que no están en contacto directo con el cuerpo humano [16]. Del mismo modo este al ser un material que presenta emisiones de vapores durante la impresión relativamente mayores al Pla y toxico en comparación, no es practico para utilizarse en aplicaciones médicas.

El PLA sobresale por su facilidad de modelado en 3D, presentando así mismo diferentes colores para llegar a personalizar diferentes componentes, esto sin dejar de presentar propiedades físicas, mecánicas [14] y de compresión que cumplen con normas como la ASTM D695, para garantizar la precisión y consistencia de los resultados [15]. Características adecuadas para las tareas a realizar recreando así un diseño preciso y funcional.

Algunas de estas propiedades se presentan de manera detallada en la Tabla (2).

Tabla 2.

Propiedades del PLA

Propiedad	Valor	Unidades
Densidad (sólido)	1.252	g/cm ³
Módulo de Young	1280	MPa
Coefficiente de Poisson	0.36	-
Resistencia a tracción	59	MPa
Resistencia última a la tracción	73	MPa
Límite elástico	70	MPa
Límite elástico a la compresión	66.7	MPa
Resistencia máxima a la compresión	67.5	MPa

Nota. Esta tabla muestra las propiedades del PLA que se pueden utilizar para realizar diferentes partes y diseños con las mismas. Tomado de: [“Plástico PLA: qué es y para qué se utiliza este material.” Accessed: Dec. 03, 2023. [Online]. Available: <https://primebiopol.com/plastico-pla-que-es-y-para-que-se-utiliza/>][“Guía de plásticos y otros materiales para impresión 3D - Formizable.” Accessed: Jan. 14, 2024. [Online]. Available: <https://formizable.com/guia-de-plasticos-y-otros-materiales-para-impresion-3d/>]

3.2 Especificaciones de diseño

En este proyecto, se recalca el planteamiento y diseño de un brazo robótico capaz de moverse en siete grados de libertad. La elección de estos siete grados de libertad se basa en la necesidad de dotar al brazo de una adaptabilidad de realizar movimientos que le permita ejecutar tareas con precisión. Esto marcará la transición hacia la consideración detallada de elementos esenciales, como el dimensionamiento humano, así como los componentes y el funcionamiento de estos mismos.

3.2.1 Dimensionamiento humano

Con el fin de determinar las medidas que debe llegar a poseer el brazo robótico antropomórfico, se dictamino seleccionar una medida propia de un hombre adulto colombiano promedio, esta estatura se promediada en 1.71m [19], [20].Mediante el uso de esta esta estatura y el respaldo del dimensionamiento antropométrico de Drillis y contini [11] de la figura (5) traída del marco teórico, se puede llegar a recrear las medidas de cada uno de los segmentos de articulación a articulación, hombro-codo, codo-muñeca y muñeca-pinza.

Considerando el dimensionamiento antropométrico de cada segmento, a continuación, se multiplica la estatura promedio (H) por el valor de cada segmento:

$$H = 1.71\text{m}$$

$$\text{De cuello a hombro} = 0.129 * H = 0.22059\text{m} \rightarrow 220\text{mm}$$

$$\text{De hombro a codo} = 0.186 * H = 0.31806\text{ m} \rightarrow 318\text{mm}$$

$$\text{De codo a muñeca} = 0.146 * H = 0.24966\text{ m} \rightarrow 250\text{ mm}$$

$$\text{De muñeca a dedos} = 0.108 * H = 0.18468\text{ m} \rightarrow 185\text{mm}$$

3.2.2 Componentes y funcionamiento

Fueron considerados 10 componentes que conforman la estructura total del brazo, estos componentes están definidos por sus funciones, las cuales posibilitan que el dispositivo lleve a cabo sus tareas este conjunto de componentes son:

- Torso: modelo de referencia para el soporte del del brazo y conexión del hombro.
- Hombro: lleva a cabo el movimiento de flexión y extensión, disminuyendo o aumentando el ángulo del brazo.
- Articulación eje hombro: relaciona el hombro con el brazo y genera el movimiento de abducción elevando el brazo alejándolo del torso, y de aducción, movimiento contrario aproximando el brazo al torso.
- Brazo: realiza movimiento de rotación externa e interna en la articulación del hombro como se muestra en la figura (4).
- Articulación eje codo: enlaza el brazo y el antebrazo, el cual permite el movimiento de flexión y extensión del antebrazo.
- Antebrazo: genera movimiento de descanso-neutral en donde las pinzas miran al torso, movimiento de supinación o giro hacia la parte superior y pronación siendo el movimiento de giro o de inclinación hacia abajo en este caso el antebrazo.
- Articulación eje muñeca: relaciona al antebrazo con el soporte, permitiendo el movimiento de flexión y extensión de la pinza.
- Palma soporte: de la misma manera que el antebrazo, permite el movimiento de posición neutral, de supinación y pronación.
- Articulaciones de conexión: establecen el enlace entre el soporte y las pinzas, así como el movimiento de contracción y extensión, con el objetivo de dar apertura y cierre al mecanismo.
- Pinza: permiten el agarre y sujeción de manera firme para la manipulación de objetos.

3.3 Diseño CAD

3.3.1 Croquizado de piezas y ensamble de brazos robóticos

3.3.1.a. Chapas del brazo robótico. Con el propósito de desarrollar un brazo robótico adaptado a las posiciones requeridas, se decidió comenzar con un diseño preliminar que facilitara la identificación de los grados de libertad y los puntos de unión esenciales. Estos últimos, conformados por chapas, proporcionaron un primer acercamiento considerando las medidas humanas y los elementos generadores de los grados de libertad.

Este diseño inicial basado en chapas de la figura (12) se creó con la finalidad de realizar un ensamblaje que permitiera observar dimensiones cruciales, como curvas en las articulaciones, evitando fricciones no deseadas y logrando formas más semejantes a las de un brazo humano. Además, se procuró mantener pesos bajos para evaluar eficientemente el intercambio de archivos y observar el funcionamiento general del brazo robótico.

Figura 12.

Diseño inicial del brazo robótico antropomórfico



Nota. Diseño inicial del brazo robótico antropomórfico, las uniones consisten en solapas cada una representando un grado de libertad por sí misma

3.3.1.b. Segundo diseño del brazo robótico. Durante la segunda fase del proceso de diseño, se logró un avance significativo en cuanto a la estructura y los movimientos del proyecto. Se ha desarrollado una forma más antropomórfica que, basada en el diseño original compuesto por chapas, revela la capacidad de ejecutar movimientos muy similares a los esféricos. Esto se logra mediante la implementación de tres grados de libertad en cada uno de los segmentos.

Las piezas, diseñadas de manera simple pero eficaz en su estructura, han dado como resultado un sistema más eficiente en las simulaciones. Además, al respetar las mediciones de las dimensiones antropomórficas, no solo se ha mejorado la estética del proyecto dando un gran avance, sino que también se ha optimizado la recopilación de datos de manera integral.

La tabla 3 muestra las características del diseño número 2. La figura 12 muestra el modelo CAD del diseño:

Tabla 3.

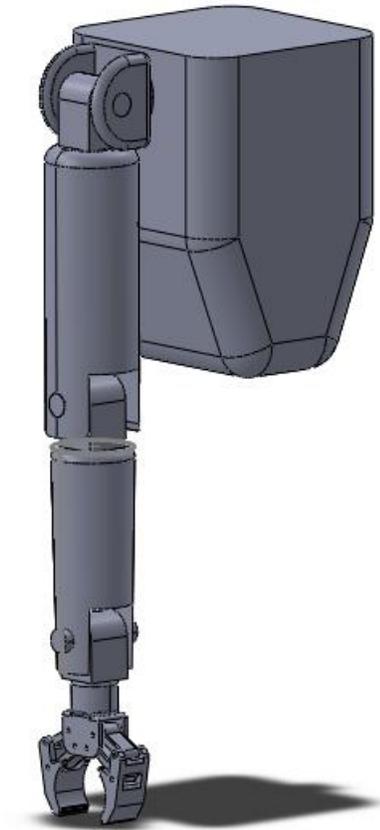
Características físicas del segundo diseño

Pieza	Densidad (g/cm ³)	Volumen (cm ³)	Masa (kg)
Hombro	1,252	251	0,314
Articulación eje hombro	1,252	238	0,298
Brazo	1,252	1.603	2,007
Articulación eje codo	1,252	238	0,298
Antebrazo	1,252	1.057	1,323
Articulación eje muñeca	1,252	200,26	0,251
Palma soporte	1,252	87,51	0,11
Articulaciones de conexión 1	1,252	15,28	0,019
Articulaciones de conexión 2	1,252	13,22	0,017
Pinza	1,252	41,29	0,052

Nota. Características físicas del segundo diseño proporcionadas por el software de diseño según el prototipo.

Figura 13.

Segundo diseño de brazo robótico antropomórfico.



Nota. Segundo diseño de brazo robótico antropomórfico. Se construyen ejes de mayor capacidad y se añade una pinza al diseño

3.3.1.c. Tercer diseño del brazo robótico. A medida que se exploran diversos modelos de diseño, podemos ver una mayor diferencia a la hora de compararlos, el primer diseño con respecto al tercer brazo robótico presente en la Figura 13, se evidencia una evolución marcada en términos de funcionalidad y eficiencia. En los modelos iniciales, se experimentó con conceptos básicos, enfocándose en la estructura mecánica fundamental. A medida que avanzo en el desarrollo, cada diseño presenta mejoras sustanciales, incorporando componentes que muestran un diseño antropomórfico con articulaciones definidas, finalmente se ajustaron las piezas de tal forma que se adaptara a las medidas específicas los segmentos del brazo humano, un torso más acorde a la proporción del brazo y una pinza diseñada con la capacidad de sujetar una lata de aluminio de 12 onzas, así como integrando consideraciones ergonómicas y mayor precisión en el movimiento La tabla 4 y la figura 13 muestran las características y diseño número 3:

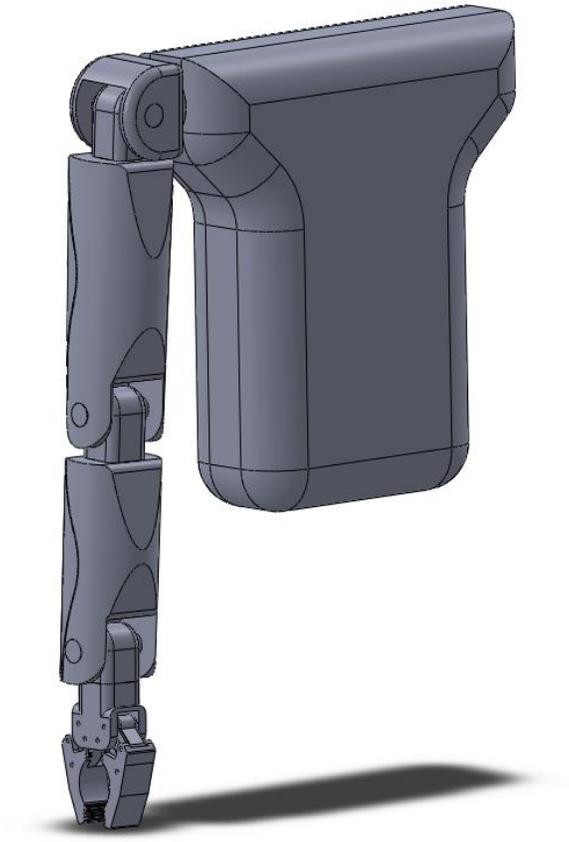
Tabla 4.*Características físicas del tercer diseño*

Pieza	Densidad (g/cm ³)	Volumen (cm ³)	Masa (kg)
Hombro	1,252	319	0.399
Articulación eje hombro	1,252	238	0.289
Brazo	1,252	2.101	2,63
Articulación eje codo	1,252	238	0.289
Antebrazo	1,252	1.432	1,793
Articulación eje muñeca	1,252	200,26	0,251
Palma soporte	1,252	143.214	0,179
Articulaciones de conexión 1	1,252	15,28	0,019
Articulaciones de conexión 2	1,252	13,22	0,017
Pinza	1,252	41,29	0,052

Nota. Características físicas del tercer diseño proporcionadas por el software de diseño según el prototipo.

Figura 14.

Tercer diseño de brazo robótico antropomórfico



Nota. Tercer diseño de brazo robótico antropomórfico. Se cambian las masas y otras características físicas tales como centros de inercia.

4. MODELO DE DENAVIT HARTENBERG PARA EL DISEÑO 3

En la tabla 5 se observa las configuraciones pertinentes para la validación del brazo robótico propuesto, para esto se adoptó un sistema de coordenadas situado en el hombro [Q1], manteniendo las direcciones propuestas por Matlab, Figura 15.

Tabla 5.

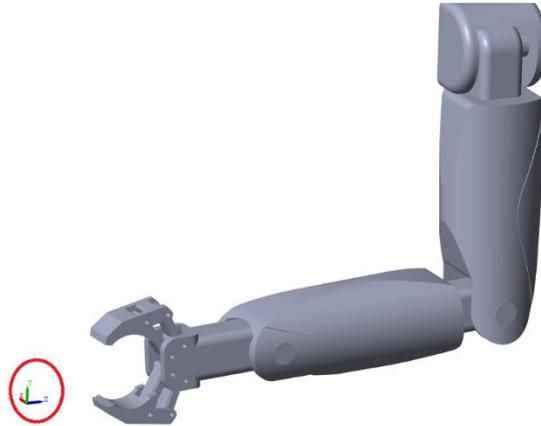
Validación modelo Denavit-Hartenberg para el diseño 3

Tabla Denavit Hartenberg				
i	x		z	
	ai	α	d	θ
0	-L1	Q1	0	0
1	0	0	0	Q2
2	0	90	0	0
3	0	0	L2	Q3
4	0	Q4	0	0
5	0	90	0	0
6	0	0	L3	Q5
7	0	Q6	0	0
8	0	0	L4	Q7

Nota. Sistemas de coordenadas en los ejes X y Z con el propósito de asignar posición espacial al brazo robótico.

Figura 15.

Coordenadas en relación al brazo robótico

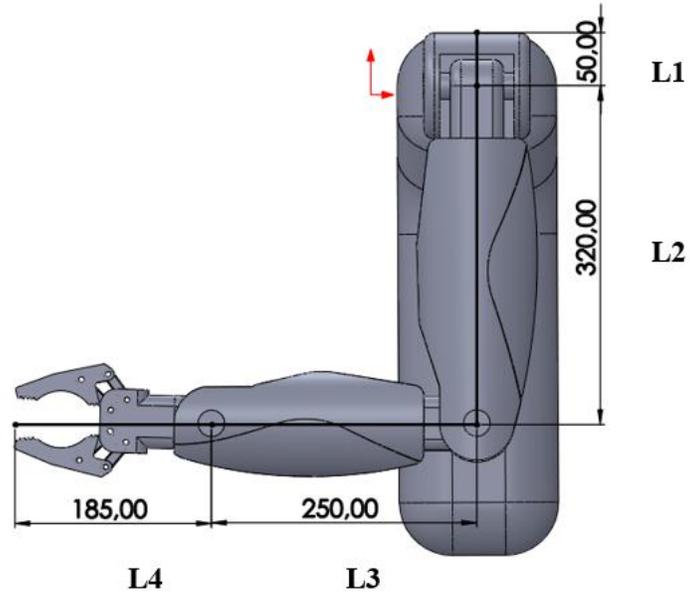


Nota. Sistema de coordenadas en relación con el brazo robótico en la plataforma Matlab.

Una vez realizada la tabla, se procede a medir los valores de traslación propuestos en la figura 15, para posteriormente crear las matrices de transformación EC [01] para las rotaciones en el eje (x) y EC [02] para las rotaciones en el eje (z).

Figura 16.

Medidas de segmentos de posición



Nota. Vista lateral con medidas de los segmentos de posición.

EC del eje X:

$$T_{(x,\alpha)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & y \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ Ec (01)}$$

Nota. Matrices de transformación EC para las rotaciones en el eje (x)

EC del eje Z:

$$T_{(z,\theta)} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 & x \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ Ec (02)}$$

Nota. Matrices de transformación EC para las rotaciones en el eje (y)

5. SOLUCIÓN DENAVIT-HARTENBERG

Para solucionar el sistema de Denavit Hartenberg se requiere multiplicar todas las matrices de transformación homogénea, las cuales se encuentran al remplazar los valores de la Tabla 5, Las matrices remplazadas son:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L1 \\ 0 & \cos(Q1) & -\sin(Q1) & 0 \\ 0 & \sin(Q1) & \cos(Q1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} Ec (03)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos(Q2) & -\sin(Q2) & 0 & 0 \\ \sin(Q2) & \cos(Q2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} Ec (04)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(90) & -\sin(90) & 0 \\ 0 & \sin(90) & \cos(90) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} Ec (05)$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} \cos(Q3) & -\sin(Q3) & 0 & 0 \\ \sin(Q3) & \cos(Q3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} Ec (06)$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(Q4) & -\sin(Q4) & 0 \\ 0 & \sin(Q4) & \cos(Q4) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} Ec (07)$$

$$A_6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(90) & -\sin(90) & 0 \\ 0 & \sin(90) & \cos(90) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} Ec (08)$$

$$A_7 = \begin{bmatrix} \cos(Q5) & -\sin(Q5) & 0 & 0 \\ \sin(Q5) & \cos(Q5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} Ec (09)$$

$$A_8 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(Q6) & -\sin(Q6) & 0 \\ 0 & \sin(Q6) & \cos(Q6) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ Ec (10)}$$

$$A_9 = \begin{bmatrix} \cos(Q7) & -\sin(Q7) & 0 & 0 \\ \sin(Q7) & \cos(Q7) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ Ec (11)}$$

Una vez encontradas las matrices A se puede calcular la matriz T que indica la posición del último extremo del robot con respecto al sistema de referencia del mismo [21], cómo se puede ver en la ecuación (Ec12):

$$T = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5 {}^5A_6 {}^6A_7 {}^7A_8 {}^8A_9 \text{ Ec (12)}$$

Al solucionar el sistema y remplazar los valores en los respectivos ángulos se encuentra tanto la posición inicial como la posición final del movimiento, al realizar la tabla se consideró la posición inicial como posición de reposo, por ende, todos los grados de libertad se consideran como 0, se utiliza un script en Python para solucionar el sistema, Anexo [3], y nos da como resultado la siguiente matriz:

$$T_{inicial} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -50 \\ 0 & -1 & 0 & -320 \\ 0 & 0 & -1 & -435 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ Ec (13)}$$

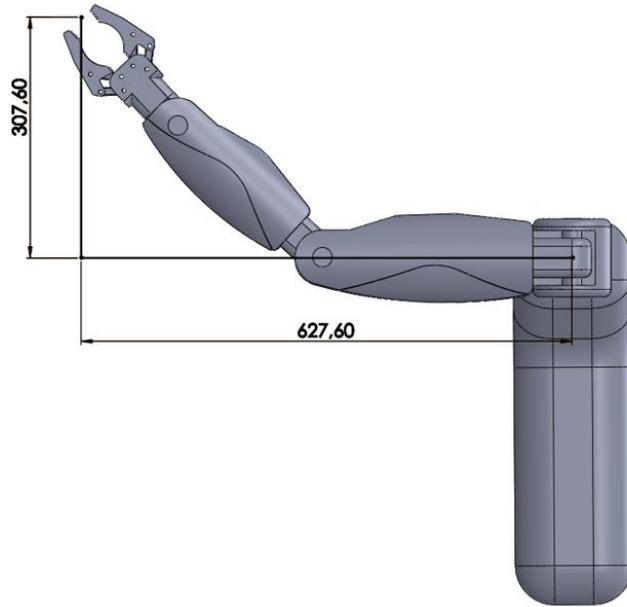
En la cual se obtienen los siguientes puntos $x = -50$, $y = -320$ y $z = -435$, los cuales corresponden a la posición en que se encuentra la pinza en la posición inicial. Para la posición final se debe considerar la traslación en cada grado de libertad, en nuestros casos de estudio se mueven el hombro en los movimientos de flexión y extensión desplazándose 1.57 Radianes con la posición inicial, así mismo el codo se desplaza -0.79 Radianes, remplazando estos en la matriz A1 valor Q1 y en A5 valor Q4. Haciendo estos cambios y solucionando nuevamente el sistema obtenemos:

$$T_{final} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -50 \\ 0 & -0.7 & 0.7 & 307.6 \\ 0 & -0.7 & -0.7 & -627.6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ Ec (14)}$$

Teniendo como resultado las posiciones $x = -50$, $y = 307.6$ y $z = -627.6$, comprobando las posiciones en el software cad se encuentra que la posición cumple con lo esperado Figura 17.

Figura 17.

Posición del segmento final



Nota. Vista lateral con medidas del segmento de posición final.

6. TORQUES BIOMECÁNICOS DE REFERENCIA

Los torques biomecánicos dependen de factores tales como, el movimiento, la masa del brazo, los tiempos en que se ejecuta el movimiento además de las medidas del brazo. Para ello se tomaron los torques propuestos en el artículo “Dynamic modeling of an upper limb hybrid exoskeleton for simulations of load-lifting assistance”[5] en donde se indica las propiedades mecánicas del brazo con las se puede comparar los diferentes diseños del brazo.

Tabla 6.

Modelo de miembro superior humano

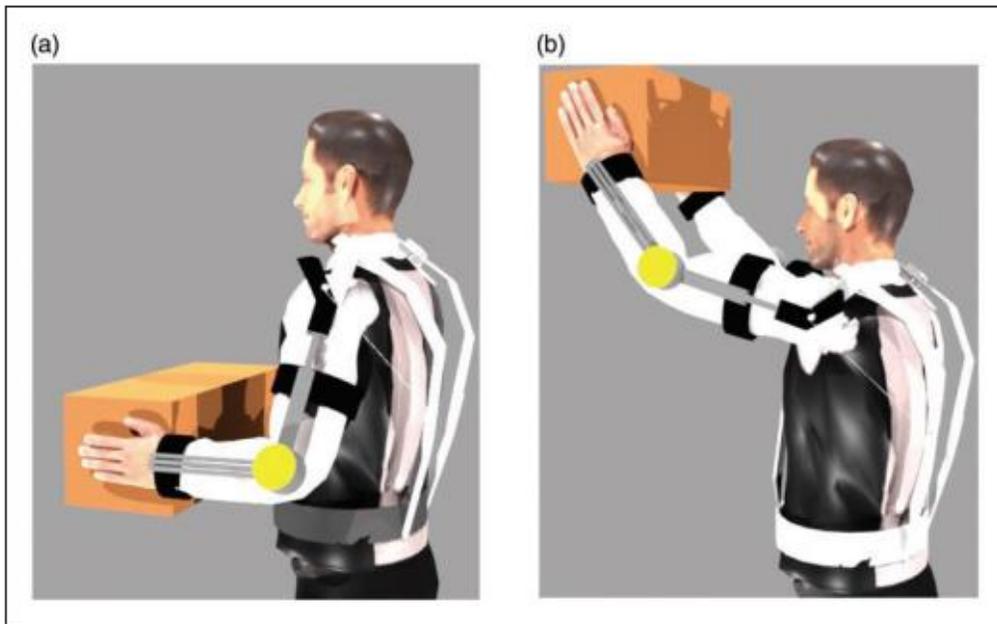
Modelo de miembro superior humano				
Parte	I_{zz} (Kg m ²)	Masa (Kg)	Longitud (m)	Centro de Masa
Brazo	0,0416	1,386	0,3	0,15
Antebrazo	0,0266	0,886	0,3	0,15

Nota. En esta tabla se muestran las características mecánicas del brazo humano de referencia. Tomado de: “Dynamic modeling of an upper limb hybrid exoskeleton for simulations of load-lifting assistance” [M. A. Gull, T. Bak, and S. Bai, “Dynamic modeling of an upper limb hybrid exoskeleton for simulations of load-lifting assistance,” Proc Inst Mech Eng C J Mech Eng Sci, vol. 236, no. 5, pp. 2147–2160, Mar. 2022, doi: 10.1177/09544062211024687.]

Se proponen dos movimientos, el primero consta del brazo levantando una carga 3 kg a lo largo de 3 segundos, conforme ilustrado en la Figura (18), el segundo movimiento consta de cuatro etapas, cada una de tres segundos, siendo que en la primera etapa los brazos se aproximan a la carga, en los segundos 3 a 6 el brazo recibe la carga y regresa a su postura inicial, en los segundos 6 a 9 levanta la carga por encima de la cabeza, y finalmente de 9 a 12 segundos se regresa a la posición inicial, según se ilustra en la Figura (19).

Figura 18.

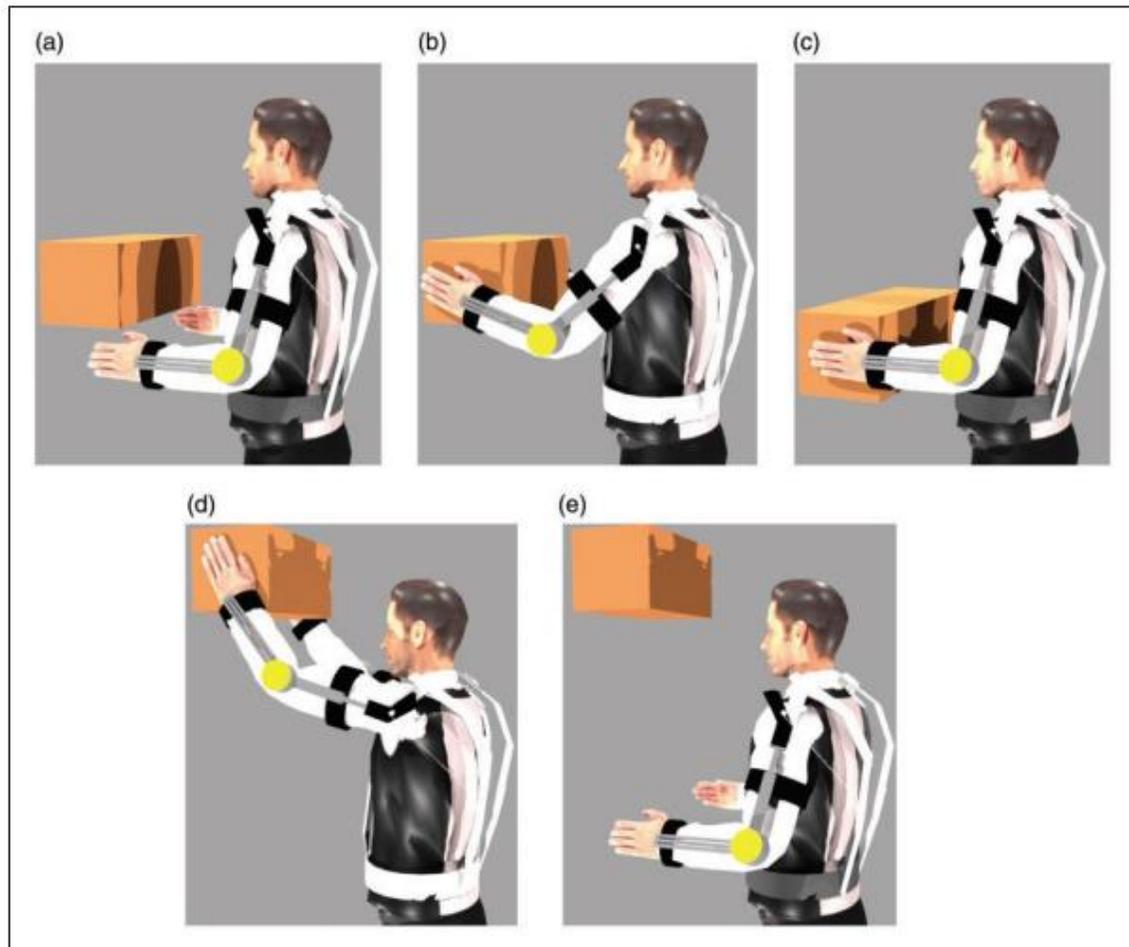
Ilustración primera simulación.



Nota. En esta ilustración se muestra el movimiento realizado en la primera simulación. Tomando de: “Dynamic modeling of an upper limb hybrid exoskeleton for simulations of load-lifting assistance” [M. A. Gull, T. Bak, and S. Bai, “Dynamic modeling of an upper limb hybrid exoskeleton for simulations of load-lifting assistance,” Proc Inst Mech Eng C J Mech Eng Sci, vol. 236, no. 5, pp. 2147–2160, Mar. 2022, doi: 10.1177/09544062211024687.].

Figura 19.

Ilustración segundo movimiento.



Nota. En esta ilustración se muestra el movimiento realizado en la simulación del segundo movimiento. Tomado de: “Dynamic modeling of an upper limb hybrid exoskeleton for simulations of load-lifting assistance” [M. A. Gull, T. Bak, and S. Bai, “Dynamic modeling of an upper limb hybrid exoskeleton for simulations of load-lifting assistance,” Proc Inst Mech Eng C J Mech Eng Sci, vol. 236, no. 5, pp. 2147–2160, Mar. 2022, doi: 10.1177/09544062211024687.]

6.1 Obtención de torques biomecánicos de referencia

Los torques están dados de forma gráfica, τ (Nm) en función del tiempo. Sin embargo, para poder comparar estos datos con los resultados del modelo propuesto es necesario tabular, para ello se obtienen una cantidad determinada de puntos que sea capaz de describir las curvas de las trayectorias angulares de referencia para cada uno de los grados de libertad, con el fin realizar los

movimientos de agarre tomados como referencia de [22], y con los datos obtenidos se puede realizar una regresión para determinar una función polinómica que describe los torques del primer movimiento, tanto en θ_3 como en θ_4 .

De acuerdo a las regresiones polinómicas realizadas para las curvas de torque, se tiene que las funciones con los respectivos coeficientes obtenidos definen la ecuación que describe el torque de θ_3 es:

$$f(t) = 0.2455t^5 - 0.799t^4 - 3.2739t^3 + 13.106t^2 - 1.72t + 0.7409 \quad Ec (15)$$

Y la ecuación que describe el torque de θ_4 es:

$$f(t) = 0.1629t^4 - 0.7449t^3 + 0.4817t^2 - 0.1119t + 10.142 \quad Ec (16)$$

Con estas funciones se puede encontrar el valor del torque ejecutado por el brazo en cualquier punto de tiempo dentro en un espacio de 0 a 3 segundos.

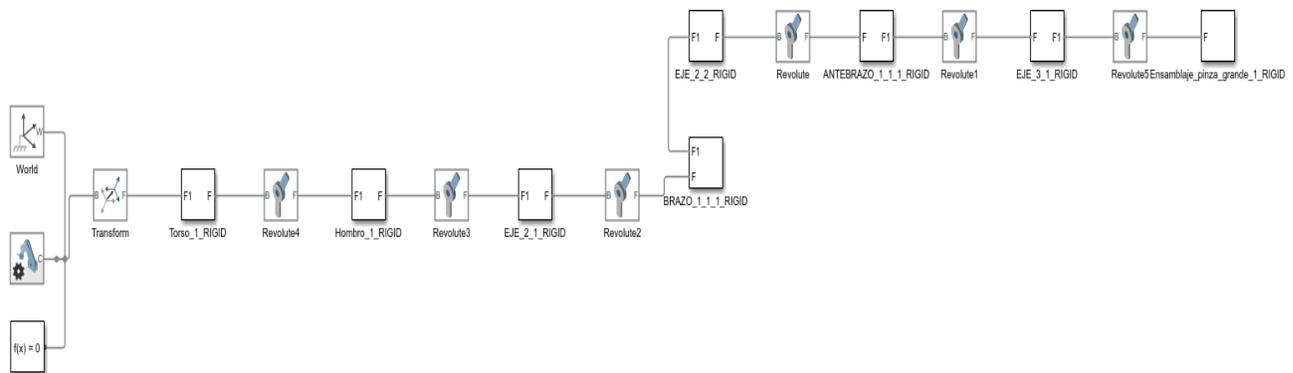
Sin embargo, los torques del segundo movimiento no se pueden describir de forma tan precisa con una ecuación polinómica por lo que se utiliza una técnica de rastreo(tracking), la cual consiste en buscar el valor en tiempo más cercano que se tenga en el conjunto de datos de comparación y con la ubicación de este relacionarlo al primer elemento.

7. SIMULACIÓN NUMÉRICA

La simulación numérica se realiza en la plataforma Matlab/Simulink, haciendo uso de las librerías Simscape Multibody las cuales proporcionan herramientas para simulación de sistemas multicuerpo en 3D. Para ello es necesario exportar las piezas en formato “. STEP” o exportar el conjunto de piezas con ayuda del Plug In “Simscape Multibody Link”. Al exportar el ensamble, se obtiene un modelo que representa cada grado de libertad, de acuerdo a como se ilustra en la Figura (20) como uniones por revoluta, es necesario ajustar las uniones en donde sea necesario para que cumpla con los objetivos de diseño.

Figura 20.

Brazo robótico antropomórfico en Simscape Multibody Link



Nota. Implementación de un ensamble CAD en el software Simulink a través del Plug In Simscape Multibody Link

7.1 Variables cinemáticas del brazo robótico

7.1.1 Trayectorias angulares

Las trayectorias angulares definen en gran parte el perfil de torque producido en cada articulación del brazo. Para esto, se deben considerar los mismos recorridos usados para generar los torques de [5], de tal forma que se pueda comparar de manera precisa el comportamiento de los brazos.

Para controlar el brazo por medio de las funciones dadas, se construyen las ecuaciones en los bloques programables de Simulink [23], ver figura 25 y 26 que son parametrizadas en función del tiempo el cual se ingresa a partir de Matlab, es decir se ingresa la función la cual tiene como resultado la posición del brazo y se deja expresado el tiempo como variable, la cual será importada

desde un código de Matlab. Ya que los otros grados de libertad se encuentran inmóviles se le ingresa directamente la posición en la que deben trabajar.

Las articulaciones deben ser programadas para recibir la posición y calcular el torque necesario para cumplir con ese movimiento, figura (21).

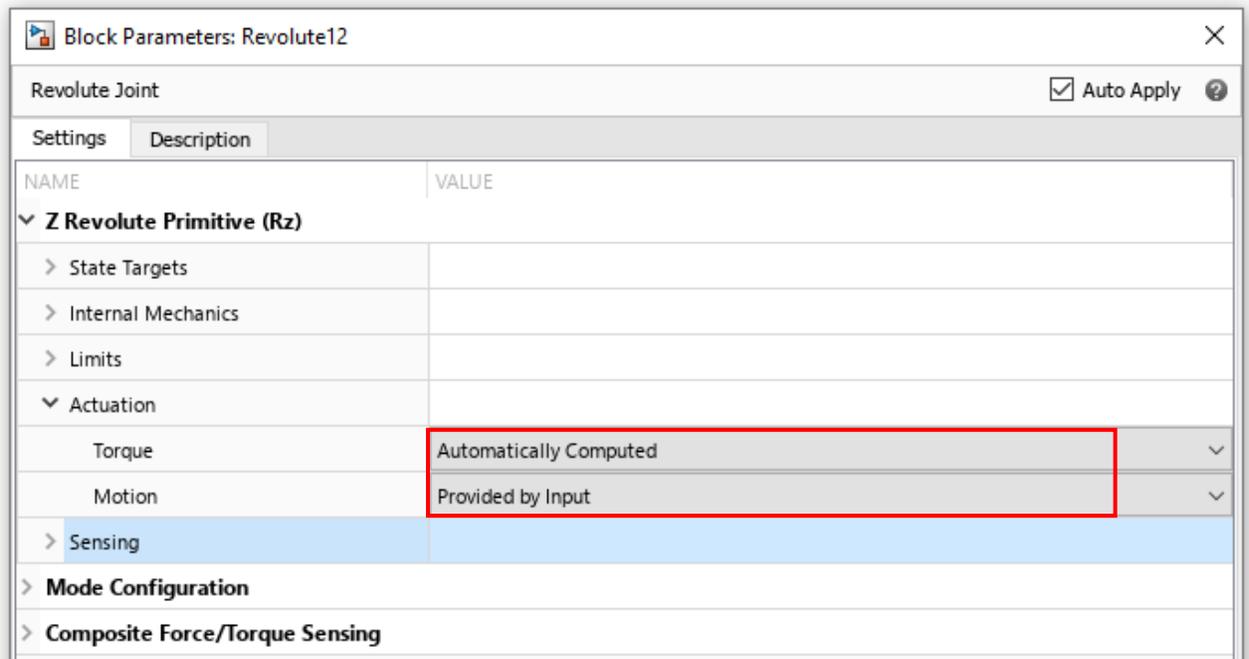
Las ecuaciones y graficas que describen el primer movimiento son:

$$\theta_1(t) = \frac{\pi t^3}{27} + \frac{\pi t^2}{6} - \frac{\pi}{2} \quad Ec (17)$$

$$\theta_2(t) = \frac{\pi t^3}{54} + \frac{\pi t^2}{12} \quad Ec (18)$$

Figura 21.

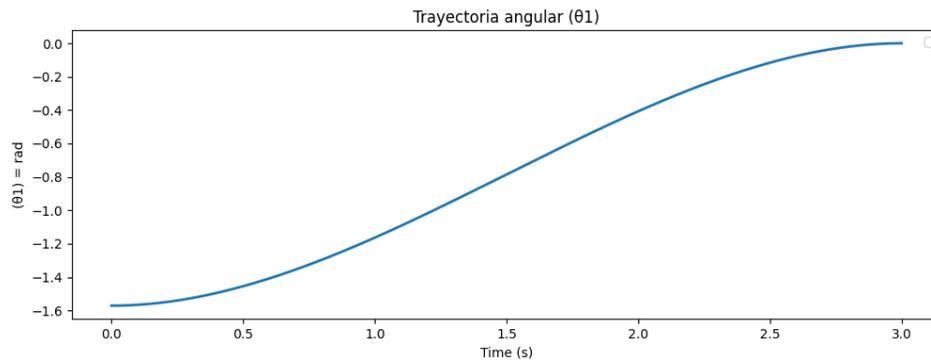
Cálculo de torque y entrada de movimiento



Nota. Implementación de cálculo automático de torque y entrada de movimiento en Radianes [Rad], que corresponde a un modelo de Dinámica Inversa.

Figura 22.

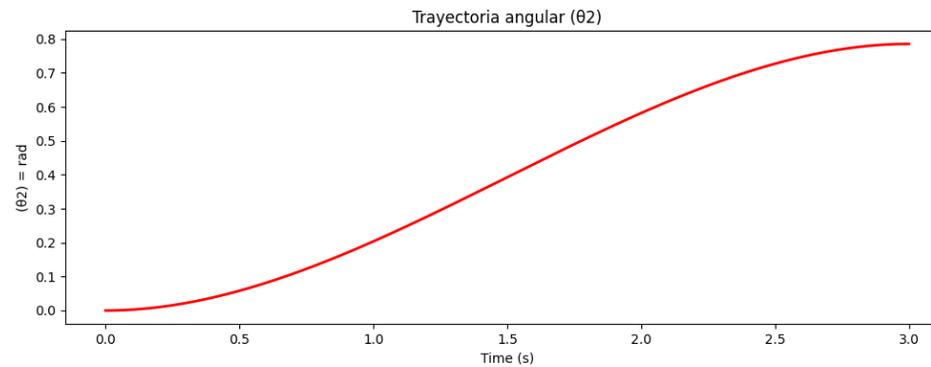
Trayectoria del brazo en la primera simulación



Nota. Trayectoria realizada por el brazo en la primera simulación, corresponde a un movimiento de flexión

Figura 23.

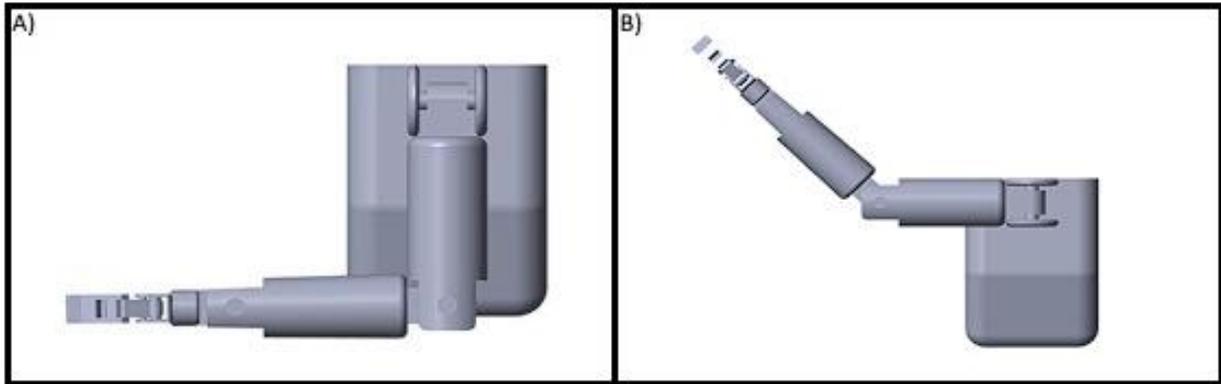
Trayectoria del antebrazo en la primera simulación



Nota. Trayectoria realizada por el antebrazo en la primera simulación la cual corresponde a un movimiento de flexión.

Figura 24.

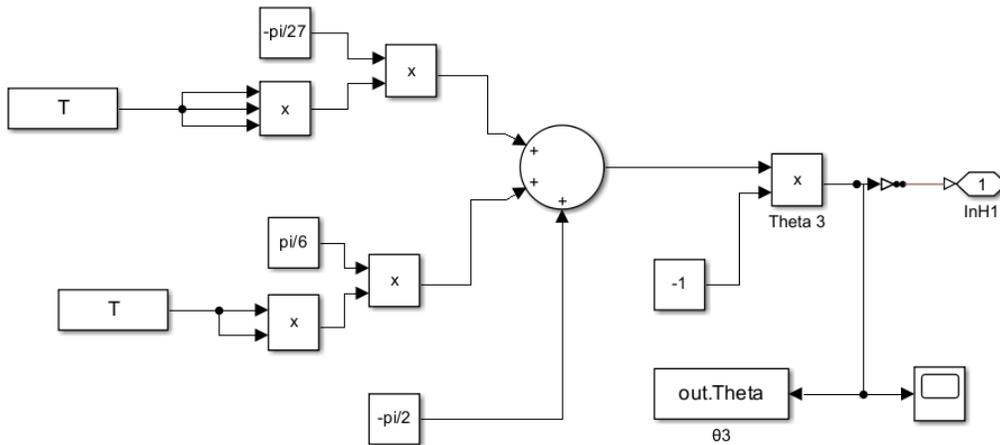
Animación de la simulación del tiempo de 0-3s



Nota. Animación de la simulación realizada, a) corresponde al tiempo 0 y posición inicial, b) posición de final en 3 segundos.

Figura 25.

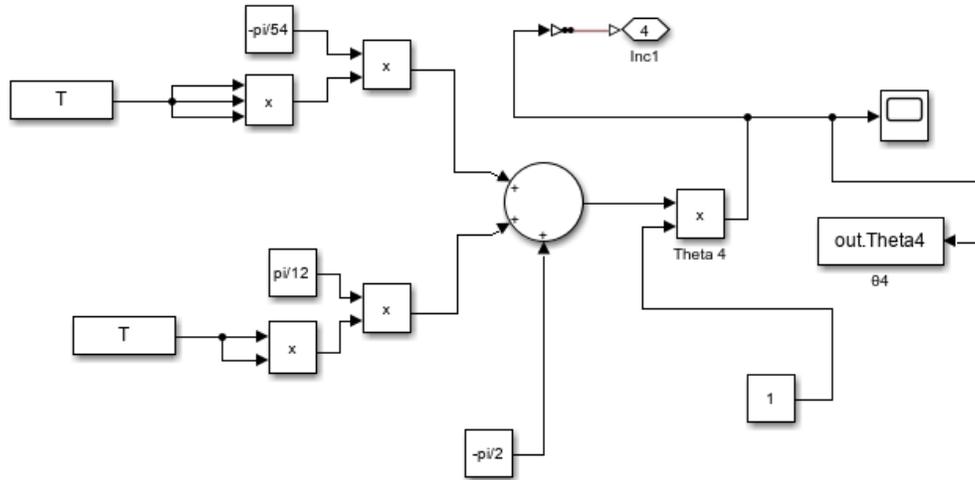
Ecuación del movimiento de flexión en el brazo



Nota. Ecuación del movimiento de flexión en el brazo, se encuentra programada con bloques matemáticos básicos como multiplicación y suma, la multiplicación en -1 se ejecuta para corregir la posición del brazo con respecto a las trayectorias de referencia

Figura 26.

Ecuación del movimiento de flexión en el codo



Nota. Ecuación del movimiento de flexión en el codo, así como el movimiento del brazo se encuentra programada con bloques matemáticos básicos como multiplicación y suma. Su salida corresponde a un Angulo en radianes.

Para el segundo movimiento, las ecuaciones de las trayectorias angulares cambian en función del tiempo, para cumplir con estos cambios es necesario hacer uso de un condicional “if”. Las ecuaciones de las trayectorias angulares son definidas de la siguiente forma

De 1 a 3 Segundos:

$$\theta_1(t) = -\frac{\pi t^3}{243} + \frac{\pi t^2}{54} - \frac{\pi}{2} \quad Ec (19)$$

$$\theta_2(t) = -\frac{2\pi t^3}{243} + \frac{\pi t^2}{27} \quad Ec (20)$$

De 4 a 6 Segundos:

$$\theta_1(t) = \frac{\pi(t-3)^3}{243} - \frac{\pi(t-3)^2}{54} - \frac{4\pi}{9} \quad Ec (21)$$

$$\theta_2(t) = \frac{2\pi(t-3)^3}{243} - \frac{\pi(t-3)^2}{27} + \frac{\pi}{9} \quad Ec (22)$$

De 7 a 9 Segundos:

$$\theta_1(t) = \frac{\pi(t-6)^3}{27} - \frac{\pi(t-6)^2}{6} - \frac{\pi}{2} \quad Ec (23)$$

$$\theta_2(t) = \frac{\pi(t-6)^3}{54} + \frac{\pi(t-6)^2}{12} \quad Ec (24)$$

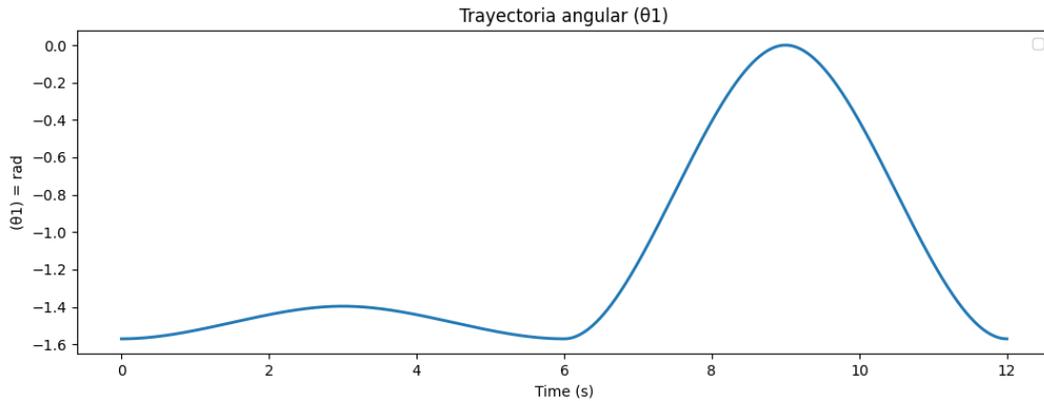
De 10 a 12 Segundos:

$$\theta_1(t) = \frac{\pi(t-9)^3}{27} - \frac{\pi(t-9)^2}{6} \quad Ec (25)$$

$$\theta_2(t) = \frac{2\pi(t-9)^3}{54} - \frac{\pi(t-9)^2}{12} + \frac{\pi}{4} \quad Ec (26)$$

Figura 27.

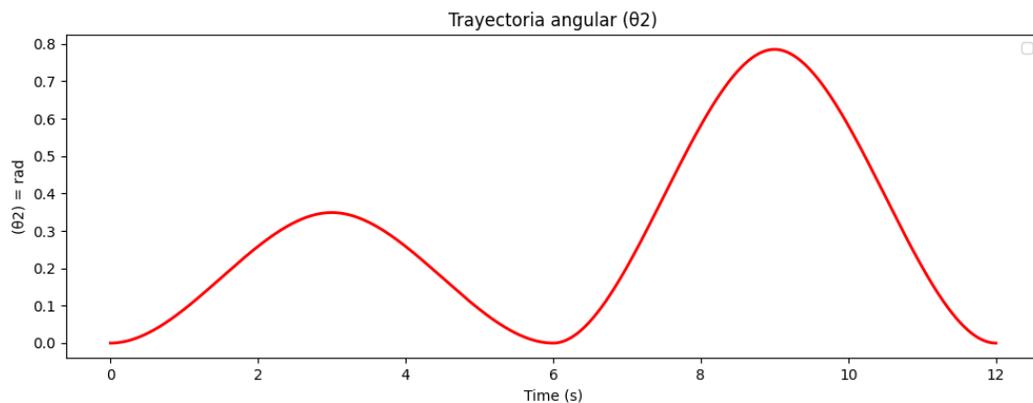
Trayectoria del brazo en la segunda simulación



Nota. Trayectoria realizada por el brazo en la segunda simulación, corresponde a un movimiento de flexión y extensión.

Figura 28.

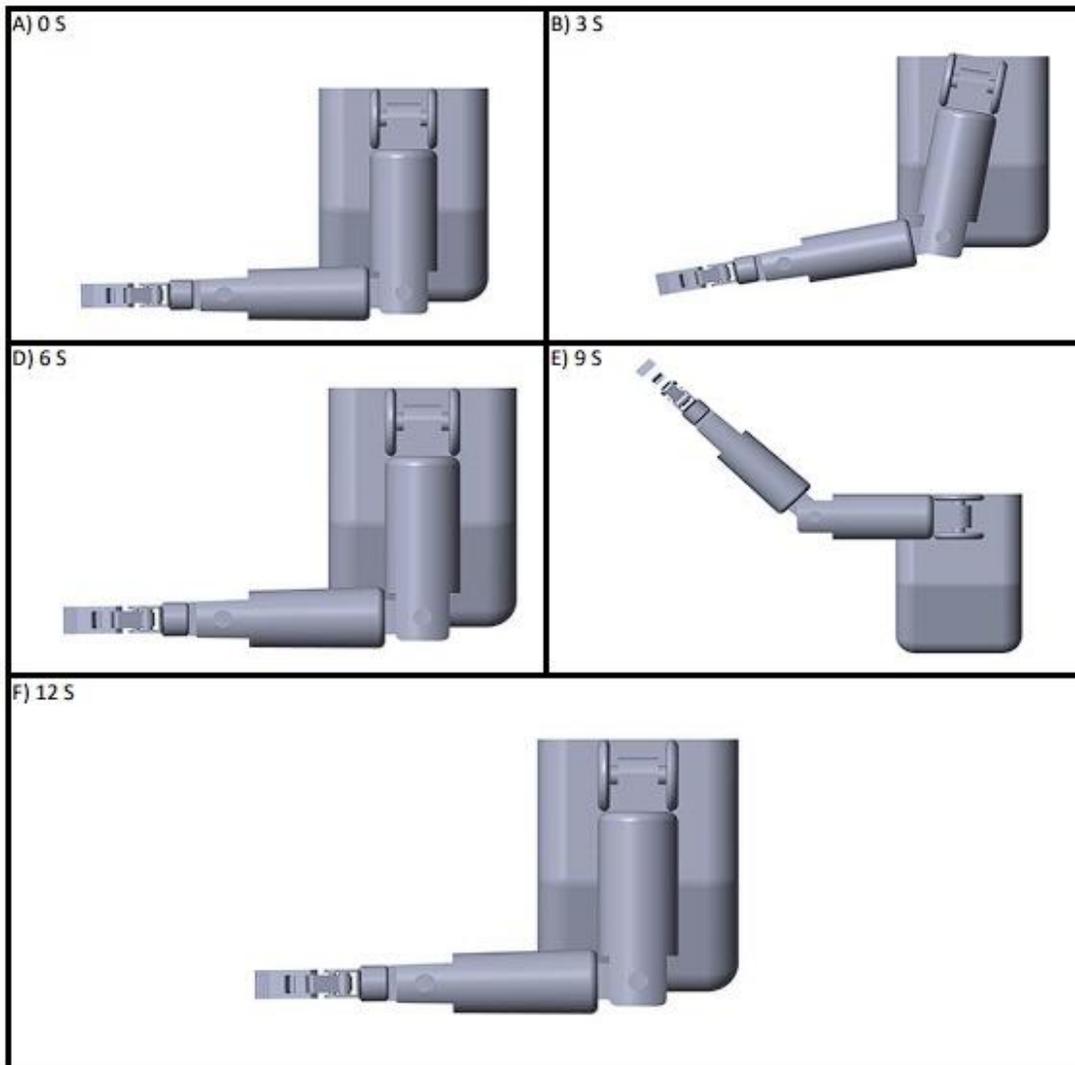
Trayectoria del antebrazo en la segunda simulación.



Nota. Trayectoria realizada por el antebrazo en la segunda simulación la cual corresponde a un movimiento de flexión y extensión.

Figura 29.

Animación de la simulación realizada.



Nota. Animación de la simulación realizada, a) corresponde al tiempo 0 y posición inicial, b) el brazo ha capturado la que se encuentra en caída libre (segundo 3), c) regresa a la posición de reposo (segundo 6), d) lleva la caja por encima de la cabeza (segundo 9), e) regresa a la posición de reposo (segundo 12)

8. PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

El proceso de optimización del brazo robótico antropomórfico consiste en encontrar un diseño CAD cuyos perfiles de torque al generar un movimiento seas próximos a los de un brazo humano, es decir el brazo que se comporte próximo al de referencia será considera óptimo para una aplicación humana y por tanto antropomórfico. Para ello se tuvo como objetivo encontrar el diseño CAD cuya curva de torque se encuentre más próxima a los perfiles de torque biomecánicos de referencia[5] .

Para obtener estos resultados se llevaron a cabo diferentes procedimientos. El primero de ellos consistió en validar dos movimientos de referencia los cuales son el levantamiento de una caja llevándola por encima de la cabeza y regresándola a la posición inicial, el segundo es recibir una caja que se encuentra en caída libre. Presentar dos diseños CAD los cuales presentaron mejoras tanto estéticas como funcionales, así mismo se cambian propiedades físicas como el momento de inercia. Por ultimo y con el objetivo de eliminar la masa como un variable, también se simularon brazos con las masas iguales.

A partir de los pasos descritos se pudo encontrar perfiles de toque máximos que se asemejaban a los perfiles de torque de referencia y perfiles que siguen las curvas de referencia.

9. COMPARACIÓN UTILIZANDO LA MEDIDA DE ERROR CUADRÁTICO MEDIO

El error cuadrático medio (ECM) es una métrica utilizada en estadísticas para evaluar la precisión de un modelo al comparar las predicciones con los valores reales. proporciona una medida de la dispersión de los errores cuadráticos, penalizando de manera proporcional los errores más grandes. Este error nos sirve para validar la curva de diseño que más se aproxima al torque biomecánico y de esta forma tener un modelo antropomorfo adecuado [24].

$$\text{MSE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2$$

Ec (27)

9.1 Comparación de los perfiles de torques

Las gráficas de perfiles de torque y los errores cuadráticos medio (MSE) para el primer movimiento fueron obtenidas a partir de los datos generados por Matlab, haciendo uso de su herramienta “Data Inspector”. Posteriormente fueron procesados en Python, donde se puede evidenciar el comportamiento de los torques en función del tiempo para ambos movimientos. La cantidad de pasos que se asigna al sistema depende en mayor parte a la cantidad fotogramas que se quieren tener en la animación, ya que el sistema acomoda de forma automática 450 resultados por segundo, es decir resuelve el sistema esa cantidad de veces para mostrar los resultados.

Se realizaron 4 iteraciones para cada movimiento, en cada una de ellas se realizaron cambios en las geometrías o en las masas, con el fin de analizar la influencia de esta variable en los resultados, en la Tabla 6 se puede apreciar un resumen de los cambios hechos en cada iteración. Las propiedades mecánicas de los diseños probados se pueden ver en la tabla 3 y tabla 4.

Figura 30.

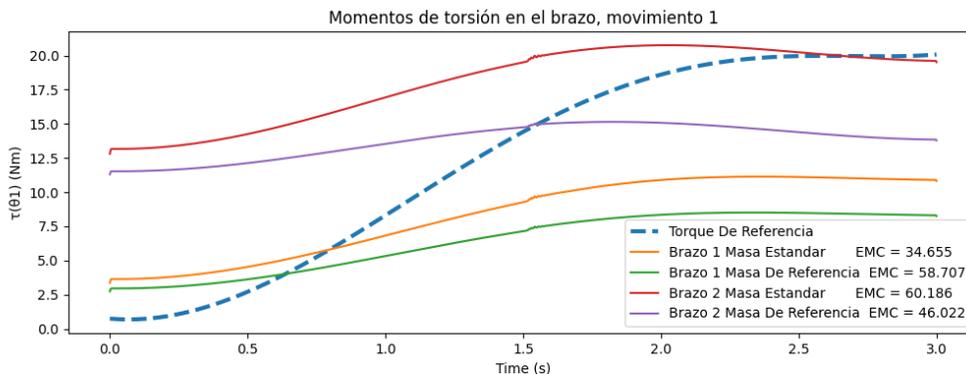
Iteraciones simuladas

Iteración	Nombre de la Iteración	Detalle de la iteración	Masas [Kg]	
			Brazo	Antebrazo
1	Brazo Masa Estandar	Se refiere al diseño 2 [Anexo Diseño], la configuración permanece por defecto exportada del software cad como lo muestra la tabla 4.	2,007	1,323
2	Brazo 1 Masa de referencia	Se encuentra simulado el diseño 2 [Anexo Diseño], Se cambian las masas a las de referencia, como se muestra en la tabla 6.	1,3886	0,886
3	Brazo 2 Masa estandar	Corresponde a el diseño 3 [Anexo Diseño], la configuración permanece por defecto exportada del software cad, como lo muestra la tabla 5.	2,63	1,793
4	Brazo 2 masa de referencia	Se encuentra simulado el diseño 2 [Anexo Diseño], Se cambian las masas a las de referencia, como se muestra en la tabla 6.	1,3886	0,886

Nota. Se muestran los cambios realizados en cada simulación, Iteración realizada, las cuales van a cambiar el comportamiento de los resultados.

Figura 31.

Perfiles de torque generados en la primera simulación del brazo

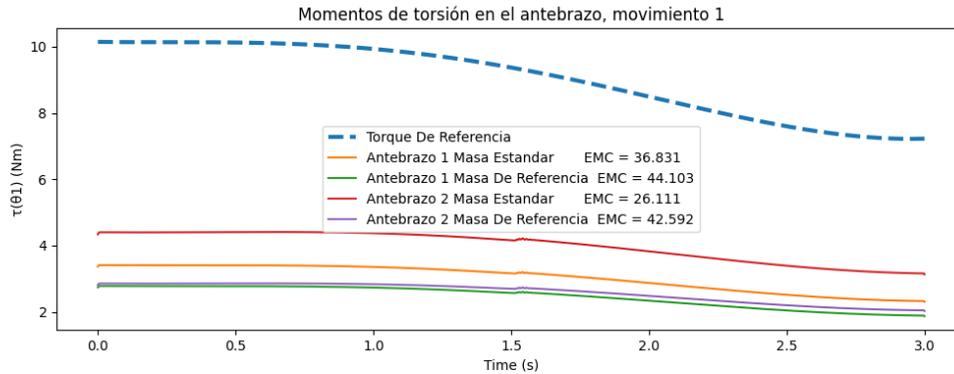


Nota. La grafica muestra los perfiles de torque generados en la primera simulación, el torque de referencia corresponde al torque generado por un brazo humano, la masa estándar es la masa de la pieza obtenida a partir del volumen calculado por el software CAD y multiplicado por la densidad

La masa de referencia es la masa del brazo humano usado para el torque de referencia (Línea azul punteada). El brazo uno es el diseño 1, con formas geométricas sencillas y funcionales, Brazo 2 tiene detalles más refinados y próximos a la geometría de un brazo humano

Figura 32.

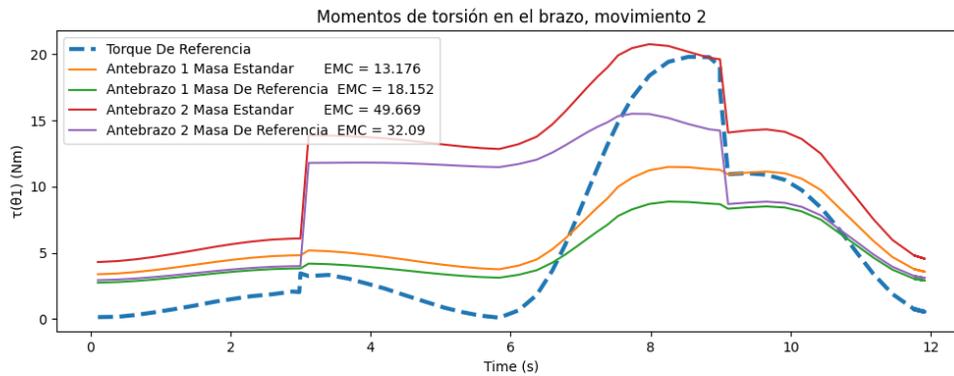
Perfiles de torque generados en la primera simulación del antebrazo



Nota. La grafica muestra los perfiles de torque generados en la primera simulación, el torque de referencia corresponde al torque generado por el antebrazo humano, la nomenclatura de las curvas sigue el mismo patrón de la figura (31).

Figura 33.

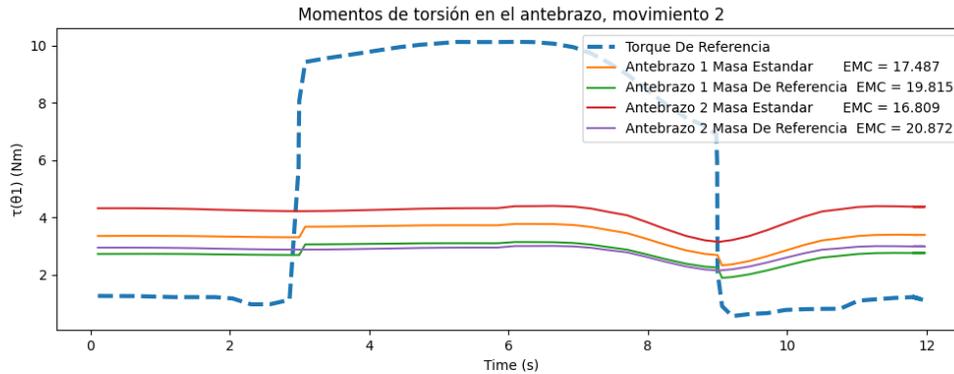
Perfiles de torque generados en la segunda simulación del brazo



Nota. La grafica muestra los perfiles de torque generados en la segunda simulación, el torque de referencia corresponde al torque generado por el brazo humano, la nomenclatura de las curvas sigue el mismo patrón de la figura (31). Se poseen dos picos principales, uno de subida y otro de bajada, los cuales corresponden a los momentos en que el brazo captura la carga de 3kg y la suelta.

Figura 34.

Perfiles de torque del antebrazo generados en la segunda simulación



Nota. La grafica muestra los perfiles de torque del antebrazo generados en la segunda simulación, la nomenclatura sigue el mismo patrón de la figura (31).

A pesar de que el brazo realizado posee 7 grados de libertad, parte de estos grados de libertad se vieron prescindibles ya que los movimientos a recrear en el documento de datos de referencia biomecánicos no requieren desplazarse en todas las direcciones, por lo tanto, solo son usados 2 grados de libertad, uno en el codo y otro en el hombro. Como se puede evidenciar en las gráficas obtenidas, se logró construir un torque biomecánico de referencia, a partir de datos de bases científicas, que funcionara como comparativo para los torques producidos por nuestro brazo robótico. Así mismo se valida el comportamiento de diferentes brazos robóticos mediante la comparación de las mismas curvas.

En el análisis de datos relacionados con el torque máximo en las gráficas, es crucial abordar posibles errores que puedan influir en la precisión de los resultados. En este caso, se identifica un desvío en el torque máximo obtenido, y se busca aplicar una evaluación más detallada para determinar el porcentaje de error, equivalente a cada componente:

$$Error = \frac{Valor Real - Valor Calculado}{Valor Real} 100\% \quad Ec (28)$$

El margen de error de torque máximo obtenido para el brazo 1 es de 3.4%, y el margen de error de torque máximo para el antebrazo 1 es de 56.5%.

Para el brazo 2, el margen de error de torque máximo es de 4.83 %, y para el antebrazo 2, el margen de error de torque máximo es de 56.5 %.

10. CONCLUSIONES

En esta investigación se aborda de manera integral el diseño de prototipos para un brazo robótico antropomórfico. Se exploraron estrategias que equilibran funcionalidad y según el comportamiento biomecánico, refinando el diseño mediante pruebas prácticas. Este enfoque ha resultado fundamental para lograr un brazo robótico que cumple con los objetivos propuestos en este proyecto, y los prototipos elaborados representan una contribución directa al progreso de nuestro trabajo en el ámbito de la robótica antropomórfica, proporcionando perspectivas valiosas para futuras aplicaciones.

La compensación en las curvas es suave debido a diferentes factores. Como se puede evidenciar en las gráficas hay dos modelos que se les modificó la masa, sin embargo, entre los torques producidos que tienen la misma masa de referencia hay una gran diferencia. Esto debido a que los torques también dependen de otras características físicas tales como momentos de inercia los cuales afectan el comportamiento de los torques. Así mismo se puede ver que un diseño sencillo es capaz de emular los torques bajos de un brazo humano, mientras que un diseño más complejo es capaz de obtener picos de torque próximos a los torques de referencia por ende óptimo, satisfaciendo así los requisitos previstos para la optimización. Adicionalmente los movimientos del cuerpo humano son producidos por músculos los cuales cambian de individuo a individuo complejizando el diseño de un brazo robótico que simule a la perfección los torques de referencia. Finalmente, de acuerdo a los resultados obtenidos, el comportamiento de las curvas de torque para los grados de libertad analizados en el brazo robótico antropomórfico demuestra un perfil suave, siguiendo el mismo patrón de comportamiento de los torques biomecánicos de referencia definidos a partir del exoesqueleto robótico de miembro superior de la referencia del estado del arte [5]. Esto es válido desde el punto de vista de mecanismos robóticos destinados a la asistencia y rehabilitación física, ya que no se generan picos de torque en las curvas, y por consiguiente, se está generando un movimiento de agarre suave. Cuando se generan picos de torque, implica que existen picos de corriente en el motor que acciona el grado de libertad, y desde el punto de eficiencia energética esto no es apropiado en el diseño. Esto a razón de posibles diferencias entre los parámetros inerciales y dinámicos entre los dos diseños, por ejemplo, en los centros de masa y momentos de inercia de los segmentos. se concluye, que así el error cuadrático medio calculado para el perfil de torque en la articulación del hombro y del codo es significativo, los torques siguen

el mismo patrón de comportamiento de los torques biomecánicos de referencia, permitiendo validar exitosamente el diseño.

BIBLIOGRAFIA

- [1] D. N. Cuesta C and J. R. Huerfano G, “Diseño y construcción de un brazo robótico de 6 GDL,” *Enero-Junio*, vol. 13, pp. 73–82, 2016.
- [2] I. Villa Castellá, “Diseño y desarrollo del prototipo de un brazo robótico antropomórfico controlado mediante arduino meda 2560,” 2018.
- [3] D. M. Izquierdo Afonso, “Desarrollo de un brazo robótico antropomórfico: Diseño base, elección de los motores, electrónica y simulación”.
- [4] T. Bautista and Blanca, “Estudio y prototipado de brazo robótico para personas con amputaciones y diseño de campaña de concienciación,” 2021.
- [5] M. A. Gull, T. Bak, and S. Bai, “Dynamic modeling of an upper limb hybrid exoskeleton for simulations of load-lifting assistance,” *Proc Inst Mech Eng C J Mech Eng Sci*, vol. 236, no. 5, pp. 2147–2160, Mar. 2022, doi: 10.1177/09544062211024687.
- [6] J. L. Pons, *Wearable robots : biomechatronic exoskeletons*. Wiley, 2008.
- [7] J. Manuel, D. González, P. R. Murillo, I. Flores Luna, and A. J. Mendoza, “ROBÓTICA Y PRÓTESIS INTELIGENTES,” vol. 6, 2004, [Online]. Available: <http://world.honda.com/ASIMO/>
- [8] “¿Qué son los grados de libertad (mecánica)?” Accessed: May 11, 2023. [Online]. Available: <https://www.techtarget.com/whatis/definition/degrees-of-freedom>
- [9] “Figura 4. Abducción-Aducción - ADAYO PBO.” Accessed: May 12, 2023. [Online]. Available: <https://www.adayo-pbo.es/glosario/figura-4-abduccion-aduccion/#>
- [10] A. B. Ortega *et al.*, “Biomechanics of the Upper Limbs: A Review in the Sports Combat Ambient Highlighting Wearable Sensors,” *Sensors*, vol. 22, no. 13. MDPI, Jul. 01, 2022. doi: 10.3390/s22134905.
- [11] D. A. Winter, *Biomechanics and motor control of human movement*. Wiley, 2009.
- [12] S. Velásquez, J. Luces, and R. Velásquez, “Modelado y simulación de un brazo robótico mediante el uso de simmechanics de matlab,” *Julio-Diciembre*, no. 2, 2015.
- [13] D. S. V. Bandara, R. A. R. C. Gopura, K. T. M. U. Hemapala, and K. Kiguchi, “Development of a multi-DoF transhumeral robotic arm prosthesis,” *Med Eng Phys*, vol. 48, pp. 131–141, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.medengphy.2017.06.034.
- [14] “Plástico PLA: qué es y para qué se utiliza este material.” Accessed: Dec. 03, 2023. [Online]. Available: <https://primebiopol.com/plastico-pla-que-es-y-para-que-se-utiliza/>
- [15] “Guía de plásticos y otros materiales para impresión 3D - Formizable.” Accessed: Jan. 14, 2024. [Online]. Available: <https://formizable.com/guia-de-plasticos-y-otros-materiales-para-impresion-3d/>

- [16] J. Ancajima-Rodríguez, “SELECCIÓN DE MATERIAL DE FABRICACIÓN PARA PRÓTESIS UTILITARIA DE EXTREMIDAD SUPERIOR IMPRESA EN 3D.”
- [17] “Características del material ABS y por qué usarlo | Aceromafe.” Accessed: Jan. 14, 2024. [Online]. Available: <https://www.aceromafe.com/material-abs/>
- [18] “Comparativa de filamentos impresión 3D PLA y ABS - Servitec3D.” Accessed: Jan. 14, 2024. [Online]. Available: <https://servitec3d.com/blog/pla-y-abs-comparativa/>
- [19] “Estatura de los colombianos: ¿Cuánto ha aumentado en los últimos año? - Ciencia - Vida - ELTIEMPO.COM.” Accessed: Dec. 03, 2023. [Online]. Available: <https://www.eltiempo.com/vida/ciencia/estatura-de-los-colombianos-cuanto-ha-aumentado-en-los-ultimos-ano-639612>
- [20] “Estatura media de hombres y mujeres en todo el mundo.” Accessed: Dec. 03, 2023. [Online]. Available: <https://www.datosmundial.com/estatura-promedio.php>
- [21] “(PDF) [ingeniería] mcgraw hill - fundamentos de robotica (barrientos, peñin, balaguer,aracil) | Endy Ibarra Verdugo - Academia.edu.” Accessed: Jan. 20, 2024. [Online]. Available: https://www.academia.edu/24829242/_ingenieria_mcgraw_hill_fundamentos_de_robotica_barrientos_pe%C3%B1in_balaguer_aracil
- [22] “WebPlotDigitizer: extrae datos de gráficos, imágenes y mapas.” Accessed: Dec. 03, 2023. [Online]. Available: <https://automeris.io/WebPlotDigitizer/citation.html>
- [23] “Simscape Multibody - MATLAB.” Accessed: Dec. 03, 2023. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/products/simscape-multibody.html>
- [24] “Aprendizaje automático: Una introducción al error cuadrático medio y las líneas de regresión.” Accessed: Dec. 03, 2023. [Online]. Available: <https://www.freecodecamp.org/espanol/news/aprendizaje-automatico-una-introduccion-al-error-cuadratico-medio-y-las-lineas-de-regresion/>

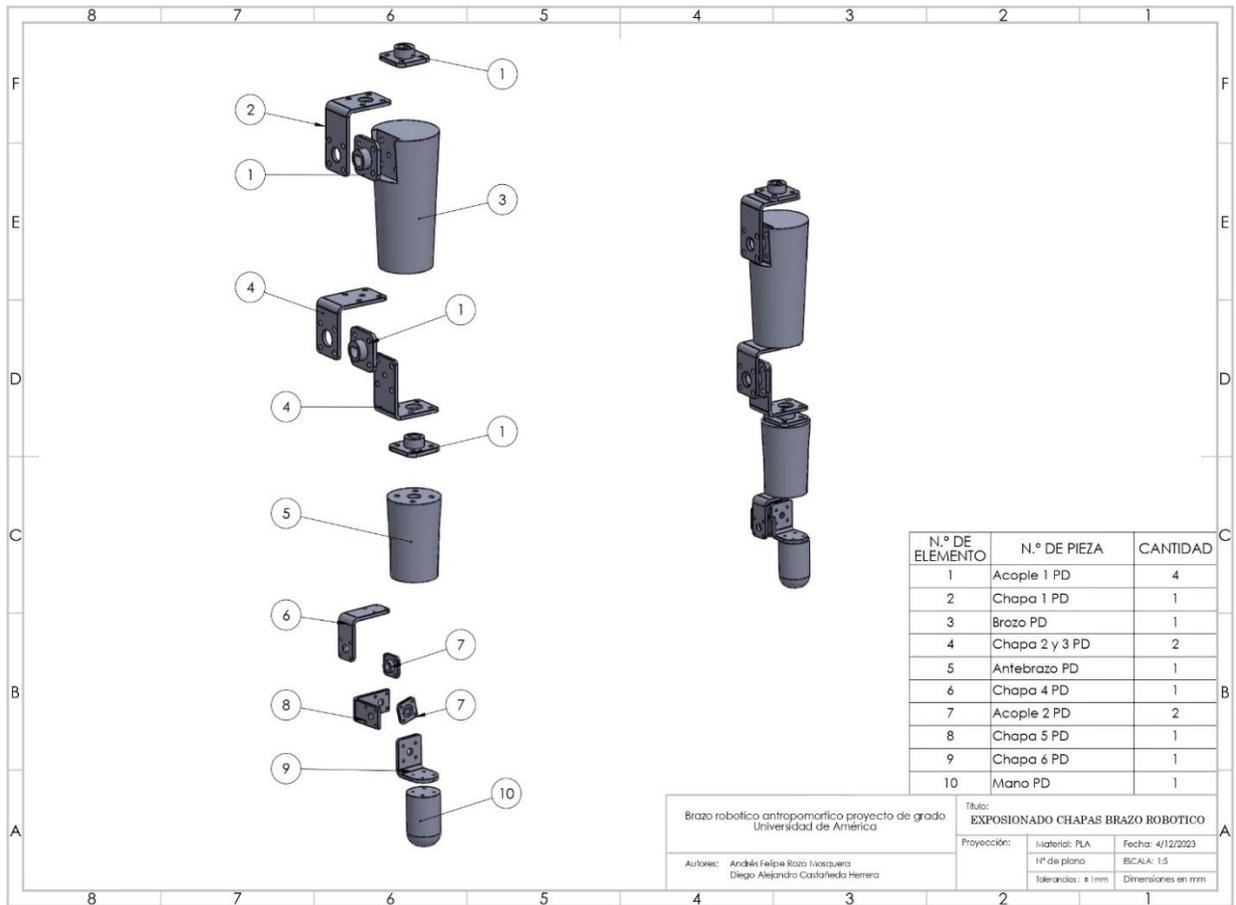
ANEXOS

ANEXO 1 DISEÑO

Diseño 1: Vista explosionada chapas brazo 1

Figura 35.

Vista Explosionada: Chapas Brazo 1.

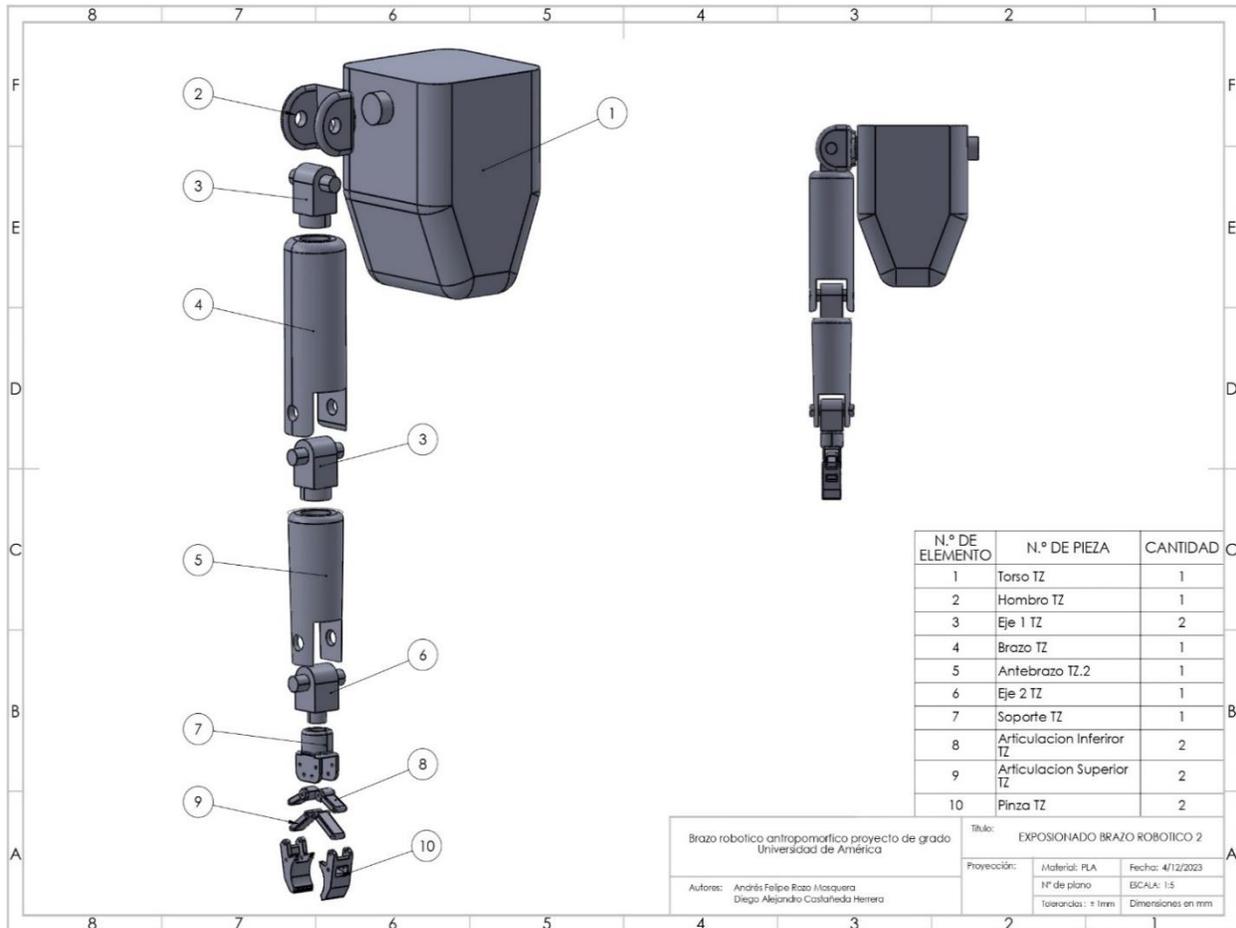


Nota. La vista explosionada de las Chapas ofrece una perspectiva detallada del primer diseño y el número de componentes que este presenta.

Diseño 2: Vista explosionada brazo robótico 2

Figura 36.

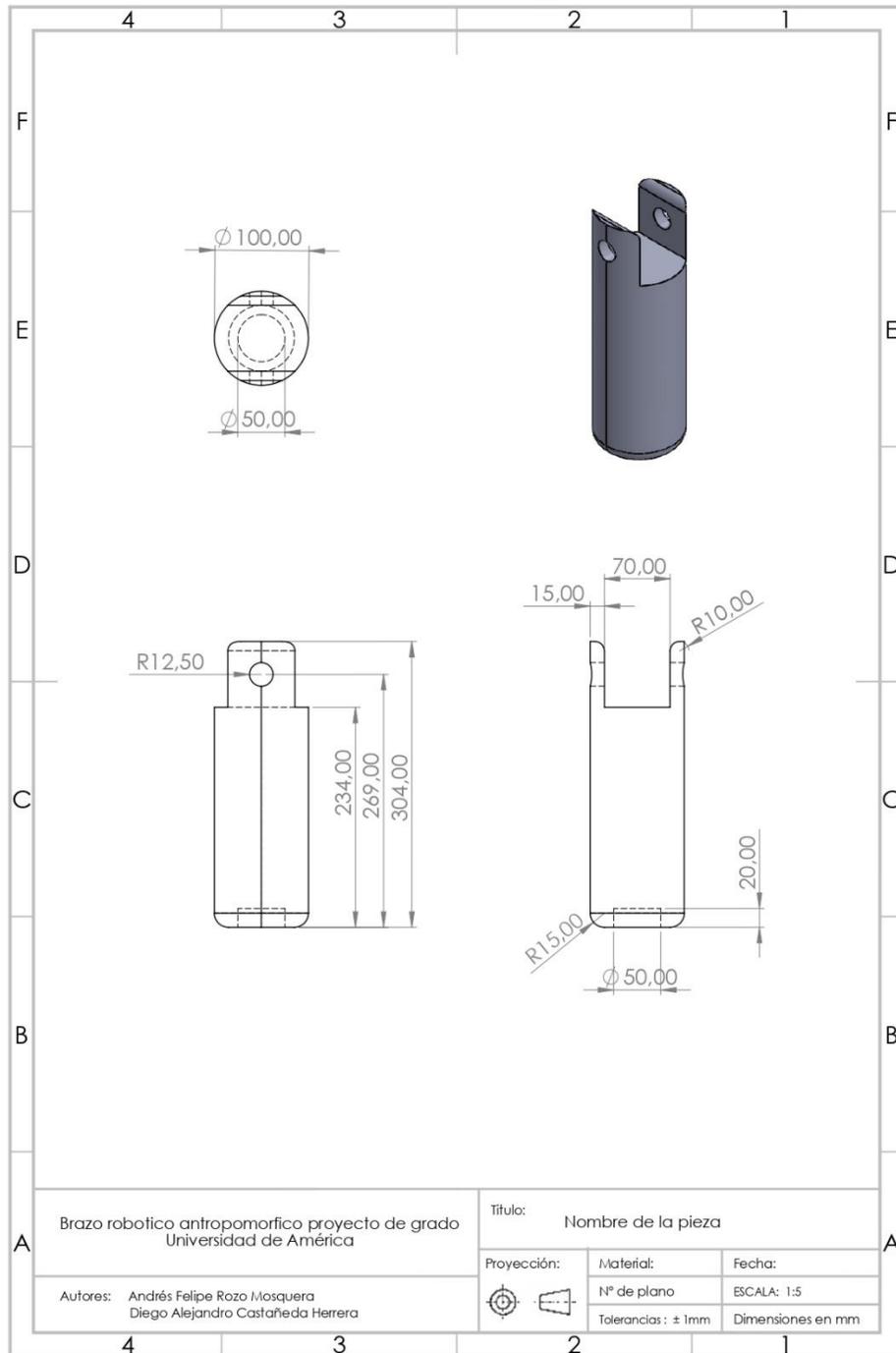
Vista Explosionada: Brazo 2.



Nota. La vista explosionada del brazo 2, ofrece una perspectiva detallada de su diseño y el número de componentes que este presenta.

Figura 37.

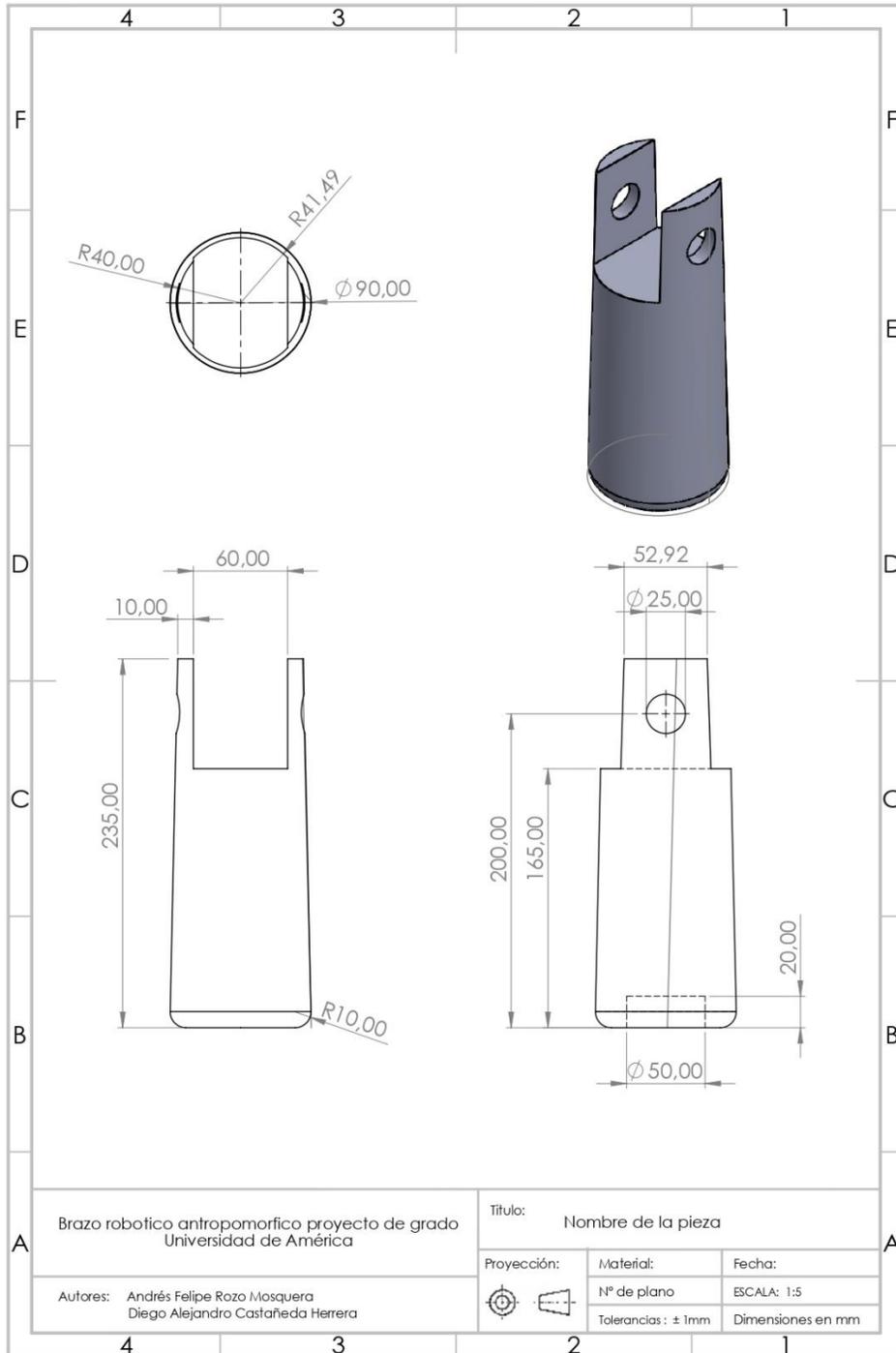
Plano del Brazo



Nota. Plano de las dimensiones del brazo, diseñado conforme a las medidas del brazo 2

Figura 38.

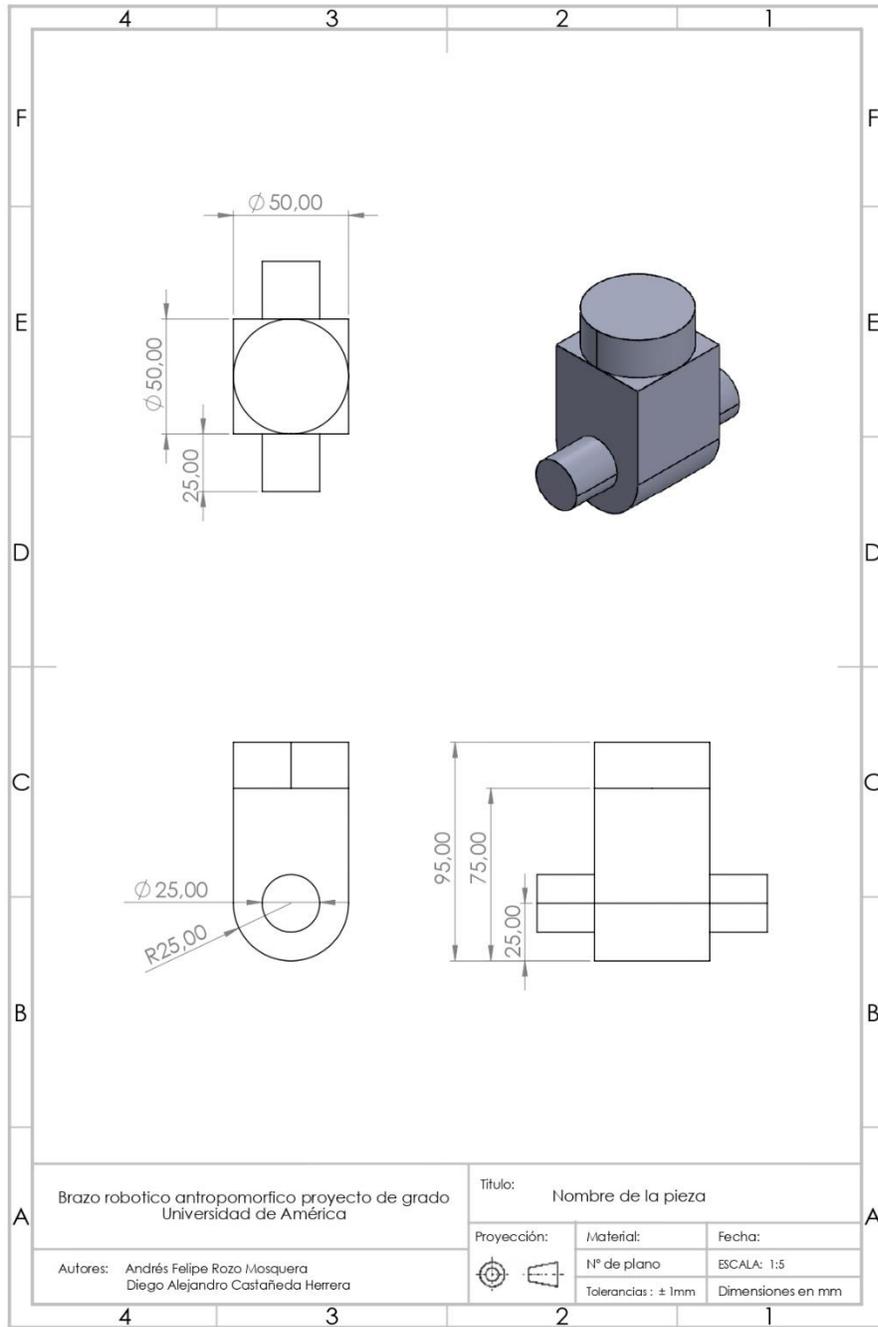
Plano del antebrazo



Nota. Plano de las dimensiones del antebrazo, diseñado conforme a las medidas del brazo 2.

Figura 39.

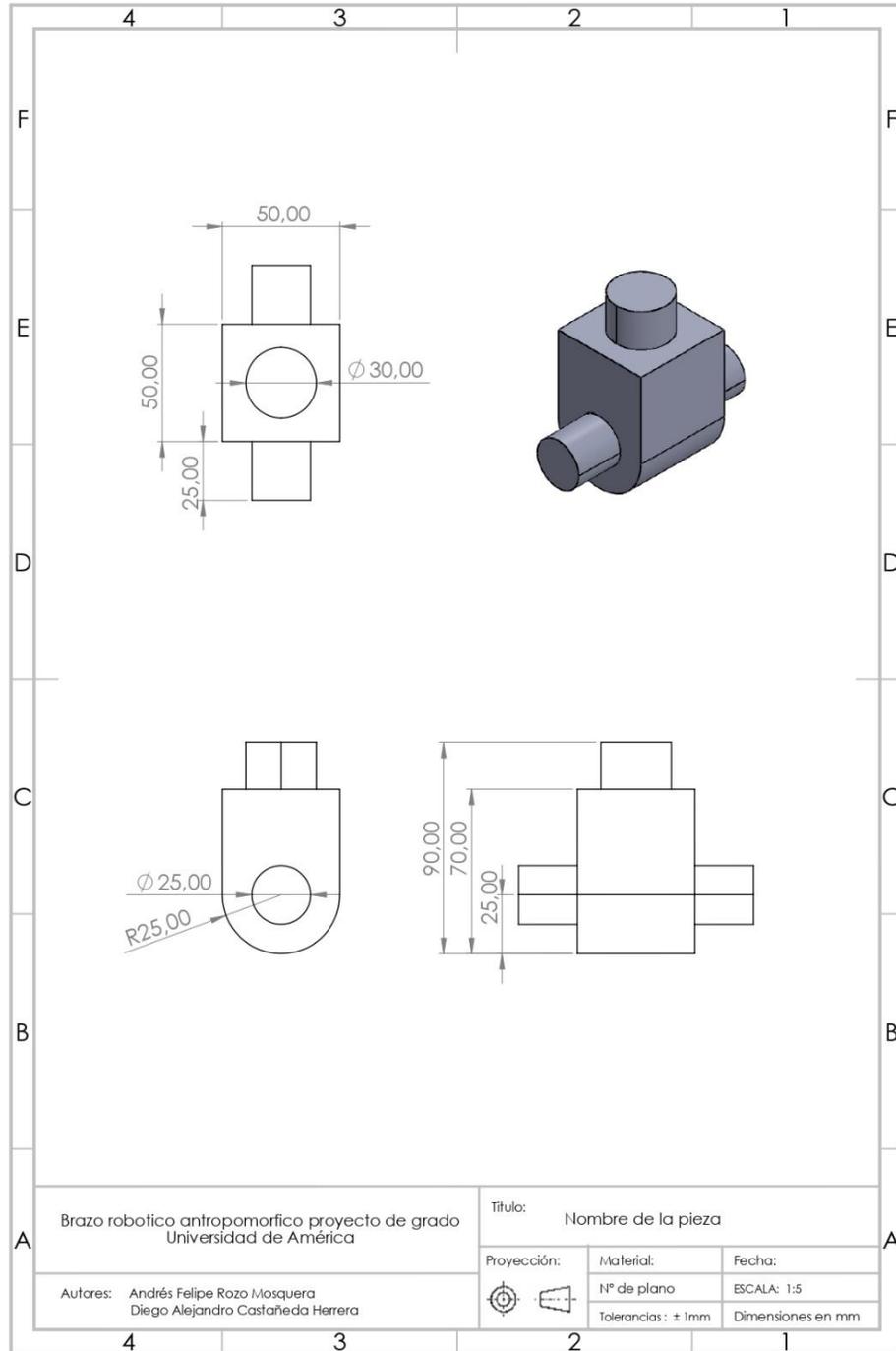
Plano del Eje 1



Nota. Plano de las dimensiones del primer eje, diseñado conforme a las medidas del brazo 2.

Figura 40.

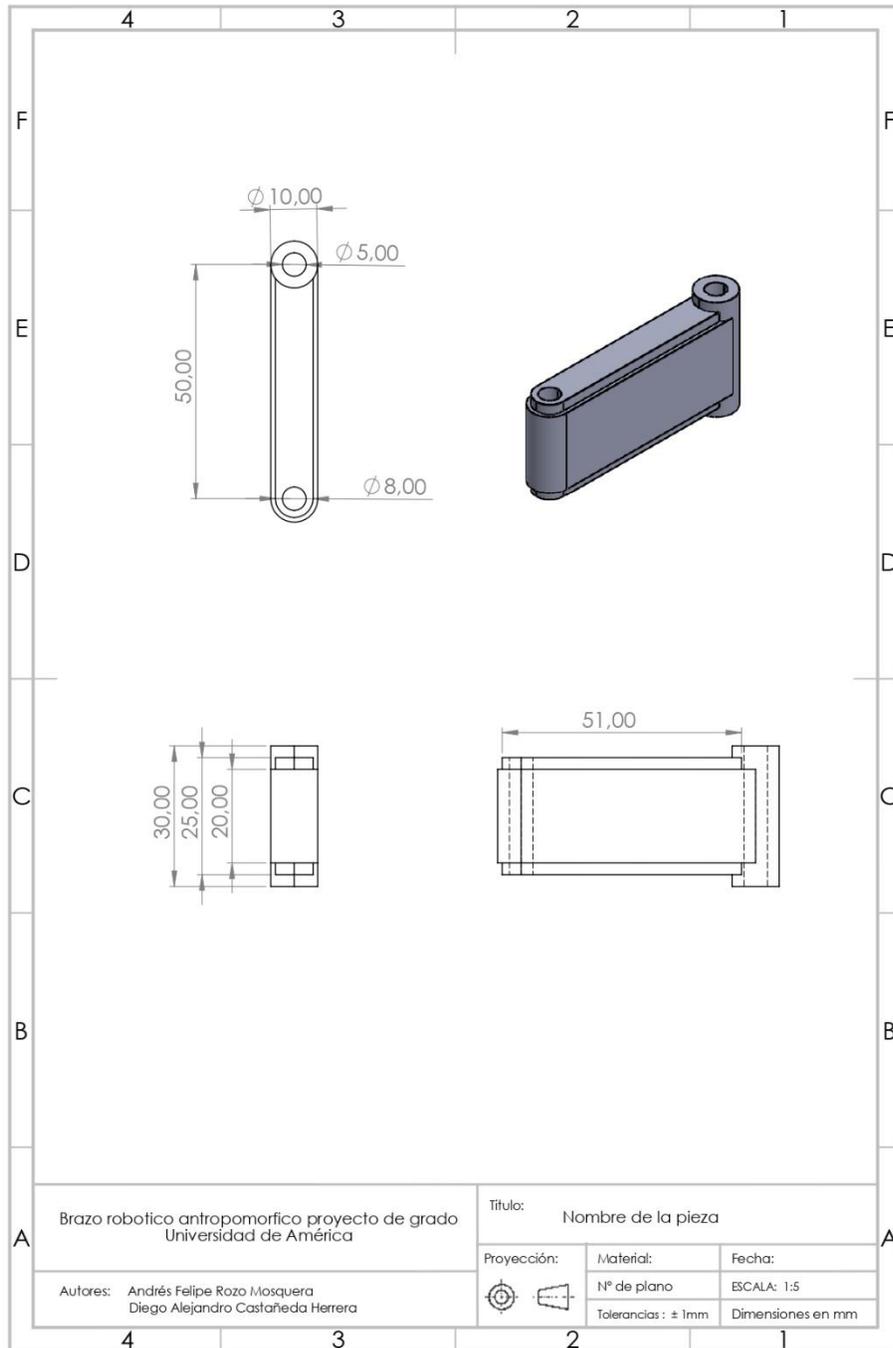
Plano Del Eje 2



Nota. Plano de las dimensiones del segundo eje, diseñado conforme a las medidas del brazo 2.

Figura 41.

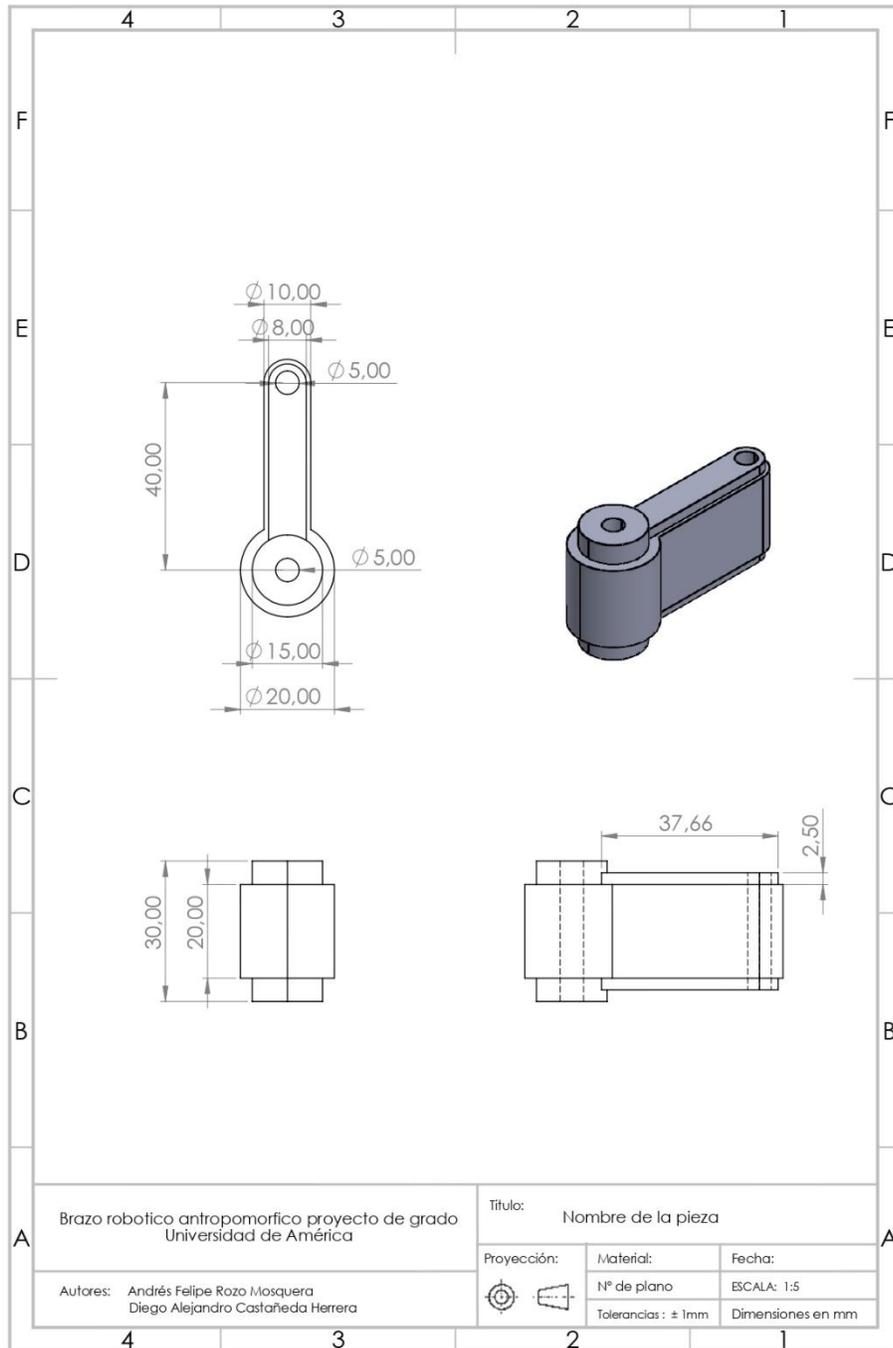
Plano articulación 1



Nota. Plano de las dimensiones de la primera articulación de la pinza, diseñado conforme a las medidas del brazo 2.

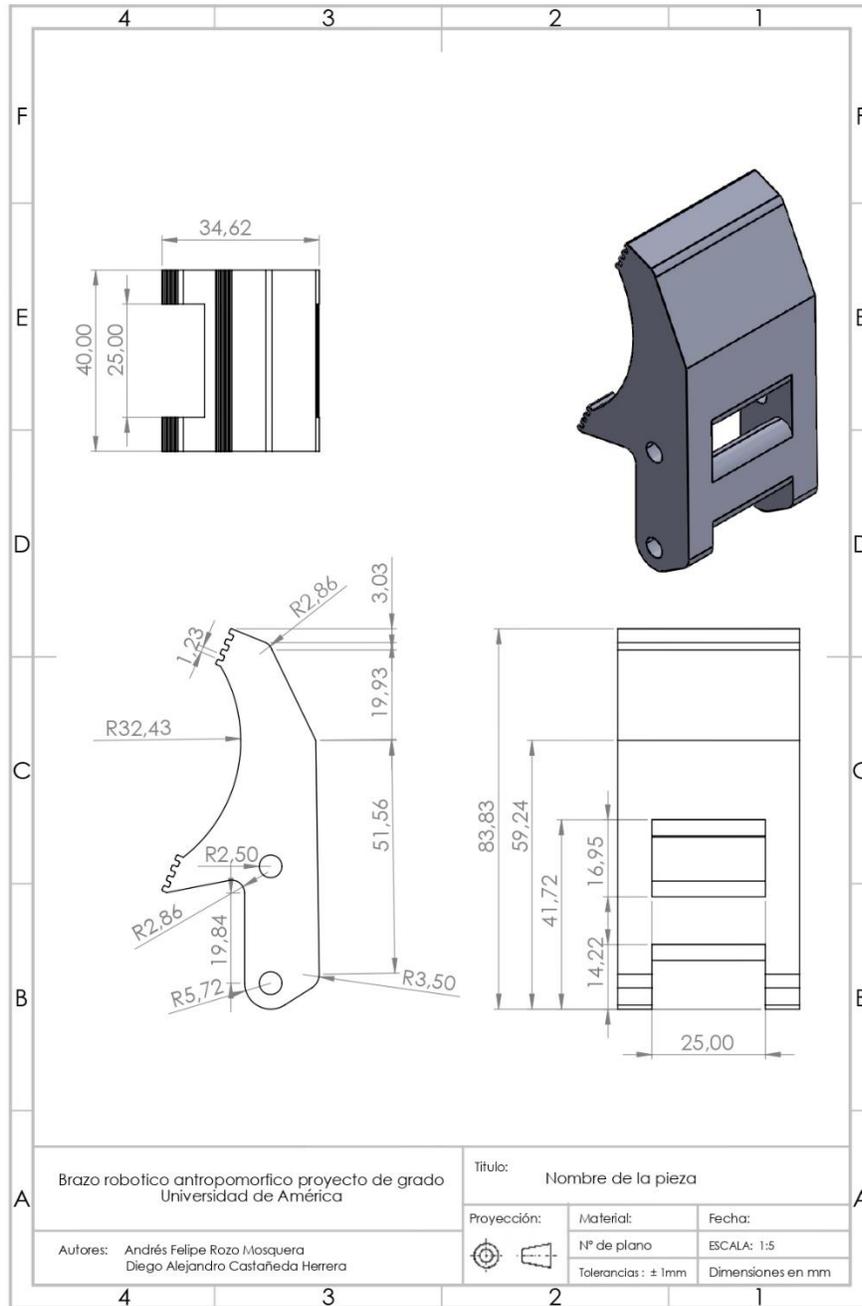
Figura 42.

Plano articulación 2



Nota. Plano de las dimensiones de la segunda articulación de la pinza, diseñado conforme a las medidas del brazo 2.

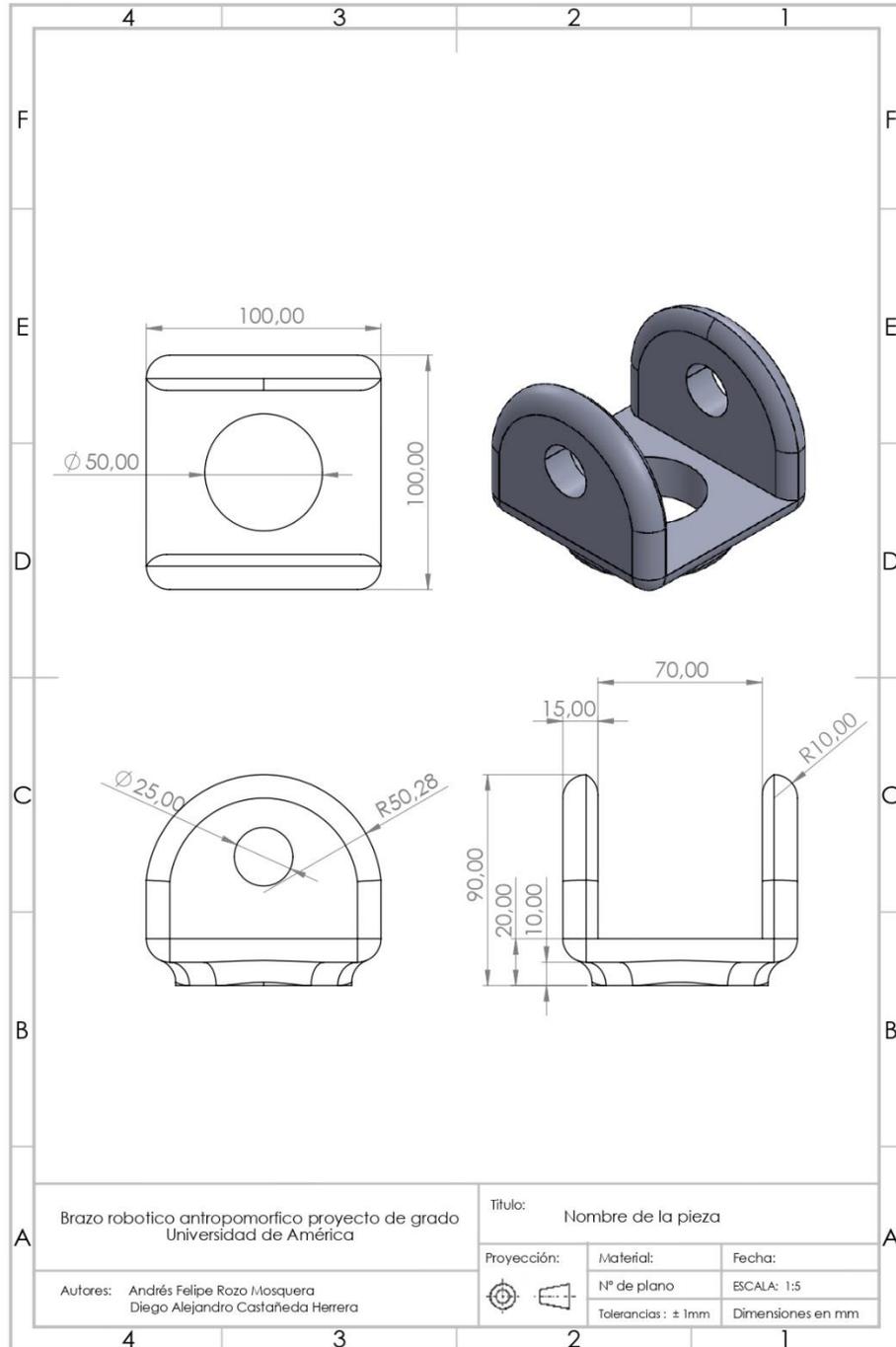
Figura 43.
Plano Pinza



Nota. Plano de las dimensiones de las pinzas, diseñadas conforme a las medidas del brazo 2.

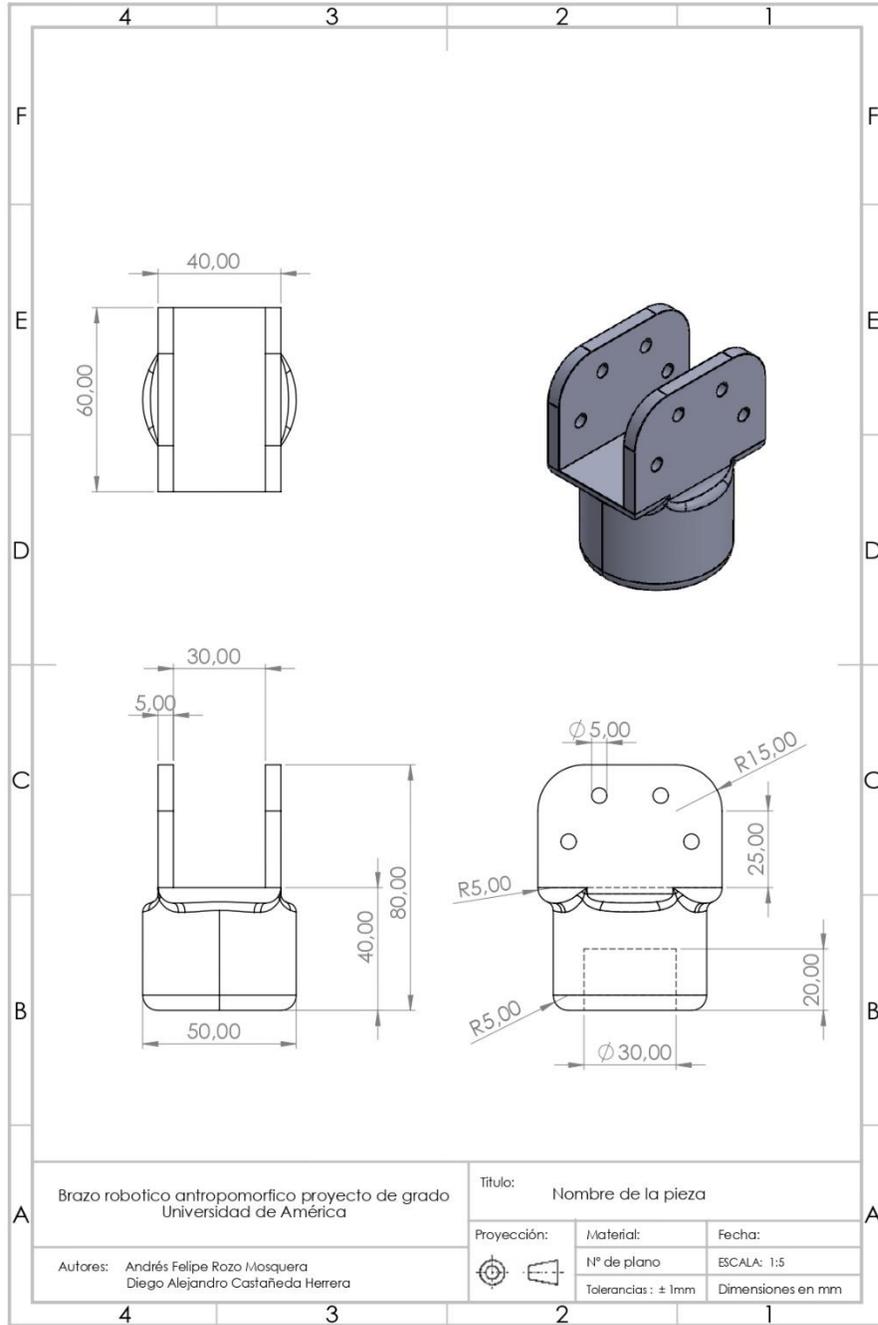
Figura 44.

Plano Hombro



Nota. Plano de las dimensiones del hombro, diseñado conforme a las medidas del brazo 2.

Figura 45.
Plano Soporte

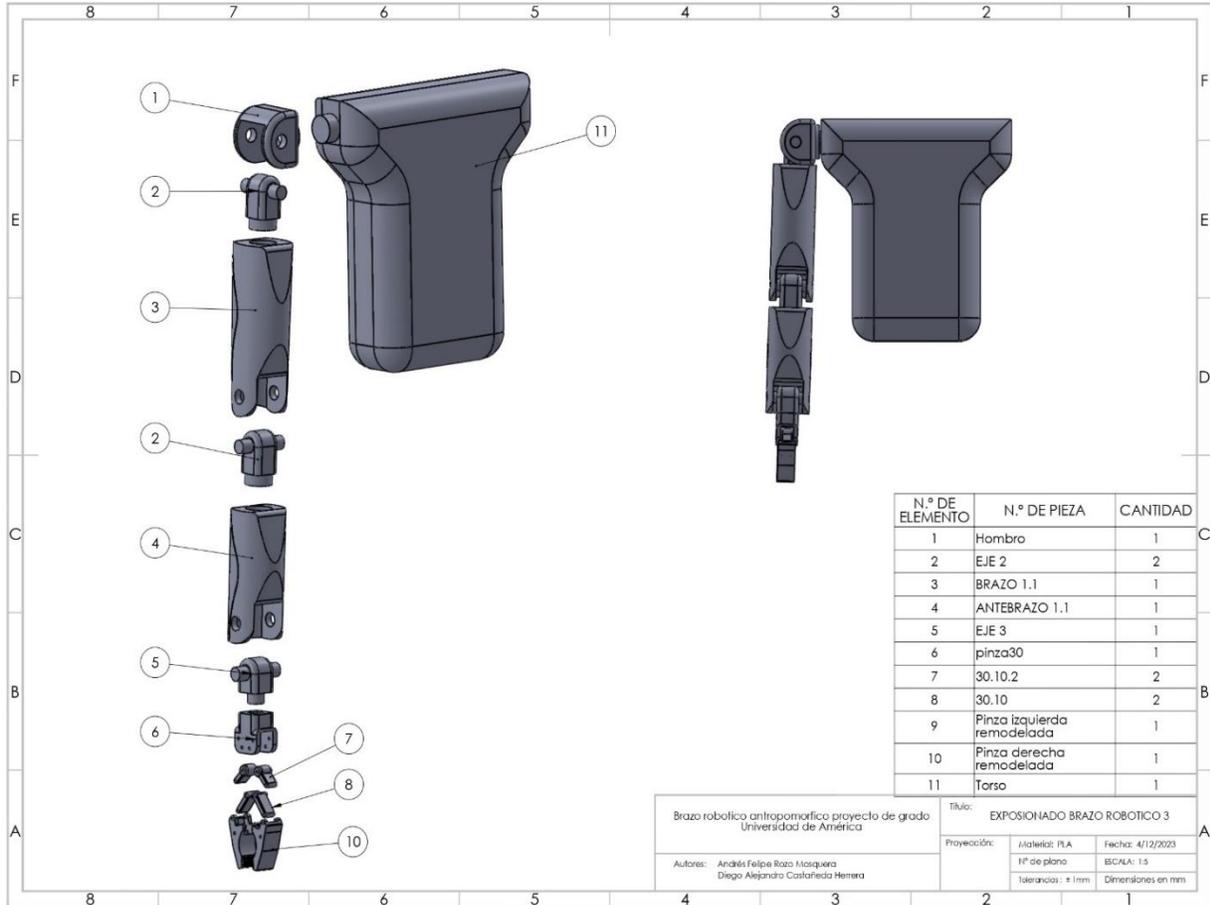


Nota. Plano de las dimensiones del soporte o palma de la pinza, diseñado conforme a las medidas del brazo 2.

Diseño 3: Vista explosionada brazo robótico 3

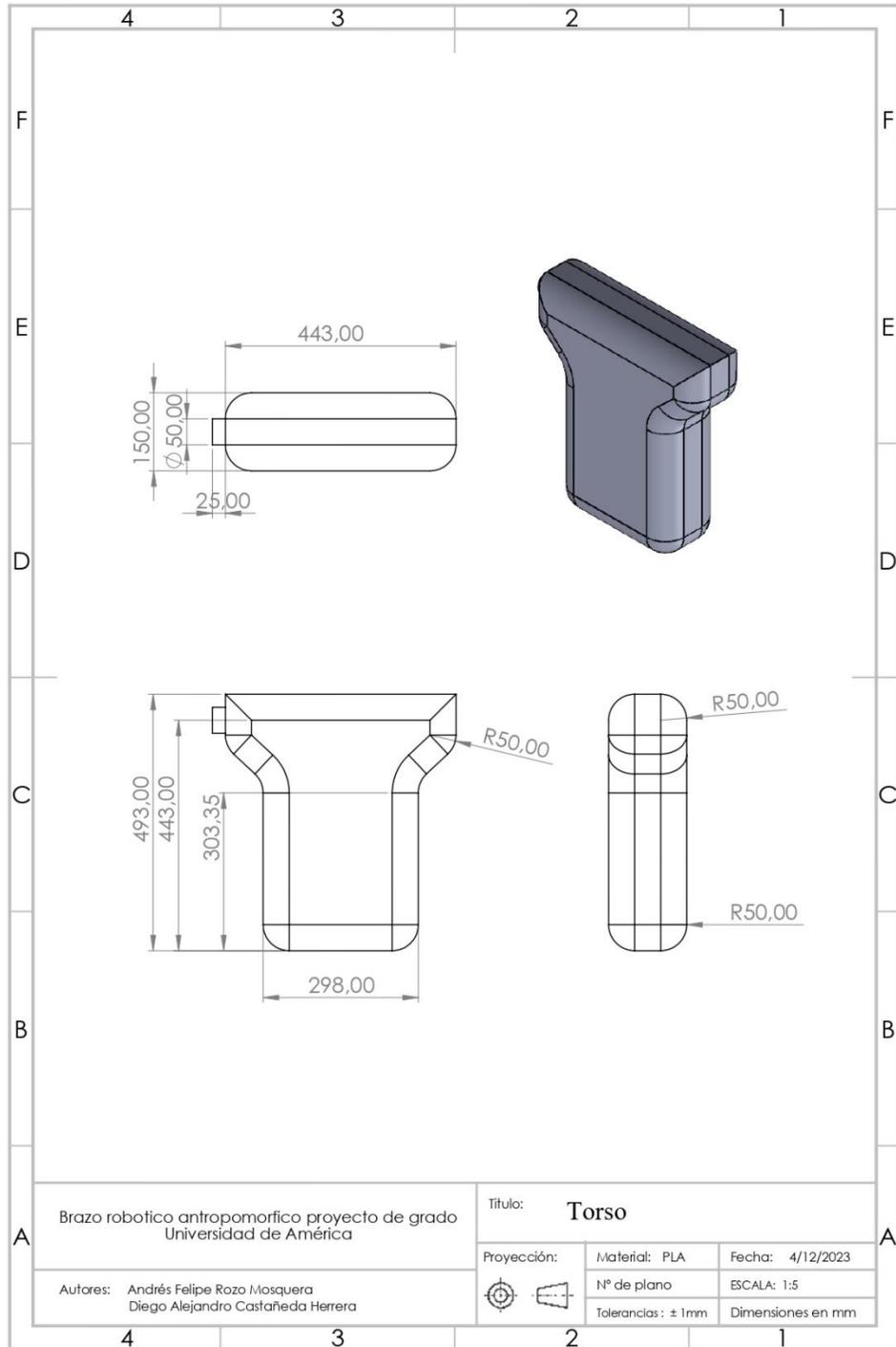
Figura 46.

Vista Explosionada: Brazo 3.



Nota. La vista explosionada del brazo 3, ofrece una perspectiva detallada de su diseño y el número de componentes que este presenta.

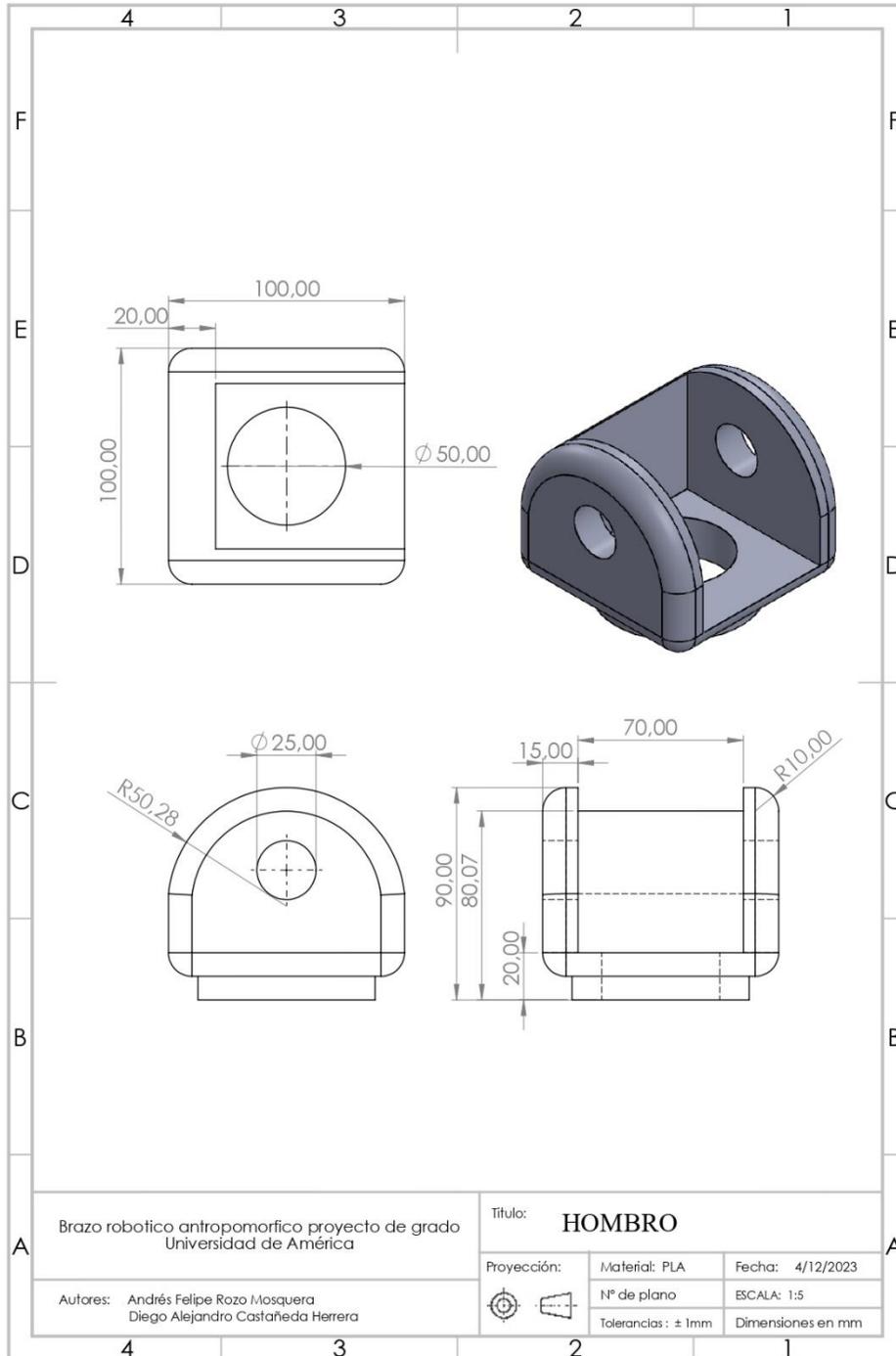
Figura 47.
Plano Torso



Nota. Plano de las dimensiones del torso y modelo de referencia, diseñado conforme a las medidas del brazo 3.

Figura 48.

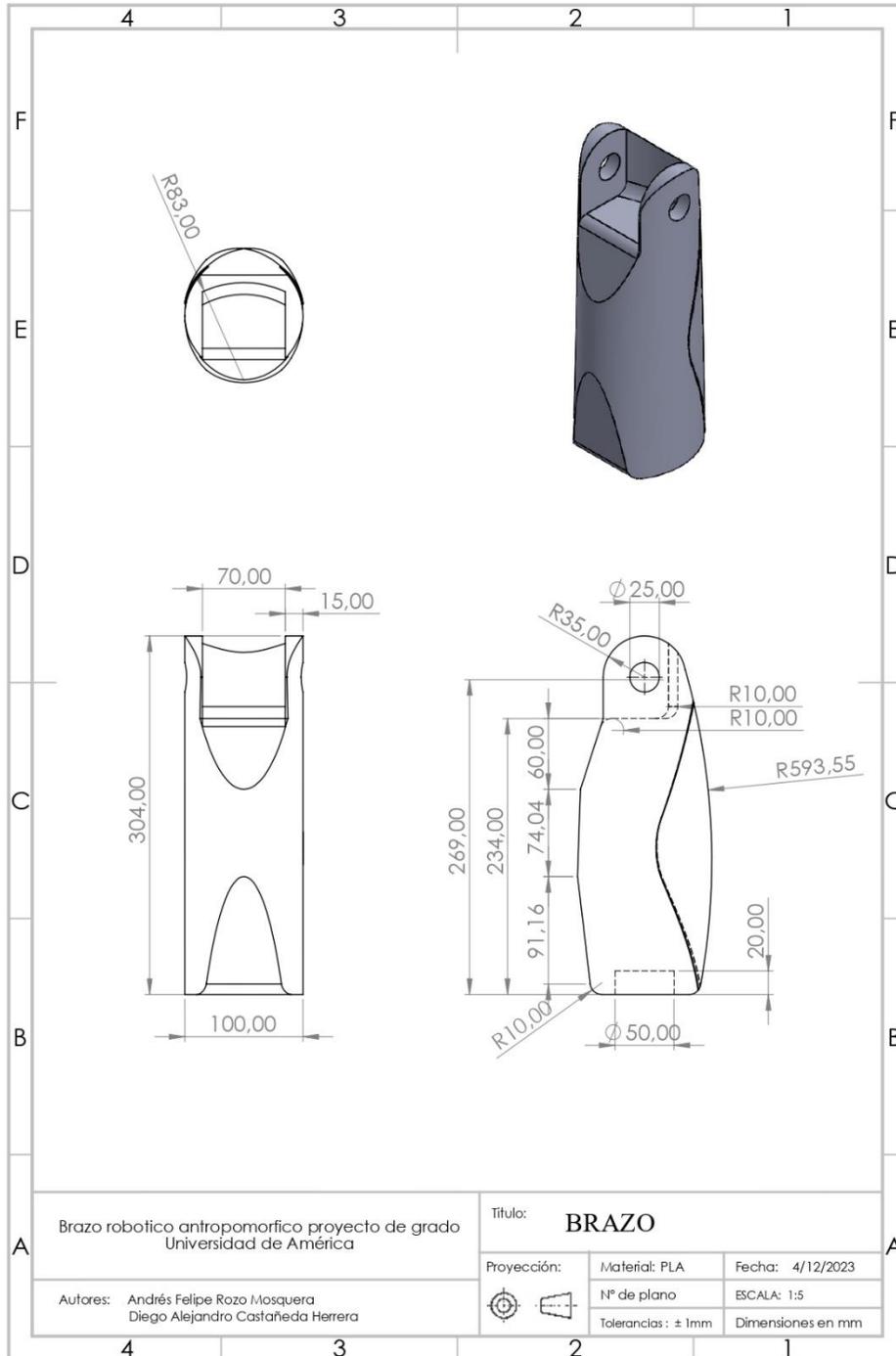
Plano Hombro 2



Nota. Plano de las dimensiones del hombro, diseñado conforme a las medidas del brazo 3.

Figura 49.

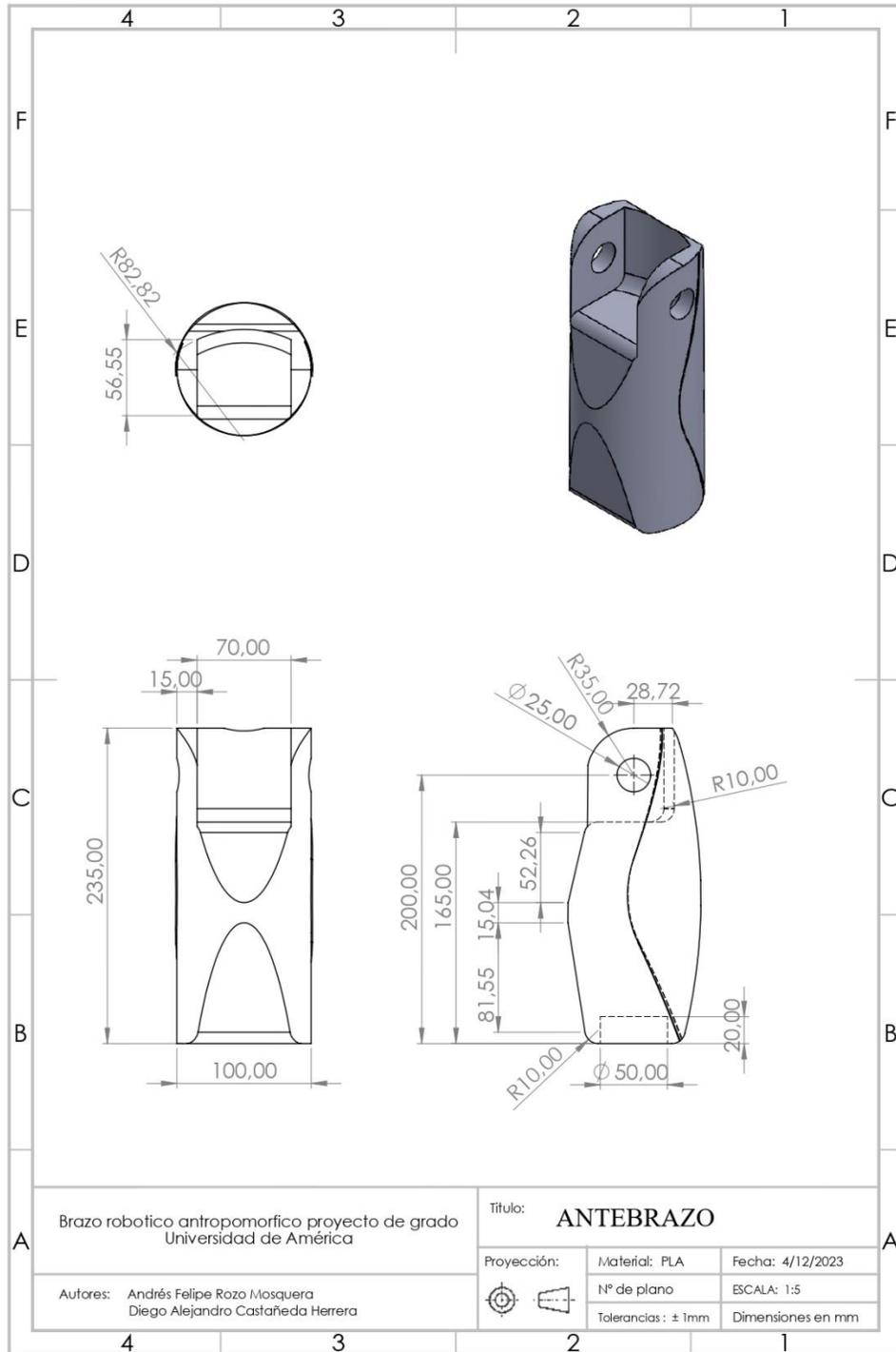
Plano Brazo 2



Nota. Plano de las dimensiones del brazo, diseñado conforme a las medidas del brazo 3.

Figura 50.

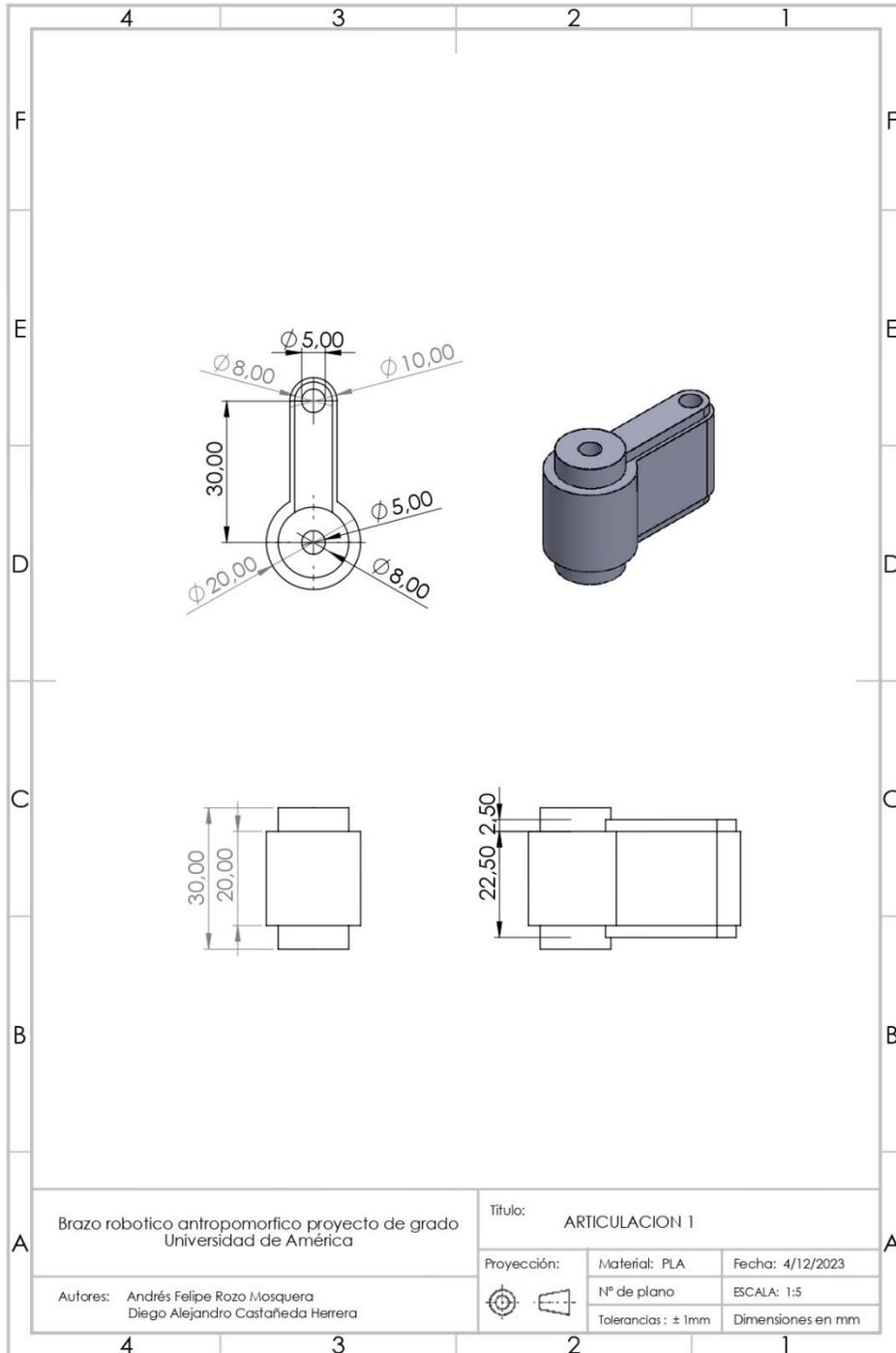
Plano Antebrazo 2



Nota. Plano de las dimensiones del antebrazo, diseñado conforme a las medidas del brazo 3.

Figura 51.

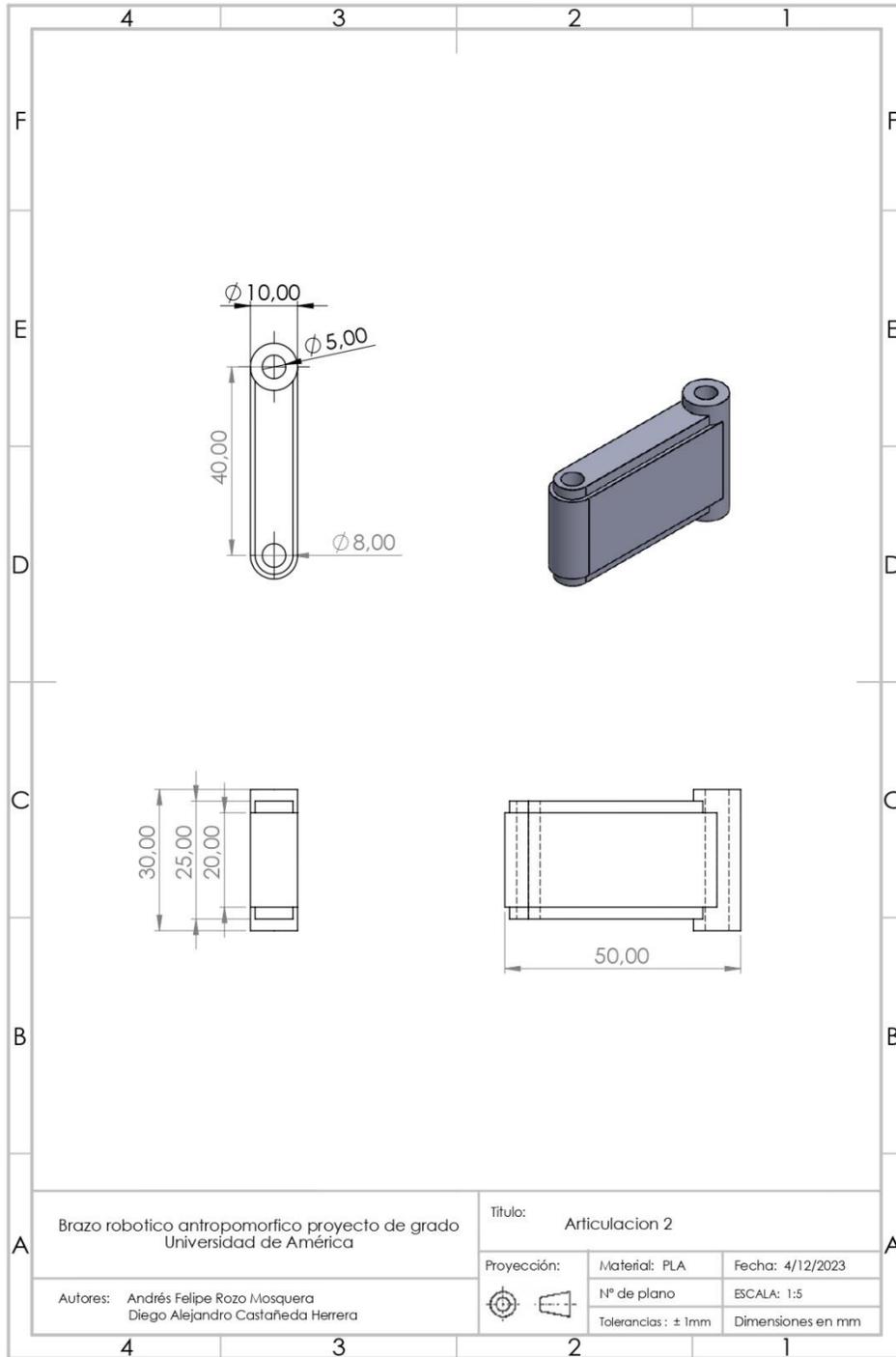
Plano Articulación 1



Nota. Plano de las dimensiones de la segunda articulación de las pinzas, diseñadas conforme a las medidas del brazo 3.

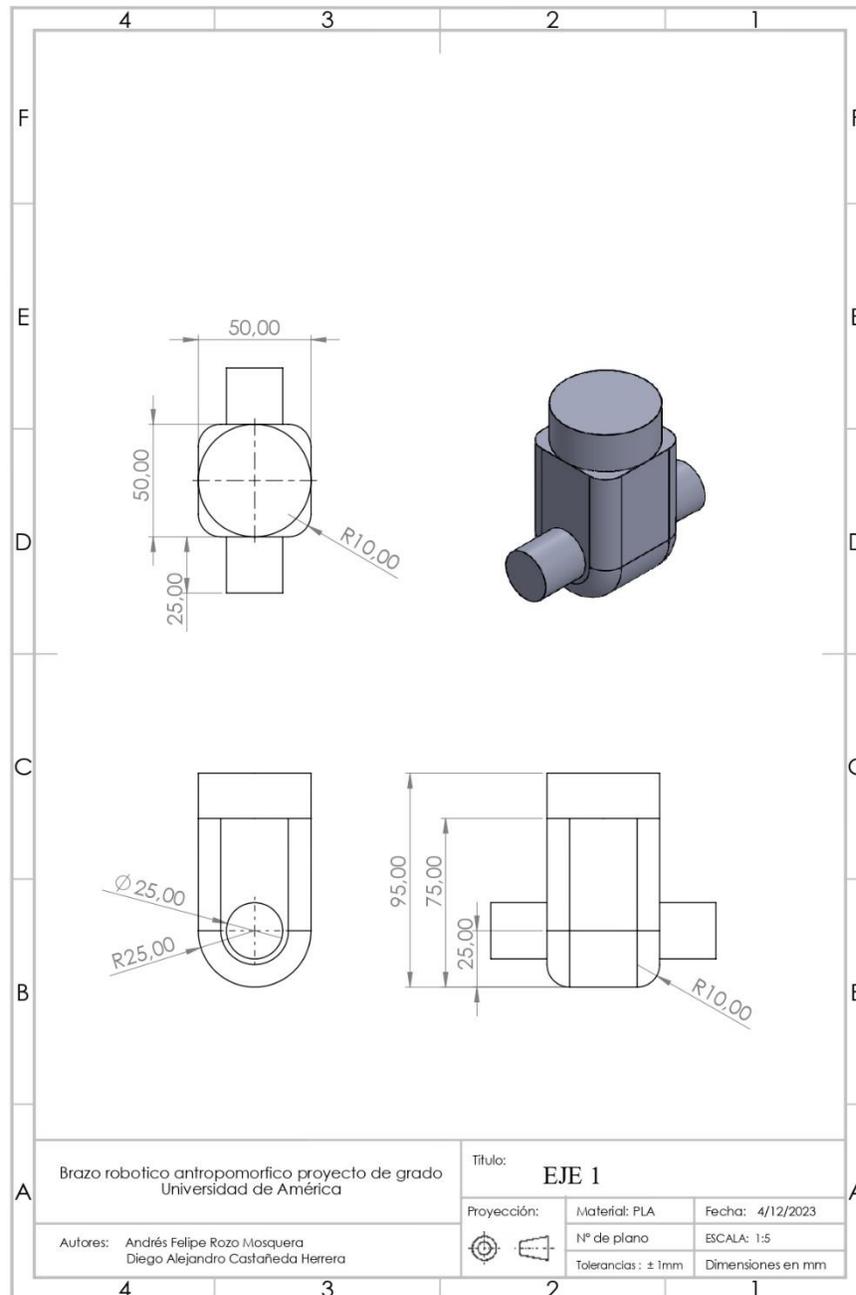
Figura 52.

Plano Articulación 2



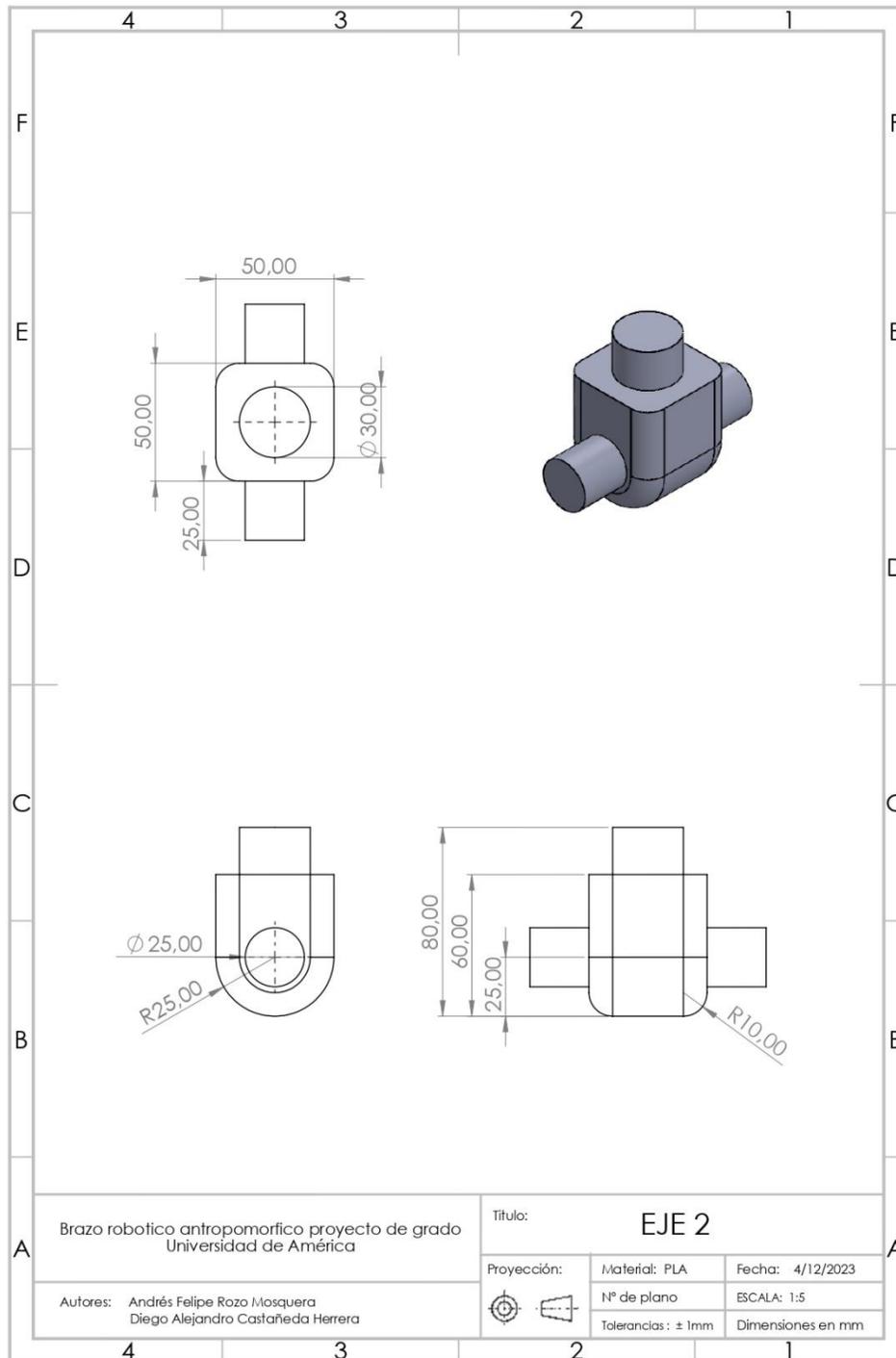
Nota. Plano de las dimensiones de la segunda articulación de las pinzas, diseñadas conforme a las medidas del brazo

Figura 53.
Plano Eje 1



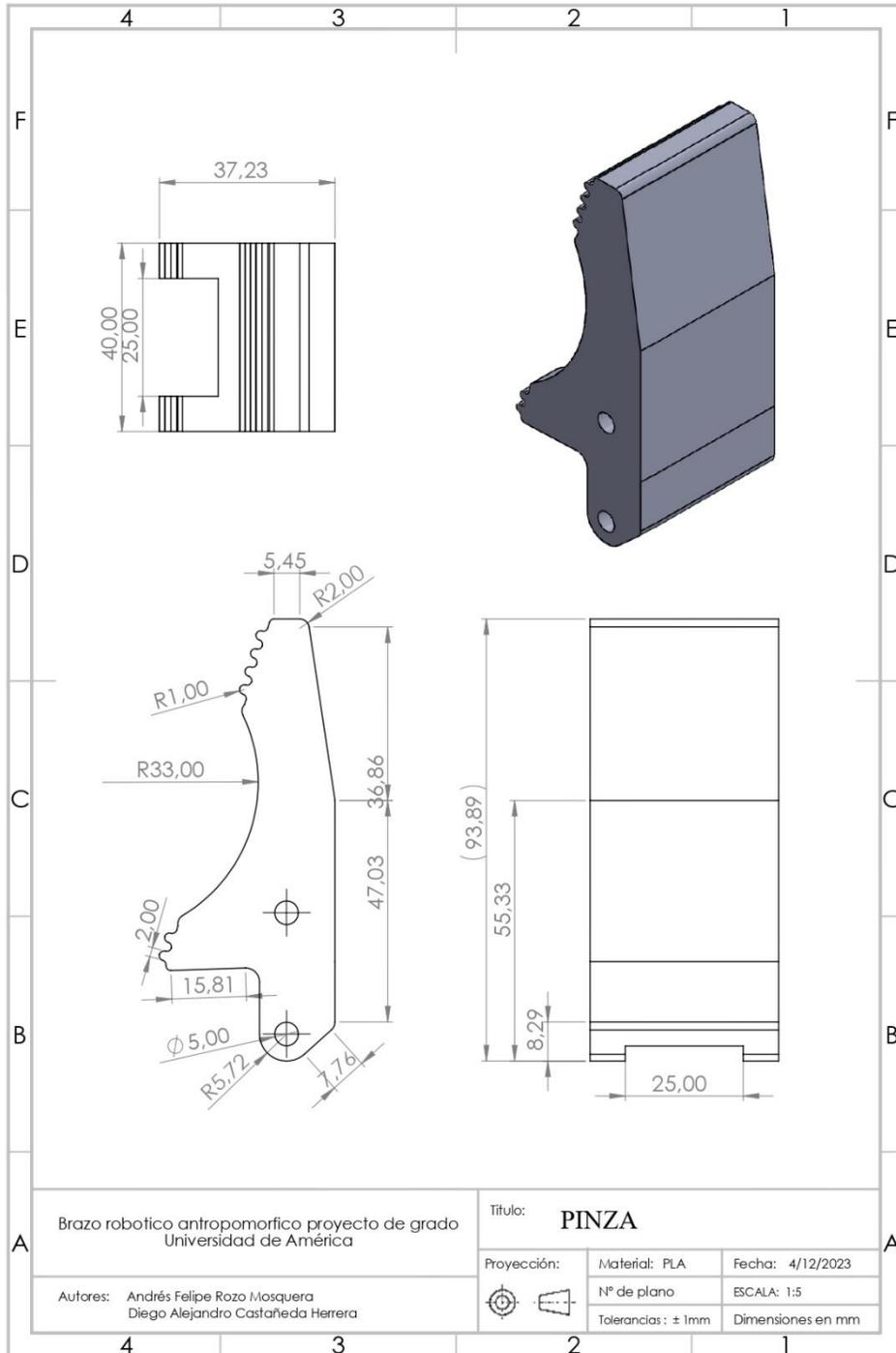
Nota. Plano de las dimensiones del primer eje, diseñado conforme a las medidas del brazo 3.

Figura 54.
Plano Eje 2



Nota. Plano de las dimensiones del segundo eje, diseñado conforme a las medidas del brazo 3.

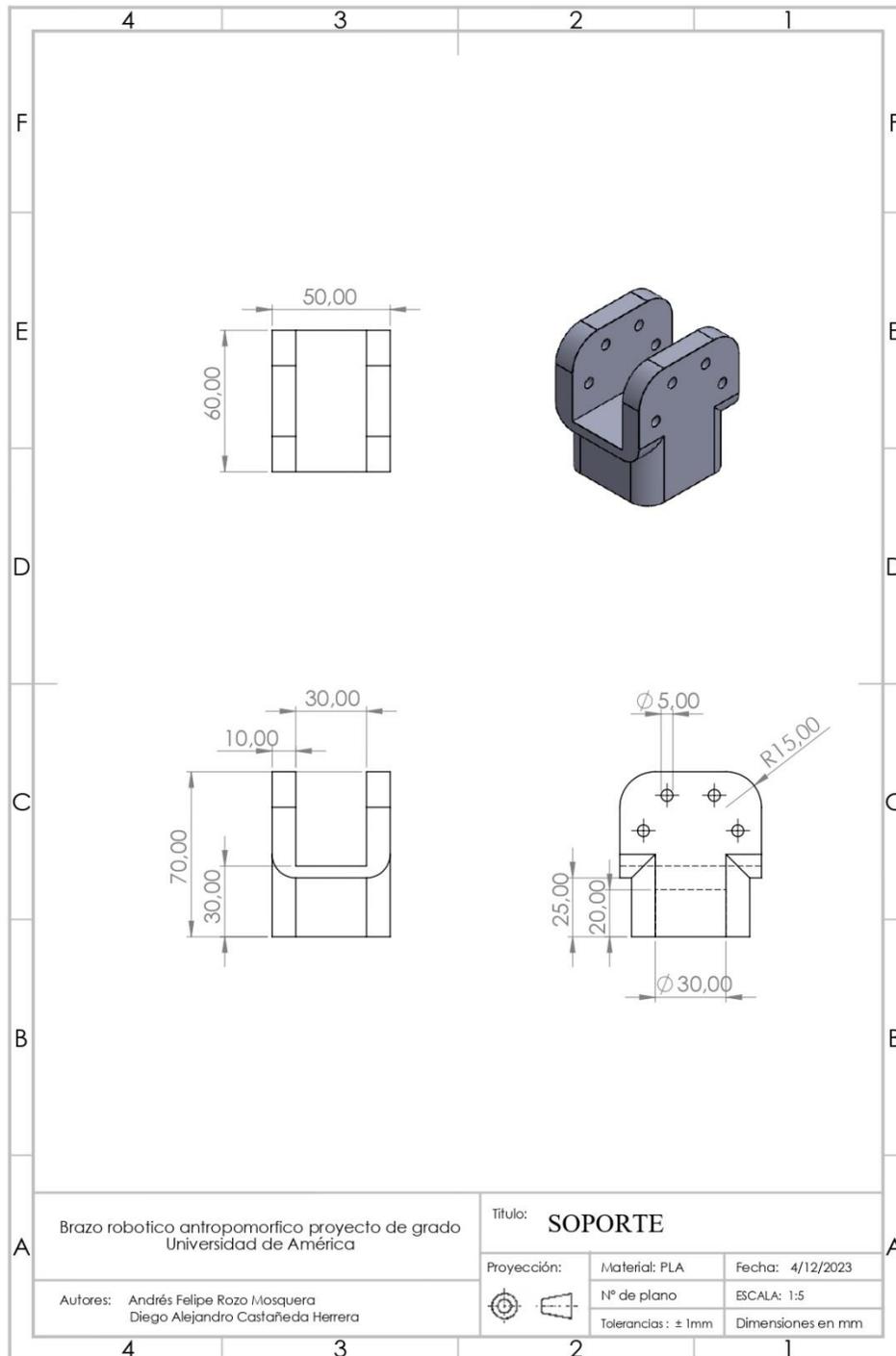
Figura 55.
Plano Pinza



Nota. Plano de las dimensiones de las pinzas, diseñadas conforme a las medidas del brazo 3.

Figura 56.

Plano Soporte



Nota. Plano de las dimensiones del soporte o palma de las pinzas, diseñado conforme a las medidas del brazo 3.

ANEXO 2

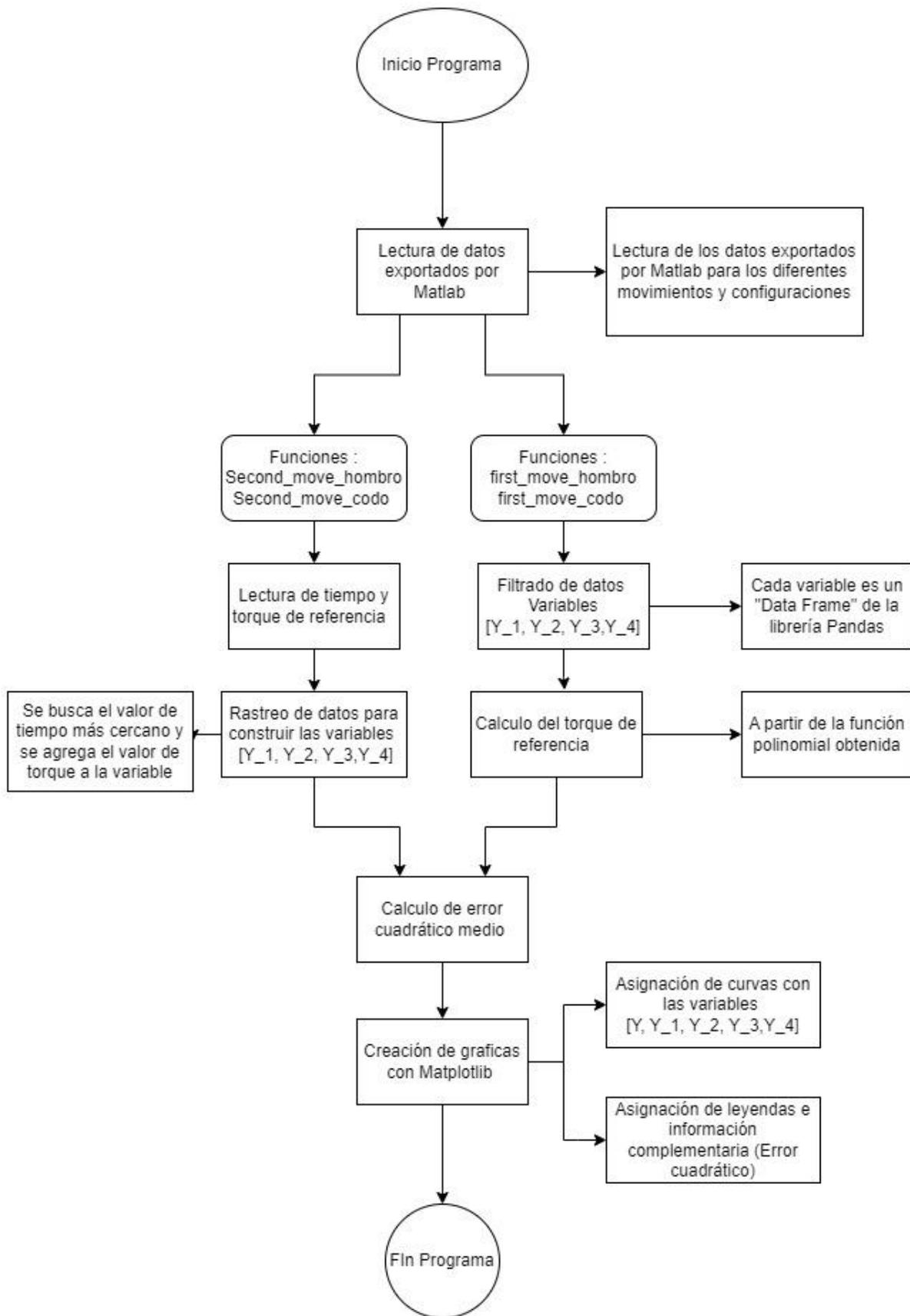
PROGRAMACIÓN

En el código se encuentran 8 funciones, Las funciones “first_move_hombro()” y “first_move_codo()” se encargan de recrear las curvas del primer movimiento con las funciones polinómicas mencionadas anteriormente, y llamar a los datos resultado de la simulación para crear la gráfica comparativa de torques. Como su nombre lo indica hacen referencia cada una tanto al hombro como al codo.

Las funciones “second_move_hombro()” y “second_move_codo()” llaman una base de datos en la que se encuentran los datos tabulados del perfil de torques del segundo movimiento, a partir de estos busca el valor de tiempo más cercano en los resultados de la segunda simulación y recrea tanto la curva de referencia como la de los diferentes brazos.

Por ultimo las funciones “move_1_1()”, “move_1_2()”, “move_2_1()” y “move_2_2()” solo buscan las posiciones angulares de las articulaciones necesarias y lo grafican en función del tiempo, esto con el fin de conocer las trayectorias angulares producidas por cada brazo.

Con el propósito de aclarar la secuencia de este proceso, se ha elaborado un diagrama de flujo. Esta representación gráfica permite una comprensión más profunda de la planificación lógica del proceso y de la estructura que se implementará en el código.



```

import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib import patheffects

def first_move_hombro():

    Data_1 = pd.read_excel(r'Tesis\TZ1.xlsx',0)
    Data_2 = pd.read_excel(r'Tesis\TZ1.xlsx',1)
    Data_3 = pd.read_excel(r'Tesis\TZ2.xlsx',0)
    Data_4 = pd.read_excel(r'Tesis\TZ2.xlsx',1)

    x = Data_1['time']
    y = []

    y_1 = Data_1['Hombro G1C']
    y_2 = Data_2['Hombro G1C']
    y_3 = Data_3['Hombro G1C']
    y_4 = Data_4['Hombro G1C']

    for i in Data_1['time']:
        a = 0.2455*(i)**5 - 0.799*(i)**4 - 3.2739*(i)**3 + 13.106*(i)**2 - 1.72*(i)
+0.7409
        y.append(a)

    Le_1 = []
    Le_2 = []
    Le_3 = []
    Le_4 = []

    for i in range(0,(Data_1.shape[0])):
        e_1 = (y_1[i] - y[i])**2
        e_2 = (y_2[i] - y[i])**2
        e_3 = (y_3[i] - y[i])**2
        e_4 = (y_4[i] - y[i])**2

        Le_1.append(e_1)
        Le_2.append(e_2)
        Le_3.append(e_3)
        Le_4.append(e_4)

    error_1 = sum(Le_1)/(Data_1.shape[0])
    error_2 = sum(Le_2)/(Data_2.shape[0])
    error_3 = sum(Le_3)/(Data_3.shape[0])

```

```

error_4 = sum(Le_4)/(Data_4.shape[0])

fig, ax = plt.subplots(figsize=(12, 4))

ax.plot(x, y, '--', label="Torque De Referencia", linewidth=3)
ax.plot(x, y_1, label=f"Brazo 1 Masa Estandar      EMC = {round(error_1,3)}")
ax.plot(x, y_2, label=f"Brazo 1 Masa De Referencia EMC = {round(error_2,3)}")
ax.plot(x, y_3, label=f"Brazo 2 Masa Estandar      EMC = {round(error_3,3)}")
ax.plot(x, y_4, label=f"Brazo 2 Masa De Referencia EMC = {round(error_4,3)}")

ax.set_title('Momentos de torción en el brazo, movimiento 1')
ax.set_xlabel('Time (s)')
ax.set_ylabel('τ(θ1) (Nm)')

ax.legend()
plt.show()

yd = pd.DataFrame(y)
print(y_3.max(), yd.max(), f'El margen de error de torque maximo :{((yd.max()-
y_3.max())/yd.max())*100}')

def first_move_codo():

    Data_1 = pd.read_excel(r'Tesis\TZ1.xlsx',0)
    Data_2 = pd.read_excel(r'Tesis\TZ1.xlsx',1)
    Data_3 = pd.read_excel(r'Tesis\TZ2.xlsx',0)
    Data_4 = pd.read_excel(r'Tesis\TZ2.xlsx',1)

    x = Data_1['time']
    y = []

    y_1 = Data_1['Codo G1 C']
    y_2 = Data_2['Codo G1 C']
    y_3 = Data_3['Codo G1 C']
    y_4 = Data_4['Codo G1 C']

    for i in Data_1['time']:
        a = 0.1629*(i)**4 - 0.7449*(i)**3 + 0.4817*(i)**2 - 0.1119*(i) + 10.142
        y.append(a)

    Le_1 = []
    Le_2 = []
    Le_3 = []
    Le_4 = []

```

```

for i in range(0,(Data_1.shape[0])):
    e_1 = (y_1[i] - y[i])**2
    e_2 = (y_2[i] - y[i])**2
    e_3 = (y_3[i] - y[i])**2
    e_4 = (y_4[i] - y[i])**2

    Le_1.append(e_1)
    Le_2.append(e_2)
    Le_3.append(e_3)
    Le_4.append(e_4)

error_1 = sum(Le_1)/(Data_1.shape[0])
error_2 = sum(Le_2)/(Data_2.shape[0])
error_3 = sum(Le_3)/(Data_3.shape[0])
error_4 = sum(Le_4)/(Data_4.shape[0])

fig, ax = plt.subplots(figsize=(12, 4))

ax.plot(x, y, '--', label="Torque De Referencia", linewidth=3)
ax.plot(x, y_1, label=f"Antebrazo 1 Masa Estandar EMC =
{round(error_1,3)}")
ax.plot(x, y_2, label=f"Antebrazo 1 Masa De Referencia EMC =
{round(error_2,3)}")
ax.plot(x, y_3, label=f"Antebrazo 2 Masa Estandar EMC =
{round(error_3,3)}")
ax.plot(x, y_4, label=f"Antebrazo 2 Masa De Referencia EMC =
{round(error_4,3)}")

ax.set_title('Momentos de torción en el antebrazo, movimiento 1')
ax.set_xlabel('Time (s)')
ax.set_ylabel('τ(θ1) (Nm)')

ax.legend()
plt.show()

yd = pd.DataFrame(y)
print(y_3.max(), yd.max(), f'El margen de error de torque maximo :{((yd.max()-
y_3.max())/yd.max())*100}')
```

```

def second_move_hombro():

def find_nearest(array, value):
    array = np.asarray(array)
    idx = (np.abs(array - value)).argmin()
```

```

    return [idx]

Data_1 = pd.read_excel(r'Tesis\TZ1.xlsx',2)
Data_2 = pd.read_excel(r'Tesis\TZ1.xlsx',3)
Data_3 = pd.read_excel(r'Tesis\TZ2.xlsx',2)
Data_4 = pd.read_excel(r'Tesis\TZ2.xlsx',3)
Data = pd.read_excel(r'Tesis\M2DS.xlsx')

#print(Data)

x = Data['X21']
y = Data['Y21']

y_1 = []
y_2 = []
y_3 = []
y_4 = []

x_1 = []
x_2 = []
x_3 = []
x_4 = []

for i in x:

    time_value = find_nearest(Data_1['time'],i)

    x_1.append(Data_1['time'][time_value[0]])
    y_1.append(Data_1['Hombro G1C'][time_value[0]])

    x_2.append(Data_2['time'][time_value[0]])
    y_2.append(Data_2['Hombro G1C'][time_value[0]])

    x_3.append(Data_3['time'][time_value[0]])
    y_3.append(Data_3['Hombro G1C'][time_value[0]])

    x_4.append(Data_4['time'][time_value[0]])
    y_4.append(Data_4['Hombro G1C'][time_value[0]])

Le_1 = []
Le_2 = []
Le_3 = []
Le_4 = []

```

```

for i in range(0,(Data.shape[0])):
    e_1 = (y_1[i] - y[i])**2
    e_2 = (y_2[i] - y[i])**2
    e_3 = (y_3[i] - y[i])**2
    e_4 = (y_4[i] - y[i])**2

    Le_1.append(e_1)
    Le_2.append(e_2)
    Le_3.append(e_3)
    Le_4.append(e_4)

error_1 = sum(Le_1)/(len(y))
error_2 = sum(Le_2)/(len(y))
error_3 = sum(Le_3)/(len(y))
error_4 = sum(Le_4)/(len(y))

fig, ax = plt.subplots(figsize=(12, 4))

ax.plot(x, y, '--',label="Torque De Referencia", linewidth=3)
ax.plot(x_1, y_1, label=f"Antebrazo 1 Masa Estandar EMC =
{round(error_1,3)}")
ax.plot(x_2, y_2, label=f"Antebrazo 1 Masa De Referencia EMC =
{round(error_2,3)}")
ax.plot(x_3, y_3, label=f"Antebrazo 2 Masa Estandar EMC =
{round(error_3,3)}")
ax.plot(x_4, y_4, label=f"Antebrazo 2 Masa De Referencia EMC =
{round(error_4,3)}")

ax.set_title('Momentos de torción en el brazo, movimiento 2')
ax.set_xlabel('Time (s)')
ax.set_ylabel('τ(θ1) (Nm)')

ax.legend()
plt.show()

print(max(y_3), max(y), f'El margen de error de torque maximo :{((max(y)-
max(y_3))/max(y))*100}')

def second_move_codo():

def find_nearest(array, value):
    array = np.asarray(array)
    idx = (np.abs(array - value)).argmin()

```

```

    return [idx]

Data_1 = pd.read_excel(r'Tesis\TZ1.xlsx',2)
Data_2 = pd.read_excel(r'Tesis\TZ1.xlsx',3)
Data_3 = pd.read_excel(r'Tesis\TZ2.xlsx',2)
Data_4 = pd.read_excel(r'Tesis\TZ2.xlsx',3)
Data = pd.read_excel(r'Tesis\M2DS.xlsx')

x = Data['X22']
y = Data['Y22']

y_1 = []
y_2 = []
y_3 = []
y_4 = []

x_1 = []
x_2 = []
x_3 = []
x_4 = []

for i in x:

    time_value = find_nearest(Data_1['time'],i)

    x_1.append(Data_1['time'][time_value[0]])
    y_1.append(Data_1['Codo G1 C'][time_value[0]])

    x_2.append(Data_2['time'][time_value[0]])
    y_2.append(Data_2['Codo G1 C'][time_value[0]])

    x_3.append(Data_3['time'][time_value[0]])
    y_3.append(Data_3['Codo G1 C'][time_value[0]])

    x_4.append(Data_4['time'][time_value[0]])
    y_4.append(Data_4['Codo G1 C'][time_value[0]])

Le_1 = []
Le_2 = []
Le_3 = []
Le_4 = []

for i in range(0,(Data.shape[0])):
    e_1 = (y_1[i] - y[i])**2

```

```

e_2 = (y_2[i] - y[i])**2
e_3 = (y_3[i] - y[i])**2
e_4 = (y_4[i] - y[i])**2

Le_1.append(e_1)
Le_2.append(e_2)
Le_3.append(e_3)
Le_4.append(e_4)

error_1 = sum(Le_1)/(len(y))
error_2 = sum(Le_2)/(len(y))
error_3 = sum(Le_3)/(len(y))
error_4 = sum(Le_4)/(len(y))

fig, ax = plt.subplots(figsize=(12, 4))

ax.plot(x, y, '--', label="Torque De Referencia", linewidth=3)
ax.plot(x_1, y_1, label=f"Antebrazo 1 Masa Estandar EMC =
{round(error_1,3)}")
ax.plot(x_2, y_2, label=f"Antebrazo 1 Masa De Referencia EMC =
{round(error_2,3)}")
ax.plot(x_3, y_3, label=f"Antebrazo 2 Masa Estandar EMC =
{round(error_3,3)}")
ax.plot(x_4, y_4, label=f"Antebrazo 2 Masa De Referencia EMC =
{round(error_4,3)}")

ax.set_title('Momentos de torción en el antebrazo, movimiento 2')
ax.set_xlabel('Time (s)')
ax.set_ylabel('τ(θ1) (Nm)')

ax.legend()
plt.show()

print(max(y_3), max(y), f'El margen de error de torque maximo :{((max(y)-
max(y_3))/max(y))*100}')

def move_1_1():

Data_1 = pd.read_excel(r'Tesis\TZ1.xlsx',0)

x = Data_1['time']
y = Data_1['Theta 3'] * [-1]

```

```

fig, ax = plt.subplots(figsize=(12, 4))

ax.plot(x, y, linewidth=2)
ax.set_title('Trayectoria angular ( $\theta_1$ )')
ax.set_xlabel('Time (s)')
ax.set_ylabel('( $\theta_1$ ) = rad')

ax.legend()
plt.show()

def move_1_2():

    Data_1 = pd.read_excel(r'Tesis\TZ1.xlsx',0)

    x = Data_1['time']
    y = [1.57079632679] + Data_1['Theta 4']

    fig, ax = plt.subplots(figsize=(12, 4))

    ax.plot(x, y, linewidth=2, color = "r")
    ax.set_title('Trayectoria angular ( $\theta_2$ )')
    ax.set_xlabel('Time (s)')
    ax.set_ylabel('( $\theta_2$ ) = rad')

    ax.legend()
    plt.show()

def move_2_1():

    Data_1 = pd.read_excel(r'Tesis\TZ1.xlsx',2)

    x = Data_1['time']
    y = Data_1['Theta 3'] * [-1]

    fig, ax = plt.subplots(figsize=(12, 4))

    ax.plot(x, y, linewidth=2)
    ax.set_title('Trayectoria angular ( $\theta_1$ )')
    ax.set_xlabel('Time (s)')
    ax.set_ylabel('( $\theta_1$ ) = rad')

    ax.legend()
    plt.show()

def move_2_2():

```

```
Data_1 = pd.read_excel(r'Tesis\TZ1.xlsx',2)
```

```
x = Data_1['time']
```

```
y = [1.57079632679] + Data_1['Theta 4']
```

```
fig, ax = plt.subplots(figsize=(12, 4))
```

```
ax.plot(x, y, linewidth=2, color = "r")
```

```
ax.set_title('Trayectoria angular ( $\theta_2$ )')
```

```
ax.set_xlabel('Time (s)')
```

```
ax.set_ylabel('( $\theta_2$ ) = rad')
```

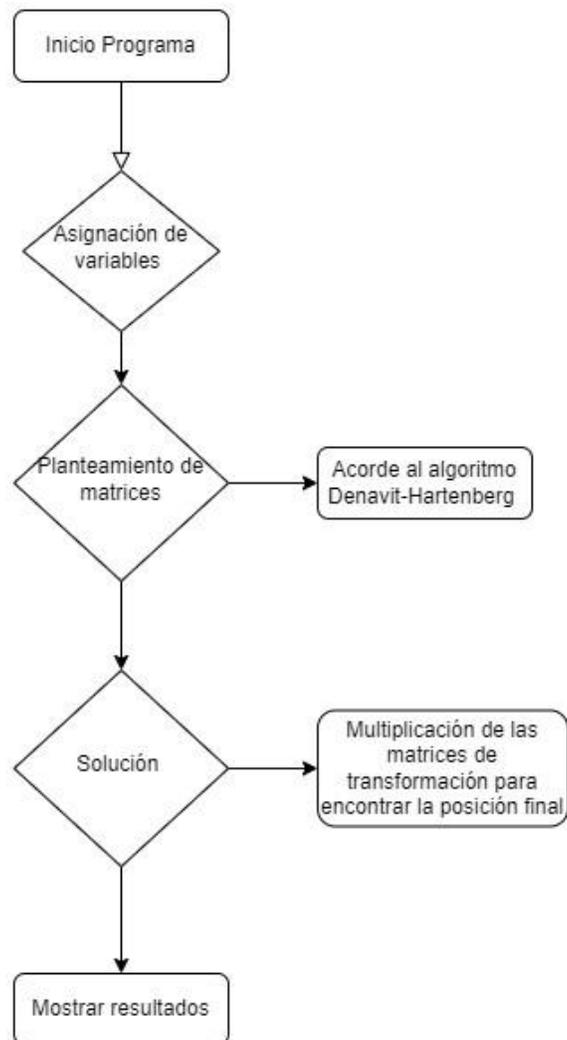
```
ax.legend()
```

```
plt.show()
```

ANEXO 3

PROGRAMACIÓN

Este código se encarga de encontrar las posiciones del manipulador a partir del algoritmo de Denavit-Hartenberg. Del mismo modo se representa este proceso mediante un diagrama de flujo, así se vuelve más sencillo visualizar y comunicar la lógica del algoritmo antes de llevar a cabo su ejecución.



```
import numpy as np # SISTEMA EN RADIANTES
```

```
from sympy import *
```

```
Q1 = 0 * 180 / np.pi
```

```
Q2 = 0 * 180 / np.pi
Q3 = 0 * 180 / np.pi
Q4 = 0 * 180 / np.pi
Q5 = 0 * 180 / np.pi
Q6 = 0 * 180 / np.pi
Q7 = 0 * 180 / np.pi
```

```
L1 = 50
L2 = 320
L3 = 250
L4 = 185
```

```
T1 = Matrix([[1,      0,      0, -L1],
             [0, np.cos(Q1), -np.sin(Q1), 0],
             [0, np.sin(Q1), np.cos(Q1), 0],
             [0,      0,      0, 1]])
```

```
T2 = Matrix([[np.cos(Q2), -np.sin(Q2), 0, 0],
             [np.sin(Q2),  np.cos(Q2), 0, 0],
             [      0,      0, 1, 0],
             [      0,      0, 0, 1]])
```

```
T3 = Matrix([[1,      0,      0, 0],
             [0, np.cos(np.pi*1/2), -np.sin(np.pi*1/2), 0],
             [0, np.sin(np.pi*1/2),  np.cos(np.pi*1/2), 0],
             [0,      0,      0, 1]])
```

```
T4 = Matrix([[np.cos(Q3), -np.sin(Q3), 0, 0],
             [np.sin(Q3),  np.cos(Q3), 0, 0],
             [      0,      0, 1, L2],
             [      0,      0, 0, 1]])
```

```
T5 = Matrix([[1,      0,      0, 0],
             [0, np.cos(Q4), -np.sin(Q4), 0],
             [0, np.sin(Q4),  np.cos(Q4), 0],
             [0,      0,      0, 1]])
```

```
T6 = Matrix([[1,      0,      0, 0],
             [0, np.cos(np.pi*1/2), -np.sin(np.pi*1/2), 0],
             [0, np.sin(np.pi*1/2),  np.cos(np.pi*1/2), 0],
             [0,      0,      0, 1]])
```

```
T7 = Matrix([[np.cos(Q5), -np.sin(Q5), 0, 0],
             [np.sin(Q5),  np.cos(Q5), 0, 0],
```

```
[      0,      0, 1, L3],  
[      0,      0, 0, 1]])
```

```
T8 = Matrix([[1,      0,      0, 0],  
            [0, np.cos(Q6), -np.sin(Q6), 0],  
            [0, np.sin(Q6), np.cos(Q6), 0],  
            [0,      0,      0, 1]])
```

```
T9 = Matrix([[np.cos(Q7), -np.sin(Q7), 0, 0],  
            [np.sin(Q7), np.cos(Q7), 0, 0],  
            [      0,      0, 1, L4],  
            [      0,      0, 0, 1]])
```

```
TT = T1*T2*T3*T4*T5*T6*T7*T8*T9
```

```
print(TT)
```