



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE CUENCA**

**CARRERA DE ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**

**DESARROLLO DE UN ROBOT ANTROPOMÓRFICO DE 5 GRADOS DE  
LIBERTAD MEDIANTE EL USO DE MOTORES A PASOS CON CAJA REDUCTORA  
ARMÓNICA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
título de Ingeniero en Electrónica.

**AUTORES: FERNANDO JAVIER VIÑANZACA FIGUEROA  
LEONARDO ISMAEL CHACHA YUMBLA**

**TUTOR: ING. LUIS ALFREDO CALLE AREVALO, Msc.**

Cuenca – Ecuador

2024

## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Fernando Javier Viñanzaca Figueroa con documento de identificación N° 0107468829 y Leonardo Ismael Chacha Yumbla con documento de identificación N° 0106055783; manifestamos que:

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

Cuenca, 29 de agosto de 2024

Atentamente,



---

Fernando Javier Viñanzaca Figueroa  
0107468829



---

Leonardo Ismael Chacha Yumbla  
0106055783

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

Nosotros, Fernando Javier Viñanzaca Figueroa con documento de identificación N° 0107468829 y Leonardo Ismael Chacha Yumbla con documento de identificación N° 0106055783, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: “Desarrollo de un robot antropomórfico de 5 grados de libertad mediante el uso de motores a pasos con caja reductora armónica” el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Electrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Cuenca, 29 de agosto de 2024

Atentamente,

---

Fernando Javier Viñanzaca Figueroa  
0107468829

---

Leonardo Ismael Chacha Yumbla  
0106055783

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Luis Alfredo Calle Arevalo con documento de identificación N° 0105109847, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DESARROLLO DE UN ROBOT ANTROPOMÓRFICO DE 5 GRADOS DE LIBERTAD MEDIANTE EL USO DE MOTORES A PASOS CON CAJA REDUCTORA ARMÓNICA, realizado por Fernando Javier Viñanzaca Figueroa con documento de identificación N° 0107468829 y Leonardo Ismael Chacha Yumbla con documento de identificación N° 0106055783, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 29 de agosto de 2024

Atentamente,



---

Ing. Luis Alfredo Calle Arevalo, MSC

0105109847

# AGRADECIMIENTOS

## *Agradecimiento de Fernando Javier Viñanzaca Figueroa*

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a mi familia por su constante apoyo, en particular a mis padres, quienes han sido una base indispensable a

lo largo de mi camino académico. Agradezco también a mis tíos, primos,

hermanos y demás familiares por su aliento y respaldo.

Mi gratitud a mi tutor, Luis Calle, por su orientación y confianza a lo largo de esta travesía, y por brindarnos la oportunidad de trabajar en este importante proyecto.

No puedo dejar de mencionar a mi compañero de tesis, con quien colaboré en este desafiante trabajo. Juntos superamos muchos obstáculos para completar esta tesis.

Finalmente, deseo agradecer a los miembros del equipo de Pequeñ@s Científic@s, donde comenzó todo, y donde tuve la oportunidad de hacer grandes amigos.

### *Agradecimiento de Leonardo Ismael Chacha Yumbla*

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a todas las personas que han sido fundamentales en mi vida y en este importante logro. En primer lugar, a mis queridos padres, Luz y Eduardo, por su amor incondicional y su apoyo constante. Gracias por brindarme la educación y los valores que me han permitido llegar hasta aquí. Su dedicación y esfuerzo han sido mi mayor inspiración. A mi hermano Andrés. Gracias por estar siempre a mi lado, por ser una fuente constante de inspiración en mi carrera, y por tu apoyo y ayuda en cada situación que se presentó a lo largo de mi camino académico.

A mis amigos, con quienes he compartido innumerables momentos de alegría, risas y desafíos. Gracias por los momentos fuera del curso, por ser amigos de juegos y largas conversaciones en las noches.

A mi compañero de tesis y amigo en este desafío, gracias por tu colaboración, tu dedicación y por ser un excelente equipo. Juntos hemos superado obstáculos.

Al profesor Ingeniero Luis Calle, tutor de tesis, le agradezco su guía y su apoyo. Su conocimiento y su paciencia han sido claves para el desarrollo de este proyecto. Gracias por haberme enseñado tanto.

Finalmente, al grupo de Pequeñ@s Científic@s, gracias por su amistad y apoyo incondicional durante estos últimos dos años. A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento por haber sido parte de este importante capítulo en mi vida.

# DEDICATORIAS

## *Dedicatoria de Fernando Javier Viñanzaca Figueroa*

Quiero dedicar este trabajo, en gran parte, a mis padres, quienes siempre me han apoyado y han sido mi fortaleza durante todo mi tiempo en la universidad. Gracias por estar siempre ahí, tanto en los buenos como en los malos momentos, y por hacer el gran sacrificio de permitirme estudiar aquí.

También quiero agradecer a mis hermanos, que han estado presentes incondicionalmente, y a mis familiares cercanos, quienes siempre han mostrado interés por mi progreso y me han respaldado en cada paso hacia el final de este ciclo.

Además, quiero dedicar este trabajo al grupo que hizo esto posible, Pequeñ@s Científic@s, con nuestro tutor Luis Calle, a Juan Francisco, David Farfan a José Sánchez, y Fatima quienes siempre estuvieron ahí ayudándonos a que todo saliera de la mejor manera posible, brindando un gran apoyo para la finalización de este proyecto.

Finalmente, dedico un gran reconocimiento a mis amigos, quienes me han acompañado desde el inicio hasta el final. Son muchos, pero cada uno ha dejado una huella importante en mi vida. Solo por nombrar algunos: Dennys Báez, Leonardo Chacha, Martín Cuji, Martín Bravo, Juan Diego Fajardo, Iván Domínguez, Alejandro Calle, Marlon Yansaguano, Camila Espinoza, Adriana Martínez, Andrés Carchi, Michael Peralta, Kevin Loja, José Sánchez, Mateo Berrezueta, Randy Abambari, Alejandro Asmal entre otros.

## *Dedicatoria de Leonardo Ismael Chacha Yumbla*

Quiero dedicar este trabajo de titulación a mi familia, quienes son mi más grande inspiración. A mis padres, Luz y Eduardo. Gracias por guiarme por el camino del bien, por velar por mi bienestar, y por hacer sacrificios para verme feliz. Espero que se sientan orgullosos de este logro, que es por ustedes, y estoy agradecido con Dios de tenerlos a mi lado.

A mi hermano Andrés, por ser una fuente de inspiración en mi carrera y por su apoyo incondicional. Tu compañía y ayuda han sido esenciales para mi éxito y crecimiento.

A mis familiares cercanos, gracias por su apoyo y amor. Su presencia y respaldo en cada paso del camino han sido fundamentales para alcanzar esta meta.

Finalmente, a mis amigos, quienes me han acompañado en todo momento con su ayuda incondicional. Mateo, David, Juan, Carlos, Javier, José, aunque es imposible nombrarlos a todos, cada uno de ustedes ha dejado una marca en mi vida con sus palabras, acciones y enseñanzas. Gracias por estar ahí, compartiendo momentos de alegría, risas y desafíos. Este logro también es de ustedes.



# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>I</b>
<b>Dedicatorias</b>	<b>III</b>
<b>Índice General</b>	<b>v</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>IX</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>X</b>
<b>Resumen</b>	<b>XI</b>
<b>Abstract</b>	<b>XII</b>
<b>Antecedentes</b>	<b>1</b>
<b>Justificación</b>	<b>3</b>
<b>Objetivos</b>	<b>5</b>
<b>Introducción</b>	<b>6</b>
<b>1. Características y Desempeño de los Brazos Robóticos</b>	<b>8</b>
1.0.1. Robots . . . . .	8
1.0.2. Características de los Brazos Robóticos . . . . .	12
1.0.3. Grados de Libertad (DOF): . . . . .	13
1.0.4. Precisión y Repetibilidad: . . . . .	14
1.0.5. Capacidad de Carga: . . . . .	15

1.0.6. Área de trabajo . . . . .	16
<b>2. Diseño Mecánico</b>	<b>18</b>
2.1. Componentes . . . . .	18
2.1.1. Motores a paso Nema 17 con caja reductora armónica . . . . .	18
2.1.2. Rodamientos . . . . .	19
2.1.3. Pernos y Tuercas . . . . .	20
2.2. Método de fabricación . . . . .	21
2.2.1. Fabricación Aditiva . . . . .	21
2.2.2. Mecanizado en CNC . . . . .	22
2.3. Morfología y Grados de libertad . . . . .	23
2.4. Diseño . . . . .	29
2.4.1. Primer grado de libertad . . . . .	29
2.4.2. Segundo grado de libertad . . . . .	30
2.4.3. Tercer grado de libertad . . . . .	32
2.4.4. Cuarto y Quinto grado de libertad . . . . .	33
2.4.5. Diseño final en Fusion 360 . . . . .	34
2.4.6. Diseño final ensamblado . . . . .	35
<b>3. Instrumentación electrónica</b>	<b>37</b>
3.1. Arduino Mega 2560 . . . . .	37
3.2. Controlador Emm42 . . . . .	38
3.2.1. Sistema a Lazo cerrado . . . . .	39
3.2.2. Pantalla OLED y Parámetros Observables . . . . .	40
3.2.3. Conexión de Dos Drivers . . . . .	41
3.2.4. Comparación de Drivers de Lazo Abierto vs Lazo Cerrado en Motores a Paso . . . . .	42
3.2.5. Módulo regulador de voltaje Step Down LM2596 3A DC/DC BUCK . . . . .	43
3.3. Diagrama de Bloques del Robot . . . . .	44
<b>4. Cinemática</b>	<b>45</b>
4.1. Cinemática . . . . .	45

4.1.1. Denavit-Hartenberg (D-H) . . . . .	46
4.1.2. Cinemática inversa . . . . .	54
4.1.3. Trayectoria punto a punto . . . . .	57
<b>5. Resultados y Conclusiones</b>	<b>62</b>
5.1. Pruebas de Software y movimiento de los motores a paso . . . . .	62
5.2. Trayectoria punto a punto . . . . .	66
5.2.1. Trayectorias . . . . .	66
5.2.2. Simulación en Simulink . . . . .	66
5.2.3. Implementación en Arduino . . . . .	68
5.2.4. Comparación . . . . .	71
5.2.5. Curvas de Función Cúbica . . . . .	71
5.3. Conclusiones . . . . .	72
<b>Glosario</b>	<b>74</b>
<b>Referencias</b>	<b>77</b>

# Índice de figuras

1.1. Tipos de robots [8] . . . . .	9
1.2. Scara [9] . . . . .	10
1.3. Robot Delta [10] . . . . .	10
1.4. Robot Cartesiano [11] . . . . .	11
1.5. Robot Colaborativo [12] . . . . .	11
1.6. Robot Antropomórfico [13] . . . . .	12
1.7. Grados de libertad [14] . . . . .	13
1.8. Precisión de un brazo robotico [8] . . . . .	15
1.9. Grados de libertad [15] . . . . .	17
2.1. Caja reductora armónica [16] . . . . .	19
2.2. Motores Nema 17 [17] . . . . .	19
2.3. Rodamiento rígidos de bolas [18] . . . . .	20
2.4. Pernos hexagonales [19] . . . . .	21
2.5. Piezas mecanizadas en CNC (autores) . . . . .	23
2.6. Primer Grado de libertad (autores) . . . . .	24
2.7. Segundo Grado de libertad (autores) . . . . .	25
2.8. Tercer Grado de libertad (autores) . . . . .	26
2.9. Cuarto Grado de libertad (autores) . . . . .	27
2.10. Quinto Grado de libertad (autores) . . . . .	28
2.11. Sexto Grado de libertad (autores) . . . . .	29
2.12. Ensamble primer grado de libertad (autores) . . . . .	30
2.13. Soporte de Rodamiento corte transversal (autores) . . . . .	30
2.14. Segundo grado de libertad (autores) . . . . .	31

2.15. Segundo grado de libertad corte transversal (autores) . . . . .	31
2.16. Tercer grado de libertad (autores) . . . . .	32
2.17. Tercer grado de libertad con corte transversal (autores) . . . . .	32
2.18. Cuarto Eje (autores) . . . . .	33
2.19. Cuarto Eje y Quinto Eje (autores) . . . . .	34
2.20. Diseño final en Fusion 360 (autores) . . . . .	35
2.21. Brazo robótico completamente armado (autores) . . . . .	36
3.1. Arduino Mega 2560 [26] . . . . .	37
3.2. Driver Emm42 para motor a pasos . . . . .	38
3.3. Pantallas OLED en la placa[27] . . . . .	40
3.4. Esquema de interconexión de dos drivers [27] . . . . .	41
3.5. Regulador LM2596 [28] . . . . .	43
3.6. Diagrama de bloques del sistema robótico. (autores) . . . . .	44
4.1. Ejes del brazo robotico mediante el algoritmo de Denavit-Hartenberg (autores) . . . . .	47
5.1. Calibración de los motores a paso (autores) . . . . .	62
5.2. Precisión del brazo robótico primera iteración (autores) . . . . .	64
5.3. Precisión del brazo robótico última iteración (autores) . . . . .	64
5.4. Gráfica de posición vs tiempo - Primera trayectoria . . . . .	66
5.5. Gráfica de posición vs tiempo - Segunda trayectoria . . . . .	67
5.6. Gráfica de posición vs tiempo - Tercera trayectoria . . . . .	67
5.7. Gráfica de posición vs tiempo - Cuarta trayectoria . . . . .	68
5.8. Gráfica de posición vs tiempo - Primera trayectoria . . . . .	68
5.9. Gráfica de posición vs tiempo - Segunda trayectoria . . . . .	69
5.10. Gráfica de posición vs tiempo - Tercera trayectoria . . . . .	69
5.11. Gráfica de posición vs tiempo - Cuarta trayectoria . . . . .	70
5.12. Brazo robótico final (autores) . . . . .	70
5.13. Brazo robótico final (autores) . . . . .	71

# Índice de tablas

3.1. Comparación de Drivers de Lazo Abierto vs Lazo Cerrado en Motores a Paso . . . . .	42
4.1. Parámetros de Denavit-Hartenberg de un brazo robótico de 6 grados de libertad. . . . .	47
5.1. Resultados de las pruebas de precisión . . . . .	65

# Resumen

Se realizó un brazo robótico antropomórfico de cinco grados de libertad, empleando herramientas de diseño 3D y utilizando material aditivo. El diseño combina componentes fabricados con tecnología CNC e impresión 3D para lograr una mayor resistencia y soporte. Cada articulación del brazo está equipada con un motor a pasos con caja reductora, lo que permite una mayor precisión en sus movimientos.

El capítulo 1 aborda los temas relacionados con la construcción y el diseño mecánico del brazo, incluyendo detalles sobre la fabricación aditiva, el cual nos va a permitir el movimiento de rotación y translación en diversos ejes. El capítulo 2 se enfoca en los diversos componentes electrónicos que conforman el brazo robótico, desde los elementos embebidos utilizados hasta los drivers empleados para los motores a pasos, que nos permitan una buena precisión del robot. En el capítulo 3, se exploran la cinemática y la cinemática inversa del brazo, junto con las matemáticas que sustentan su funcionamiento y los cálculos realizados. Finalmente, el capítulo 4 presenta los resultados que se obtuvieron en base a de pruebas punto a punto, que permiten evaluar la precisión del brazo robótico.

*Palabras clave:* brazo antropomórfico; motor a pasos;cinemática;cinemática inversa;impresión 3D;diseño mecánico

# Abstract

A five-degree-of-freedom anthropomorphic robotic arm was created using 3D design tools and additive material. The design combines components manufactured using CNC technology and 3D printing to achieve greater strength and support. Each joint of the arm is equipped with a stepper motor with a gearbox, allowing for greater precision in its movements.

Chapter 1 addresses issues related to the construction and mechanical design of the arm, including details on additive manufacturing, which will allow us to achieve rotation and translation movement on various axes. Chapter 2 focuses on the various electronic components that make up the robotic arm, from the embedded elements used to the drivers used for the stepper motors, which will allow us to achieve good robot precision. In Chapter 3, the kinematics and inverse kinematics of the arm are explored, along with the mathematics that underpins its operation and the calculations performed. Finally, Chapter 4 presents the results obtained based on point-to-point tests, which allow us to evaluate the precision of the robotic arm.

**Keywords:** anthropomorphic arm; stepper motor; kinematics; inverse kinematics; 3D printing; mechanical design



# Antecedentes

Los brazos robóticos antropomórficos, reconocidos ampliamente por su capacidad para agilizar tareas repetitivas, han jugado un papel crucial en diversos ámbitos, incluyendo la educación[1]. Esta revolución tecnológica tuvo sus inicios con el desarrollo del primer brazo controlado por computadora en la Universidad de Stanford, una creación innovadora de Victor Scheinman. Su "Brazo Robótico de Stanford" fue un precursor de robots modernos que actualmente son empleados en el campo de la industria. Este progreso no solo representó un gran avance en la robótica, sino que también inició una nueva era en la automatización de procesos industriales y educativos. La evolución de los robots ha desempeñado un papel cada vez más relevante en el ámbito de la medicina, ofreciendo una amplia gama de beneficios tanto para pacientes como para profesionales médico[2].

Los brazos robóticos a escala son fascinantes réplicas en miniatura de los robots industriales [3]. Su tamaño reducido los convierte en herramientas accesibles para aficionados, estudiantes y entusiastas de la robótica, ofreciendo una experiencia de aprendizaje y entretenimiento única. Existen varios modelos, que van desde kits educativos para armar y programar hasta juguetes controlados a distancia, coleccionables y equipos de investigación y desarrollo. Estos últimos son especialmente útiles para probar nuevos diseños y algoritmos de control antes de su implementación en robots de tamaño real. La ventaja principal de estos brazos robóticos a escala es que permiten explorar el mundo de la robótica a un costo significativamente menor que el de los robots industriales[4]. Además, al ser más pequeños, reducen el riesgo de accidentes y son fácilmente portátiles[5].

Este ámbito también permite la incorporación de tecnologías avanzadas, como la inteligencia artificial. Potenciando la capacidad de los brazos robóticos más allá

de lo que actualmente ofrecen. Además, se puede realizar investigaciones para explorar usos futuros de estos dispositivos, lo que subraya su potencial no solo como herramientas educativas o de entretenimiento, sino también como catalizadores de innovación en la robótica.

Con el avance de la tecnología, la precisión de los brazos robóticos ha experimentado una mejora significativa a lo largo del tiempo. Desde los primeros sistemas robóticos hasta las últimas generaciones de dispositivos, hemos presenciado un aumento exponencial en la exactitud y la capacidad de estos brazos mecánicos[6].

# Justificación

En la era contemporánea de la automatización, la robótica moderna ha experimentado un crecimiento significativo. Los brazos robóticos, especialmente los de diseño compacto, se han revelado como herramientas eficaces para optimizar la realización de tareas repetitivas, eliminando la necesidad de una constante intervención humana. Además, estos dispositivos tienen importantes implicaciones en términos de seguridad, ya que pueden asumir tareas potencialmente peligrosas para los humanos, como la manipulación de materiales tóxicos o el trabajo en entornos de alta temperatura. A diferencia de los humanos, los robots no se cansan ni se distraen, lo que significa que pueden mantener un alto nivel de rendimiento durante períodos prolongados.

La creación de un brazo robótico permite explorar las posibilidades de la robótica. Con la investigación y las pruebas adecuadas, puede abrir nuevas vías para la automatización y la eficiencia en una variedad de sectores. En un contexto educativo, el brazo robótico puede ser una herramienta invaluable. No solo proporciona una plataforma práctica para aprender sobre robótica y programación, sino que también puede fomentar el interés de los estudiantes en la exploración de carreras relacionadas en áreas científicas, tecnológicas, de ingeniería y matemáticas. Además, el brazo robótico puede ser utilizado en proyectos de investigación universitaria, permitiendo a los estudiantes aplicar y expandir su conocimiento en un entorno práctico.

La cinemática juega un papel crucial en la operación de los brazos robóticos, siendo la disciplina física que estudia el movimiento de los objetos sin considerar sus causas. Es fundamental para determinar la cinemática del robot, es decir, cómo las articulaciones deben moverse para lograr una posición y orientación específicas. Este enfoque proporciona a los estudiantes una comprensión profunda de los principios

básicos de la robótica, mostrándoles cómo las ecuaciones cinemáticas se aplican en situaciones prácticas y cómo se utilizan para el control preciso de los brazos robóticos.

# Objetivos

## Objetivo General

- Desarrollar un robot antropomórfico de cinco grados de libertad mediante el uso de motores a pasos con caja reductora armónica.

## Objetivos específicos:

- Diseñar y fabricar los componentes mecánicos del brazo robótico mediante el uso de: software CAD, fabricación aditiva y mecanizado CNC.
- Implementar una plataforma embebida comercial con controlador de lazo cerrado para la regulación precisa de motores paso a paso en cada articulación, asegurando una operación eficiente y exacta del sistema.
- Desarrollar e implementar un modelo cinemático para un robot de cinco grados de libertad, que permita la simulación e implementación detallada de sus movimientos y trayectorias, asegurando una operación precisa y eficaz en su espacio de trabajo.
- Implementar pruebas de posicionamiento para validar el funcionamiento del sistema, evaluando la precisión del brazo robótico mediante trayectorias punto a punto.

# Introducción

Para el diseño y la elaboración del brazo robótico, se empleará el software Fusion 360, en el cual se diseñará un boceto inicial que será iterativamente mejorado hasta obtener el resultado final. Este software no solo facilitará el diseño mecánico, sino que también proporcionará las medidas necesarias para la cinemática del brazo robótico.

Los brazos robóticos tienen múltiples aplicaciones en la actualidad. Pueden proporcionar una plataforma interactiva y estimulante para estudiantes, permitiéndoles comprender el funcionamiento de un brazo robótico desde las matemáticas que gobiernan su movimiento hasta su implementación práctica. Además, dependiendo de dónde se ubique el robot, se pueden realizar mejoras y adaptaciones para proyectos de investigación que pueden involucrar inteligencia artificial y procesos de automatización.

A futuro, este trabajo puede abrir nuevas oportunidades para innovaciones en procesos de automatización. El estudio en este campo pueden llevar a la implementación de nuevas ideas y tecnologías que optimicen y amplíen las capacidades de los sistemas robóticos. Este proyecto no solo busca contribuir al conocimiento técnico, sino también inspirar futuras investigaciones y aplicaciones en el área de la robótica y especialmente en el área de la automatización industrial.

## Grupo Objetivo (Beneficiarios)

El proyecto dirigido a "Pequeños Científicos", en colaboración con la Universidad Politécnica Salesiana, tiene como propósito brindar a jóvenes estudiantes una plataforma interactiva y estimulante para de una mejor manera al ámbito de la

robótica. Mediante el diseño, la elaboración y programación de un brazo robótico, los participantes podrán desarrollar habilidades fundamentales en ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas. Este enfoque práctico no solo impulsará su creatividad y habilidades para enfrentar desafíos, sino que también proporcionará una experiencia educativa valiosa y relevante.

Además de beneficiar a los "Pequeños Científicos", este proyecto tiene el potencial de impactar positivamente a la carrera de Electrónica y Automatización, así como a grupos de investigación en robótica. Su desarrollo y ejecución podrían inspirar mejoras significativas, atrayendo la atención de otros profesionales y académicos interesados en la innovación tecnológica. Esta colaboración multidisciplinaria no solo consolidará la conexión entre el entorno académico y el ámbito comunitario, sino que también fomentará el surgimiento de una nueva generación de innovadores y líderes en el campo de la tecnología.

## **Funcionamiento y Delimitaciones**

El diseño del brazo robótico no consistirá completamente en piezas fabricadas mediante CNC. En su lugar, se priorizará la resistencia reforzada de la parte inferior durante la fase inicial. Además, el enfoque inicial se centrará exclusivamente en la capacidad de seguir trayectorias, según se especifica en los objetivos del proyecto.

# Capítulo 1

## Características y Desempeño de los Brazos Robóticos

En el presente capítulo se ofrece una introducción fundamental sobre los robots y los brazos robóticos, los cuales se han transformado en componentes fundamentales en la industria moderna.

### 1.0.1. Robots

La historia de la robótica se remonta a la antigüedad, con autómatas mecánicos y criaturas mitológicas que despertaban la imaginación. Sin embargo, el concepto moderno de robot surge en el siglo XX, impulsado por la Revolución Industrial y los avances en electricidad, mecánica y ciencia computacional [7].

Un hito importante en la robótica moderna fue Unimate, el primer robot en entornos industriales programable, inventado en 1954 por George Devol. Desde entonces, la robótica ha experimentado un crecimiento exponencial, impulsada por la creatividad y la búsqueda de soluciones más avanzadas [7].

Hoy en día, los robots son esenciales en diversas industrias, desde la manufactura hasta la medicina.



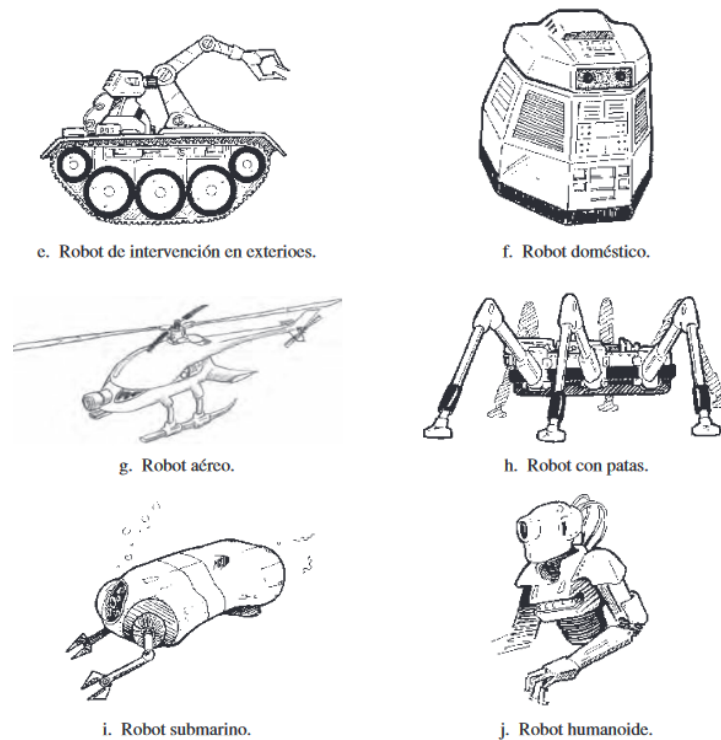


Figura 1.1: Tipos de robots [8]

Actualmente, existe una gran variedad de robots que desempeñan un rol muy importante en el campo industrial. Entre ellos, los brazos robóticos destacan por su versatilidad y eficiencia. Los principales tipos de brazos robóticos incluyen:

**1. Robots SCARA (Brazo Robótico de Ensamblaje con Cumplimiento Selectivo):**

Los robots SCARA están especialmente concebidos para realizar tareas de ensamblaje y manipulación de materiales. Su diseño permite movimientos en el plano horizontal, con un eje de rotación adicional para posicionamiento vertical. Esto les proporciona una gran velocidad y precisión en aplicaciones de pick-and-place, ensamblaje de piezas pequeñas, y operaciones de soldadura y encolado.



Figura 1.2: Scara [9]

- Robots Delta:** Los robots Delta están compuestos por una plataforma móvil unida a una base estacionaria mediante tres brazos articulados en paralelo. Este diseño les permite realizar movimientos rápidos y precisos en tres dimensiones. Los robots Delta son ampliamente utilizados en la industria alimentaria, farmacéutica y electrónica, donde la velocidad y la precisión son cruciales. Su estructura ligera y la capacidad de realizar movimientos suaves y rápidos los hacen ideales para tareas de ensamblaje, empaquetado y manipulación de productos frágiles.



Figura 1.3: Robot Delta [10]

- Robots Cartesianos:** Los robots cartesianos se mueven en tres ejes lineales (X, Y, Z) perpendiculares entre sí. Este diseño les proporciona movimientos precisos y controlados en un espacio tridimensional. Son ampliamente utilizados en aplicaciones de impresión 3D, corte por láser, y manejo de materiales en almacenes automatizados.

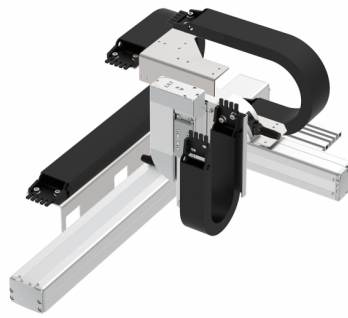


Figura 1.4: Robot Cartesiano [11]

4. **Cobots (Robots Colaborativos):** Los robots colaborativos, o cobots, han sido diseñados para operar en conjunto con humanos dentro de un entorno compartido. Los cobots incorporan sensores y tecnologías de seguridad que permiten una interacción segura con los operadores humanos. Se emplean en diversas aplicaciones, que van desde el montaje y la manipulación hasta tareas de servicio y asistencia en entornos médicos.



Figura 1.5: Robot Colaborativo [12]

5. **Robots Antropomórficos:** Los robots antropomórficos imitan la estructura y movimientos del cuerpo humano. Están diseñados con extremidades y articulaciones similares a las de los humanos, lo que les permite realizar tareas que requieren alta destreza y precisión. Estos robots son muy utilizados en la actualidad, en aplicaciones que van desde la investigación y desarrollo en laboratorios hasta la asistencia en cirugía y rehabilitación. Los robots antropomórficos también están siendo explorados en campos donde la interacción humano-robot es esencial, ya que su capacidad para realizar

movimientos naturales y complejos puede mejorar la experiencia de los usuarios y la eficiencia en tareas colaborativas.



Figura 1.6: Robot Antropomórfico [13]

De estos brazos robóticos, el que se centra en el proyecto es un brazo antropomórfico de 5 ejes de movimiento, el cual ha sido construido a base de motores a paso. Gracias a estos motores, se permitirá una operación con una alta precisión del brazo robótico.

### 1.0.2. Características de los Brazos Robóticos

Los brazos robóticos se caracterizan por una variedad de atributos que los hacen indispensables en diversas aplicaciones industriales y científicas. Una de las más características es la precisión milimétrica en el posicionamiento, capacidad de realizar movimientos complejos en múltiples ejes, velocidad ajustable según requerimientos específicos de la tarea, adaptabilidad para trabajar en entornos controlados o colaborativos, integración con sistemas de visión artificial, y diseño modular que permite configuraciones personalizadas según las necesidades del usuario. La combinación de estas características abre nuevas posibilidades en áreas de fabricación avanzada, la investigación biomédica y la automatización industrial de alta precisión.

### 1.0.3. Grados de Libertad (DOF):

Los grados de libertad (DOF) definen las capacidades de movimiento del brazo robótico y son fundamentales para determinar su flexibilidad y funcionalidad. Cada grado de libertad corresponde a un eje independiente alrededor del cual el robot puede moverse, que puede incluir traslación (movimiento lineal) y rotación. Tener más grados de libertad proporcionan mayor flexibilidad y capacidad para realizar tareas complejas, ya que el robot puede posicionarse y orientarse con mayor precisión en su entorno.

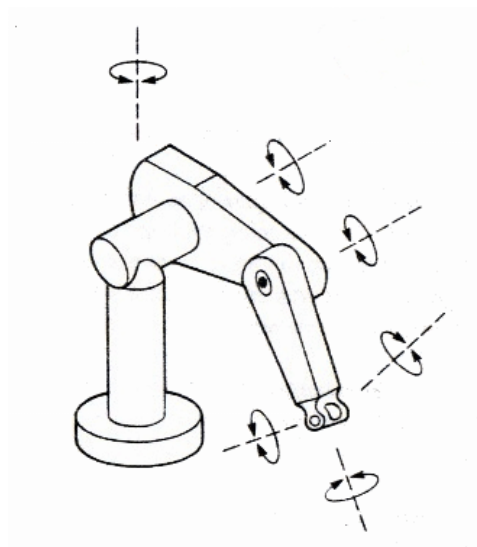


Figura 1.7: Grados de libertad [14]

En el entorno robótico, los grados de libertad suelen dividirse en tres tipos principales de movimiento:

1. **Movimientos Lineales (Traslaciones):** Estos movimientos permiten que el robot se traslade en una línea recta a lo largo de los ejes X, Y y Z. Un robot con tres grados de libertad lineales puede moverse hacia adelante y hacia atrás, de lado a lado, y hacia arriba y hacia abajo.
2. **Movimientos Rotacionales:** Estos movimientos permiten que el robot gire alrededor de un eje. Por ejemplo, un robot puede girar su "hombro", "codo", y "muñeca" en ángulos específicos. Cada rotación en torno a un eje separado proporciona un grado de libertad adicional.

- 3. Movimientos Combinados:** En robots más avanzados, los movimientos lineales y rotacionales se combinan para permitir operaciones más complejas. Estos robots pueden ajustar tanto su posición como su orientación para alcanzar y manipular objetos desde diferentes ángulos y direcciones.

Los grados de libertad presentes en un robot se relacionan a la capacidad para realizar una tarea determinada. Por ejemplo, los robots industriales con seis grados de libertad pueden imitar los movimientos de una mano humana, lo que es suficiente para muchas operaciones de montaje, soldadura y manipulación de materiales. Sin embargo, tareas más especializadas como la cirugía robótica o la exploración espacial pueden requerir robots con más de seis grados de libertad para lograr mayor precisión y flexibilidad.

El diseño de los grados de libertad también afectará a su control y programación. Si aumentan los grados de libertad, también aumenta la complejidad de los sistemas de control necesarios para coordinar de manera eficiente y segura todos los movimientos del robot.

#### **1.0.4. Precisión y Repetibilidad:**

La precisión se refiere a la exactitud con la que un robot alcanza una determinada posición en el espacio tridimensional. Esta capacidad es esencial si el robot necesita colocar objetos en ubicaciones precisas o realizar tareas que requieren alta precisión, como la microelectrónica o la cirugía robótica. La precisión depende de varios factores, incluida la calidad del sensor, la rigidez del brazo robótico y la precisión del software de control.

La repetibilidad, por otro lado, es la capacidad del robot para dirigirse a un lugar con alta precisión y regresar repetidamente al mismo lugar con alta precisión. Esto significa que si un robot completa una tarea y luego se le pide que la repita, podrá completarla con un pequeño margen de error. La repetibilidad es fundamental en entornos de fabricación y montaje donde los robots deben realizar las mismas tareas varias veces sin desviaciones perceptibles. La alta repetibilidad garantiza que el robot pueda realizar el proceso de producción de manera consistente, reduciendo errores y aumentando la eficiencia [8].

Estas características, precisión y repetibilidad, son importantes en un brazo robótico al tener que moverse de un punto a otro. Por ejemplo, en la industria automotriz, los robots deben ensamblar piezas con alta precisión para garantizar que cada componente encaje perfectamente. En la industria farmacéutica, los robots deben dispensar líquidos con gran exactitud para asegurar las dosis correctas. De igual manera, en la exploración espacial, los robots deben manejar equipos sensibles y realizar experimentos con precisión extrema.



Figura 1.8: Precisión de un brazo robotico [8]

### 1.0.5. Capacidad de Carga:

La capacidad de carga indica la carga máxima que un brazo robótico puede manejar de manera efectiva. Esta característica es esencial para aplicaciones que involucran el manejo de cargas pesadas, como en las industrias automotriz, de ingeniería y de construcción. La capacidad de carga de un brazo robótico determina no sólo el peso máximo que puede levantar, sino también la estabilidad y precisión con la que maneja el peso durante el movimiento.

Los factores que afectan la capacidad de carga de un brazo robótico incluyen el diseño estructural, los actuadores potentes, el control dinámico, la distribución de cargas y la rigidez del robot. Un diseño robusto y bien balanceado permite

al robot soportar mayores pesos sin comprometer su rendimiento. Materiales de alta resistencia, como aceros de alta aleación o compuestos avanzados, se utilizan comúnmente para construir brazos robóticos que requieren una alta capacidad de carga.

Los actuadores, como motores y cilindros hidráulicos, deben ser suficientemente potentes para mover cargas pesadas con precisión. La selección adecuada de actuadores es esencial para asegurar que el robot pueda manejar su capacidad máxima de carga de manera eficiente. El control dinámico avanzado permite que el robot ajuste su fuerza y velocidad de movimiento para manejar cargas variables sin perder estabilidad ni precisión. Los algoritmos de control deben ser capaces de compensar las inercias adicionales introducidas por las cargas pesadas.

La distribución del peso a lo largo del brazo robótico también es importante. Un diseño que distribuye la carga de manera uniforme minimiza el esfuerzo en puntos específicos, reduciendo el riesgo de fallo estructural y aumentando la vida útil del robot. Aunque la rigidez estructural es importante para manejar cargas pesadas, cierta flexibilidad también puede ser beneficiosa para absorber impactos y reducir las vibraciones. Esto es particularmente relevante en aplicaciones donde el robot interactúa con entornos dinámicos o imprevistos[8].

En aplicaciones industriales, la capacidad de carga también está relacionada con la seguridad operativa. Un brazo robótico que opera cerca de su capacidad máxima debe estar equipado con sensores y sistemas de seguridad para evitar sobrecargas y proteger tanto al robot como a los operadores humanos.

### **1.0.6. Área de trabajo**

El rango operativo de un brazo robótico indica el espacio máximo que puede alcanzar la punta del robot. También es consciente de las limitaciones de movimiento impuestas por el sistema operativo. Donde muchos de estas características vienen indicadas mediante un dibujo acotado, indicando el área de trabajo de cada articulación como se muestra en la figura 1.9.



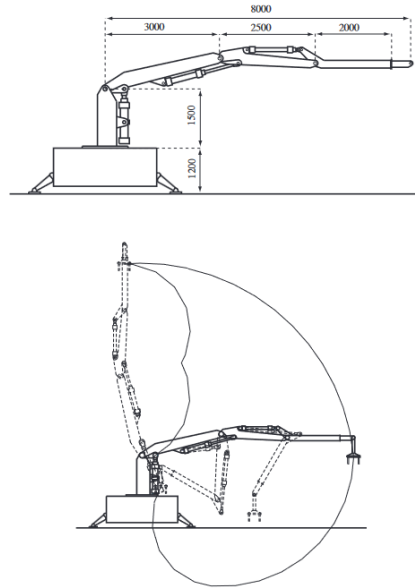


Figura 1.9: Grados de libertad [15]

El hecho de que un robot tenga acceso a toda el área de trabajo no implica que pueda acceder a todos los caminos. Hay conjuntos de caracteres a los que solo se puede acceder desde ciertos caminos y a otros lugares desde todos los caminos.

# Capítulo 2

## Diseño Mecánico

En este capítulo se describen los componentes que conforman la estructura del brazo robótico, su diseño, componentes y materiales utilizados

### 2.1. Componentes

Los componentes utilizados en la estructura del brazo robótico consta principalmente con cuatro elementos: motores a paso Nema 17 con caja reductora armónica, piezas en aluminio realizadas en CNC, rodamientos con medidas de (8, 22, 7) mm y finalmente pernos M2, M3, M4 y M5.

#### 2.1.1. Motores a paso Nema 17 con caja reductora armónica

El diseño del brazo robótico ha sido desarrollado empleando motores paso a paso con una caja reductora armónica. Se ha utilizado motores paso a paso debido a que los motores ofrecen rotación de gran precisión en forma de pasos angulares. Estos motores giran en un ángulo fijo para cada paso. La implementación de la caja reductora armónica contribuye a el torque que ofrece cada motor, todas las cajas reductoras utilizadas tienen una relación de engranajes de 30:1 [16]. Se controla la posición del motor logrando un ángulo de paso de  $1,8^\circ$ , el cual pasa por la caja reductora 1:30, obteniendo una precisión mucho mayor de  $0.06^\circ$ .



Figura 2.1: Caja reductora armónica [16]

Para cada grado de libertad se ha implementado motores a paso Nema 17 con diferente torque, dependiendo el esfuerzo que realiza. Para los tres primeros grados de libertad se ha utilizado Motores Nema 17 X17-28-30A, cada uno con su respectiva caja reductora armónica. Para el cuarto grado de libertad se ha utilizado un motor Nema17 X17-24-30A. para el quinto y sexto grado de libertad se ha utilizado los motores Nema 17 X17-22-30A, con la única diferencia que en el sexto grado de libertad se ha omitido el uso de la cada reductora [17].



Figura 2.2: Motores Nema 17 [17]

### 2.1.2. Rodamientos

Los rodamientos, también conocidos como rulimanes, son componentes mecánicos esenciales en diversos equipos utilizados en varios campos. Su función principal es minimizar la fricción entre dos elementos rotativos, permitiendo un movimiento suave y preciso, de esta manera se evita el desgaste de las partes implicadas en el movimiento [18].

Un rodamiento está compuesto por tres partes principales: los anillos o aros (interno y externo), los elementos rodantes (bolas) y una jaula que mantiene estos elementos en su lugar.



Figura 2.3: Rodamiento rígidos de bolas [18]

Para el brazo robótico se ha utilizado tres rodamientos para los primeros grados de libertad, el primer rodamiento con una medida de (68x70x10) mm se encuentra en el primer grado de libertad, siendo la base de todo el brazo. En el segundo y tercer grado de libertad se utilizó rodamientos de medida de (8x22x7) mm asegurando así un movimiento preciso y reduciendo el desgaste entre los componentes.

### 2.1.3. Pernos y Tuercas

Los pernos y las tuercas son elementos fundamentales en cualquier máquina o equipo, ya que facilitan la unión de todos los componentes y piezas. Para la elaboración del brazo robótico es esencial el uso de estos elementos, ya que proporcionan una sujeción sólida, creando un modelo compacto y resistente.

En la construcción se han empleado un total de 116 pernos de cabeza hexagonal y 5 tuercas.



Figura 2.4: Pernos hexagonales [19]

## 2.2. Método de fabricación

### 2.2.1. Fabricación Aditiva

La fabricación aditiva, conocida comúnmente como impresión 3D, es una tecnología que crea objetos tridimensionales a partir de modelos digitales mediante la adición de material capa por capa. Esta tecnología se utiliza en diversas industrias debido a sus numerosas ventajas [20].

#### Ventajas de la Fabricación Aditiva

La fabricación aditiva ofrece varias ventajas significativas:

- **Flexibilidad de Diseño:** Permite la creación de geometrías complejas que serían difíciles o imposibles de lograr con métodos de fabricación tradicionales [21].
- **Reducción del Tiempo de Producción:** Los prototipos y productos finales se pueden producir rápidamente, lo que acelera el ciclo de desarrollo del producto [22].
- **Costos de Producción Reducidos:** Al eliminar la necesidad de herramientas y moldes costosos, la fabricación aditiva puede ser más económica, especialmente para producciones de bajo volumen [20].
- **Personalización:** Es ideal para la producción de piezas personalizadas, adaptadas a necesidades específicas sin un aumento significativo en el costo [23].

- **Menor Desperdicio de Material:** Solo se utiliza el material necesario para construir el objeto, lo que reduce el desperdicio en comparación con métodos sustractivos [24].

### Uso en el Brazo Robótico

En el contexto del desarrollo del brazo robótico, la fabricación aditiva ha sido fundamental. Se ha utilizado principalmente el plástico poliláctico (PLA) debido a sus propiedades adecuadas para la impresión 3D, como la flexibilidad de diseño, buen acabado superficial y costos reducidos. Se recomienda una temperatura de 210°C para la boquilla y 60°C para la base de la impresora. El material puede soportar un esfuerzo máximo entre 50 y 70 MPa [25].

El brazo robótico está diseñado para trabajar con seis grados de libertad, lo que le permite sostener su propio peso y las cargas aplicadas en su último grado de libertad. Gracias a la fabricación aditiva, se han podido realizar estudios de esfuerzos en las partes del diseño, optimizando así la estructura para que sea capaz de resistir los esfuerzos ejercidos. La posibilidad de iterar rápidamente en los diseños ha permitido mejorar el rendimiento y la funcionalidad del brazo robótico de manera eficiente.

### 2.2.2. Mecanizado en CNC

El aluminio, a comparación de la impresión en 3D, es considerablemente más resistente, por lo que la implementación reduce las vibraciones producidas por la elasticidad de las piezas en PLA, principalmente por tener que soportar el peso de motores. Para la fabricación de partes del segundo grado de libertad, se ha utilizado principalmente aluminio procesado mediante CNC. Este material es reconocido por su gran resistencia, durabilidad y capacidad para soportar cargas importantes, convierte buena opción en el segundo grado de libertad que soportar el peso de los motores.

La fabricación en CNC garantiza una precisión extrema en la fabricación, asegurando que cada pieza cumpla con especificaciones exactas en sus medidas. Además, que la producción de las piezas son duraderas y capaces de soportar condiciones exigentes de trabajo. La combinación de materiales y técnicas de

fabricación proporciona una solución óptima para crear componentes precisos, fiables y económicos.

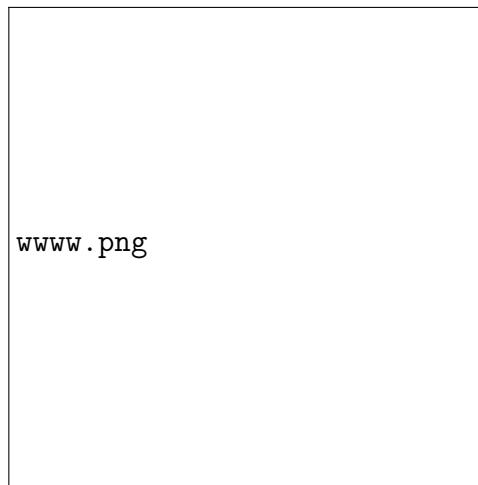


Figura 2.5: Piezas mecanizadas en CNC (autores)

### 2.3. Morfología y Grados de libertad

En el contexto de la robótica, la morfología se refiere a la estructura física y configuración mecánica de un brazo robótico de 5 grados de libertad. Esta morfología determina los tipos de movimientos que el brazo será capaz de realizar y las funcionalidades que podrán generarse a partir de estos movimientos. Para el diseño del brazo se establecen los siguientes 6 grados de libertad:

- Base Rotatoria: Permite que el brazo robótico gire horizontalmente sobre un eje vertical, proporcionando el primer grado de libertad. Este movimiento de rotación permite posicionar el brazo en diferentes direcciones a lo largo de un plano horizontal. La base rotatoria se tiene restricciones de ángulo, permitiendo un giro controlado de  $-90^\circ$  a  $90^\circ$ . Esto evita cualquier rotación excesiva que podría dañar el brazo o interferir con su funcionamiento en el entorno de trabajo.

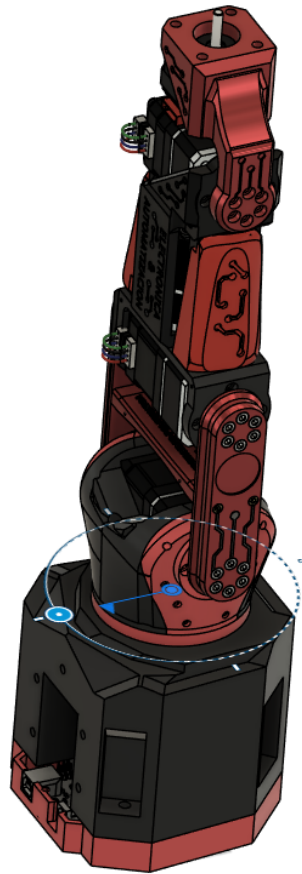


Figura 2.6: Primer Grado de libertad (autores)

- **Hombro (Base del Brazo):** Permite el movimiento vertical desde la base rotatoria, proporcionando el segundo grado de libertad. Este movimiento vertical permite ajustar la altura y alcance del brazo robótico, permitiendo que el brazo interactúe con objetos a diferentes niveles de elevación. Al igual que la base rotatoria, el hombro está equipado con restricciones de ángulo, permitiendo un movimiento controlado de  $-90^\circ$  a  $90^\circ$ . Estas limitaciones aseguran que el brazo no se mueva fuera de su rango seguro de operación



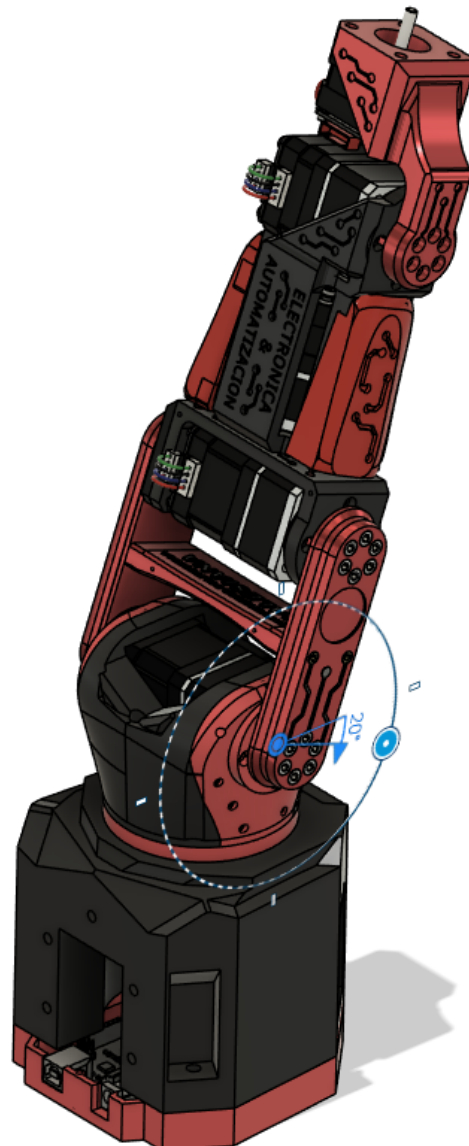


Figura 2.7: Segundo Grado de libertad (autores)

- Codo: Permite la flexión y extensión del brazo en un plano vertical desde el hombro, proporcionando el tercer grado de libertad. Este movimiento es permite acercar o alejar la herramienta del brazo a los objetos, facilitando actividades como la manipulación y el ensamblaje de componentes. El codo está equipado con restricciones de ángulo, permitiendo un movimiento controlado de  $-120^\circ$  a  $120^\circ$ .

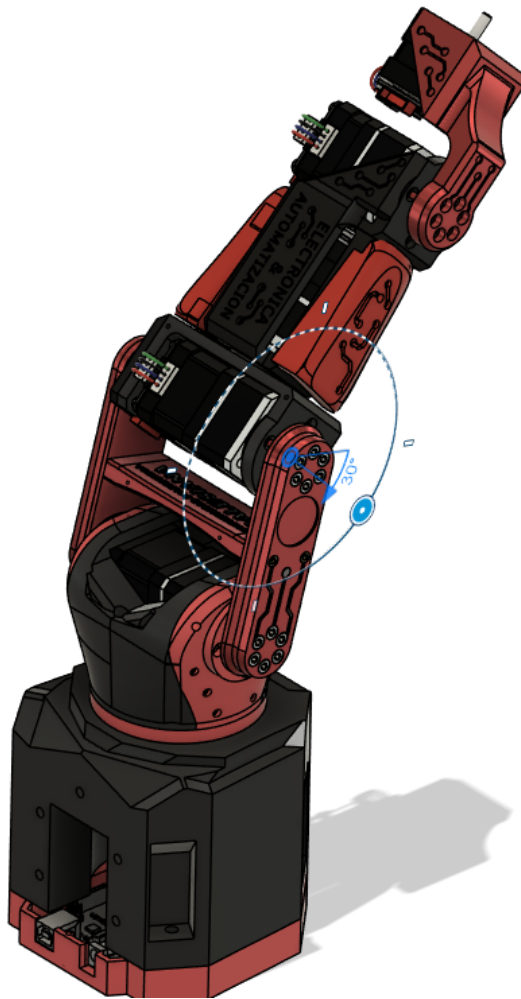


Figura 2.8: Tercer Grado de libertad (autores)

- Muñeca 1 (Pitch): Permite la rotación del extremo del brazo robótico sobre un eje horizontal desde el codo, proporcionando el cuarto grado de libertad. Este movimiento de rotación permite orientar la herramienta o efector final en la dirección deseada, facilitando tareas que requieren una precisión angular específica. La muñeca 1 está equipada con restricciones de ángulo, permitiendo un giro controlado de  $-170^{\circ}$  a  $170^{\circ}$ .

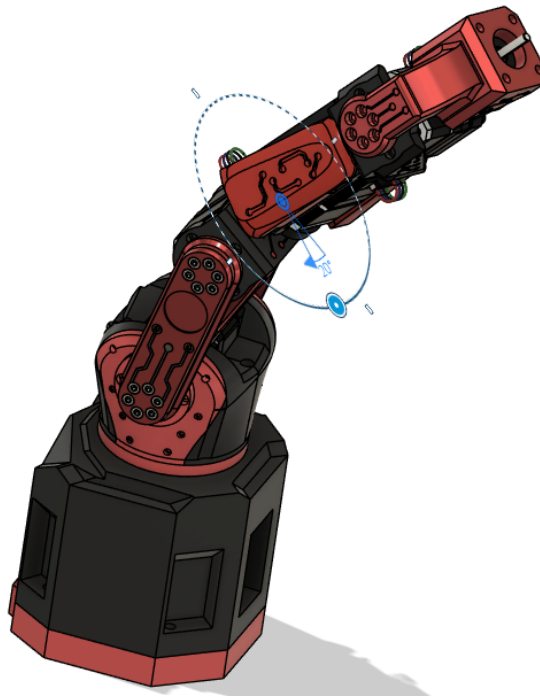


Figura 2.9: Cuarto Grado de libertad (autores)

- Muñeca 2 (Yaw): Permite el giro lateral del extremo del brazo robótico alrededor de su eje longitudinal, proporcionando el quinto grado de libertad. Este movimiento permite para orientar la herramienta o efector final de manera que pueda realizar tareas en diferentes ángulos y posiciones en un diferente eje con respecto al cuarto grado de libertad, permitiendo orientar la herramienta de en muchas más direcciones. La muñeca 2 está equipada con restricciones de ángulo, permitiendo un giro controlado de  $-90^{\circ}$  a  $90^{\circ}$ .

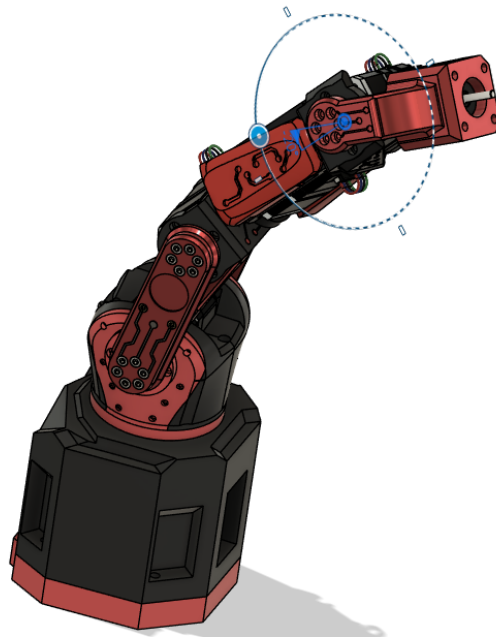


Figura 2.10: Quinto Grado de libertad (autores)

- Muñeca 3 (Roll): Permite la rotación del extremo final del brazo robótico alrededor de su eje longitudinal, proporcionando el sexto grado de libertad. Este movimiento de rotación permite ajustar la orientación de la herramienta o efector final, permitiendo una mayor flexibilidad y precisión en tareas que requieren un ajuste fino del ángulo de trabajo.

A diferencia de otros grados de libertad, la muñeca 3 no tiene restricciones de ángulo, permitiendo una rotación continua y sin limitaciones. La libertad de movimiento total de la muñeca 3 garantiza que el brazo robótico pueda adaptarse a una amplia variedad de tareas y entornos, proporcionando una funcionalidad superior y versatilidad en su operación.

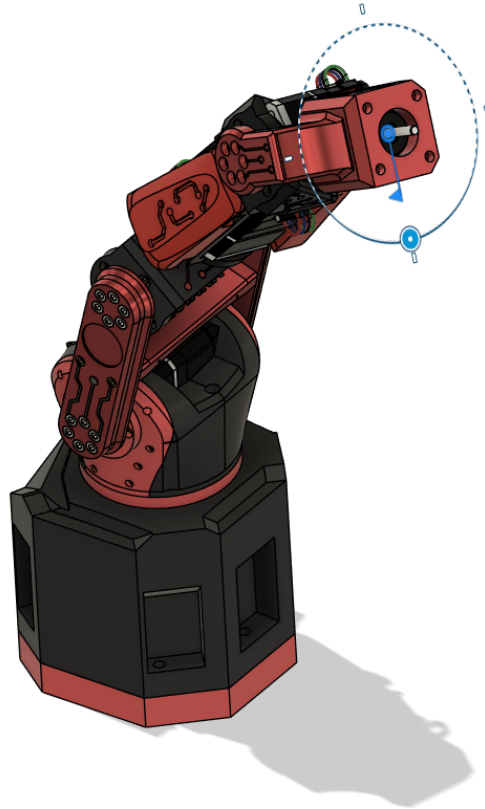


Figura 2.11: Sexto Grado de libertad (autores)

## 2.4. Diseño

### 2.4.1. Primer grado de libertad

Para la base rotatoria del brazo implementamos un rodamiento (68x70x10)mm con el objetivo de reducir el desgaste del motor, además para que el motor pueda soportar el peso de los componentes y fuerzas de cargas externas.

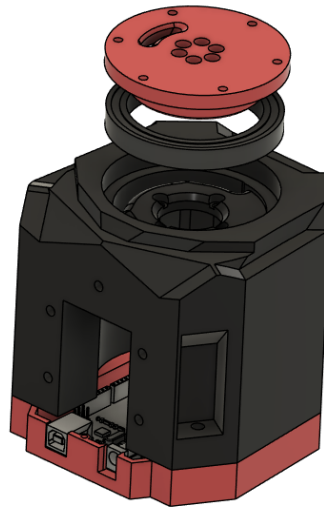


Figura 2.12: Ensamble primer grado de libertad (autores)

Como se observa en la figura 2.13 la base que soporta los siguientes grados de libertad se asienta en el anillo interno del rodamiento, de esta manera se disminuye la carga que debe manejar el motor.

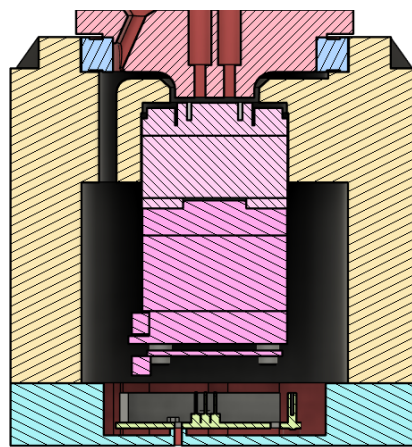


Figura 2.13: Soporte de Rodamiento corte transversal (autores)

#### 2.4.2. Segundo grado de libertad

Para el hombro, o base del brazo, se ha implementado un rodamiento (8X22X7) mm, mediante el cual se reduce el esfuerzo que realiza el segundo motor.

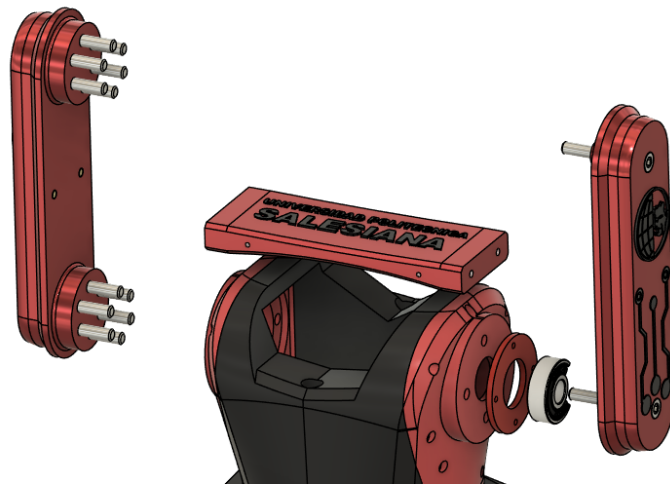


Figura 2.14: Segundo grado de libertad (autores)

Como se puede observar en la figura 2.14 el uso de rodamientos en el eje auxiliar es importante para mantener la estabilidad y precisión del sistema. Las vibraciones causadas por el peso de los motores pueden afectar negativamente la eficiencia y la durabilidad de las partes mecánicas.

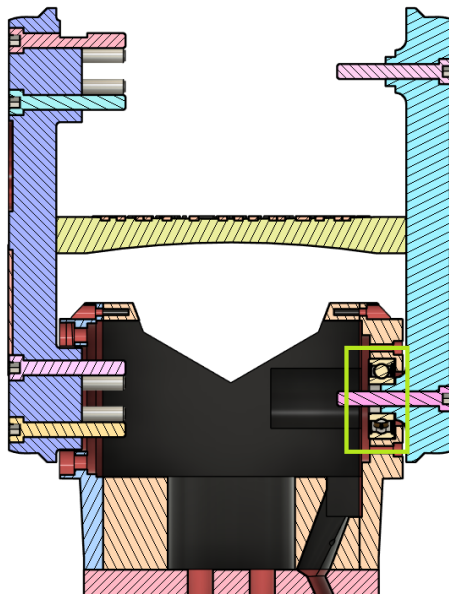


Figura 2.15: Segundo grado de libertad corte transversal (autores)

Al implementar rodamientos como se observa en la figura 2.15 en el segundo eje, se logra una amortiguación efectiva de las vibraciones, lo que permite un movimiento más suave y controlado. Además, se minimiza el deterioro de las piezas,

lo que contribuye a una mayor durabilidad del sistema en su conjunto.

### 2.4.3. Tercer grado de libertad

Como se muestra en la figura 2.16, usar rodamientos en el tercer eje es importante para mantener la estabilidad y precisión del sistema.

Al poner rodamientos en el tercer eje, se logran amortiguar las vibraciones, permitiendo un movimiento más suave y controlado.

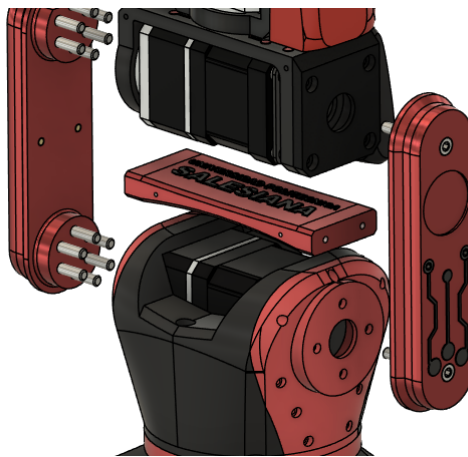


Figura 2.16: Tercer grado de libertad (autores)

Se utilizan 4 pernos M4 para asegurar los componentes del sistema, colocándolos estratégicamente en los motores, el eje principal y el eje auxiliar que se conecta con el eje 2. En los motores, los pernos M4 se utilizan para fijarlos firmemente a su base de montaje, asegurando que no haya movimiento no deseado.

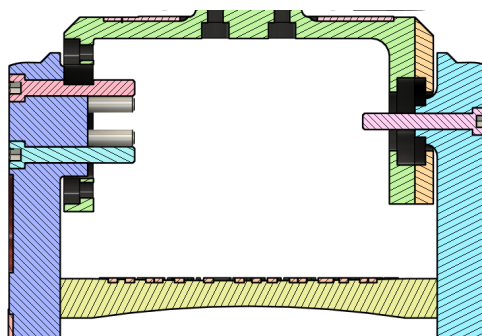


Figura 2.17: Tercer grado de libertad con corte transversal (autores)

Como se observa en la figura 2.17, el rodamiento se encuentra sujeto en el



componente 3, en el cual se asienta el eje auxiliar. Solo existe contacto con el anillo interno del rodamiento para evitar aumentar el esfuerzo que realiza el motor.

Este diseño permite que el eje auxiliar gire libremente dentro del rodamiento sin transmitir cargas innecesarias al motor. Además, al limitar el contacto al anillo interno, se minimiza la fricción y el desgaste en el sistema, contribuyendo a un funcionamiento más eficiente y prolongando la vida útil del rodamiento.

El montaje preciso del rodamiento en el componente 3 es importante para mantener la alineación correcta del eje auxiliar y asegurar un movimiento suave y controlado.

#### 2.4.4. Cuarto y Quinto grado de libertad

El cuarto grado de libertad, como se muestra en la figura 2.18. Este grado de libertad corresponde a un movimiento circular del brazo robótico, donde la única conexión es entre el motor paso a paso y el eje anterior. Todo el montaje está alineado de forma óptima para garantizar un funcionamiento fluido y exacto.

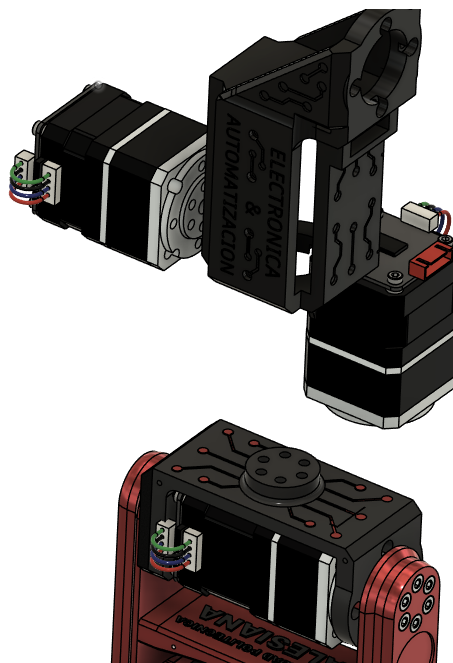


Figura 2.18: Cuarto Eje (autores)

Este diseño también incluye la capacidad de transportar otro motor paso a paso en el quinto grado de libertad. Todas las uniones están aseguradas con tornillos M4

para garantizar que el robot permanezca estable y no se desmonte. Además, se han previsto agujeros para el paso de los cables, facilitando una gestión ordenada y segura del cableado del brazo robótico. Una vez ensamblado todo, el conjunto se vería como en la figura 2.19.

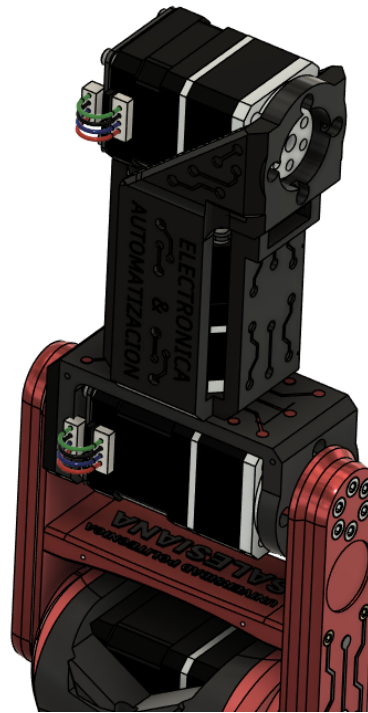


Figura 2.19: Cuarto Eje y Quinto Eje (autores)

#### 2.4.5. Diseño final en Fusion 360

En esta etapa del proyecto, se ha completado el diseño del brazo robótico utilizando Fusion 360. El ensamblaje de todas las partes se ha realizado con precisión, asegurando que cada componente encaje correctamente y funcione de manera óptima en el conjunto final. Este proceso incluye la integración de los sistemas de actuadores y mecanismos de articulación, garantizando así la funcionalidad y eficiencia del brazo robótico en su conjunto.

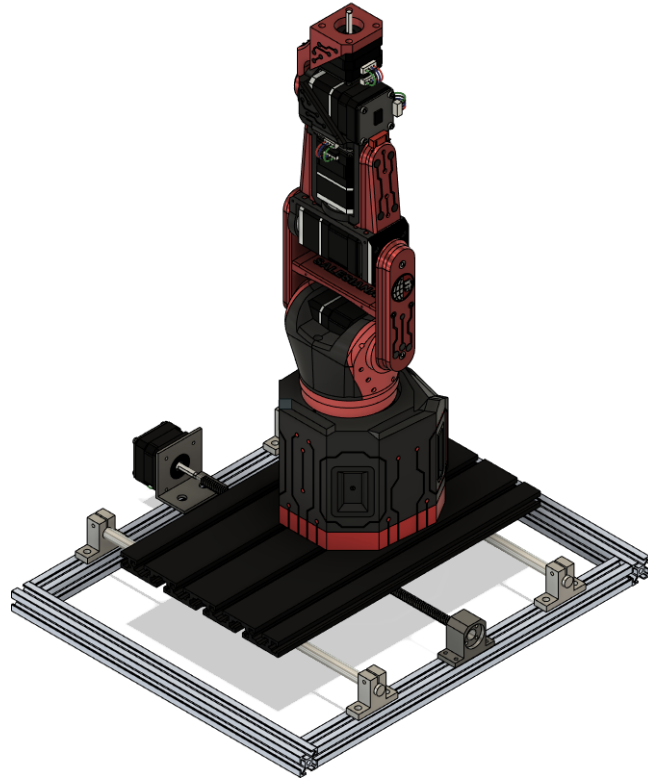


Figura 2.20: Diseño final en Fusion 360 (autores)

#### 2.4.6. Diseño final ensamblado

Finalmente, se imprimen todas las piezas 3D necesarias para el ensamblaje del brazo robótico, como se muestra en la Figura 2.21. En esta imagen, se puede observar el acabado final del brazo robótico con todas las piezas completamente armadas.

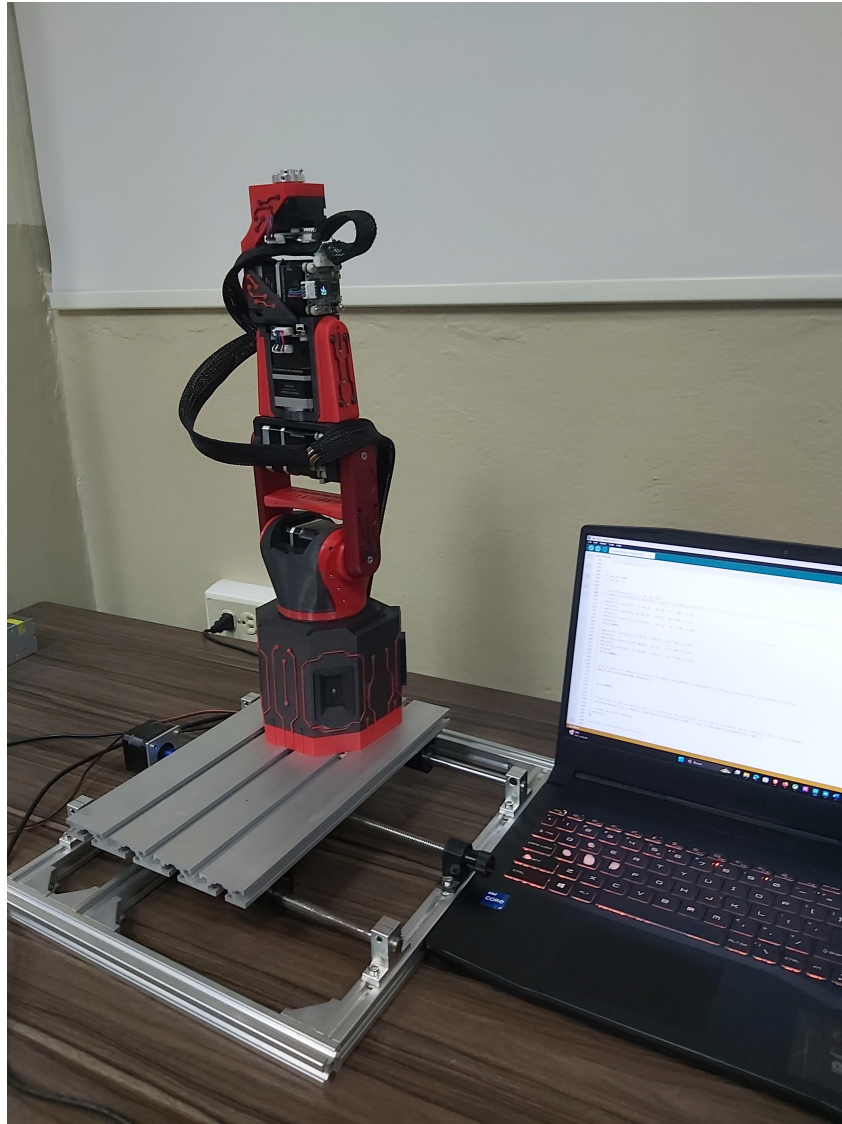


Figura 2.21: Brazo robótico completamente armado (autores)

# Capítulo 3

## Instrumentación electrónica

En el siguiente capítulo se describe la instrumentación electrónica que se utilizara en la parte del brazo robótico.

### 3.1. Arduino Mega 2560

El Arduino Mega 2560, que proyecta en la 3.1, es un microcontrolador que representa una mejora significativa y expansión del popular Arduino Uno, ofreciendo capacidades de procesamiento superiores y una mayor cantidad de conexiones periféricas. Esta placa está equipada con el microcontrolador ATmega2560 de Atmel, que opera con una arquitectura de 8 bits. Además de una memoria flash de 256 kB del microcontrolador permite la ejecución de programas más complejos y el manejo de una mayor cantidad de datos.

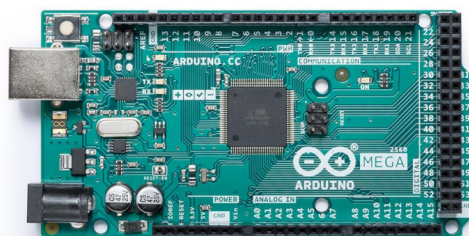


Figura 3.1: Arduino Mega 2560 [26]

Una característica destacada del Arduino Mega 2560 es su extenso conjunto de

pinos de entrada/salida. Con un total de 54 pines digitales, entre los cuales 15 son capaces de producir salidas PWM, y 16 pines que pueden configurarse como entradas analógicas, la placa proporciona una gran flexibilidad para la conexión de diversos dispositivos y sensores externos. Además, cuenta con 4 puertos seriales adicionales, esto permite una fácil comunicación con otros dispositivos y sistemas periféricos [26].

Una de las ventajas más notables del Arduino Mega 2560 es su compatibilidad con el entorno de desarrollo integrado, el cual reduce enormemente la programación y la implementación de proyectos. El IDE utiliza el lenguaje de programación C/C++ y ofrece una extensa biblioteca de funciones, lo que facilita el desarrollo de aplicaciones. La conexión a una computadora se realiza a través de un puerto USB, que también sirve para alimentar la placa. Alternativamente, se puede utilizar un conector de alimentación que admite voltajes de entre 7 y 12 voltios

## 3.2. Controlador Emm42

Para el desarrollo del brazo cobáltico se ha implementado en driver para motor paso a paso Emm42-V5.0, es la mejor opción debido a su bajo costo, facilidad de uso y confiabilidad.

For 3D Printing

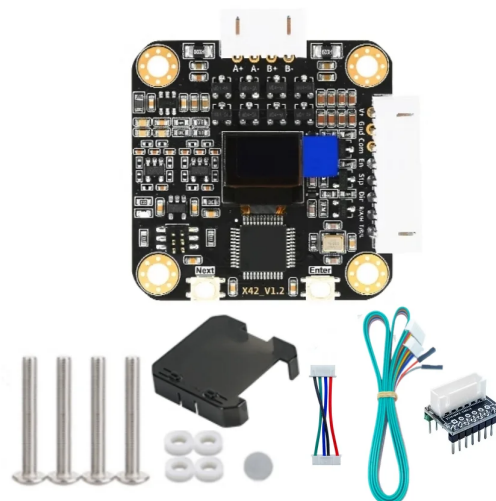


Figura 3.2: Driver Emm42 para motor a pasos

Es de circuito cerrado, por lo que ofrecen alta precisión y control preciso del

movimiento, esta opción la hace ideal ya que se requiere movimientos exactos en cada uno de sus grados de libertad.

### 3.2.1. Sistema a Lazo cerrado

El Driver Emm42-V5.0 utiliza un algoritmo avanzado de control vectorial en lazo cerrado FOC "Field Oriented Control" para lograr el control preciso de un motor en términos de par, velocidad y posición [27]. Los componentes que utiliza son:

#### Encoder Magnético de Alta Precisión

El controlador Emm42 utiliza un encoder magnético con 16384 líneas para obtener información precisa de la posición del motor. Esto permite retroalimentar al controlador con la posición exacta del eje de rotación, lo que se traduce en un control de movimiento más preciso y confiable [27].

#### Sensores de Corriente

Incorporados en el controlador, estos sensores registran el flujo eléctrico que circula a través de las bobinas del motor. Esta información permite ajustar el par motor de manera precisa, asegurando que el motor tenga la fuerza necesaria para realizar las tareas requeridas [27].

#### Control en Tres Anillos

El controlador Emm42 emplea un sistema de control en tres niveles o anillos para asegurar un control preciso y eficiente del motor. Los tres anillos son:

- **Anillo de Par:** Controla la corriente en las bobinas del motor para proporcionar el par adecuado.
- **Anillo de Velocidad:** Regula la velocidad del motor basándose en la información del encoder.
- **Anillo de Posición:** Ajusta la posición del motor para alcanzar la posición deseada con alta precisión.

Este sistema de control en tres anillos permite al controlador Emm42 responder rápidamente a los cambios en la carga y las condiciones de operación, asegurando un movimiento suave y preciso del motor [27].

### Frecuencia de Control

El controlador Emm42 realiza ajustes a una frecuencia de 20kHz o más. Esta alta frecuencia de control permite un control muy fino y rápido de los parámetros del motor, lo que resulta en un movimiento más preciso y eficiente [27].

### 3.2.2. Pantalla OLED y Parámetros Observables

El driver Emm42 cuenta con una pantalla OLED que muestra varios parámetros clave del sistema. A continuación, se describen los parámetros observables en cada en la pantalla mostrada en la Figura 3.3



Figura 3.3: Pantallas OLED en la placa[27]

#### ■ Información que se puede visualizar en la pantalla OLED :

- **Ángulo:** 360.0°
- **Error:** 0.00 err
- **Reloj:** 0 clk
- **Voltaje:** 23864 mV
- **Corriente:** 637 mA
- **Velocidad:** 100 rpm
- **Temperatura:** 31°C
- **Resistencia:** 1196 mR
- **Energía:** 3367 uH



### 3.2.3. Conexión de Dos Drivers

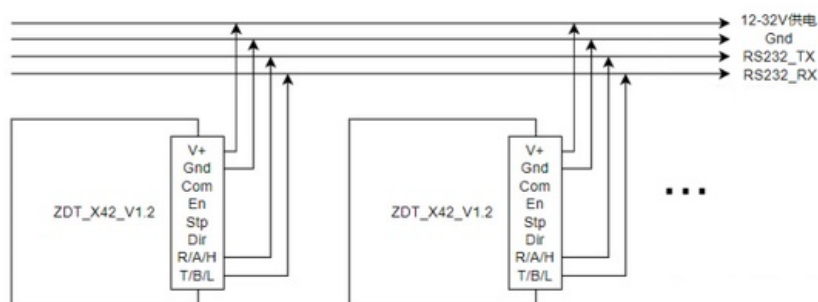


Figura 3.4: Esquema de interconexión de dos drivers [27]

La figura 3.4 presenta el esquema de conexión de dos drivers modelo ZDT\_X42\_V1.2. Las conexiones principales se describen a continuación:

#### ■ Alimentación:

- **V+:** Entrada de voltaje de 12-32V.
- **Gnd:** Conexión a tierra.

#### ■ Control y Comunicación:

- **Com:** Común.
- **En:** Habilitación del driver.
- **Stp:** Señal de paso (Step).
- **Dir:** Señal de dirección.
- **R/A/H:** Conexión para la función de retorno.
- **T/B/L:** Conexión adicional (puede ser utilizada para diferentes funciones según la configuración del sistema).

#### ■ Comunicación Serial :

- **TX:** Conexión del transmisor directo al pin Tx del Arduino.
- **RX:** Conexión del receptor directo al pin Rx del Arduino.
- **GND:** Conexión a tierra del control principal.

La comunicación se realiza directamente a la comunicación serial del Arduino, entrada (Rx) y salida (Tx). Esto permite al Arduino controlar y monitorear los drivers, facilitando la integración en proyectos de automatización y robótica. Los drivers se conectan en paralelo para las señales de control y alimentación, permitiendo la sincronización y el control simultáneo de múltiples unidades. Este esquema es ideal para aplicaciones que requieren el control coordinado de varios motores, tales como impresoras 3D o sistemas de automatización industrial.

### 3.2.4. Comparación de Drivers de Lazo Abierto vs Lazo Cerrado en Motores a Paso

Aspecto	Lazo Abierto	Lazo Cerrado
<b>Control y Retroalimentación</b>	Sin retroalimentación, el controlador no recibe información sobre la posición del motor.	Utilizan encoders para retroalimentación continua.
<b>Precisión y Fiabilidad</b>	Limitada por la posibilidad de perder pasos sin detectarlo.	Corrigen desviaciones en tiempo real para mayor precisión.
<b>Complejidad y Costo</b>	Más simples y económicos.	Más complejos y caros.
<b>Rendimiento bajo Cargas Variables</b>	No ajustan automáticamente la posición con variaciones de carga.	Ajustan automáticamente la posición.
<b>Eficiencia Energética</b>	Proporcionan corriente máxima, consumo innecesario.	Ajustan la corriente según sea necesario.
<b>Aplicaciones Adecuadas</b>	Para aplicaciones sencillas como impresoras 3D económicas.	Preferidos en aplicaciones industriales y robótica avanzada.

Tabla 3.1: Comparación de Drivers de Lazo Abierto vs Lazo Cerrado en Motores a Paso

### 3.2.5. Módulo regulador de voltaje Step Down LM2596 3A DC/DC BUCK

El regulador Step Down LM2596 de 3A es un componente electrónico fundamental que permite convertir eficientemente una fuente de alimentación de voltaje elevado a un voltaje más bajo con gran precisión. Este módulo es capaz de reducir la tensión de entrada de manera controlada y manejar corrientes de hasta 3 amperios, haciéndolo ideal para alimentar cargas de alta demanda como motores y componentes de potencia que requieren una fuente de alimentación confiable [28].



Figura 3.5: Regulador LM2596 [28]

Es relevante mencionar que existen dos tipos principales de reguladores DC/DC: los reguladores lineales y los conmutados (switching). Los reguladores lineales, como los conocidos LM7805 o LM317, son fáciles de utilizar, pero presentan baja eficiencia energética. En contraste, los reguladores conmutados, como el LM2596, ofrecen una alta eficiencia energética que supera el 80 %. Estos reguladores conmutados almacenan energía de entrada de forma periódica para liberarla a un nivel de voltaje deseado, permitiendo una conversión de voltaje mucho más eficiente [28].

El módulo LM2596 también incluye opciones para ajustar el voltaje de salida, proporcionando flexibilidad para ajustarse a los requerimientos particulares

de cada proyecto. Algunos modelos vienen equipados con un potenciómetro que permite ajustar la tensión de salida dentro de un rango determinado, facilitando su configuración y adaptación a diferentes sistemas.

### 3.3. Diagrama de Bloques del Robot

En la figura 3.6, se presenta el diagrama de bloques del sistema interno del brazo robótico, donde se detallan los componentes necesarios para su funcionamiento.

El microcontrolador Arduino se encarga de recibir datos desde una computadora a través de un puerto USB y enviar un vector de control al driver de lazo cerrado Emm42. Este driver, a su vez, interpreta los datos y ajusta los motores a paso para que se muevan a los ángulos especificados.

Además, el diagrama muestra las conexiones de los puertos de comunicación, así como el sistema de alimentación de los motores a paso y del propio Arduino. Estos componentes fueron seleccionados cuidadosamente para garantizar un rendimiento óptimo de los motores y una operación eficiente y sencilla del sistema.

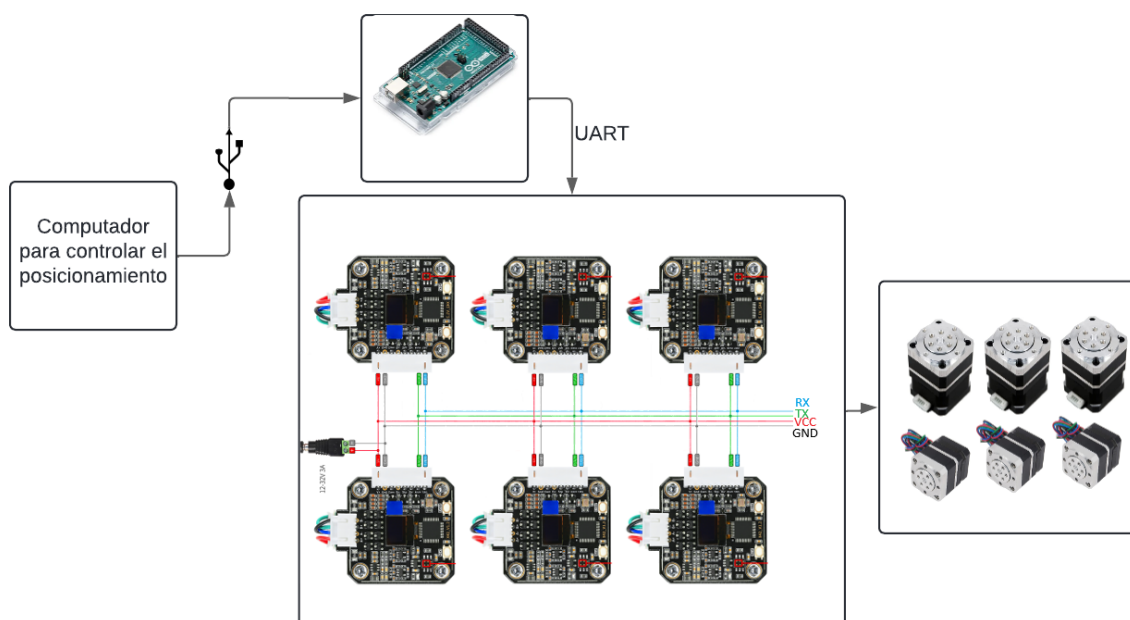


Figura 3.6: Diagrama de bloques del sistema robótico. (autores)

# Capítulo 4

## Cinemática

En el siguiente capítulo se detalla qué es la cinemática de un robot y se describen los cálculos realizados para el brazo robótico, así como cómo estos cálculos facilitan el desplazamiento del robot de un punto a otro.

### 4.1. Cinemática

La cinemática se centra en analizar el movimiento del robot respecto a un sistema de coordenadas, sin tener en cuenta las fuerzas que influyen en él. Esta disciplina se dedica en la explicación detallada del desplazamiento del robot a lo largo del tiempo.

En el campo de la cinemática robótica, se tratan dos problemas fundamentales. El primero, conocido como problema de cinemática directa, calcular la ubicación y orientación del extremo del robot en relación con un sistema de coordenadas fijo. El segundo, denominado problema de cinemática inversa, se refiere a encontrar la configuración necesaria para que adopte una posición y orientación específicas del extremo [29].

Para abordar el problema de cinemática directa, uno de los métodos más frecuentemente empleados es el de Denavit-Hartenberg. Este método ofrece un procedimiento metódico para detallar y describir la geometría espacial de los elementos en una cadena cinemática, especialmente en el caso de un robot, en relación con un sistema de coordenadas fijo.

### 4.1.1. Denavit-Hartenberg (D-H)

El método Denavit-Hartenberg (D-H) ofrece un enfoque organizado y eficiente para describir la estructura cinemática de cadenas articuladas, como los brazos robóticos. Este procedimiento emplea sistemas de coordenadas asignados a cada segmento, facilitando la definición de relaciones precisas y coherentes entre los diversos componentes del robot [29].

Para aplicar el método D-H, se utilizan cuatro parámetros básicos para cada articulación:

- $\theta_i$ : Ángulo de rotación alrededor del eje común entre dos eslabones.
- $d_i$ : Desplazamiento a lo largo del eje común (generalmente, la distancia entre dos articulaciones).
- $a_i$ : Longitud del eslabón común.
- $\alpha_i$ : Ángulo de rotación con respecto al eje común entre dos eslabones.

Estos parámetros definen completamente la geometría espacial y la disposición relativa de cada eslabón con respecto al siguiente en la cadena. La simplicidad y la claridad del método D-H lo hacen ideal para la modelización y análisis cinemático de robots, ya que reduce la complejidad de las ecuaciones y facilita la implementación práctica en entornos de desarrollo.

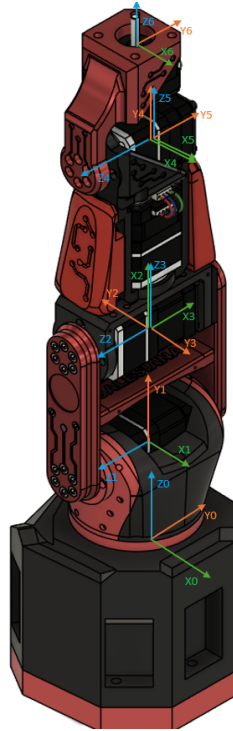


Figura 4.1: Ejes del brazo robótico mediante el algoritmo de Denavit-Hartenberg (autores)

En la tabla 4.1 se muestra ilustra cómo se aplican los parámetros D-H para una cadena de seis articulaciones, de nuestro brazo robótico, demostrando la estructura ordenada y sistemática que proporciona este método:

Tabla 4.1: Parámetros de Denavit-Hartenberg de un brazo robótico de 6 grados de libertad.

Articulación	$\theta_i$	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i$
1	$q_1$	$l_1$	0	$\frac{\pi}{2}$
2	$\frac{\pi}{2} + q_2$	0	$l_2$	0
3	$\frac{\pi}{2} + q_3$	0	0	$\frac{\pi}{2}$
4	$q_4$	$l_3$	0	$\frac{\pi}{2}$
5	$q_5$	0	0	$\frac{\pi}{2}$
6	$q_6$	$l_4$	0	0

Para derivar las ecuaciones de posición en la cinemática directa, se comienza calculando la matriz de transformación.

${}^0A_6$  como se muestra en la Ec. (4.1).

$$T(n, o, a) = {}^0A_6 \quad (4.1)$$

$${}^0A_6 = {}^0A_1 \cdot {}^1A_2 \cdot {}^2A_3 \cdot {}^3A_4 \cdot {}^4A_5 \cdot {}^5A_6 \quad (4.2)$$

Donde:

$${}^0A_1 = R(Z, q_1) \cdot T(Z, l_1) \cdot R(X, +\frac{\pi}{2}) \quad (4.3)$$

$${}^1A_2 = R(Z, q_2 + \frac{\pi}{2}) \cdot T(X, l_2) \quad (4.4)$$

$${}^2A_3 = R(Z, q_3 + \frac{\pi}{2}) \cdot R(X, \frac{\pi}{2}) \quad (4.5)$$

$${}^3A_4 = R(Z, q_4) \cdot T(Z, l_3) \cdot R(X, \frac{\pi}{2}) \quad (4.6)$$

$${}^4A_5 = R(Z, q_5) \cdot R(X, \frac{\pi}{2}) \quad (4.7)$$

$${}^5A_6 = R(Z, q_6) \cdot T(Z, l_4) \quad (4.8)$$

Luego, se realiza la multiplicación de las matrices de rotación y traslación obtenidas

La resolución de la primera matriz de transformación homogénea es:

$$R(Z, q_1) = \begin{bmatrix} \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 & 0 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$T(Z, l_1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$



$$R(X, \frac{\pi}{2}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$${}^0A_1 = R(Z, q_1) \cdot T(Z, l_1) \cdot R(X, \frac{\pi}{2})$$

$$= \begin{bmatrix} \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 & 0 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos q_1 & 0 & \sin q_1 & l_1 \sin q_1 \\ \sin q_1 & 0 & -\cos q_1 & -l_1 \cos q_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

La resolución de la segunda matriz de transformación homogénea es:

$$R(Z, q_2 + \frac{\pi}{2}) = \begin{bmatrix} \cos(q_2 + \frac{\pi}{2}) & -\sin(q_2 + \frac{\pi}{2}) & 0 & 0 \\ \sin(q_2 + \frac{\pi}{2}) & \cos(q_2 + \frac{\pi}{2}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$$T(X, l_2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

$${}^1A_2 = R(Z, q_2 + \frac{\pi}{2}) \cdot T(X, l_2) \quad (4.16)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(q_2 + \frac{\pi}{2}) & -\sin(q_2 + \frac{\pi}{2}) & 0 & 0 \\ \sin(q_2 + \frac{\pi}{2}) & \cos(q_2 + \frac{\pi}{2}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(q_2 + \frac{\pi}{2}) & -\sin(q_2 + \frac{\pi}{2}) & 0 & l_2 \cos(q_2 + \frac{\pi}{2}) \\ \sin(q_2 + \frac{\pi}{2}) & \cos(q_2 + \frac{\pi}{2}) & 0 & l_2 \sin(q_2 + \frac{\pi}{2}) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

La resolución de la tercer matriz de transformación homogénea es:

$$R(Z, q_3 + \frac{\pi}{2}) = \begin{bmatrix} \cos(q_3 + \frac{\pi}{2}) & -\sin(q_3 + \frac{\pi}{2}) & 0 & 0 \\ \sin(q_3 + \frac{\pi}{2}) & \cos(q_3 + \frac{\pi}{2}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

$$R(X, \frac{\pi}{2}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

$${}^2A_3 = R(Z, q_3 + \frac{\pi}{2}) \cdot R(X, \frac{\pi}{2}) \quad (4.21)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(q_3 + \frac{\pi}{2}) & -\sin(q_3 + \frac{\pi}{2}) & 0 & 0 \\ \sin(q_3 + \frac{\pi}{2}) & \cos(q_3 + \frac{\pi}{2}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(q_3 + \frac{\pi}{2}) & 0 & \sin(q_3 + \frac{\pi}{2}) & 0 \\ \sin(q_3 + \frac{\pi}{2}) & 0 & -\cos(q_3 + \frac{\pi}{2}) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

La resolución de la cuarta matriz de transformación homogénea es:

$$R(Z, q_4) = \begin{bmatrix} \cos q_4 & -\sin q_4 & 0 & 0 \\ \sin q_4 & \cos q_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

$$T(Z, l_3) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

$$R(X, \frac{\pi}{2}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

$${}^3A_4 = R(Z, q_4) \cdot T(Z, l_3) \cdot R(X, \frac{\pi}{2}) \quad (4.27)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos q_4 & -\sin q_4 & 0 & 0 \\ \sin q_4 & \cos q_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos q_4 & 0 & \sin q_4 & l_3 \sin q_4 \\ \sin q_4 & 0 & -\cos q_4 & -l_3 \cos q_4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

La resolución de la quinta matriz de transformación homogénea es:

$$R(Z, q_5) = \begin{bmatrix} \cos q_5 & -\sin q_5 & 0 & 0 \\ \sin q_5 & \cos q_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

$$R(X, \frac{\pi}{2}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

$${}^4A_5 = R(Z, q_5) \cdot R(X, \frac{\pi}{2}) \quad (4.32)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos q_5 & -\sin q_5 & 0 & 0 \\ \sin q_5 & \cos q_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos q_5 & 0 & \sin q_5 & 0 \\ \sin q_5 & 0 & -\cos q_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

La resolución de la sexta matriz de transformación homogénea es:

$$R(Z, q_6) = \begin{bmatrix} \cos q_6 & -\sin q_6 & 0 & 0 \\ \sin q_6 & \cos q_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

$$T(Z, l_4) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

$${}^5A_6 = R(Z, q_6) \cdot T(Z, l_4) \quad (4.37)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos q_6 & -\sin q_6 & 0 & 0 \\ \sin q_6 & \cos q_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos q_6 & -\sin q_6 & 0 & 0 \\ \sin q_6 & \cos q_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

Para encontrar la matriz de transformación  ${}^0A_6$ , se debe realizar una multiplicación secuencial de las matrices de transformación individuales que corresponden cada uno de los eslabones del sistema. Estas matrices,  ${}^0A_1$ ,  ${}^1A_2$ ,  ${}^2A_3$ ,  ${}^3A_4$ ,  ${}^4A_5$  y  ${}^5A_6$ , describen cómo se transforma el sistema de coordenadas de un enlace al siguiente.

Al multiplicar todas estas matrices, se consigue una única matriz de transformación que define la posición y orientación final del sexto segmento en relación con el sistema de coordenadas inicial. Este proceso de multiplicación es esencial en la cinemática de robots, ya que permite determinar la posición y orientación de cualquier parte del robot en el espacio, considerando todas las juntas y enlaces intermedios.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \left( {}^0A_1 \cdot {}^1A_2 \cdot {}^2A_3 \cdot {}^3A_4 \cdot {}^4A_5 \cdot {}^5A_6 \right) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

### 4.1.2. Cinemática inversa

La cinemática inversa es un desafío esencial en el diseño y control de robots manipuladores. A diferencia de la cinemática directa, que se centra en determinar la ubicación y orientación del extremo del robot en función de los ángulos de las articulaciones, la cinemática inversa trata el problema opuesto: determinar las configuraciones de los ángulos de las articulaciones requeridos para que el extremo del robot llegue a una posición y orientación determinadas [30].

Este problema es vital en diversas aplicaciones robóticas, como la manipulación de objetos, la soldadura, la pintura y la cirugía, donde se requiere que el extremo del robot (habitualmente una herramienta o un efector final) se desplace a ubicaciones precisas.

La cinemática inversa presenta varios desafíos, entre ellos:

- **Existencia de Soluciones:** No siempre existe una solución para cada una de las posiciones y orientaciones deseadas. El alcance y sus limitaciones físicas pueden restringir las posiciones alcanzables.
- **Múltiples Soluciones:** En muchos casos, puede haber múltiples configuraciones de los eslabones que logren la misma posición y orientación para el punto final. Esto puede complicar la elección de la mejor configuración basada en criterios adicionales como la eficiencia o la seguridad.
- **Singularidades:** Las singularidades son configuraciones en las que el robot pierde uno o más grados de libertad, lo que puede resultar en un comportamiento indeseado o incontrolable del robot. Estas singularidades deben ser evitadas o gestionadas cuidadosamente en el diseño y control del robot.

En el caso de este robot para el cálculo de posición de la cinemática inversa se requiere el análisis solamente con los 3 primeros grados de libertad, donde a partir de la ecuación 4.40:

$$\begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix}^T = \left( {}^0A_1 \cdot {}^1A_2 \cdot {}^2A_3 \right) \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (4.40)$$

Ahora aplicando la inversa a la matriz homogénea de  ${}^0A_1$  y le pasamos a la izquierda de la ecuación vamos a obtener la siguiente ecuación:

$$\left({}^0A_1\right)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix}^T = \left({}^1A_2 \cdot {}^2A_3\right) \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (4.41)$$

Reemplazando las longitudes de  $L_1, L_2$  y  $L_3$  en la ecuación 4.40:

$$\begin{bmatrix} x \cos(q_1) + y \sin(q_1) \\ z - 170 \\ -y \cos(q_1) + x \sin(q_1) \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -215 \sin(q_2 + q_3) - 90 \sin(q_2) \\ 215 \cos(q_2 + q_3) + 90 \cos(q_2) \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

A partir de la ecuación 4.42, es posible descomponer la igualdad de los dos vectores en diferentes ecuaciones, igualando cada uno de sus términos respectivos.

$$-y \cos(q_1) + x \sin(q_1) = 0 \quad (4.43)$$

Podemos despejar  $q_1$  de la ecuación 4.43

$$\frac{y}{x} = \frac{\cos(q_1)}{\sin(q_1)} \quad (4.44)$$

$$\tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) = q_1 \quad (4.45)$$

Para encontrar  $q_2$  y  $q_3$  nos ayudaremos de un software como MATLAB:

$$x \cos(q_1) + y \sin(q_1) = -215 \sin(q_2 + q_3) - 90 \sin(q_2) \quad (4.46)$$

$$z - 170 = 215 \cos(q_2 + q_3) + 90 \cos(q_2) \quad (4.47)$$

Para el resultado usamos el software de MATLAB que nos da como resultado  $q_2$  y  $q_3$  las cuales van a tener dos resultados posibles:

$$q_2 = -2 \operatorname{atan} \left( \frac{180A - \sqrt{-(A^2 + (z - 170)^2 - 15625)(A^2 + (z - 170)^2 - 93025)}}{A^2 + (z - 170)^2 + 180(z - 170) - 38125} \right)$$

donde:

$$A = x \cos(q_1) + y \sin(q_1) \quad (4.48)$$

$$q_2 = -2 \operatorname{atan} \left( \frac{180A + \sqrt{-(A^2 + (z - 170)^2 - 15625)(A^2 + (z - 170)^2 - 93025)}}{A^2 + (z - 170)^2 + 180(z - 170) - 38125} \right)$$

donde:

$$A = x \cos(q_1) + y \sin(q_1) \quad (4.49)$$

$$q_3 = -2 \operatorname{atan} \left( \frac{\sqrt{-(A)((x \cos(q_1) + y \sin(q_1))^2 + (z - 170)^2 - 93025)}}{(x \cos(q_1) + y \sin(q_1))^2 + (z - 170)^2 - 15625} \right) \quad (4.50)$$

donde:

$$A = x \cos(q_1) + y \sin(q_1))^2 + (z - 170)^2 - 15625$$

$$q_3 = 2 \operatorname{atan} \left( \frac{\sqrt{-(A)((x \cos(q_1) + y \sin(q_1))^2 + (z - 170)^2 - 93025)}}{(x \cos(q_1) + y \sin(q_1))^2 + (z - 170)^2 - 15625} \right) \quad (4.51)$$

donde:

$$A = x \cos(q_1) + y \sin(q_1))^2 + (z - 170)^2 - 15625$$

Una vez completado el análisis de la cinemática inversa, es crucial describir el método para que el robot se desplace de una ubicación 1 a una ubicación 2. No es suficiente con asignar una velocidad y esperar que el robot se mueva en cualquier dirección.

La falta de una trayectoria definida puede, en el peor de los casos, dañar la parte electrónica del motor. Por lo tanto, es necesario realizar cálculos precisos para asegurar que el robot se desplace de un punto a otro sin causar daños a sus motores.



### 4.1.3. Trayectoria punto a punto

El control por trayectorias implica la planificación de un camino específico que el robot debe seguir. Esto no solo garantiza movimientos suaves y eficientes, sino que también protege los componentes mecánicos y electrónicos del sistema. Mediante algoritmos de planificación de trayectorias, es posible determinar las velocidades y aceleraciones adecuadas para cada articulación del robot, minimizando el riesgo de daños y optimizando el rendimiento.

La razón para generar estas trayectorias radica en los impulsos que se generan al cambiar de una velocidad a otra instantáneamente. Para evitar estos impulsos  $\delta(t)$ , se busca una planificación de trayectorias utilizando las articulaciones  $q_1, q_2, q_3$ .

En este contexto, se elige una función cúbica ya que nos ayuda a eliminar esos impulsos en la salida.

#### Proceso de Obtención de las Ecuaciones

La generación de trayectorias en robótica es fundamental para definir el movimiento de un robot desde una posición inicial hasta una posición final en un intervalo de tiempo específico. Una de las formas comunes de generar trayectorias es mediante polinomios cúbicos, los cuales aseguran suavidad y evitan la generación de impulsos en la posición, velocidad, aceleración y jerk.

Para ajustar la ecuación de trayectoria punto a punto, comenzamos con las condiciones iniciales y finales tanto en posición como en velocidad:

$$q(t_{\text{inicial}}) = q_{\text{inicial}} \quad (4.52)$$

$$q(t_{\text{final}}) = q_{\text{final}} \quad (4.53)$$

$$\dot{q}(t_{\text{inicial}}) = 0 \quad (4.54)$$

$$\dot{q}(t_{\text{final}}) = 0 \quad (4.55)$$

Donde  $q(t)$  representa la posición en función del tiempo  $t$  y  $\dot{q}(t)$  la velocidad en función del tiempo  $t$ .

La forma general de una trayectoria cúbica es:

$$q(t) = at^3 + bt^2 + ct + d \quad (4.56)$$

Y su derivada, que representa la velocidad, es:

$$\dot{q}(t) = 3at^2 + 2bt + c \quad (4.57)$$

Para determinar los coeficientes  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$ , utilizamos las condiciones iniciales y finales. Suponiendo que  $t_{\text{inicial}} = 0$ :

$$q(0) = q_{\text{inicial}} \implies d = q_{\text{inicial}} \quad (4.58)$$

$$q(t_{\text{final}}) = q_{\text{final}} \implies q_{\text{final}} = at_{\text{final}}^3 + bt_{\text{final}}^2 + ct_{\text{final}} + d \quad (4.59)$$

Dado que  $\dot{q}(t_{\text{inicial}}) = 0$ :

$$\dot{q}(0) = 0 \implies c = 0 \quad (4.60)$$

Y finalmente, considerando  $\dot{q}(t_{\text{final}}) = 0$ :

$$\dot{q}(t_{\text{final}}) = 0 \implies 0 = 3at_{\text{final}}^2 + 2bt_{\text{final}} \quad (4.61)$$

De esta ecuación, podemos despejar  $b$ :

$$b = -\frac{3at_{\text{final}}^2}{2t_{\text{final}}} = -\frac{3at_{\text{final}}}{2} \quad (4.62)$$

98Sustituyendo  $c$  y  $d$  en la ecuación de la posición final:

$$q_{\text{final}} = at_{\text{final}}^3 + bt_{\text{final}}^2 + q_{\text{inicial}} \quad (4.63)$$

Resolviendo este sistema, obtenemos:

$$a = -\frac{2(q_{\text{final}} - q_{\text{inicial}})}{t_{\text{final}}^3} \quad (4.64)$$

$$b = \frac{3(q_{\text{final}} - q_{\text{inicial}})}{t_{\text{final}}^2} \quad (4.65)$$

Finalmente, los coeficientes  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$  permiten definir la trayectoria cúbica que cumple con las condiciones iniciales y finales en posición y velocidad. Esta metodología asegura que el movimiento del robot sea suave y preciso.

**Algoritmo 1** Pseudocódigo del Programa de Arduino

---

```

1: Incluir la biblioteca de matemáticas.
2: Declarar variables globales:
3:   float X, Y, Z
4:   float Q1, Q2, Q3
5:   double q1_inicial = 0
6:   double q2_inicial = 0
7:   double q3_inicial = 0
8:   int Vel_M = 50
9:   int Acc_M = 0
10:  double q1, q2, q3
11:  int Sentido_q1, Sentido_q2, Sentido_q3
12:  unsigned long tiempo_inicio
13:  double tiempo_movimiento = 10
14: Inicializar la comunicación serial a 115200 baud.
15: while true do
16:   if hay datos disponibles en el puerto serial then
17:     Leer la entrada del puerto serial hasta un salto de línea.
18:     Verificar si hay exactamente dos comas en la cadena de entrada.
19:     if la entrada es válida then
20:       Convertir las partes en números:
21:         X = parseFloat(inputString[0])
22:         Y = parseFloat(inputString[1])
23:         Z = parseFloat(inputString[2])
24:       Calcular la distancia final:
25:          $distanciaFinal = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$ 
26:       if la distancia final es menor o igual a 475 then
27:         Llamar a la función de cinemática inversa:
28:         cinematicaInversa(X, Y, Z, q1, q2, q3)
29:         Verificar los ángulos:
30:          $-90 \leq q1 \leq 90$ 
31:          $-100 \leq q2 \leq 110$ 
32:          $-150 \leq q3 \leq 150$ 
33:         Determinar el sentido de los ángulos:
34:         Sentido_q1 = signo(q1)
35:         Sentido_q2 = signo(q2)
36:         Sentido_q3 = signo(q3)
37:         Llamar a la función punto a punto:
38:         Punto_a_punto(q1_inicial, q2_inicial, q3_inicial, q1, q2, q3, t_inicio, t_movimiento)

39:       Actualizar los ángulos iniciales:
40:         q1_inicial = q1
41:         q2_inicial = q2
42:         q3_inicial = q3
43:     end if
44:   end if
45: end if
46: end while=0

```

---

---

**Algoritmo 2** Funciones adicionales
 

---

1: **Función de verificación numérica:**

2: Verificar si una cadena es un número.

3: **Función de control de posición:**

4: Enviar comando de control de posición al motor.

5: **Función de cinemática inversa:**6: Calcular  $q_1, q_2, q_3$  a partir de  $x, y, z$ :

7:  $q_1 = \arctan\left(\frac{y}{x}\right)$

8:  $A = x \cdot \cos(q_1) + y \cdot \sin(q_1)$

9:  $B = z - 170$

10:  $q_2 = -2 \cdot \arctan\left(\frac{180 \cdot A + 15625 \cdot \sqrt{-(A^2 + B^2 - 15625) \cdot (A^2 + B^2 - 93025)}}{(A^2 + B^2 - 15625) - A^2 \cdot \sqrt{-(A^2 + B^2 - 15625)}}\right)$

11:  $q_3 = 2 \cdot \arctan\left(\frac{\sqrt{-(A^2 + B^2 - 15625) \cdot (A^2 + B^2 - 93025)}}{(A^2 + B^2 - 15625)}\right)$

12: Convertir a grados:

13:  $q_1 = q_1 \cdot \frac{180,0}{\pi}$

14:  $q_2 = q_2 \cdot \frac{180,0}{\pi}$

15:  $q_3 = q_3 \cdot \frac{180,0}{\pi}$

16: **Función de interpolación cúbica punto a punto:**

17: Calcular los coeficientes de interpolación cúbica:

18:  $a_1 = -\frac{2 \cdot (q_{1\text{final}} - q_{1\text{inicial}})}{\text{tiempo\_final}^3}$

19:  $b_1 = \frac{3 \cdot (q_{1\text{final}} - q_{1\text{inicial}})}{\text{tiempo\_final}^2}$

20:  $d_1 = q_{1\text{inicial}}$

21:  $a_2 = -\frac{2 \cdot (q_{2\text{final}} - q_{2\text{inicial}})}{\text{tiempo\_final}^3}$

22:  $b_2 = \frac{3 \cdot (q_{2\text{final}} - q_{2\text{inicial}})}{\text{tiempo\_final}^2}$

23:  $d_2 = q_{2\text{inicial}}$

24:  $a_3 = -\frac{2 \cdot (q_{3\text{final}} - q_{3\text{inicial}})}{\text{tiempo\_final}^3}$

25:  $b_3 = \frac{3 \cdot (q_{3\text{final}} - q_{3\text{inicial}})}{\text{tiempo\_final}^2}$

26:  $d_3 = q_{3\text{inicial}}$

27: Calcular los ángulos actuales:

28:  $q_{1\text{actual}} = a_1 \cdot t^3 + b_1 \cdot t^2 + d_1$

29:

30:  $q_{2\text{actual}} = a_2 \cdot t^3 + b_2 \cdot t^2 + d_2$

31:  $q_{3\text{actual}} = a_3 \cdot t^3 + b_3 \cdot t^2 + d_3$

32: Actualizar la posición del motor para  $q_{1\text{actual}}, q_{2\text{actual}}, q_{3\text{actual}}$ 

=0

# Capítulo 5

## Resultados y Conclusiones

En el presente capítulo se explica los resultados obtenidos de las diferentes pruebas realizadas y las conclusiones alcanzadas. Se demostrará cómo el robot sigue una trayectoria definida por los puntos establecidos por nosotros.

### 5.1. Pruebas de Software y movimiento de los motores a paso

Para evaluar el driver Emm42, se procedió a calibrar todos los motores paso a paso utilizando el correspondiente driver Emm42. Este driver ofrece una opción de calibración, como se ilustra en la figura siguiente.

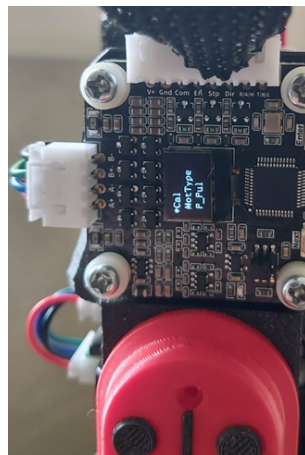


Figura 5.1: Calibración de los motores a paso (autores)

Para asegurar el correcto funcionamiento del brazo robótico, se realizó una prueba de los motores paso a paso junto con su driver correspondiente, el "Driver Emm42". Este driver permite enviar comandos desde el Arduino para ajustar los ángulos de los motores paso a paso. Las pruebas se llevaron a cabo utilizando un Arduino Mega, que, a través de sus puertos UART RX2 y TX2, transmitió los datos necesarios, incluyendo el ID, velocidad, aceleración y ciclos de reloj.

En esta etapa, se muestra cómo el motor pasa de 0° a 90°. Utilizando el IDE de Arduino, enviamos el vector de datos correspondiente para que, al recibir esta información, el motor se mueva hasta los 90° deseados, como se ilustra a continuación:

Para evaluar el movimiento y la precisión de los motores, se utilizó un reloj comparador para medir su exactitud. Se realizaron pruebas de repetibilidad para verificar que el motor alcanzara el mismo punto de destino en cada repetición y se determinó el margen de error de los motores.

En la tabla 5.1, se presentan los datos obtenidos de las 50 iteraciones. El error de cada iteración fue calculado utilizando la siguiente fórmula:

$$E = |D - D_{\text{ref}}|$$

donde  $E$  es el error,  $D$  es la desviación medida y  $D_{\text{ref}}$  es la desviación de referencia, que en este caso es 0.03 mm.



Figura 5.2: Precisión del brazo robótico primera iteración (autores)



Figura 5.3: Precisión del brazo robótico última iteración (autores)



Tabla 5.1: Resultados de las pruebas de precisión

Iteración	Desviación medida (mm)	Error (mm)
1	0.03	0.00
2	0.04	0.01
3	0.02	0.01
4	0.03	0.00
5	0.05	0.02
6	0.03	0.00
7	0.01	0.02
8	0.04	0.01
9	0.03	0.00
10	0.05	0.02
11	0.02	0.01
12	0.03	0.00
13	0.04	0.01
14	0.01	0.02
15	0.03	0.00
16	0.05	0.02
17	0.02	0.01
18	0.04	0.01
19	0.03	0.00
20	0.05	0.02
21	0.03	0.00
22	0.01	0.02
23	0.04	0.01
24	0.03	0.00
25	0.02	0.01
26	0.05	0.02
27	0.03	0.00
28	0.04	0.01
29	0.01	0.02
30	0.03	0.00
31	0.02	0.01
32	0.04	0.01
33	0.05	0.02
34	0.03	0.00
35	0.01	0.02
36	0.04	0.01
37	0.02	0.01
38	0.03	0.00
39	0.05	0.02
40	0.04	0.01
41	0.01	0.02
42	0.03	0.00
43	0.02	0.01
44	0.05	0.02
45	0.03	0.00

## 5.2. Trayectoria punto a punto

A continuación, se presentan las gráficas de trayectorias punto a punto obtenidas tanto de la simulación en Simulink como de la implementación en Arduino.

### 5.2.1. Trayectorias

- $(0,0,475) \rightarrow (100,0,300)$
- $(100,0,300) \rightarrow (100,100,100)$
- $(100,100,100) \rightarrow (100,-100,300)$
- $(100,100,100) \rightarrow (0,0,475)$

### 5.2.2. Simulación en Simulink

Primero, se muestran las cuatro gráficas generadas por Simulink, donde se ha implementado la cinemática inversa para calcular las trayectorias de los puntos especificados. Estas gráficas representan las trayectorias teóricas que el sistema debería seguir.

- La gráfica de la primera trayectoria, de  $(0,0,475)$  a  $(100,0,300)$ , muestra un movimiento suave y continuo, evitando movimientos bruscos.

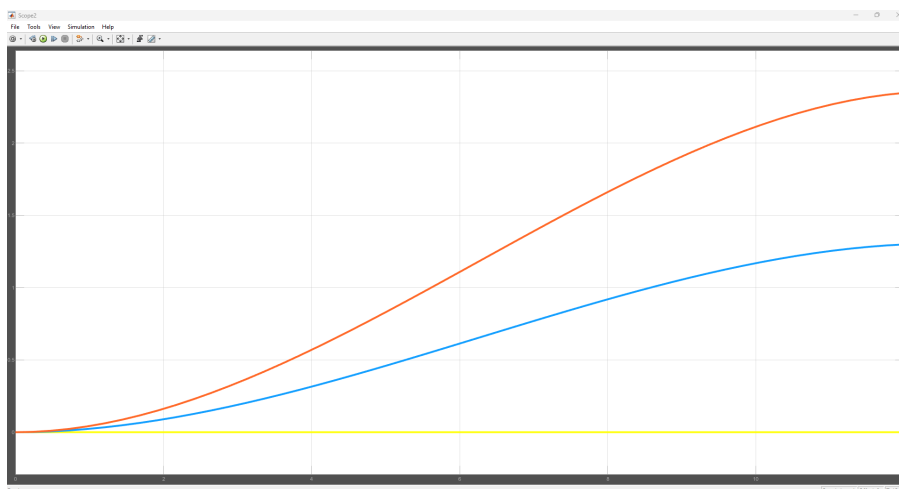


Figura 5.4: Gráfica de posición vs tiempo - Primera trayectoria

- La gráfica de la segunda trayectoria, de  $(100,0,300)$  a  $(100,100,100)$ , describe un cambio de dirección en el plano Y-Z, mostrando la capacidad del sistema para manejar variaciones en múltiples ejes.

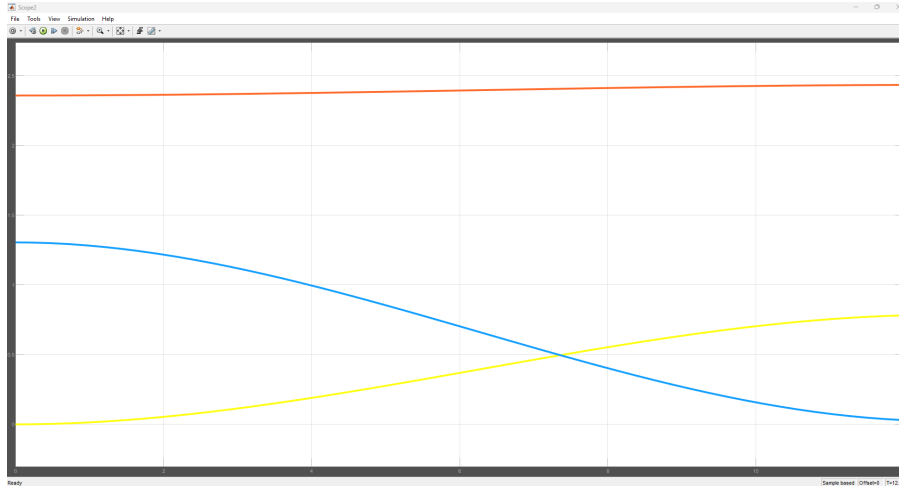


Figura 5.5: Gráfica de posición vs tiempo - Segunda trayectoria

- La gráfica de la tercera trayectoria, de  $(100,100,100)$  a  $(100,-100,300)$ , presenta un movimiento inverso en el eje Y, ilustrando cómo el sistema se adapta a cambios significativos en la trayectoria.

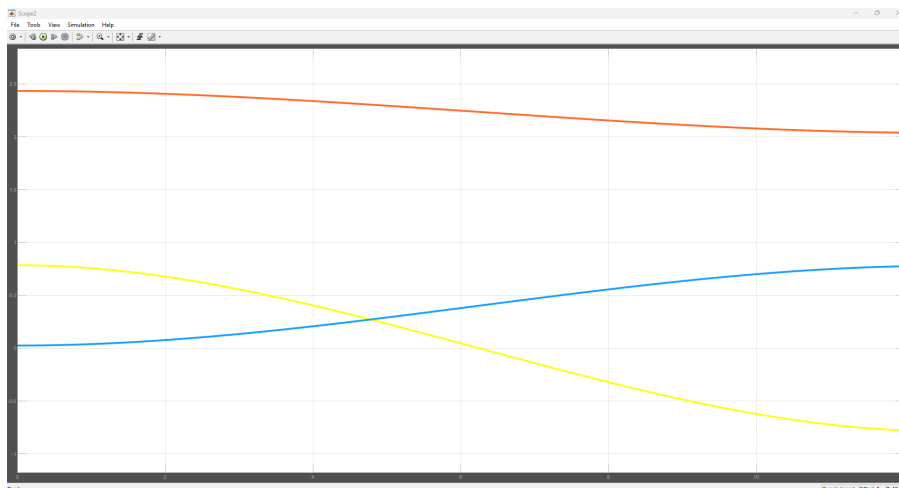


Figura 5.6: Gráfica de posición vs tiempo - Tercera trayectoria

- La gráfica de la cuarta trayectoria, de  $(100,100,100)$  a  $(0,0,475)$ , muestra el retorno al punto inicial, asegurando que el sistema puede volver a su posición original con precisión.

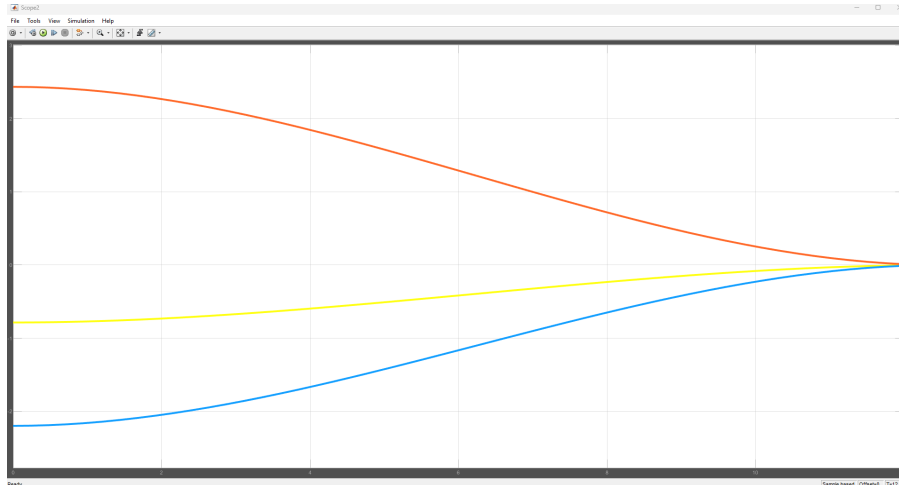


Figura 5.7: Gráfica de posición vs tiempo - Cuarta trayectoria

### 5.2.3. Implementación en Arduino

A continuación, se presentan las mismas cuatro gráficas, pero en este caso, se muestran las posiciones angulares enviadas desde Arduino a los motores. Estos datos representan la implementación práctica de las trayectorias calculadas en Simulink.

- La gráfica de la primera trayectoria muestra que las posiciones angulares enviadas a los motores siguen de cerca la trayectoria teórica, con una mínima desviación.

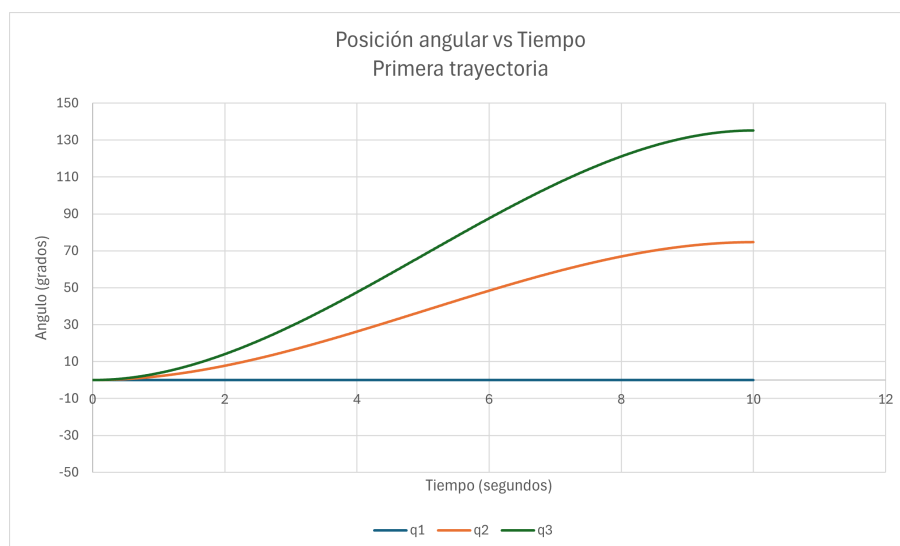


Figura 5.8: Gráfica de posición vs tiempo - Primera trayectoria

- La gráfica de la segunda trayectoria confirma la capacidad del sistema para

reproducir cambios de dirección complejos con alta precisión.

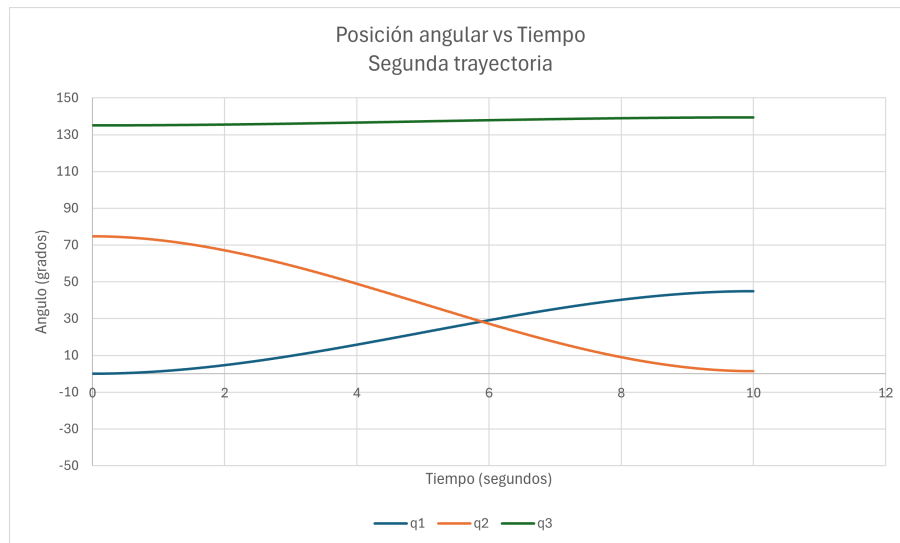


Figura 5.9: Gráfica de posición vs tiempo - Segunda trayectoria

- La gráfica de la tercera trayectoria evidencia la habilidad del sistema para manejar trayectorias inversas sin problemas.

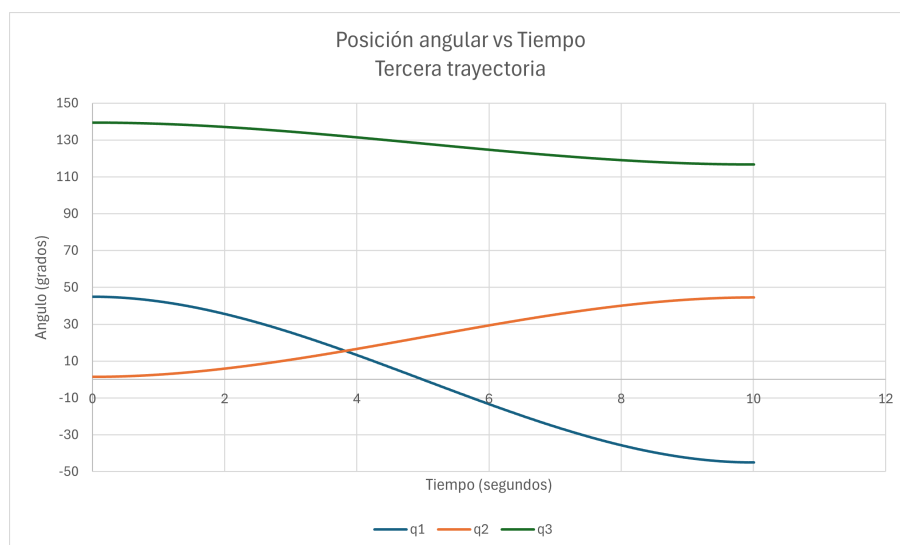


Figura 5.10: Gráfica de posición vs tiempo - Tercera trayectoria

- La gráfica de la cuarta trayectoria muestra la capacidad del sistema para regresar al punto inicial, validando la exactitud de la implementación práctica.

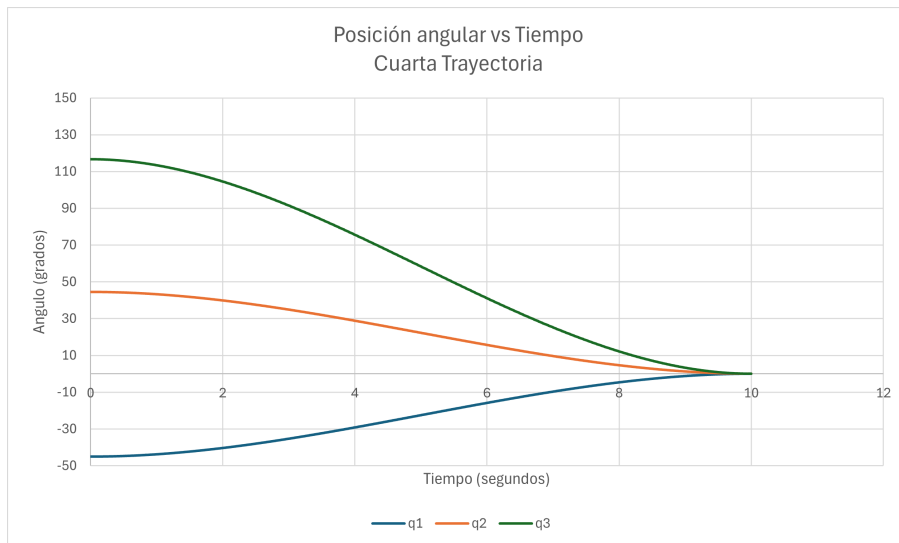


Figura 5.11: Gráfica de posición vs tiempo - Cuarta trayectoria

Como resultado podemos observar el movimiento del brazo robótico como se muestra en la figura 5.12.



Figura 5.12: Brazo robótico final (autores)



Figura 5.13: Brazo robótico final (autores)

#### 5.2.4. Comparación

Al comparar las gráficas obtenidas de la simulación en Simulink con las gráficas de la implementación en Arduino, se puede observar una alta concordancia entre ambas. Esto demuestra que las trayectorias calculadas teóricamente mediante la cinemática inversa en Simulink coinciden con las posiciones angulares enviadas a los motores desde Arduino. La similitud entre las gráficas valida que el modelo teórico ha sido correctamente implementado en el sistema físico, asegurando que el comportamiento del robot en el entorno real sigue las trayectorias deseadas con precisión.

#### 5.2.5. Curvas de Función Cúbica

Las curvas generadas para las trayectorias son de una función cúbica. Este enfoque se elige porque las curvas cúbicas permiten una transición suave entre puntos, evitando cambios bruscos en la velocidad y aceleración que podrían causar estrés en los motores. Al utilizar funciones cúbicas, se asegura que el movimiento del robot sea fluido y continuo, lo que no solo mejora la precisión y la eficiencia del sistema, sino

que también prolonga la vida útil de los motores al reducir el desgaste mecánico.

En resumen, la comparación entre las simulaciones en Simulink y las implementaciones en Arduino confirma que el diseño y la implementación del sistema son coherentes y precisos, garantizando el correcto funcionamiento del robot en aplicaciones prácticas. Las curvas cúbicas utilizadas en las trayectorias juegan un papel crucial al asegurar un movimiento suave y prolongar la vida útil de los componentes del sistema.

### 5.3. Conclusiones

El diseño y la fabricación de los componentes mecánicos del brazo robótico se llevaron a cabo utilizando software CAD, fabricación aditiva y mecanizado CNC. La base del brazo se construyó mediante impresión 3D, mientras que el segundo grado de libertad se fabricó en aluminio utilizando CNC. Esta combinación de métodos de fabricación demostró ser efectiva, ya que las piezas de aluminio mecanizadas en CNC proporcionaron una mayor estabilidad estructural al brazo, evitando la deformación que puede ocurrir con los materiales impresos en 3D. En conclusión, la utilización de piezas CNC de aluminio mejoró significativamente la robustez y precisión del brazo robótico.

Para la regulación precisa de los motores paso a paso en cada articulación, se implementó una plataforma embebida comercial utilizando el controlador Emm42. Este controlador de lazo cerrado se seleccionó debido a sus diversas funciones avanzadas, que incluye la capacidad de corregir errores de posicionamiento en tiempo real, lo cual es crucial para cualquier proyecto que requiera alta precisión. La implementación de este controlador permitió una operación eficiente y exacta del sistema, asegurando que cada movimiento del brazo robótico se ejecutara con la máxima precisión posible.

Se desarrolló e implementó un modelo cinemático para un robot de cinco grados de libertad, centrándose en el estudio de los tres primeros grados de libertad, que son esenciales para las trayectorias y ubicación. Este modelo permitió la simulación detallada de los movimientos y trayectorias del brazo robótico en su área



de trabajo. La simulación en Simulink proporcionó una comprensión clara de cómo debería moverse el brazo, y su implementación en Arduino confirmó que el sistema podía replicar esas trayectorias con alta precisión en el entorno real. En resumen, el modelo cinemático desarrollado resultó ser fundamental para asegurar una operación precisa y eficaz del brazo robótico.

Se llevaron a cabo pruebas de posicionamiento para validar el funcionamiento del sistema, utilizando trayectorias punto a punto. Las simulaciones en Simulink fueron esenciales para definir las trayectorias y movimientos de los primeros tres grados de libertad. Estas trayectorias se implementaron en Arduino, y las gráficas obtenidas mostraron que las posiciones se enviaron de manera continua y precisa entre los puntos. Para evaluar la precisión del brazo robótico, se utilizó un reloj comparador, que permitió medir el error entre las trayectorias simuladas y las reales. Los resultados indicaron que el error era mínimo, validando la alta precisión del sistema.

La combinación de técnicas de fabricación avanzadas, el uso de controladores de lazo cerrado, el desarrollo de un modelo cinemático robusto y la implementación de pruebas de posicionamiento detalladas permitieron la creación de un brazo robótico preciso y eficiente. Las trayectorias generadas mediante funciones cúbicas no solo aseguraron un movimiento suave y continuo, reduciendo el desgaste en los motores, sino que también garantizan la durabilidad y confiabilidad del sistema en aplicaciones prácticas. Este proyecto no solo demuestra la viabilidad de las tecnologías utilizadas, sino que también establece una base sólida para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de la robótica.

# Glosario

**Brazo Robótico Antropomórfico** Brazo robótico diseñado para imitar los movimientos y funciones del brazo humano, utilizando articulaciones que imitan las de los hombros, codos y muñecas..

**Caja Reductora Armónica** Mecanismo de transmisión de alta precisión y relación de reducción, utilizado para reducir la velocidad y aumentar el par de salida en motores..

**Cinemática** Estudio del movimiento de los cuerpos sin considerar las fuerzas que lo producen. En robótica, se refiere al análisis del movimiento de los robots..

**Cinemática Inversa** Técnica utilizada para calcular las posiciones de las articulaciones necesarias para que un robot alcance una posición y orientación específicas..

**Controladores a Lazo Cerrado** Sistemas de control que utilizan retroalimentación para ajustar la operación de un robot y alcanzar la posición deseada con precisión..

**Software CAD** Programas de Diseño Asistido por Ordenador (CAD), utilizado para crear, modificar y optimizar diseños en ingeniería. En robótica, se usa para diseñar piezas y ensamblajes..

**Trayectorias Punto a Punto** Método de control de robots en el cual se define una serie de posiciones intermedias para que el robot las siga, optimizando el recorrido..

# Referencias

- [1] D. Y. Villa, J. A. Villanueva, A. B. Merlo y C. P. Fabian, «Design, Simulation and Control of a 2 DOF Robotic Arm for Correction and Training of Craft Turning,» *2021 IEEE 12th Annual Ubiquitous Computing, Electronics and Mobile Communication Conference, UEMCON 2021*, págs. 736-740, 2021. DOI: 10.1109/UEMCON53757.2021.9666689.
- [2] A. K. Sahoo, B. Brahma y A. Pattanaik, «Design Development of Robotic Arm for Medical Surgery,» *Proceedings of the 2019 2nd International Conference on Power and Embedded Drive Control, ICPEDC 2019*, págs. 105-110, ago. de 2019. DOI: 10.1109/ICPEDC47771.2019.9036490.
- [3] P. P. Sonawanc y G. M. Phade, «Motion Control of Robotic Arm for Micro-Positioning in Industrial Application,» *2018 International Conference On Advances in Communication and Computing Technology, ICACCT 2018*, págs. 553-558, nov. de 2018. DOI: 10.1109/ICACCT.2018.8529429.
- [4] T. T. Tung, N. V. Tinh, D. T. P. Thao y T. V. Minh, «Development of a prototype 6 degree of freedom robot arm,» *Results in Engineering*, vol. 18, pág. 101 049, jun. de 2023, ISSN: 2590-1230. DOI: 10.1016/J.RINENG.2023.101049.
- [5] M. Quispe, C. Castillo, A. Ponce y J. Castro, «Design and Implementation of a Pick and Place System Using a 4 DOF Robotic Arm Integrated into a Longitudinal Horizontal Movement Base,» 2023, ISSN: 2414-6390. DOI: 10.18687/LACCEI2023.1.1.794. dirección: <https://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2023.1.1.794>.
- [6] H. M. Saputra, T. Permadi, C. H. A. Baskoro, N. S. M. Nor, B. Abdussalam y M. Y. Rezaldi, «Effect of IMU Sensor Positioning on 1-DOF Angle Measurement Accuracy for Robotic Charging Station (RoCharg-v1) Manipulator,» *Proceedings - 2023 10th International Conference on Computer, Control, Informatics and its Applications: Exploring the Power of Data: Leveraging Information to Drive Digital Innovation, IC3INA 2023*, págs. 96-101, 2023. DOI: 10.1109/IC3INA60834.2023.10285798.

- [7] Robotnik, *Historia de los Robots y la Robótica*, Accessed: 2024-07-17, 2024. dirección: <https://robotnik.eu/es/historia-de-los-robots-y-la-robotica/>.
- [8] A. Barrientos, J. M. Sierra, T. Bastos, A. Valera y J. C. A. Jardón, *Fundamentos de robótica*. McGraw-Hill, 2014.
- [9] J. Sprovieri, «Next-Gen SCARA Robots,» *Assembly Magazine*, 2024, Accessed: 2024-07-14. dirección: <https://www.assemblymag.com/articles/94230-next-gen-scara-robots>.
- [10] Acrome, *Delta Robot*, Accessed: 2024-07-14, 2024. dirección: <https://acrome.net/product/delta-robot>.
- [11] Semaiq, *Robots Cartesianos: ¿Qué es un Robot Cartesiano?* Accessed: 2024-07-14, 2024. dirección: <https://semaiq.com/robots-cartesianos-que-es-un-robot-cartesiano/>.
- [12] Omron, *Collaborative Robots*, Accessed: 2024-07-14, 2024. dirección: <https://industrial.omron.pt/pt/products/collaborative-robots>.
- [13] Tecnical, *Introducción a los Robots Antropomorfos*, Accessed: 2024-07-14, 2024. dirección: <https://tecnical.biz/actualidad/introduccion-a-los-robots-antropomorfos/>.
- [14] O. Jegede, «The Design and Construction of a Robotic Arm Using an 8051 Microcontroller,» Tesis doct., jun. de 2007.
- [15] CMClift, *S27*, Accedido: 21 de julio de 2024, 2024. dirección: <https://www.cmclift.com/es/productos/s27/>.
- [16] PGFUN Transmission, *Harmonic Drive Reducer with Nema 17 (42mm) Stepper Motor, 1.2 A 1.8 NM Ratio 30:1 Rotary Gear Reducer*, Accessed: 2024-07-25, 2023. dirección: <https://pgfuntransmission.com/product/harmonic-reducer/>.
- [17] TME, *Motor paso a paso: tipos y ejemplos del uso de motores paso a paso*, Accedido: fecha de acceso, Año actual o año de publicación. dirección: <https://www.tme.eu/es/news/library-articles/page/41861/Motor-paso-a-paso-tipos-y-ejemplos-del-uso-de-motores-paso-a-paso/>.
- [18] SKF, *General Bearing Knowledge*, Accessed: 2024-07-25, 2024. dirección: <https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings/principles-of-rolling-bearing-selection/general-bearing-knowledge>.
- [19] McMaster-Carr, *Bolts*, Accessed: 2024-07-25, 2024. dirección: <https://www.mcmaster.com/bolts>.

- [20] I. Gibson, D. Rosen y B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. Springer, 2014.
- [21] H. Bikas, P. Stavropoulos y G. Chryssolouris, «Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 83, págs. 389-405, 2016.
- [22] F. Calignano, D. Manfredi, E. P. Ambrosio et al., «Overview on additive manufacturing technologies,» *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, n.º 4, págs. 593-612, 2017.
- [23] V. Petrovic, J. Vicente Haro Gonzalez, O. Jordá Ferrando, J. Delgado Gordillo, J. Ramón Blasco Puchades y L. Portolés Griñan, «Additive layered manufacturing: sectors of industrial application shown through case studies,» *International Journal of Production Research*, vol. 49, n.º 4, págs. 1061-1079, 2011.
- [24] J.-Y. Lee, J. An y C. K. Chua, «Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials,» *Applied materials today*, vol. 7, págs. 120-133, 2017.
- [25] Prusa Research, *PLA (Ácido poliláctico)*, Accessed: 2024-07-25, 2024. dirección: [https://help.prusa3d.com/es/article/pla\\_2062](https://help.prusa3d.com/es/article/pla_2062).
- [26] Arduino, *Arduino Mega 2560 Rev3*, <https://docs.arduino.cc/hardware/mega-2560/>, Accessed: 2024-07-25.
- [27] Macrobase-tech, *Emm42 Stepper Motor Driver*, Accessed: 2024-07-25, 2024. dirección: <https://github.com/Macrobase-tech/Emm42>.
- [28] T. Instruments, *LM2596 DC-DC Buck Converter*, Accedido: 2024-07-25, 2024. dirección: <https://www.ti.com/product/LM2596>.
- [29] R. M. Colorado, *Cinemática y dinámica de robots manipuladores*. Alpha Editorial, 2016.
- [30] Unity3DAnimation, *Overview of Inverse Kinematics*, Accedido: 22 de julio de 2024, 2020. dirección: <https://medium.com/unity3danimation/overview-of-inverse-kinematics-9769a43ba956>.