



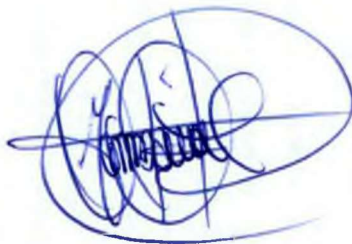
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE MECATRÓNICA

**REPOTENCIACIÓN DE UN ROBOT DE 4 GRADOS DE LIBERTAD
MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
CONTROL CON INTERFAZ HMI PARA LA MANIPULACIÓN DE
OBJETOS**

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

AUTORES: Alejandro Javier Hidalgo Suárez
Gabriel Steven Vilema Villa
TUTOR: Tomás Santiago Gavilánez Gamboa

Guayaquil - Ecuador
2025



27/02/26

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, **Alejandro Javier Hidalgo Suárez** con documento de identificación N° **2000114856** y **Gabriel Steven Vilema Villa** con documento de identificación N° **0952521672** 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.

Guayaquil, 12 de febrero del año 2026

Atentamente,



Alejandro Javier Hidalgo Suárez
2000114856



Gabriel Steven Vilema Villa
0952521672

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

Nosotros, **Alejandro Javier Hidalgo Suárez** con documento de identificación N° **2000114856** y **Gabriel Steven Vilema Villa** con documento de identificación N° **0952521672** expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del **Dispositivo Tecnológico: REPOTENCIACIÓN DE UN ROBOT DE 4 GRADOS DE LIBERTAD MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL CON INTERFAZ HMI PARA LA MANIPULACIÓN DE OBJETOS**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Guayaquil, 12 de febrero del año 2026

Atentamente,



Alejandro Javier Hidalgo Suárez
2000114856



Gabriel Steven Vilema Villa
0952521672

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Tomás Santiago Gavilánez Gamboa**, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **REPOTENCIACIÓN DE UN ROBOT DE 4 GRADOS DE LIBERTAD MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL CON INTERFAZ HMI PARA LA MANIPULACIÓN DE OBJETOS**, realizado por **Alejandro Javier Hidalgo Suárez** con documento de identificación N° **2000114856** y **Gabriel Steven Vilema Villa** con documento de identificación N° **0952521672**, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción **Dispositivo Tecnológico** que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 18 de febrero del año 2026

Atentamente,



Ing. Tomás Santiago Gavilánez Gamboa

1802792646

DEDICATORIA

Quiero dedicarle este trabajo a mis padres quienes han sido un pilar muy importante en mi vida y un mayor ejemplo de educación y perseverancia por su amor incondicional y cada uno de sus sacrificios que lamentablemente no podrán asistir el día de hoy debido a difíciles pruebas de la vida, pero a pesar de su ausencia ambos están en mi corazón siempre dándome fuerza y apoyándome en todo.

Alejandro Javier Hidalgo Suárez

Este trabajo de titulación quiero dedicarlo a mi madre y a mis hermanas, quienes han sido un pilar fundamental en mi formación como ser humano y profesional, siendo un ejemplo de superación y perseverancia.

Finalmente, también quiero dedicárselo a mi padre y a mis abuelos, quienes lamentablemente no están presentes físicamente para acompañarme en este logro, pero sé que, donde estén, me brindan su apoyo incondicional.

Gabriel Steven Vilema Villa

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a mi universidad, a cada uno de mis docentes por haberme ayudado y dotado de herramientas y criterio necesario para formarme como el ingeniero en que en el cada uno de ustedes espere en que me convierta y a mis amigos que también me han apoyado en las buenas y en las malas los cuales también le quiero expresar mis profundas gratitudes por el apoyo y fe que siempre han tenido en mí.

Alejandro Javier Hidalgo Suárez

Agradezco a los docentes de la carrera de Ingeniería en Mecatrónica que han formado parte de mi formación profesional, quienes con su conocimiento y su apoyo me brindaron las herramientas para un futuro exitoso como ingeniero mecatrónico.

Y un agradecimiento especial a aquellas personas que tengo la fortuna de llamar amigos: mi grupo, que desde el inicio de esta etapa siempre me brindó su apoyo y entusiasmo para salir adelante. A aquellos profesionales que encontré en el camino estudiantil y laboral, siempre les estaré agradecido por todo el apoyo brindado.

Gabriel Steven Vilema Villa

RESUMEN

El presente proyecto tiene como finalidad la repotenciación de un robot manipulador de 4 grados de libertad mediante la implementación de un sistema de control reacondicionado y el desarrollo de una interfaz HMI para su operación interactiva. El proyecto previo, operaba bajo una lógica tipo CNC, haciendo que su funcionamiento a movimientos secuenciales sea complicado de manejar rápidamente.

La propuesta desarrollada permitió transformar el sistema existente mediante la reorganización del armario eléctrico, la implementación de una interfaz gráfica que posibilita el control del robot desde un dispositivo tipo SmartPad (Tablet). Esta interfaz fue desarrollada utilizando Python y Visual Studio, permitiendo la emisión de comandos de movimiento y la configuración básica de trayectorias de manera intuitiva.

Adicionalmente, se diseñó e incorporó un efector final tipo ventosa neumática con el propósito de ampliar las capacidades del manipulador, permitiendo la movilización de objetos de hasta 100 gramos. El diseño mecánico fue realizado en SolidWorks, asegurando compatibilidad estructural con el último eslabón del robot sin afectar su comportamiento cinemático.

Finalmente, el rediseño del sistema eléctrico fue documentado mediante planos elaborados en CAdE SIMU, garantizando orden, seguridad y facilidad de mantenimiento. Con estas mejoras, el robot pasó de operar como una máquina tipo CNC a un sistema de manipulación interactivo con mayor versatilidad y facilidad de uso.

Palabras claves: Robótica, Repotenciación, Control, Brazo Robótico, Neumática

ABSTRACT

This project aims at the upgrading of a 4-degree-of-freedom robotic manipulator through the implementation of a refurbished control system and the development of an HMI interface for interactive operation. The previous system operated under a CNC-type logic, making its operation through sequential movements difficult to manage quickly.

The developed proposal transformed the existing system by reorganizing the electrical cabinet and implementing a graphical interface that enables robot control from a SmartPad-type device (tablet). This interface was developed using Python and Visual Studio, allowing the execution of motion commands and basic trajectory configuration in an intuitive way.

Additionally, a pneumatic suction-cup end effector was designed and incorporated in order to expand the manipulator's capabilities, allowing the handling of objects weighing up to 100 grams. The mechanical design was carried out in SolidWorks, ensuring structural compatibility with the robot's last link without affecting its kinematic behavior.

Finally, the electrical system redesign was documented through schematics developed in CADe SIMU, ensuring organization, safety, and ease of maintenance. With these improvements, the robot evolved from operating as a CNC-type machine to an interactive manipulation system with greater versatility and ease of use.

Keywords: Robotics, Upgrading, Control, Robotic Arm, Pneumatics.

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	PROBLEMA	2
III.	JUSTIFICACIÓN	4
IV.	OBJETIVOS	5
IV-A.	OBJETIVO GENERAL	5
IV-B.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
V.	MARCO TEÓRICO	6
V-A.	FUNDAMENTOS DE LA ROBÓTICA	6
V-A1.	POSICIÓN Y ORIENTACIÓN DE UN CUERPO RÍGIDO EN EL ESPACIO . .	8
V-A2.	CARACTERÍSTICAS DE UN ROBOT INDUSTRIAL	10
V-A3.	MORFOLOGÍA DE UN ROBOT INDUSTRIAL	13
V-A4.	BRAZOS ROBOTICOS COMERCIALES	18
V-A5.	COMPONENTES DE UN ROBÓT INDUSTRIAL	24
V-B.	CINEMÁTICA	26
V-B1.	CINEMÁTICA DIRECTA	27
V-B2.	CINEMÁTICA INVERSA	34
V-B3.	MÉTODOS NUMÉRICOS (ITERATIVOS)	36
V-C.	REPOTENCIACIÓN EN EL CAMPO DE LA ROBÓTICA	38
V-C1.	OBJETIVOS DE LA REPOTENCIACIÓN	39
V-C2.	NIVELES DE INTERVENCIÓN	39
V-C3.	METODOLOGÍA DE IMPLEMENTACIÓN	40
V-C4.	IMPACTO EN LA EFICIENCIA OPERATIVA	41
V-C5.	APLICACIONES INDUSTRIALES DE LA MODERNIZACIÓN TECNOLÓGICA	42
VI.	MARCO METODOLÓGICO	44
VI-A.	DIAGNÓSTICO	45
VI-B.	DISEÑO	46
VI-B1.	DISEÑO ELÉCTRICO	46
VI-B2.	DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL	49
VI-B3.	DISEÑO MECÁNICO	52
VI-C.	IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA	54
VI-D.	VALIDACIÓN	56
VI-D1.	SISTEMA LIBERACIÓN DE OBJETO	56
VI-D2.	PRUEBAS DE REPETIBILIDAD Y PRECISIÓN ESPACIAL	57
VI-D3.	VALIDACIÓN DE LA COMUNICACIÓN INALÁMBRICA (LATENCIA) . . .	57
VI-D4.	EFICIENCIA DEL CICLO DE PICK AND PLACE	57
VI-D5.	RESOLUCIÓN DE CONTROL: DE COORDENADAS A PULSOS	59
VII.	RESULTADOS	61
VIII.	CRONOGRAMA	62
IX.	PRESUPUESTO	63
X.	CONCLUSIONES	64

XI. RECOMENDACIONES	65
XI-1. DIMENSIONES Y COTAS	69
Referencias	71

ÍNDICE DE FIGURAS

1.	Cadena Cinematica	6
2.	PLANO XYZ	8
3.	ANGULOS EULER	9
4.	Espacio de trabajo de diferentes tipos de Robots	12
5.	SISTEMA DE COORDENADAS	13
6.	Configuración Cartesiana	14
7.	Configuración Scara	15
8.	Configuración Antropomórfico	15
9.	Configuración Paralela	16
10.	Configuración Robot Colaborativo	17
11.	Robot Fanuc modelo LR MATE 200 iD	18
12.	FANUC Control	19
13.	Robot KUKA modelo KR 180	19
14.	Interfaz de control KUKA	20
15.	Robot ABB modelo IRB 6640	21
16.	ABB ACS-CP-A	22
17.	Robot UR Modelo UR5	22
18.	Universal Robots Touch	23
19.	Cinematica de un robot de 3GDL	26
20.	ROBOT PLANAR DE 2 GRADOS DE LIBERTAD	28
21.	MATRÍZ DE TRANSFORMACIÓN HOMOGÉNEA	29
22.	Ejercicio Translación	30
23.	EJERCICIO ROTACIÓN	31
24.	DENAVIT-HARTENBERG	33
25.	CINEMÁTICA DIRECTA VS CINEMÁTICA INVERSA	34
26.	BRAZO DE 2 GRADOS DE LIBERTAD	35
27.	SIMULACION CI CAPT1	37
28.	Repotenciación de un robot industrial	38
29.	Diagrama del sistema de control vinculado con la interfaz HMI.	44
30.	Robot original	45
31.	Tablero original del robot 4GDL	45
32.	Plano general del Robot 4GDL	48
33.	Interfaz desarrollada (versión 1.0)	49
34.	Interfaz desarrollada (versión 2.0)	50
35.	Diagrama de flujo basado en el sistema de control	51
36.	Diseño adaptador para ventosa	52
37.	Vista general del armario eléctrico	53
38.	Adaptador ventosa	53
39.	Tablero rediseñado del Robot 4GDL	54
40.	Robot con adaptación ventosa	55
41.	Grafica de Sujeción	58
42.	Grafica de tiempo promedio	58
43.	Grafica de velocidad promedio	59
44.	Sistema completo en operación.	61
45.	Hoja 1 - Sección controlador NVUM	66
46.	Hoja 2 - Sección drivers motores	67
47.	Hoja 3 - Sección bomba de vacio	68
48.	Plano acotado del efector final	69
49.	Planos de la estructura	70

ÍNDICE DE TABLAS

I.	Elementos Fundamentales del Análisis Cinemático	8
II.	Comparativa técnica de las configuraciones de robots industriales.	17
III.	Comparativa técnica de modelos comerciales de carga media (Segmento 20 kg).	24
IV.	Comparativa de Métodos para Cinemática Inversa	36
V.	Resumen de resultados en casos de éxito de repotenciación industrial.	43
VI.	Resultados de las pruebas de precisión y repetibilidad del manipulador.	57
VII.	Flujo de conversión de datos del sistema de control.	60
VIII.	Cronograma	62
IX.	Presupuesto total del proyecto.	63

I. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo aborda la adecuación y actualización de un robot manipulador de cuatro grados de libertad existente en el laboratorio, el cual originalmente operaba bajo una lógica tipo máquina CNC. Debido a estas condiciones, el sistema no permitía una interacción directa con el usuario ni la manipulación práctica de objetos dentro de actividades académicas.

Con el fin de ampliar sus aplicaciones, se implementó un sistema de control que permite la operación del robot mediante una interfaz HMI accesible desde un dispositivo tipo tablet. A través de esta interfaz el usuario puede realizar movimientos manuales, configurar trayectorias básicas y activar el efector final, facilitando su utilización en prácticas de laboratorio.

Como parte de la adaptación mecánica, se incorporó un efector final tipo ventosa neumática diseñado para integrarse al último eslabón del manipulador sin modificar su estructura original. Esta incorporación permite realizar tareas simples de manipulación de objetos de pequeño peso, ampliando la funcionalidad del equipo.

Adicionalmente, se efectuó la reorganización del tablero eléctrico con el propósito de mejorar la distribución de los elementos de control, reducir interferencias y facilitar el mantenimiento. Para ello se documentó la nueva configuración mediante planos eléctricos y de conexión, garantizando la continuidad de uso del sistema dentro del laboratorio.

II. PROBLEMA

La robótica industrial global experimenta un crecimiento exponencial, con más de 4 millones de robots operativos a nivel mundial en 2023 y una tasa de crecimiento anual compuesta del 13 %. Esta expansión refleja una creciente automatización y la adopción acelerada de tecnologías robóticas para optimizar la eficiencia y productividad en diversas áreas industriales[1].

Existe una gran diversidad de configuraciones y morfologías. Su efectividad depende en gran medida de la aplicación, un ejemplo representativo es el robot de 4 grados de libertad (GDL), que permite movimientos más complejos y flexibilidad moderada para tareas de manipulación básica e intermedia. Por ejemplo, robots colaborativos tipo Hitbot Z-Arm 2442 están diseñados para aplicaciones industriales ligeras y educativas, ofreciendo facilidad de programación y versatilidad, lo cual se adapta a procesos de ensamblaje y manipulación de objetos pequeños. Sin embargo, la limitación en su rango y precisión puede generar desafíos para operaciones que demandan movimientos más complejos o cargas mayores [2].

Por otro lado, los robots de 6 grados de libertad (GDL) como los desarrollados para organización y ensamblaje industrial, permiten una mayor libertad y precisión en el espacio tridimensional, facilitando tareas más sofisticadas en líneas de producción. El reto principal de estos sistemas radica en la complejidad del diseño y la necesidad de control avanzado, lo que incrementa costos y demanda conocimientos especializados para su mantenimiento [3].

Así mismo, el tipo de efector final influye en la aplicación en sectores que requieren manipular objetos frágiles, planos o con geometrías diversas, como la industria alimentaria o electrónica. La problemática en estos sistemas incluye asegurar la succión adecuada sin dañar los objetos y mantener la eficiencia en el manejo repetitivo, además de la integración del sistema neumático con los controles robóticos [4].

Un robot, por su naturaleza, es multifuncional y reprogramable; generalmente, en la aplicación resulta imperativo la adopción de efectores finales que permitan la manipulación eficiente de objetos sin comprometer su integridad. Existen alternativas como grippers tipo pinza, grippers neumáticos, grippers magnéticos y sistemas de succión por ventosa, que pueden ser adecuados según la forma, peso y fragilidad del objeto a manipular [5]. Sin embargo, la problemática radica en seleccionar y diseñar el efector final óptimo para cada tarea específica, ya que cada tipo de gripper presenta limitaciones en cuanto a la adaptabilidad, fuerza de agarre y seguridad. Por ejemplo, los grippers neumáticos requieren un sistema de control preciso para evitar daños en objetos delicados y pueden ser voluminosos para aplicaciones compactas, mientras que los grippers magnéticos solo son útiles para materiales ferromagnéticos y no aplican en objetos no metálicos [6]. Además, la integración del efector final con el sistema de control y la interfaz HMI implica retos técnicos para garantizar una coordinación eficaz que permita movimientos precisos y respuesta en tiempo real bajo condiciones variables de carga y entorno [7].

Esta situación configura una problemática multidimensional que abarca la adaptación mecánica, la complejidad en la programación del control y la necesidad de una interfaz hombre-máquina intuitiva, retos claves para lograr una repotenciación eficiente y funcional del robot de 4 grados de libertad (GDL).

Los desafíos técnicos en la repotenciación de un robot de 4 grados de libertad (GDL) con arquitectura abierta incluyen la complejidad inherente en el modelado y control de sistemas robóticos, que requiere un estudio detallado de la cinemática directa e inversa para asegurar movimientos precisos y seguros [8], [9]. La dinámica del robot presenta retos adicionales, ya que la matriz de inercia es variable y no lineal, lo que implica que las fuerzas de Coriolis y los efectos gravitacionales cambian según la configuración del robot, aumentando la dificultad del control robusto y estable [10]. Para abordar estas dificultades, el sistema de control debe ser capaz no solo de manejar eficientemente los motores a paso, sino también de implementar algoritmos avanzados que minimicen errores y vibraciones en la trayectoria, aspecto crítico para mantener la precisión operativa [11], [12]. La precisión en la ejecución del movimiento es esencial, particularmente al enfrentar singularidades, puntos en los que el robot pierde grados de libertad actuables y donde puede surgir indeterminación en el control, reduciendo la capacidad de respuesta del sistema [13]. Esto exige resolver la resolución en tiempo real de trayectorias con alta fidelidad y minimizar errores y vibraciones, factores críticos en aplicaciones industriales que demandan repetibilidad absoluta [14]. Además, la compleja interacción entre múltiples variables dinámicas y cinemáticas requiere algoritmos eficientes que implementen compensación de inercia variable para mantener la estabilidad del sistema bajo diferentes condiciones operativas, manteniendo la respuesta del robot dentro de parámetros óptimos para la manipulación de objetos. Estos desafíos técnicos resaltan la necesidad de enfoques integrales en diseño, control y simulación para garantizar la funcionalidad y eficacia en la repotenciación de robots 4 grados de libertad (GDL) con arquitecturas abiertas [15].

Finalmente, la repotenciación de robots 4 grados de libertad (GDL) requiere un enfoque multidisciplinario que combine avances en diseño mecánico, control embebido y experiencia de usuario para asegurar que estos sistemas sean competitivos, modulares y adaptables a las crecientes demandas industriales. Solo mediante la superación integral de estas problemáticas técnicas y operativas se podrá maximizar el potencial y la aplicabilidad de los robots industriales modernos, potenciando la productividad y la innovación en el sector.

III. JUSTIFICACIÓN

La creciente demanda de automatización y robots industriales en distintas áreas productivas ha generado la necesidad de innovar y mejorar constantemente las capacidades de los sistemas robóticos actuales. En especial, los robots con 4 grados de libertad (GDL) son ampliamente utilizados en tareas de manipulación de objetos debido a su versatilidad y eficiencia para realizar movimientos precisos en el espacio [16].

La repotenciación de un robot 4GDL mediante la incorporación de un efector de ventosa y un sistema de control embebido con interfaz hombre-máquina (HMI) intuitiva responde a estas necesidades, ofreciendo una plataforma modular adaptable para diversas tareas industriales. Esta tecnología facilita la programación y operación para usuarios con poca experiencia en robótica, contribuyendo a la reducción de costos y al incremento en la productividad y calidad de procesos productivos [17], [18].

La importancia de este tema radica en la creciente demanda mundial por soluciones robóticas flexibles y modulares que permitan mejorar la productividad y reducir costos mediante la reutilización y actualización tecnológica de equipos existentes [19], [20]. La repotenciación de robots industriales con nuevas capacidades embebidas y efectores avanzados impacta directamente en la competitividad de las empresas, facilitando además la incorporación de usuarios con diferente nivel de experiencia a través de interfaces hombre-máquina intuitivas [21], [22].

Desde el punto de vista teórico, la investigación contribuirá a una mejor comprensión de la cinemática y el control de sistemas robóticos con múltiples grados de libertad y efectores neumáticos, elementos primordiales para el desarrollo de algoritmos precisos y robustos en tiempo real [23]. Esta aportación se materializa en el desarrollo práctico de soluciones tecnológicas que pueden ser utilizadas en la industria manufacturera, centros de investigación y educación tecnológica, ampliando las capacidades locales y regionales en automatización y robótica [23], [24].

Los robots de 4 grados de libertad (GDL) con efectores neumáticos tipo ventosa tienen un gran potencial para aplicaciones de manipulación ligera, donde es vital combinar precisión, rapidez y delicadeza en el manejo de objetos [25]. Estas características son fundamentales para optimizar procesos industriales que requieren alta eficiencia y sensibilidad en la manipulación, beneficiando especialmente tareas de ensamblaje y clasificación [26].

Por último, la necesidad de soluciones robóticas eficientes, accesibles y adaptables en entornos industriales hace indispensable el desarrollo de plataformas como la propuesta en esta investigación. La repotenciación de un robot de 4 grados de libertad mediante tecnologías y efectores neumáticos tipo ventosa no solo responde a los desafíos actuales de precisión, versatilidad y facilidad de uso, sino que también representa una oportunidad para fortalecer la automatización en sectores de producción con recursos limitados. Esta problemática justifica el desarrollo de soluciones innovadoras que integren hardware y software de manera eficiente, contribuyendo así al avance tecnológico y a la democratización del acceso a la robótica industrial.

IV. OBJETIVOS

IV-A OBJETIVO GENERAL

Repotenciación del robot de 4GDL mediante la implementación de un efector final tipo ventosa y el diseño de un controlador para la manipulación de objetos.

IV-B OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar un efector final de tipo ventosa de vacío neumática para la manipulación de objetos con un peso de hasta de 100 gramos, considerando la compatibilidad con la estructura del robot.
- Desarrollar un sistema de control para la gestión de movimientos del robot de 4 grados de libertad, utilizando motores a paso con controladores compatibles con la arquitectura existente.
- Implementar una interfaz HMI intuitiva que facilite la interacción del usuario con el robot, permitiendo la configuración de trayectorias.

V. MARCO TEÓRICO

V-A FUNDAMENTOS DE LA ROBÓTICA

La robótica trasciende la mera construcción de máquinas; se define como la integración sinérgica entre la ingeniería mecánica, electrónica y computacional [27]. Esta convergencia permite el diseño de sistemas capaces de percibir, procesar información y actuar de forma controlada sobre su entorno. En el ámbito de la automatización, los manipuladores cinemáticos constituyen la base operativa, estructurándose mediante una cadena de eslabones y articulaciones cuya versatilidad y alcance espacial están intrínsecamente ligados a sus grados de libertad (GDL).

La estructura física de un robot se fundamenta en su cadena cinemática, definida como una sucesión de eslabones rígidos interconectados mediante articulaciones que permiten el movimiento relativo entre ellos [28]. Estas articulaciones son los elementos clave que determinan el comportamiento del sistema: las de tipo rotacional o de revolución permiten giros sobre un eje definido, similar al movimiento del codo humano, donde la variable de control es el ángulo θ ; mientras que las articulaciones prismáticas o deslizantes facilitan desplazamientos lineales, de manera análoga a un pistón neumático o una guía telescópica.

La disposición secuencial de estos componentes determina los grados de libertad del manipulador y su capacidad para posicionar el efector final en un punto específico del espacio. Un diseño mecatrónico equilibrado debe seleccionar la combinación adecuada de articulaciones para garantizar que la arquitectura mecánica sea lo suficientemente robusta para cumplir con la tarea de posicionamiento, optimizando la relación entre el alcance físico y la complejidad del modelo matemático que gobernará sus trayectorias [29].

En la Figura 1 se aprecia la cadena cinemática de un brazo robótico.

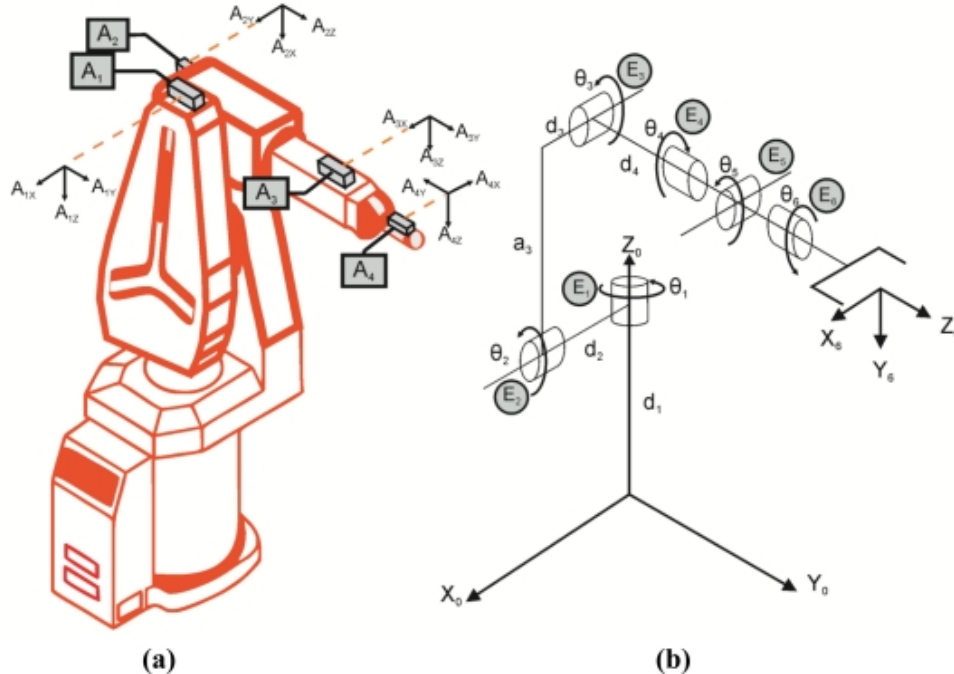


Figura 1. Cadena Cinematica

El fundamento operativo de cualquier brazo robótico se basa en una cadena cinemática compuesta por una serie de eslabones conectados mediante articulaciones, como se observa en la Figura 1, ya sean de revolución o prismáticas, las cuales proporcionan los Grados de Libertad necesarios para que el efector final alcance una posición y orientación en el espacio de trabajo. En la práctica industrial, esta configuración mecánica permite que herramientas como pinzas, de soldadura o ventosas de vacío interactúen con el entorno siguiendo trayectorias complejas [21].

La complejidad de un robot se mide por su capacidad de replicar la flexibilidad del brazo humano, mientras que el estándar de seis ejes ofrece una destreza total. Configuraciones con menor número de articulaciones se consolidan como soluciones eficientes para tareas específicas de manufactura donde se busca optimizar la relación entre la carga computacional y la estabilidad del sistema [16]. Esta selección estratégica de la arquitectura articular no solo define el volumen de trabajo disponible, sino que es determinante para asegurar que el control dinámico sea capaz de corregir errores de posición en tiempos reducidos, garantizando un comportamiento estable en operaciones repetitivas de alta precisión [6].

Desde la perspectiva del control, el robot depende de un controlador que procesa las instrucciones del usuario y las traduce en señales eléctricas para los actuadores; este proceso implica una gestión constante de datos, asegurando que el sistema mantenga una alta repetibilidad y precisión, parámetros críticos en procesos de alta exigencia, donde la fiabilidad del movimiento es el objetivo principal [27]. En la actualidad, entender estos fundamentos es el paso previo obligado para cualquier proyecto de repotenciación, ya que permite identificar los límites mecánicos del sistema antes de proponer una mejora en su arquitectura de control o en su capacidad de procesamiento.

Además, el análisis del movimiento se rige por el modelado cinemático y dinámico, donde la cinemática directa se encarga de determinar la posición y orientación del efector final a partir de las coordenadas articulares, mientras que la dinámica evalúa las fuerzas y torques necesarios para generar dicho movimiento [16]. Esta descripción matemática es esencial para garantizar la estabilidad del manipulador, permitiendo que algoritmos avanzados corrijan el error de seguimiento en tiempo real y aseguren que el efector final alcance el punto deseado con una trayectoria suave y eficiente, minimizando las vibraciones mecánicas y el desgaste de los componentes de transmisión [10].

Bajo esta perspectiva, definir la posición y la orientación de un cuerpo rígido en el espacio es fundamental en todo análisis mecánico. La posición determina la ubicación tridimensional exacta de cada eslabón, mientras que la orientación establece la dirección hacia la cual apunta su geometría. El dominio de ambos conceptos es indispensable, ya que sin una referencia espacial rigurosa, el sistema de control operaría a ciegas sobre su propia estructura, lo que haría físicamente imposible alinear la herramienta con precisión, evitar colisiones o manipular objetos de manera segura.

V-A1. POSICIÓN Y ORIENTACIÓN DE UN CUERPO RÍGIDO EN EL ESPACIO

Los elementos presentada en la Tabla I permite establecer la base de un brazo robótico. La interacción entre los eslabones rígidos y las articulaciones define la geometría de la cadena cinemática, permitiendo que el sistema de control transforme las variables articulares en coordenadas cartesianas referenciadas al sistema de base [16].

Tabla I
ELEMENTOS FUNDAMENTALES DEL ANÁLISIS CINEMÁTICO

Elemento	Función en el Modelo
Eslabón	Segmento rígido que determina la distancia física entre dos puntos de giro del robot.
Articulación	Punto de unión que permite el movimiento relativo y define el eje de rotación de cada sección.
Efecto Final	Punto de interés ubicado en el extremo del brazo (ventosa) donde se ejecutan las tareas.
Sistema de Base	Punto de referencia fijo (0, 0, 0) desde el cual se calculan todas las distancias del brazo.

SISTEMA DE COORDENADAS

Para describir el estado de un manipulador, es fundamental establecer marcos de referencia que permitan localizar cada uno de sus componentes. Un sistema de coordenadas en robótica consiste típicamente en un marco cartesiano ortogonal definido por tres ejes (X , Y , Z) que se interceptan en un origen común. La posición de cualquier punto del robot se define mediante un vector de posición respecto a una base, mientras que la interacción entre los distintos eslabones requiere la transformación constante entre sistemas [28] como se observa en la Figura 2.

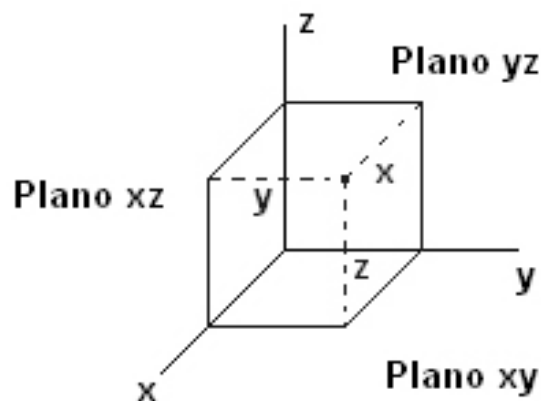


Figura 2. PLANO XYZ

ÁNGULOS EULER

La orientación de un cuerpo rígido en el espacio tridimensional se describe comúnmente mediante los ángulos de Euler, los cuales representan una secuencia de tres rotaciones sucesivas alrededor de los ejes de un sistema de coordenadas móvil. En robótica industrial, la convención más utilizada es la de rotaciones intrínsecas $Z - Y - X$, conocidas técnicamente como los ángulos de balanceo, cabeceo y guiñada [29]. Este método es intuitivo para la programación de trayectorias, ya que permite definir la actitud del efector final de manera similar a como se orienta una aeronave o el cuello humano. Sin embargo, desde la perspectiva del control, es vital considerar que estas secuencias pueden presentar singularidades matemáticas, como el bloqueo de cardán (*gimbal lock*), donde se pierde la capacidad de distinguir entre dos ejes de rotación, lo que exige una gestión algorítmica robusta para evitar errores en el posicionamiento angular [16]. En la Figura 3 se observa una ejemplificación de los ángulos euler.

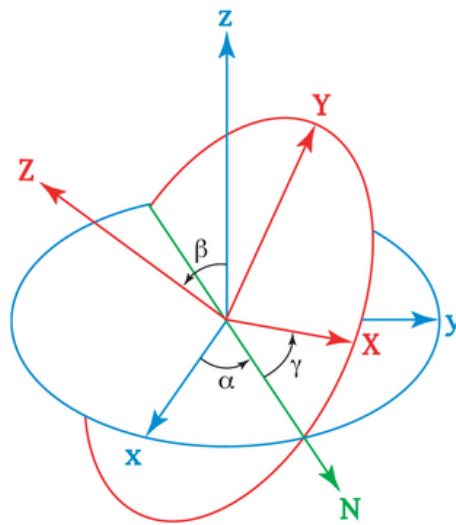


Figura 3. ANGULOS EULER

MATRICES DE ROTACIÓN

Matemáticamente, la orientación se formaliza a través de las matrices de rotación, las cuales son matrices ortonormales de 3×3 cuyos vectores columna representan las direcciones de los ejes del sistema móvil expresadas en términos del sistema de referencia fijo. Una matriz de rotación no solo permite transformar coordenadas de un marco a otro, sino que conserva las distancias y ángulos del cuerpo rígido, garantizando que el modelo cinemático sea una representación fiel de la estructura mecánica [10]. La integración de estas matrices en la matriz de transformación homogénea es lo que permite unificar la posición y la orientación en un solo operador matemático, facilitando el cálculo de la cinemática directa mediante la concatenación de transformaciones sucesivas a lo largo de toda la cadena articular del robot [16].

En el espacio tridimensional, existen tres matrices de rotación fundamentales. Cada una representa un giro definido por el ángulo θ alrededor de uno de los ejes cartesianos principales X, Y o Z.

Rotación sobre el eje X:

La matriz mantiene intacta la coordenada X mientras gira el plano formado por los ejes Y y Z.

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

Rotación sobre el eje Y:

La matriz mantiene intacta la coordenada Y mientras gira el plano formado por los ejes X y Z.

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

Rotación sobre el eje Z:

La matriz mantiene intacta la coordenada Z mientras gira el plano formado por los ejes X e Y. Esta es la rotación más común para bases de robots.

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

La multiplicación secuencial de estas tres matrices fundamentales conforma la matriz de rotación general. Esta matriz resultante describe por completo cualquier inclinación tridimensional del efector final del robot en el espacio de trabajo.

V-A2. CARACTERISTICAS DE UN ROBOT INDUSTRIAL

El desempeño de un sistema robótico industrial no depende únicamente de su estructura mecánica, sino de una serie de parámetros técnicos que determinan su aptitud para una tarea específica. Estas características son los indicadores críticos de rendimiento (KPI) que un ingeniero debe evaluar al momento de diseñar, seleccionar o repotenciar un manipulador. Entre estos parámetros, destacan la resolución, la precisión y la repetibilidad, los cuales definen la capacidad del robot para alcanzar un punto en el espacio de trabajo con un margen de error mínimo y constante [27].

Mientras que la precisión se refiere a la cercanía del efector final a una coordenada objetivo, la repetibilidad mide la consistencia del sistema al realizar el mismo movimiento bajo condiciones idénticas, siendo este último un factor determinante en procesos de alta cadencia como el ensamble o el empaquetado [10]. Asimismo, la capacidad de carga y el alcance máximo (reach) delimitan el volumen de trabajo efectivo y la fuerza que el actuador final

puede ejercer sobre el objeto manipulado, parámetros que deben ser calculados rigurosamente para evitar fatiga mecánica o inestabilidad en el control dinámico durante la operación [16].

Entre estos parámetros, destacan la resolución, la precisión y la repetibilidad, los cuales definen la capacidad del robot para alcanzar un punto en el espacio de trabajo con un margen de error mínimo y constante [27]. Mientras que la precisión se refiere a la cercanía del efector final a una coordenada objetivo, la repetibilidad mide la consistencia del sistema al realizar el mismo movimiento bajo condiciones idénticas, siendo este último un factor determinante en procesos como el ensamble o el empaquetado [10]. Asimismo, la capacidad de carga y el alcance máximo delimitan el volumen de trabajo efectivo y la fuerza que el actuador final puede ejercer sobre el objeto manipulado, parámetros que deben ser calculados rigurosamente para evitar fatiga mecánica o inestabilidad en el control dinámico durante la operación [16].

1. Grados de Libertad

Los Grados de Libertad definen la movilidad intrínseca del sistema y representan el número de variables articulares independientes, ya sean rotacionales o prismáticas, que determinan la configuración del robot en cada instante. Para que un manipulador posea capacidad de posicionamiento y orientación total en el espacio tridimensional, requiere un mínimo de 6 DoF: tres destinados a situar el extremo en las coordenadas cartesianas y tres adicionales para definir la orientación mediante los ángulos de Euler (*roll*, *pitch*, *yaw*) [29]. Un robot con una configuración inferior presentará restricciones en su maniobrabilidad para ciertas tareas, mientras que un sistema con más de 6 DoF se considera redundante, lo que le permite esquivar obstáculos manteniendo la postura de su efector final [30]. Para determinar matemáticamente esta movilidad en una cadena cinemática, se emplea la ecuación de movilidad de Grübler–Kutzbach, la cual permite calcular los grados de libertad efectivos en función del número de eslabones, articulaciones y sus respectivas restricciones:

Los grados de libertad de un manipulador pueden determinarse analíticamente mediante el criterio de Grübler–Kutzbach, el cual permite calcular la movilidad total de un mecanismo a partir del número de eslabones y articulaciones presentes en su estructura. Para mecanismos espaciales (robots industriales), la expresión viene dada por:

$$M = 6(n - 1 - j) + \sum_{i=1}^j f_i$$

2. Espacio de Trabajo y Zonas de Singularidad

El espacio de trabajo, o envolvente de operación, se define como el volumen total de puntos que el punto central de la herramienta es capaz de alcanzar, cuya geometría y dimensiones están supeditadas directamente a la configuración mecánica del sistema, tal como se ilustra en los ejemplos de la Figura 4 [31].

Dentro de este volumen, un aspecto crítico para el control son las singularidades cinemáticas: configuraciones geométricas donde dos o más ejes de movimiento se alinean de tal forma que el determinante de la matriz Jacobiana del sistema se reduce a cero. En estas condiciones, el manipulador pierde instantáneamente uno o más grados de libertad, lo que provoca que las velocidades articulares requeridas para mantener un movimiento lineal en el espacio cartesiano tiendan matemáticamente al infinito [10]. Este fenómeno representa un desafío técnico significativo, ya que puede derivar en bloqueos del controlador, saturación de los actuadores o daños

mecánicos estructurales debido a las fuerzas de inercia imprevistas; por lo tanto, el diseño de trayectorias debe considerar siempre la detección y evasión de estas zonas para garantizar una operación fluida y segura en entornos industriales [16].

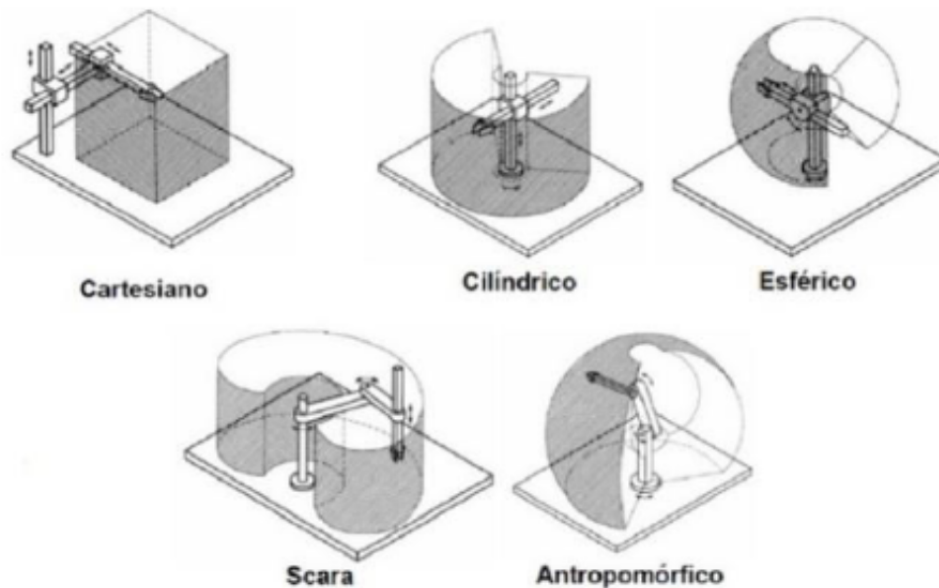


Figura 4. Espacio de trabajo de diferentes tipos de Robots

3. Repetibilidad vs. Exactitud (Precisión)

Es imperativo diferenciar estos conceptos en el análisis de precisión:

- **Exactitud:** Es la capacidad del robot de alcanzar una posición teórica calculada mediante coordenadas. Depende de la rigidez estructural y la fidelidad del modelo cinemático [16].
- **Repetibilidad:** Es el grado de dispersión al regresar a un punto previamente grabado (*teach-in*). En entornos industriales, la repetibilidad es más valorada debido a la naturaleza cíclica de los procesos. Un brazo industrial moderno suele presentar una repetibilidad de entre $\pm 0,01$ mm y $\pm 0,1$ mm [27].

4. Resolución y Capacidad de Carga

La resolución se divide en resolución de programación y de control. Por otro lado, el *Payload* no solo contempla la masa del objeto a manipular, sino también la del efector final. Se debe considerar el momento de inercia; una carga alejada del eje de la muñeca puede exceder el torque máximo de los actuadores debido al brazo de palanca, provocando errores de seguimiento [16].

5. Velocidad y Aceleración Nominal

Estos parámetros dictan el tiempo de ciclo del proceso. El controlador gestiona perfiles de aceleración y

desaceleración para mitigar vibraciones estructurales [10]. En proyectos de repotenciación, la actualización del sistema de control busca optimizar estos perfiles para reducir el estrés mecánico [6].

6. Sistemas de Coordenadas

En robótica industrial se emplean múltiples marcos de referencia para describir el movimiento del manipulador [28]. Entre los principales se encuentran:

- Sistema Base: Fijo al pedestal del robot.
- Sistema Articular: Asociado a cada articulación.
- Sistema Herramienta (TCP): Ubicado en el efector final.
- Sistema Mundo o Celda: Referencia global de la estación de trabajo.

La transformación entre sistemas se realiza mediante concatenación de matrices homogéneas utilizando el método de Denavit–Hartenberg, permitiendo expresar trayectorias programadas en coordenadas cartesianas y convertirlas a coordenadas articulares para su ejecución por el controlador. Se puede observar en la figura 5 el sistema de coordenadas de un brazo robótico [27].

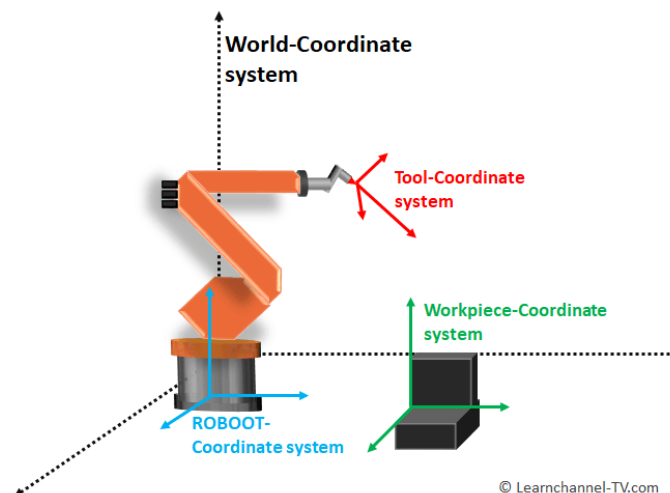


Figura 5. SISTEMA DE COORDENADAS

V-A3. MORFOLOGÍA DE UN ROBOT INDUSTRIAL

La clasificación de los robots industriales se fundamenta en su arquitectura mecánica, la cual determina no solo su apariencia física, sino también su capacidad de carga, precisión y volumen de trabajo. Para un ingeniero, la morfología del manipulador es el factor determinante para la viabilidad de un proyecto de automatización [32]. A continuación, se describen de manera extensiva las configuraciones más utilizadas en la industria actual:

1. Configuración Cartesiana (Lineal)

El robot cartesiano es la arquitectura más robusta y simple desde el punto de vista del control operativo. Se basa en tres articulaciones prismáticas cuyos ejes de movimiento son perpendiculares entre sí, como se puede observar en la figura 6. Coincidiendo con un sistema de coordenadas ortogonales [33].

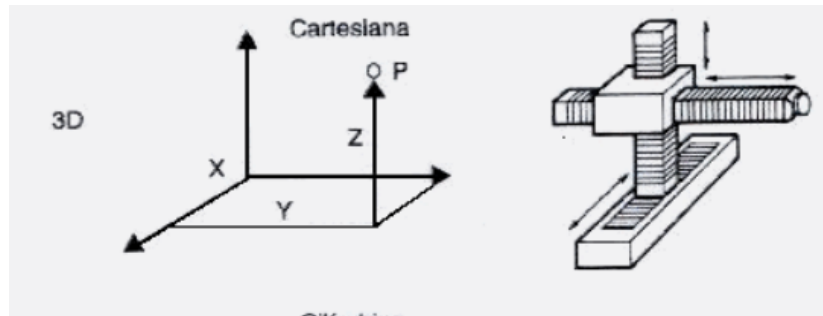


Figura 6. Configuración Cartesiana

- **Detalles Técnicos:** Esta configuración destaca por su alta rigidez estructural. Al utilizar guías lineales y husillos de bolas o correas dentadas, la deflexión mecánica es mínima incluso bajo cargas pesadas. Desde la perspectiva del software de control, la cinemática es uno a uno; es decir, un movimiento de 10 cm en el eje *X* corresponde exactamente a un desplazamiento de 10 cm en el actuador físico, eliminando la necesidad de cálculos trigonométricos complejos en el procesador [34].

- **Ventajas y Limitaciones:**

Su principal ventaja es la facilidad de escalabilidad; se pueden construir robots cartesianos de varias decenas de metros. Su mayor limitación es que el espacio físico que ocupa la máquina es siempre mayor que su volumen útil de trabajo, lo que lo hace ineficiente en plantas con densidad de maquinaria alta.

2. Configuración SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm)

El robot SCARA fue diseñado específicamente para optimizar las líneas de montaje rápido. Su configuración consiste en dos articulaciones rotacionales paralelas que proporcionan movimiento en un plano horizontal y una articulación prismática para el movimiento vertical [32]. Se puede observar en la figura 7 como están colocadas las articulaciones con el fin de lograr dichos movimientos.

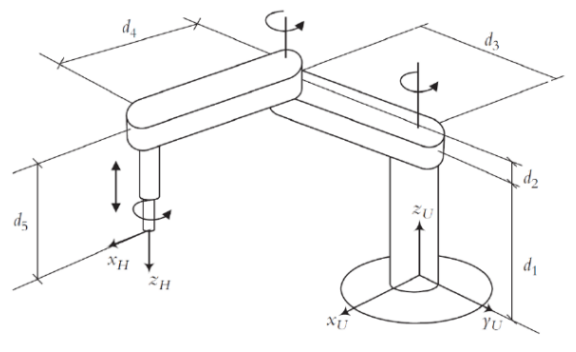


Figura 7. Configuración Scara

- **Detalles Técnicos:** Esta arquitectura se caracteriza por su rigidez selectiva; es muy rígido en el eje vertical (Z) pero flexible en el plano horizontal (XY). Esto permite que el robot acomode piezas con pequeñas desviaciones durante procesos de inserción sin dañar los componentes. Utiliza servomotores de alta velocidad en sus hombros y codos, lo que resulta en tiempos de ciclo extremadamente bajos [35].
- **Ventajas y Limitaciones:** Su principal ventaja es el alto *throughput* en tareas de *pick-and-place* y ensamblaje electrónico. Su limitación reside en que su área de trabajo es cilíndrica y tiene singularidades cuando el brazo está completamente extendido o retraído hacia su centro.

3. Configuración Articulada o Antropomórfica

Es la arquitectura más avanzada y la que define la robótica industrial moderna. Se compone de una cadena de eslabones unidos por articulaciones rotacionales que emulan la funcionalidad del brazo humano, típicamente con 6 grados de libertad [33]. En la figura 8 se puede ver la emulación que tiene esta configuración a un brazo humano.

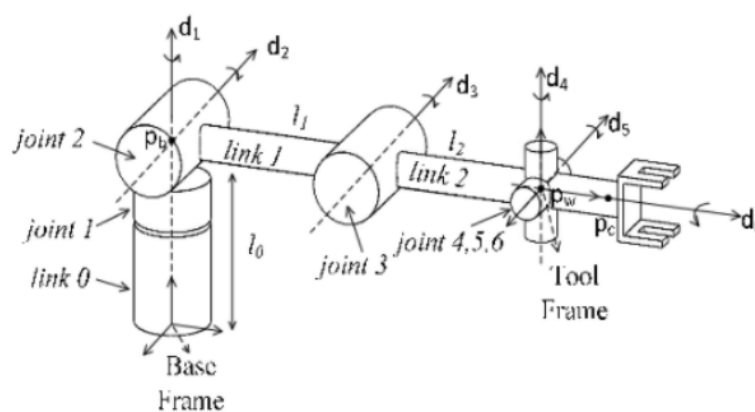


Figura 8. Configuración Antropomórfico

- **Detalles Técnicos:** A diferencia de los robots lineales, su control requiere cálculos de cinemática inversa intensivos debido al acoplamiento de sus ejes. La precisión suele variar según la posición en el espacio de trabajo, y el uso de reductores de precisión es crítico para minimizar el *backlash* [34].
- **Ventajas y Limitaciones:** Ofrece la mayor libertad de movimiento en un espacio compacto, permitiendo rodear obstáculos. Su desventaja es la complejidad del control de trayectorias y que su rigidez mecánica disminuye conforme el brazo se aleja de su base.

4. Configuración Paralela (Robot Delta)

El robot Delta rompe con el esquema de cadena abierta. Aquí, múltiples brazos (generalmente tres) actúan de forma simultánea sobre una única plataforma móvil donde se sitúa la herramienta [35]. En la figura 9 se puede observar la novedad de multiples brazos en este tipo de configuración.

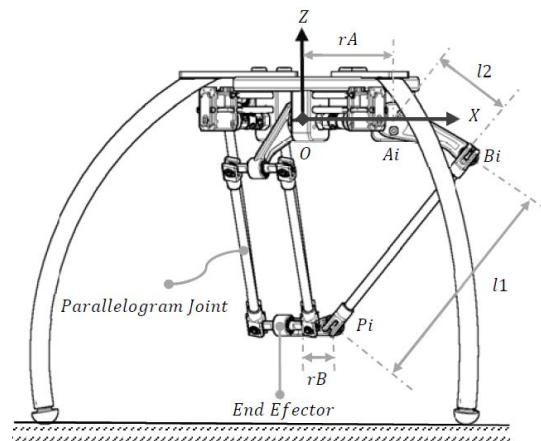


Figura 9. Configuración Paralela

- **Detalles Técnicos:** Los actuadores se encuentran fijos en la base superior, lo que reduce drásticamente la masa en movimiento. El efector final se mantiene siempre paralelo a la base gracias a la geometría de sus brazos de fibra de carbono, permitiendo aceleraciones que pueden superar los 10G [16].
- **Ventajas y Limitaciones:** Es la configuración más rápida del mercado, ideal para empaque de alimentos o medicamentos. No obstante, su volumen de trabajo es muy reducido en comparación con el tamaño de su estructura y tiene una capacidad de carga (*payload*) muy limitada.

5. Robots Colaborativos (Cobots)

Los cobots no son solo una forma física, sino una categoría de seguridad industrial diseñada para la interacción directa con el personal de planta [36]. Como se observa en la Figura 10, la configuración del robot colaborativo se puede representar mediante una cadena cinemática que define los movimientos de sus articulaciones.

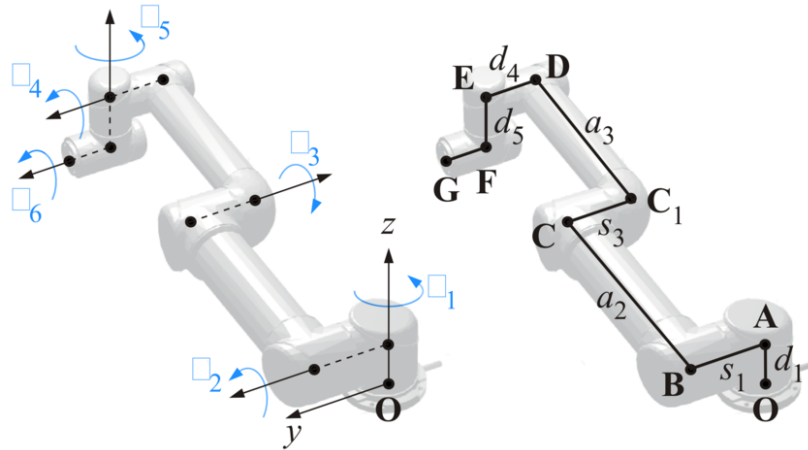


Figura 10. Configuración Robot Colaborativo

- **Detalles Técnicos:** Incorporan sensores de fuerza/torque en cada articulación o sistemas de monitoreo de corriente que detectan colisiones instantáneamente. Su software de control limita la potencia y la fuerza del actuador para cumplir con las normas ISO 10218-1/2 de seguridad robótica [37].
- **Ventajas y Limitaciones:** Facilitan una implementación rápida y flexible (*plug-and-play*) en pequeñas y medianas empresas. Sin embargo, para garantizar la seguridad, operan a velocidades significativamente menores que un robot industrial convencional, lo que reduce la productividad bruta por ciclo.

Tabla II
COMPARATIVA TÉCNICA DE LAS CONFIGURACIONES DE ROBOTS INDUSTRIALES.

Configuración	DoF	Rigidez	Velocidad	Aplicación Principal
Cartesiano	3	Muy Alta	Media	CNC, Paletizado pesado
SCARA	3 - 4	Media	Muy Alta	Ensamblaje electrónico
Articulado	5 - 7	Media	Media	Soldadura, Pintura
Delta	3 - 4	Baja	Extrema	Pick and Place alimentario
Colaborativo	6 - 7	Baja	Baja	Inspección, Asistencia

La Tabla II presenta una comparativa técnica de las principales arquitecturas robóticas, destacando cómo el número de grados de libertad (DoF) y la rigidez estructural condicionan su rendimiento en el entorno industrial. Se observa que mientras las configuraciones cartesianas priorizan la robustez para tareas de paletizado, los robots tipo Delta y SCARA sacrifican rigidez en favor de velocidades extremas para operaciones de alta frecuencia. Por otro

lado, los robots articulados y colaborativos ofrecen una mayor versatilidad operativa gracias a su elevado número de DoF, aunque los segundos operan con velocidades reducidas para garantizar la seguridad en entornos compartidos. Esta diversificación morfológica permite seleccionar la arquitectura óptima en función de los requerimientos de precisión, carga y tiempo de ciclo de cada proceso automatizado.

V-A4. BRAZOS ROBOTICOS COMERCIALES

En la ingeniería de automatización, la selección de un manipulador no se limita a sus capacidades mecánicas; es una decisión estratégica que involucra el ecosistema de software, la compatibilidad con PLCs existentes y la robustez del servicio postventa [27]. A continuación, se analizan las cuatro firmas que dominan el mercado global, evaluando sus lenguajes de programación y arquitecturas de control [16].

1. FANUC (Fuji Automatic Numerical Control)

Los robots de FANUC son fácilmente reconocibles por su color amarillo y su presencia masiva en la industria automotriz norteamericana y asiática [27]. Un ejemplo representativo es el robot modelo LR Mate 200iD, mostrado en la Figura 11, ampliamente utilizado en tareas de ensamblaje, pick and place y manipulación de piezas de precisión [31].

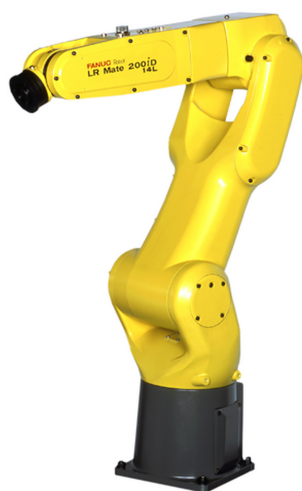


Figura 11. Robot Fanuc modelo LR MATE 200 iD

Utilizan el controlador R-30iB Plus, que destaca por su rapidez de arranque y su capacidad de gestionar hasta 72 ejes simultáneamente. El lenguaje principal es *KAREL*, un lenguaje de alto nivel basado en Pascal, ideal para gestión de datos y lógica compleja. Sin embargo, la mayoría de los técnicos programan mediante *TP* (*Teach Pendant*), un lenguaje de comandos directos que facilita el ajuste en piso. Su entorno *ROBOGUIDE* permite realizar estudios de alcance y tiempos de ciclo con una precisión del 98 % respecto a la realidad.

Para controlar un robot FANUC, la arquitectura del sistema exige una interacción sincronizada entre el procesador principal y la interfaz de programación manual o *Teach Pendant*. Este dispositivo físico actúa como el medio primario para la configuración de coordenadas y la introducción de secuencias lógicas en el piso de planta como se ve en la Figura 12.

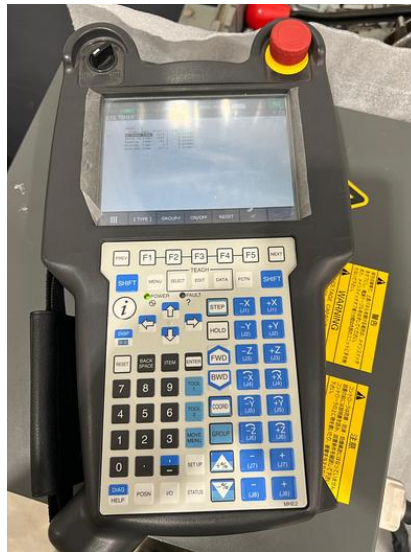


Figura 12. FANUC Control

2. KUKA (Keller und Knappich Augsburg)

KUKA es la marca preferida en Europa. Se distinguen por su color naranja y por ser pioneros en integrar sistemas operativos comerciales en sus controladores [27]. Un ejemplo representativo es el robot modelo KR 180, mostrado en la Figura 13, ampliamente utilizado en aplicaciones de soldadura, manipulación de cargas pesadas y automatización automotriz [31].



Figura 13. Robot KUKA modelo KR 180

Sus controladores KRC4 y KRC5 corren sobre un núcleo de Windows embebido. Esto permite una integración mucho más natural con redes Ethernet industriales y bases de datos externas [27]. Utilizan *KRL (KUKA Robot Language)*, el cual permite una flexibilidad enorme para crear estructuras condicionales complejas y funciones personalizadas. Es considerado uno de los lenguajes más versátiles para aplicaciones de investigación y desarrollo [16]. Su línea *LBR iiwa* (Intelligent Industrial Work Assistant) fue la primera en introducir sensores de torque en cada articulación, permitiendo que el robot sienta su entorno [6].

El control de los robots KUKA destaca por dividir el trabajo de su procesador en dos tareas complementarias. Una sección del controlador gestiona el sistema operativo comercial para facilitar la comunicación con el usuario y las bases de datos externas, mientras que un núcleo industrial trabaja a gran velocidad para resolver la matemática del movimiento. Este núcleo calcula exactamente cuánta energía enviar a cada servomotor para que el brazo siga una trayectoria fluida y sin vibraciones. El avance más significativo en esta arquitectura es el uso directo de los sensores de fuerza ubicados en sus articulaciones. Al procesar las lecturas de estos sensores en tiempo real, el robot deja de ser una máquina rígida y ciega para comportarse de forma similar a un resorte programable. Esta sensibilidad electrónica permite que el manipulador detecte variaciones físicas en su entorno, ceda ante posibles colisiones y adapte su fuerza de contacto, un principio mecánico vital para asegurar el trabajo mediante el uso de una interfaz HMI, el cual permite controlar todo lo ya mencionado como se ve en la Figura14.

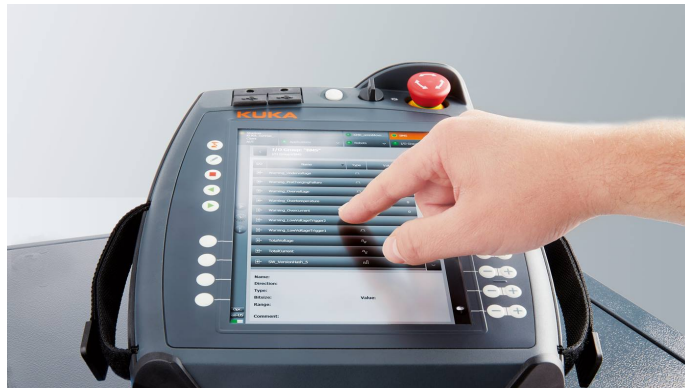


Figura 14. Interfaz de control KUKA

3. ABB (Asea Brown Boveri)

ABB es reconocido por tener los algoritmos de control de trayectoria más precisos del mercado, lo que los hace ideales para aplicaciones de corte y pintura [27]. Pero que de todas maneras cuentan con diferentes modelos que se encargan de tareas mas pesada un ejemplo representativo es el robot modelo IRB 6640, mostrado en la Figura 15, ampliamente utilizado en aplicaciones de manipulación pesada, paletizado y procesos de manufactura automatizada [31].



Figura 15. Robot ABB modelo IRB 6640

Sus controladores *OmniCore* están diseñados para la digitalización total, permitiendo la conexión a la nube para mantenimiento predictivo. Utilizan *RAPID*, un lenguaje sumamente potente que permite el multihilo. Es muy apreciado por ingenieros de software por su estructura limpia. *RobotStudio* es, posiblemente, el software de simulación más potente del mundo, permitiendo la programación fuera de línea sin detener la producción de la planta.

El control destaca por su capacidad para entender y predecir el comportamiento físico de toda su estructura. A diferencia de un sistema básico que solo envía electricidad a los motores para que giren, el procesador de ABB imagina el movimiento antes de ejecutarlo, también analiza de manera constante el peso de cada pieza y la fuerza de impulso que lleva el brazo al moverse por el espacio. El controlador sabe exactamente en

qué momento debe acelerar o frenar cada articulación. Esta anticipación inteligente es lo que permite que la herramienta dibuje trayectorias perfectas en el aire, incluso cuando trabaja a su máxima velocidad usando un variador como en la Figura 16 el cual se encarga de la manipulación.

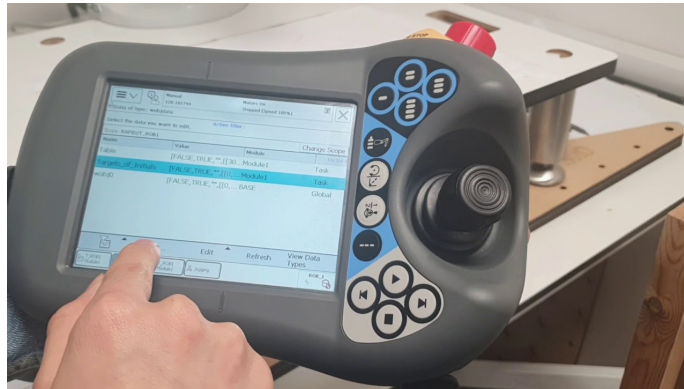


Figura 16. ABB ACS-CP-A

4. Universal Robots (UR)

UR es la empresa danesa que cambió las reglas del juego al popularizar la robótica colaborativa (Cobots) [27]. Un ejemplo representativo es el robot modelo UR5, mostrado en la Figura 17, ampliamente utilizado en tareas de ensamblaje, laboratorio, manipulación ligera y automatización flexible en entornos industriales y educativos [31].



Figura 17. Robot UR Modelo UR5

No utilizan gabinetes pesados; su controlador es compacto y su *Teach Pendant* es una tableta táctil de alta resolución. Su entorno *PolyScope* es gráfico. El usuario puede mover el brazo físicamente para grabar posiciones. Para aplicaciones avanzadas, utilizan *URScript*, un lenguaje basado en Python. A través de *UR+*, ofrecen una plataforma "Plug and Play" donde periféricos de marcas como Robotiq u OnRobot se instalan en segundos.

Su sistema de control consiste en una arquitectura diseñada para interactuar de forma segura con humanos. El procesador monitorea continuamente la corriente eléctrica de cada motor para medir la fuerza que aplican sus articulaciones. Si el brazo detecta un impacto imprevisto contra su entorno, registra el aumento repentino de energía y frena de inmediato para evitar accidentes. Esta misma sensibilidad mecánica permite una programación muy intuitiva, donde el usuario mueve físicamente la estructura con sus manos para enseñarle las posiciones deseadas. Todo este entorno de trabajo se gestiona desde una tableta táctil de alta resolución como se ve en la Figura 18, la cual reemplaza a las pesadas consolas tradicionales y convierte la configuración del equipo en una experiencia visual, gráfica y directa.

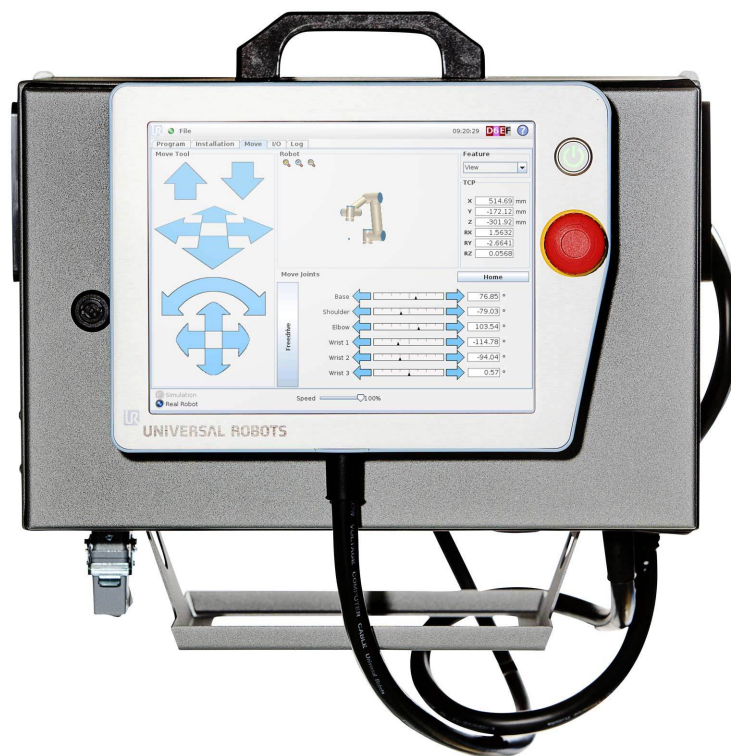


Figura 18. Universal Robots Touch

Tabla III
COMPARATIVA TÉCNICA DE MODELOS COMERCIALES DE CARGA MEDIA (SEGMENTO 20 KG).

Modelo	Marca	Alcance (mm)	GDL	Repetibilidad	Peso (kg)	Lenguaje
M-20iB/25	FANUC	1853	6	± 0.03 mm	230	KAREL / TP
KR 20-3	KUKA	1610	6	± 0.05 mm	245	KRL
IRB 2600	ABB	1650	6	± 0.04 mm	272	RAPID
UR20 (Cobot)	Universal Robots	1750	6	± 0.05 mm	64	URScript

La comparativa presentada en la Tabla III permite identificar los estándares de rendimiento que rigen el segmento de manipuladores de carga media en la industria actual. Al analizar modelos líderes como el Fanuc M-20iB/25 y el ABB IRB 2600, se observa que la industria prioriza una repetibilidad situada en el rango de los $\pm 0,03$ a $\pm 0,05$ mm, lo que garantiza la viabilidad de estos sistemas en tareas de alta precisión como la soldadura o el ensamblaje electrónico [27]. Un factor diferenciador crítico es la relación entre el peso estructural del brazo y su alcance; mientras que los modelos industriales tradicionales presentan masas superiores a los 230 kg para asegurar la rigidez necesaria en trayectorias de alta velocidad, los sistemas colaborativos como el UR20 apuestan por una reducción drástica de peso (64 kg) para facilitar su integración en entornos de trabajo compartidos con humanos [31]. Esta selección de parámetros técnicos subraya la importancia de equilibrar la capacidad de carga con la manejabilidad del sistema de control, sirviendo como métrica de referencia para proyectos de diseño o repotenciación que busquen alcanzar niveles de eficiencia operativa competitivos bajo estándares internacionales [16].

V-A5. COMPONENTES DE UN ROBÓT INDUSTRIAL

El funcionamiento de un sistema robótico industrial es el resultado de la interacción coordinada entre diversas áreas de la ingeniería donde cada componente cumple una función crítica para transformar señales de control en movimientos mecánicos precisos, el sistema se divide generalmente en cuatro pilares fundamentales conocidos como la estructura mecánica, el sistema de actuación, el sistema sensorial y la unidad de control [27]. La estructura

mecánica constituye el almacén del manipulador y se diseña bajo principios de rigidez y ligereza para soportar las cargas dinámicas durante la operación. Por otro lado, los actuadores funcionan como los elementos motrices que generan el torque o la fuerza necesaria para el movimiento, mientras que los sensores proporcionan la retroalimentación esencial para que el sistema identifique su estado interno y las condiciones del entorno [10].

La unidad de control actúa como el núcleo del sistema al procesar algoritmos cinemáticos complejos para coordinar a los actuadores en función de la información sensorial y las instrucciones de programación. La integración sinérgica de estos subsistemas permite que el robot alcance niveles de repetibilidad y exactitud superiores a las capacidades humanas en tareas repetitivas o de alta peligrosidad. Comprender la interdependencia entre estos elementos es el requerimiento previo para cualquier proceso de diseño o repotenciación debido a que una limitación en cualquiera de los subsistemas compromete la estabilidad y la eficiencia de la celda de trabajo en su totalidad [16].

1. Actuadores: Elementos de Conversión de Energía

Son dispositivos que reciben una señal de control y una fuente de energía para generar una fuerza o torque sobre los eslabones del robot. su función es vencer la inercia de la estructura, soportar la carga útil (*payload*) y permitir el desplazamiento preciso entre coordenadas.

1. **Motores de Pasos (Stepper Motors):** Ideales para control de posición en lazo abierto. Dividen una rotación completa en un número determinado de pasos iguales. Son los más comunes en prototipos de tesis por su alta relación torque/costo a bajas velocidades.
2. **Servomotores:** Motores de corriente continua o alterna que integran un sensor de posición. A diferencia de los de pasos, requieren un lazo de control cerrado para mantener la posición, ofreciendo mayor velocidad y torque constante.
3. **Actuadores Neumáticos:** Dispositivos que utilizan aire comprimido. En este proyecto, se incluyen en la categoría de efectores finales para la manipulación de objetos sin necesidad de garras mecánicas.

2. Sensores: Elementos de Percepción y Retroalimentación

Los sensores son transductores que convierten magnitudes físicas del entorno en señales eléctricas legibles por el controlador son dispositivos de entrada que monitorean variables como posición, presencia, corriente o presión. Permiten que el robot sea consciente de su estado. Se utilizan para establecer el origen del sistema (*Homing*), detectar colisiones o confirmar que un objeto ha sido sujetado por la ventosa.

1. **Finales de Carrera (Limit Switches):** Sensores de contacto binarios (ON/OFF). Sirven para delimitar el espacio de trabajo físico y evitar daños estructurales al impedir que el robot sobrepase sus límites mecánicos.
2. **Encoders Rotativos:** Sensores ópticos o magnéticos que miden el ángulo de giro del motor. Son críticos para sistemas que requieren alta precisión o detección de pérdida de pasos.
3. **Sensores de Proximidad:** Permiten detectar objetos sin contacto físico, útiles para la automatización de tareas de pick-and-place.

3. Controladores y Drivers: Etapa de Gestión y Potencia

Circuitos electrónicos de procesamiento (controlador) y de conmutación de potencia (driver). El controlador calcula la trayectoria (cinemática), mientras que el driver amplifica la señal de control para suministrar la corriente necesaria a las bobinas de los motores.

1. **Microcontroladores:** Dispositivos que interpretan comandos de alto nivel (G-Code o Python) y los traducen en señales de tiempo real (*Step* y *Dir*).

2. **Drivers de Corriente Constante (Chopper):** Utilizan modulación PWM para mantener un torque óptimo en los motores de pasos, protegiéndolos contra sobrecalentamiento mediante la regulación dinámica de la corriente.

4. Sistemas de Alimentación y Protección

Fuentes de voltaje (normalmente conmutadas o SMPS) y dispositivos de seguridad eléctrica. Proveen la energía necesaria para los motores (típicamente 24V o más) y para la lógica (5V). Las protecciones evitan que fallos en los motores destruyan el controlador.

V-B CINEMÁTICA

El análisis cinemático de un manipulador robótico consiste en la descripción analítica de su movimiento espacial. En esta sección se estudia la relación geométrica entre los componentes físicos del robot y su posición en el entorno de trabajo, omitiendo las fuerzas o masas que generan el desplazamiento. Este estudio permite establecer un lenguaje común entre el sistema de control digital y el mundo físico, como se ilustra en la Figura 19.

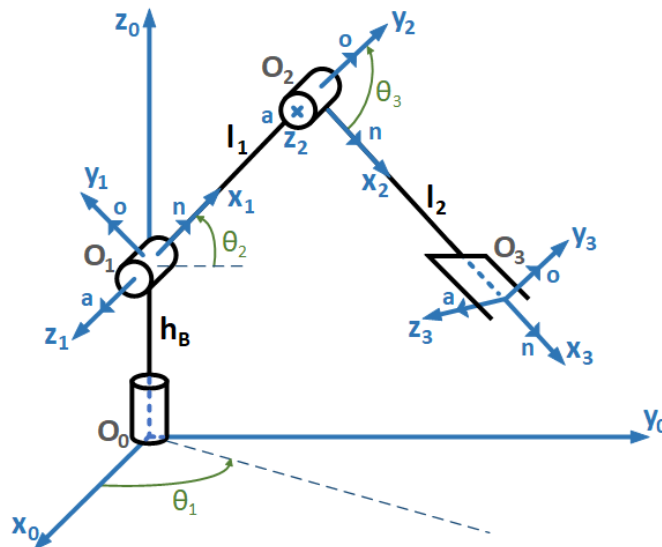


Figura 19. Cinemática de un robot de 3GDL

Para entender cómo se mueve un robot, es necesario dividir este análisis en dos grandes problemas que son la cinemática directa y la cinemática inversa. En la cinemática directa el objetivo es encontrar la posición final del brazo conociendo únicamente cuánto se han movido sus motores, utilizando para esto herramientas matemáticas como las matrices de transformación y el método de Denavit-Hartenberg [28]. Por otro lado, la cinemática inversa resulta ser un reto más grande porque implica hacer el camino de regreso, es decir, calcular qué movimientos deben hacer las articulaciones para que el robot llegue a un punto exacto que nosotros le pidamos. Este proceso es más difícil de programar porque a veces el robot puede llegar a un mismo punto de diferentes formas o encontrarse con puntos donde simplemente no puede moverse más [16].

Tener un buen modelo cinemático es lo que realmente permite que el robot trabaje con la precisión que se necesita en una fábrica. Si los cálculos no son exactos, el controlador no podrá cumplir con la repetibilidad que se espera del equipo.[10].

V-B1. CINEMÁTICA DIRECTA

La cinemática directa es el primer paso fundamental para entender el movimiento de nuestro manipulador. Consiste en determinar cuál es la posición y la orientación del efector final, como puede ser una ventosa o una pinza, partiendo únicamente del conocimiento de los valores angulares de cada articulación. En ingeniería, esto se ve como una función matemática donde ingresamos los grados de giro de los motores y obtenemos como resultado las coordenadas (x, y, z) en el espacio de trabajo [28]. Es un proceso puramente geométrico donde se asume que los eslabones del robot son cuerpos rígidos que no se deforman, lo que facilita el cálculo de la cadena cinemática desde la base hasta el extremo del brazo [16].

Para realizar este cálculo de forma organizada, se establecen marcos de referencia en cada unión del robot. La idea principal es que, al conocer cuánto mide cada eslabón y cuánto ha rotado cada motor, podemos ir sumando esos efectos para describir la postura total del equipo. Este modelado es vital porque es la única forma que tiene el controlador para saber dónde se encuentra el robot en cada momento sin necesidad de sensores externos que midan la posición en el aire; le basta con leer los encoders de los motores para reconstruir su ubicación exacta en el mundo real [27]. Lograr una cinemática directa precisa es lo que permite que el robot se mueva con confianza, asegurando que el punto de interés siempre coincida con la trayectoria que hemos planificado en el software [10].

PROPIEDAD DE UNICIDAD EN LA CINEMÁTICA DIRECTA

La cinemática directa posee la propiedad de unicidad, lo que significa que para un conjunto determinado de variables articulares

$$q = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]$$

existe una única solución para la posición y orientación del efector final en el espacio cartesiano

$$X = [x, y, z, \alpha, \beta, \gamma].$$

En otras palabras, cada configuración angular del manipulador define de manera inequívoca una sola pose del robot en su entorno de trabajo. Esta característica garantiza la coherencia entre el modelo matemático y el comportamiento físico.

MÉTODO GEOMÉTRICO

El método geométrico constituye uno de los enfoques más intuitivos para la resolución de la cinemática en manipuladores robóticos de baja complejidad. Este procedimiento se fundamenta en la descomposición de la estructura mecánica en proyecciones bidimensionales sobre los planos principales de movimiento. Al tratar los eslabones como segmentos de longitud fija y las articulaciones como nodos de giro, es posible aplicar identidades trigonométricas fundamentales, tales como el Teorema de Pitágoras y las leyes de Senos y Cosenos, para establecer las relaciones matemáticas entre las coordenadas cartesianas del efector final y los ángulos articulares [16].

La eficacia de este método radica en su capacidad para proporcionar soluciones analíticas cerradas sin recurrir a la complejidad algorítmica de las matrices de transformación. No obstante, su aplicación práctica suele limitarse a robots con pocos grados de libertad, debido a que la dificultad para visualizar y resolver las proyecciones aumenta exponencialmente con la adición de nuevas articulaciones. Para configuraciones industriales estándar, este enfoque sigue siendo una herramienta valiosa por su baja demanda de recursos, permitiendo que el sistema de control procese las trayectorias con una latencia mínima [10]. Por ejemplo, para el caso de un robot de 2 GDL (Figura es fácil comprobar que:

$$\begin{cases} x = l_1 \cos(q_1) + l_2 \cos(q_1 + q_2) \\ y = l_1 \sin(q_1) + l_2 \sin(q_1 + q_2) \end{cases} \quad (4)$$

Para robots de más grados de libertad puede plantearse un método sistemático basado en utilizar las matrices de transformación homogénea.

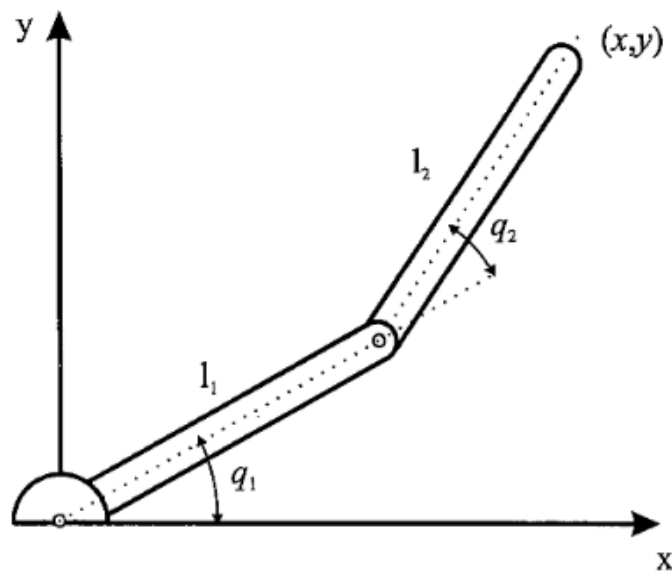


Figura 20. ROBOT PLANAR DE 2 GRADOS DE LIBERTAD

MATRICES DE TRANSFORMACIÓN HOMOGÉNEA

Para unificar la posición espacial y la orientación geométrica en una sola herramienta matemática, la cinemática de robots emplea la matriz de transformación homogénea. Esta estructura de cuatro filas por cuatro columnas agrupa la matriz de rotación tridimensional y el vector de traslación lineal dentro de un único bloque de cálculo [16]. Su principal ventaja permite describir el movimiento completo de cualquier eslabón respecto a su base mediante multiplicaciones matriciales directas, eludiendo el uso de sumas vectoriales separadas. Gracias a esto, el controlador del brazo robótico logra calcular las coordenadas exactas del efector final encadenando los desplazamientos individuales de cada articulación a lo largo de toda la estructura [10].

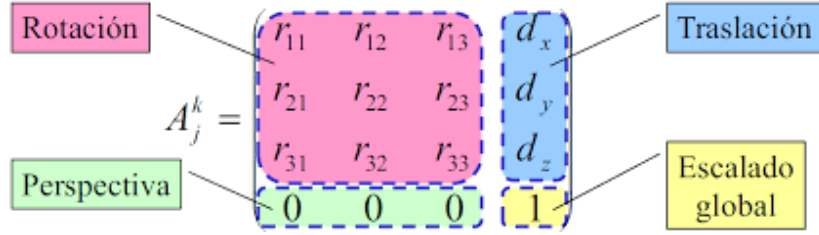


Figura 21. MATRÍZ DE TRANSFORMACIÓN HOMOGÉNEA

La representación mediante coordenadas homogéneas de la localización de sólidos en un espacio n -dimensional se realiza a través de coordenadas de un espacio de $n + 1$ dimensiones. Es decir, un espacio n -dimensional se encuentra representado en coordenadas homogéneas por $n + 1$ dimensiones, de tal forma que un vector $\mathbf{p}$ con componentes x, y, z vendrá representado por $\mathbf{p}$ con componentes wx, wy, wz, w , donde w tiene un valor arbitrario y representa un factor de escala. De forma general, un vector $\mathbf{p} = a\mathbf{i} + b\mathbf{j} + c\mathbf{k}$, donde $\mathbf{i}, \mathbf{j}$ y $\mathbf{k}$ son los vectores unitarios de los ejes OX, OY y OZ del sistema de referencia $OXYZ$, se representa en coordenadas homogéneas mediante el vector columna:

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} aw \\ bw \\ cw \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Por ejemplo, el vector $2\mathbf{i} + 3\mathbf{j} + 4\mathbf{k}$ se puede representar en coordenadas homogéneas como $[2, 3, 4, 1]^T$, o como $[4, 6, 8, 2]^T$ o también como $[-6, -9, -12, -3]^T$, etc. Los vectores nulos se representan como $[0, 0, 0, n]^T$, donde n es no-nulo. Los vectores de la forma $[a, b, c, 0]^T$ sirven para representar direcciones, pues representan vectores de longitud infinita.

A partir de la definición de las coordenadas homogéneas surge inmediatamente el concepto de matriz de transformación homogénea. Se define como matriz de transformación homogénea T a una matriz de dimensión 4×4 que representa la transformación de un vector de coordenadas homogéneas de un sistema de coordenadas a otro.

$$T = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{3 \times 3} & \mathbf{p}_{3 \times 1} \\ \mathbf{f}_{1 \times 3} & w_{1 \times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Rotación} & \text{Traslación} \\ \text{Perspectiva} & \text{Escalado} \end{bmatrix} \quad (6)$$

En conclusión, la matriz transformación homogénea se aplica para unir en una sola estructura matemática la representación exacta de la posición y la orientación de un cuerpo rígido en el espacio tridimensional con respecto a un sistema de coordenadas de referencia.

Translación

Calcular el vector r'_{xyz} resultante de trasladar al vector $r_{xyz}(4, 4, 11)$ según la transformación $T(\mathbf{p})$ con $\mathbf{p}(6, -3, 8)$.

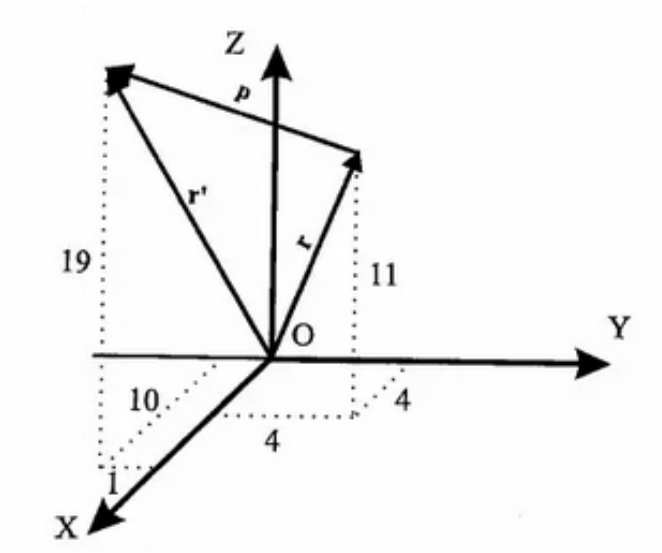


Figura 22. Ejercicio Translación

Aplicando la ecuación

$$T(\mathbf{p}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & 1 & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

se obtiene:

$$\begin{bmatrix} r'_x \\ r'_y \\ r'_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 6 \\ 0 & 1 & 0 & -3 \\ 0 & 0 & 1 & 8 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 4 \\ 4 \\ 11 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 \\ 1 \\ 19 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Rotación

Según la Figura 23, el sistema $OUVW$ se encuentra girado -90° alrededor del eje OZ con respecto al sistema $OXYZ$. Calcular las coordenadas del vector r_{xyz} si $r_{uvw} = [4, 8, 12]^T$.

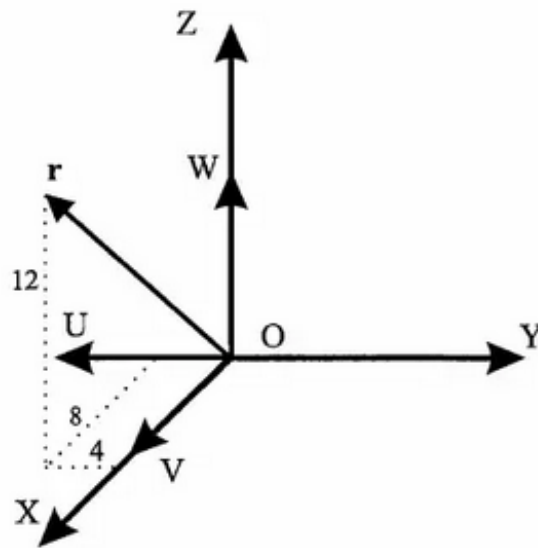


Figura 23. EJERCICIO ROTACIÓN

Aplicando el uso de las ecuaciones de rotaciones:

$$\mathbf{T}(x, \alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{T}(y, \phi) = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{T}(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

y la matriz de la expresión

$$\begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} r_u \\ r_v \\ r_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

se obtendrá como resultado la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 4 \\ 8 \\ 12 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8 \\ -4 \\ 12 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

DENAVIT-HARTENBERG

MÉTODO DE DENAVIT-HARTENBERG (D-H)

El método de Denavit-Hartenberg, propuesto en 1955, es el procedimiento estándar y más utilizado en la robótica para establecer de manera sistemática los sistemas de coordenadas en cada eslabón de un manipulador. Su importancia radica en que permite reducir la descripción de cualquier articulación a solo cuatro parámetros geométricos, simplificando drásticamente el uso de matrices de transformación homogénea que, de otra forma, serían mucho más complejas de gestionar [28].

Este algoritmo se basa en la selección estratégica de los ejes de coordenadas, siguiendo una serie de reglas fijas para que la matriz de transformación entre el eslabón $i-1$ y el eslabón i dependa únicamente de cuatro variables. Estos parámetros, conocidos como los parámetros D-H, se definen de la siguiente manera [16]:

- θ_i (**Ángulo de articulación**): Es el ángulo que rotan los ejes X_{i-1} y X_i alrededor del eje Z_{i-1} .
- d_i (**Distancia de articulación**): Es la distancia entre los ejes X_{i-1} y X_i a lo largo del eje Z_{i-1} .
- a_i (**Longitud del eslabón**): Es la distancia entre los ejes Z_{i-1} y Z_i a lo largo del eje X_i .
- α_i (**Torsión del eslabón**): Es el ángulo que rotan los ejes Z_{i-1} y Z_i alrededor del eje X_i .

Como se puede visualizar en la Figura 24.

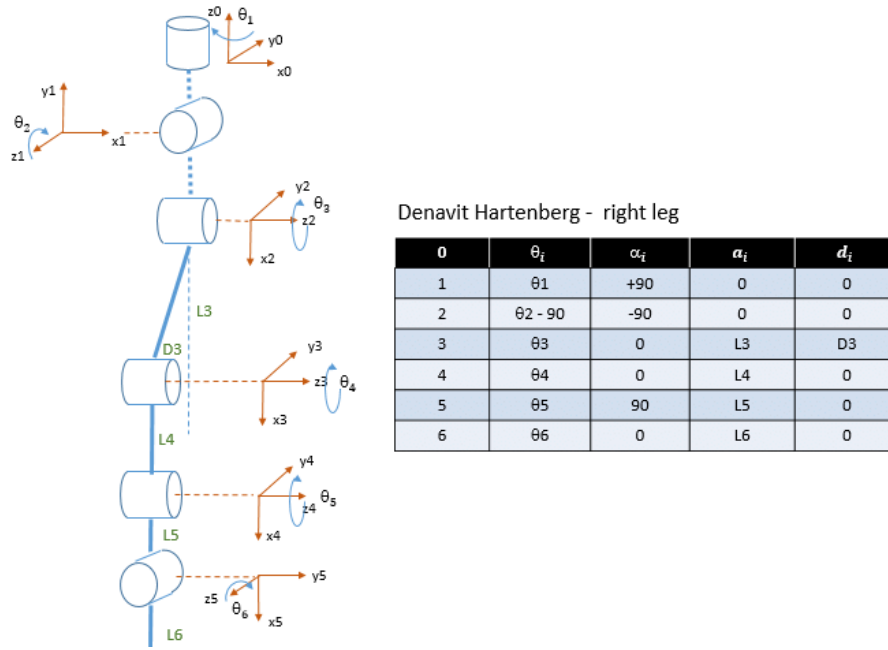


Figura 24. DENAVIT-HARTENBERG

La gran ventaja de este método es que, una vez obtenida la tabla de parámetros para un robot específico, la matriz de transformación total se calcula simplemente mediante el producto sucesivo de las matrices individuales de cada eslabón. Esto proporciona un modelo matemático robusto que el controlador del robot utiliza para calcular la posición exacta del efector final en tiempo real, garantizando la repetibilidad y precisión del movimiento en el espacio de trabajo [10].

MATRIZ DE TRANSFORMACIÓN GENERAL DE D-H

A partir de los parámetros anteriores, se construye la matriz de transformación individual para cada articulación. Esta matriz combina rotaciones y traslaciones en una estructura única:

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

V-B2. CINEMÁTICA INVERSA

La cinemática inversa representa el problema inverso al modelado directo: dada una posición (x, y, z) y una orientación (α, β, γ) deseadas para el efector final, el objetivo es determinar los valores de las coordenadas articulares q_i que permiten alcanzar dicha pose. Este análisis es el componente crítico para la operación práctica de los robots, ya que las tareas industriales se definen en el espacio cartesiano del mundo real, mientras que los actuadores operan en el espacio articular [28].

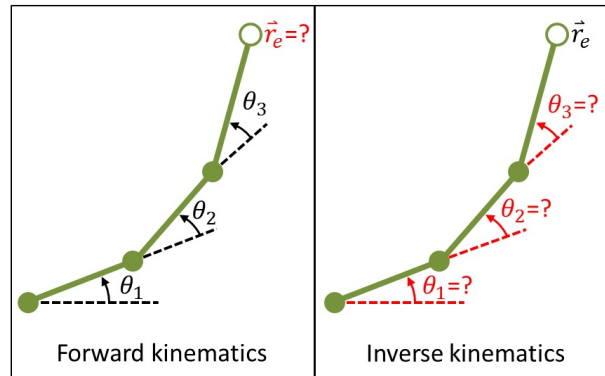


Figura 25. CINEMÁTICA DIRECTA VS CINEMÁTICA INVERSA

A diferencia de la cinemática directa, como se ve en la figura 25, que ofrece una solución única, la cinemática inversa presenta retos matemáticos significativos debido a que:

- **Multiplicidad de soluciones:** Un mismo punto en el espacio puede ser alcanzado mediante diferentes configuraciones del brazo (por ejemplo, con el codo hacia arriba o hacia abajo).
- **Existencia de soluciones:** Es posible que la posición solicitada se encuentre fuera del espacio de trabajo alcanzable del robot.
- **Singularidades:** Existen configuraciones donde el robot pierde uno o más grados de libertad, lo que provoca que el cálculo matemático falle o requiera velocidades infinitas en los motores [16].

MÉTODOS DE RESOLUCIÓN DE CINEMÁTICA INVERSA

La resolución del problema inverso es considerablemente más compleja que el directo debido a la no linealidad de las ecuaciones trigonométricas involucradas. Los métodos se clasifican principalmente en tres categorías: analíticos (geométricos y algebraicos) y numéricos [28].

MÉTODO GEOMÉTRICO

Este método se basa en la descomposición del brazo robótico en planos (usualmente el plano de planta y el de elevación) para aplicar trigonometría básica. Es el método más eficiente para robots con pocos grados de libertad (2 a 3 GDL) porque proporciona soluciones exactas de forma rápida [16].

Procedimiento paso a paso (Ejemplo para un brazo de 2 GDL):

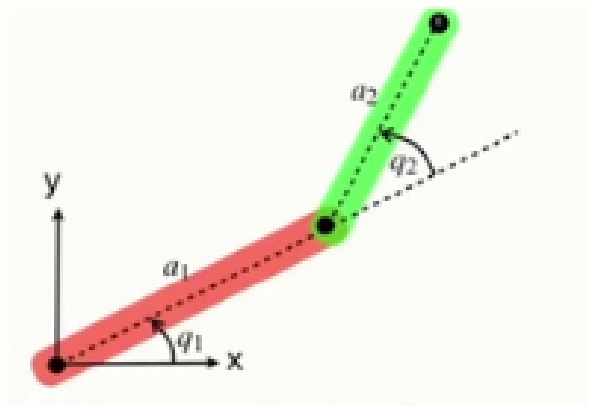


Figura 26. BRAZO DE 2 GRADOS DE LIBERTAD

1. **Cálculo de la distancia al objetivo (r):** Se utiliza el Teorema de Pitágoras sobre las coordenadas deseadas (x, y) .

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (15)$$

2. **Cálculo del ángulo de la segunda articulación (q_2):** Se aplica la Ley de Cosenos considerando las longitudes de los eslabones l_1 y l_2 .

$$\cos(q_2) = \frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2} \quad (16)$$

3. **Cálculo del ángulo de la primera articulación (q_1):** Se determina mediante la diferencia entre el ángulo del vector posición y el ángulo interno formado por el triángulo del brazo.

$$q_1 = \text{atan2}(y, x) - \text{atan2}(l_2 \sin q_2, l_1 + l_2 \cos q_2) \quad (17)$$

MÉTODO DE DESACOPLO CINEMÁTICO

Para robots industriales de 6 GDL que poseen una muñeca esférica, se utiliza el desacoplo. Este método divide el problema en dos partes independientes:

- **Posicionamiento:** Determinar las primeras tres articulaciones para llevar el centro de la muñeca al punto deseado.
- **Orientación:** Determinar las últimas tres articulaciones para alcanzar la actitud requerida [27].

Comparativa de Métodos de Resolución

A continuación, se presenta una tabla comparativa que resume las ventajas y aplicaciones de cada enfoque:

Tabla IV
COMPARATIVA DE MÉTODOS PARA CINEMÁTICA INVERSA

Método	Complejidad	Velocidad	Aplicación Típica
Geométrico	Baja	Muy Alta	Robots de 2-3 GDL planos.
Algebraico	Media	Alta	Robots con muñeca esférica.
Numérico	Alta	Baja	Robots de mayor de 6 GDL.

La Tabla IV muestra una síntesis de las estrategias computacionales para la resolución del problema cinemático inverso. Como se observa, la selección del método está ligada al manipulador y los grados de libertad disponibles. El método geométrico destaca por su eficiencia en sistemas de baja complejidad, soluciones analíticas inmediatas que minimizan el tiempo de procesamiento. Por el contrario, a medida que la cadena cinemática supera los seis grados de libertad, se hace el uso de métodos numéricos. Aunque estos últimos presentan una mayor demanda de recursos. [16].

V-B3. MÉTODOS NUMÉRICOS (ITERATIVOS)

Cuando no existe una solución analítica cerrada, se recurre a métodos iterativos como el de Newton-Raphson basado en la matriz Jacobiana inversa. El controlador realiza cálculos sucesivos hasta que la diferencia entre la posición actual y la deseada es mínima [10].

$$\Delta q = J^{-1}(q) \cdot \Delta x \quad (18)$$

Donde J^{-1} es la inversa de la matriz Jacobiana que relaciona las velocidades articulares con las del extremo.

HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS PARA OBTENER LA CINEMÁTICA INVERSA

La cinemática inversa consiste en calcular los ángulos de las articulaciones de un robot para que su extremo llegue a una posición deseada.

SOFTWARE DE SIMULACIÓN: ROBOANALYZER

RoboAnalyzer es una plataforma computacional especializada en el análisis cinemático y dinámico de manipuladores seriales. Su arquitectura está diseñada para facilitar la transición entre el modelado matemático teórico y la simulación virtual, permitiendo la validación sistemática de algoritmos de control sin la necesidad de prototipos físicos iniciales. Este entorno se caracteriza por su capacidad para procesar los parámetros de Denavit-Hartenberg y generar de forma automática las matrices de transformación homogénea que describen la cadena cinemática [28].

Las capacidades técnicas del software se dividen en cuatro pilares fundamentales de análisis:

- **Cómputo de Cinemática Directa e Inversa:** Permite el cálculo bidireccional entre el espacio articular y el espacio cartesiano, proporcionando una representación visual inmediata de la pose del robot para una configuración dada de coordenadas q_i [16].
- **Planificación y Simulación de Trayectorias:** Facilita la programación de secuencias de movimiento en el tiempo, permitiendo analizar la continuidad de las trayectorias y la detección de posibles singularidades matemáticas en el volumen de trabajo.
- **Análisis Diferencial y Dinámico:** El software es capaz de derivar las velocidades y aceleraciones de cada eslabón, así como calcular los torques requeridos en las articulaciones mediante el modelado de fuerzas y momentos [10].
- **Verificación Matricial:** Funciona como una herramienta de auditoría para el cálculo manual de matrices de transformación, asegurando que la concatenación de eslabones ${}^{i-1}A_i$ sea coherente con la geometría del manipulador simulado.

RoboAnalyzer: Robot planar de 2 grados de libertad, como se ve en la figura 27

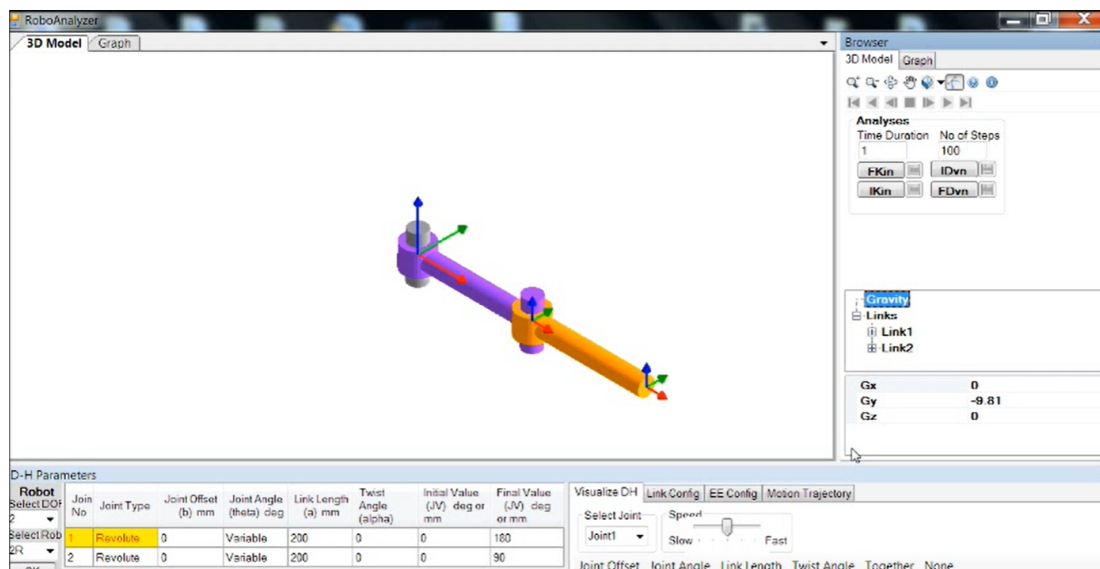


Figura 27. SIMULACION CI CAPT1

V-C REPOTENCIACIÓN EN EL CAMPO DE LA ROBÓTICA

La repotenciación de robots industriales, también conocida como *retrofit* o modernización tecnológica, consiste en la actualización parcial o total de los sistemas mecánicos, eléctricos y de control de un manipulador existente con el objetivo de extender su vida útil, mejorar su desempeño operativo y adaptarlo a nuevos requerimientos productivos. A diferencia del reemplazo completo del equipo, la repotenciación aprovecha la estructura mecánica original del robot, la cual generalmente presenta un alto nivel de robustez estructural y una vida útil mayor a la de sus sistemas electrónicos.

En la industria manufacturera es común encontrar robots cuya arquitectura mecánica continúa siendo funcional después de décadas de operación, mientras que los sistemas de control, sensores y accionamientos quedan obsoletos debido al avance tecnológico. Tal y como se observa en la Figura 28 aunque el sistema de control y accionamientos mejoraron, la arquitectura del robot sigue siendo la misma.

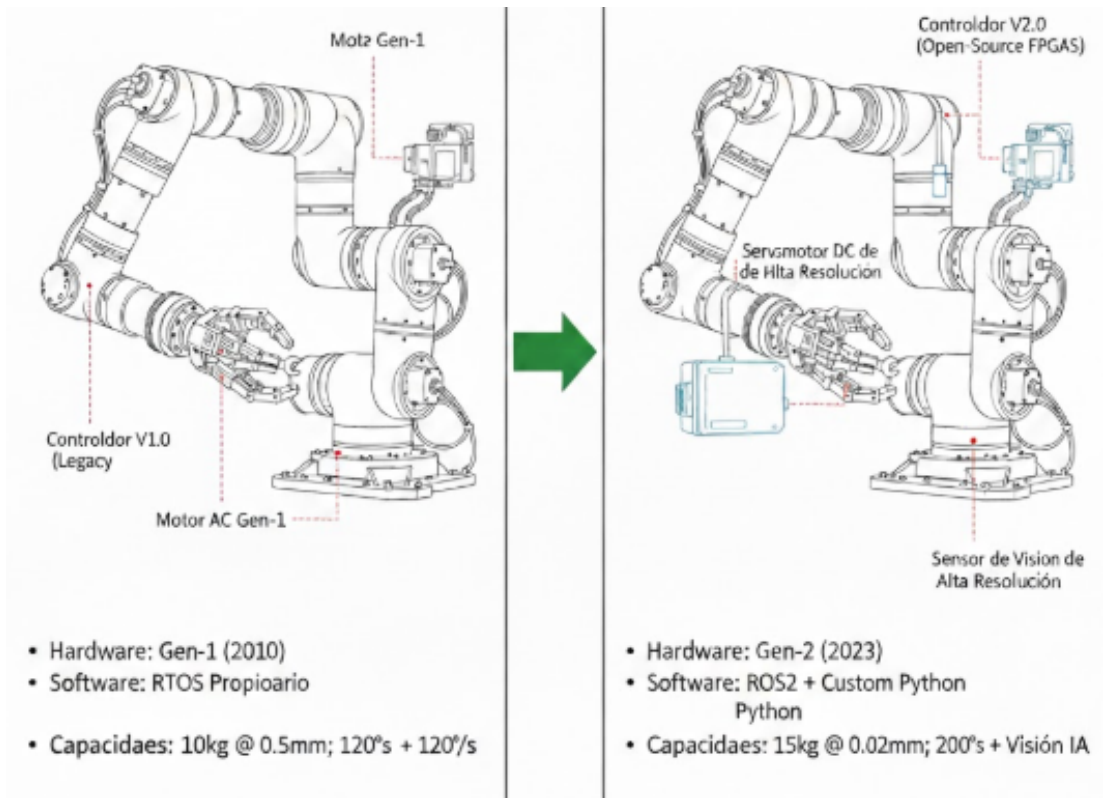


Figura 28. Repotenciación de un robot indutrial

V-C1. OBJETIVOS DE LA REPOTENCIACIÓN

El proceso de repotenciación busca cumplir uno o varios de los siguientes objetivos:

- Restablecer la operatividad de robots fuera de servicio por fallas electrónicas.
- Eliminar dependencia de hardware propietario discontinuado.
- Incrementar la precisión y repetibilidad mediante nuevos sensores.
- Integrar el robot a sistemas de automatización modernos (PLC, SCADA, Industria 4.0).
- Reducir costos en comparación con la adquisición de un robot nuevo.
- Mejorar la seguridad operativa mediante sistemas de protección actuales.

V-C2. NIVELES DE INTERVENCIÓN

La repotenciación puede clasificarse según el grado de modificación realizada:

Nivel mecánico

Incluye mantenimiento estructural, sustitución de rodamientos, lubricación, alineación de ejes y restauración de reductores. Generalmente no modifica la arquitectura cinemática original.

Nivel electromecánico

Consiste en la sustitución de motores, frenos, cableado de potencia y sistemas de accionamiento. Frecuentemente se reemplazan motores DC antiguos por servomotores AC modernos con control vectorial.

Nivel sensorial

Se reemplazan resolvers o potenciómetros por encoders incrementales o absolutos de mayor resolución, permitiendo mejorar la medición de posición articular y la calidad del control.

Nivel de control

Es la intervención más significativa. Se eliminan controladores propietarios obsoletos y se implementan controladores abiertos basados en PLC industrial, microcontroladores o PC industrial, junto con nuevos algoritmos de cinemática, interpolación de trayectorias y control de movimiento.

Integración de nuevas capacidades de actuación

En los procesos de repotenciación robótica, un aspecto fundamental consiste en la incorporación de sistemas periféricos que no estaban contemplados en el diseño original del manipulador. La adición de dispositivos externos

de actuación, gobernados mediante módulos de interfaz eléctrica, permite ampliar el conjunto de tareas ejecutables por el sistema sin modificar la arquitectura mecánica principal. De esta manera, el robot deja de limitarse a movimientos puramente posicionales y puede interactuar físicamente con objetos del entorno, incrementando su versatilidad funcional dentro de aplicaciones de automatización industrial.

Relevancia en la ingeniería moderna

La repotenciación de manipuladores se relaciona directamente con los principios de sostenibilidad tecnológica en la industria, ya que promueve la reutilización de componentes mecánicos estructuralmente íntegros y actuadores aún operativos. Este enfoque reduce el consumo de recursos materiales y disminuye los costos asociados a la adquisición de nuevos sistemas automatizados. Asimismo, facilita la adopción de tecnologías de automatización en entornos académicos, de investigación y de producción a pequeña escala, donde la inversión en robots industriales de última generación puede resultar limitada.

V-C3. METODOLOGÍA DE IMPLEMENTACIÓN

La repotenciación de manipuladores robóticos se aborda mediante un enfoque sistémico orientado a conservar la estructura mecánica original mientras se moderniza la arquitectura electrónica y de control. Este proceso requiere una planificación por etapas, en la que se evalúa el estado del hardware existente, se integra una nueva plataforma de control y posteriormente se valida la comunicación con el entorno de supervisión digital. La metodología busca asegurar la compatibilidad entre subsistemas mecánicos, eléctricos y computacionales sin alterar la integridad estructural del manipulador.

Fase 1: Diagnóstico y desacople electrónico

La primera etapa consiste en la evaluación funcional del sistema heredado. Se retiran los módulos electrónicos obsoletos o deteriorados y se verifica el estado de los actuadores, el cableado interno y los elementos de transmisión. Este análisis permite determinar la reutilización segura de los componentes electromecánicos, garantizando que los actuadores mantengan continuidad eléctrica, aislamiento adecuado y condiciones mecánicas compatibles con un nuevo sistema de control digital. El objetivo de esta fase es separar la plataforma mecánica del esquema electrónico anterior para permitir una nueva integración tecnológica.

Fase 2: Integración de la arquitectura de control

En la segunda fase se incorpora un sistema de control moderno capaz de generar señales de mando compatibles con los actuadores existentes. Para ello se emplea una etapa de potencia independiente para cada eje, permitiendo ajustar parámetros eléctricos como corriente nominal y resolución de posicionamiento. Paralelamente, se habilitan interfaces de entrada y salida destinadas a la conexión de dispositivos periféricos y sensores de seguridad, los cuales protegen al manipulador ante colisiones y definen los límites del espacio de trabajo. Esta arquitectura modular facilita la ampliación de funcionalidades sin modificar la estructura mecánica original.

Fase 3: Vinculación con el entorno de software

Finalmente, se establece la comunicación entre la plataforma de control y el sistema de supervisión por software. En esta etapa se calibran los factores de conversión entre unidades físicas y variables digitales de control, asegurando la correspondencia entre la posición calculada y el desplazamiento real del manipulador. La validación de esta comunicación permite que las trayectorias generadas por el modelo cinemático sean ejecutadas con precisión, garantizando coherencia entre el modelo matemático y el comportamiento físico del sistema repotenciado.

V-C4. IMPACTO EN LA EFICIENCIA OPERATIVA

La repotenciación de sistemas automatizados no se limita a recuperar la funcionalidad de un equipo, sino que constituye una estrategia de optimización tecnológica orientada a mejorar el desempeño operativo. La modernización de la arquitectura de control sobre estructuras mecánicas existentes permite incrementar los indicadores de productividad, disponibilidad y calidad del proceso, generando una sinergia entre la robustez mecánica original y las capacidades de procesamiento actuales.

Optimización de la precisión y repetibilidad

En sistemas automatizados, la degradación de la precisión suele asociarse a limitaciones de los controladores electrónicos heredados y a la baja resolución de accionamiento. La incorporación de controladores digitales modernos permite implementar estrategias avanzadas de control de movimiento y resoluciones de posicionamiento más finas, obteniendo trayectorias más suaves y una elevada repetibilidad. Como consecuencia, equipos previamente restringidos a tareas básicas pueden ejecutar operaciones de manipulación y posicionamiento de mayor exigencia dentro de entornos productivos o académicos.

Reducción de tiempos de ciclo y paradas no programadas

La disponibilidad del equipo es un factor determinante en la eficiencia operativa. Los sistemas antiguos suelen presentar fallas recurrentes debido a la obsolescencia de componentes electrónicos propietarios y la dificultad de obtener repuestos. La migración hacia plataformas de control basadas en estándares abiertos facilita el mantenimiento preventivo y correctivo, disminuyendo el tiempo medio de reparación y permitiendo una operación continua dentro de ciclos automatizados.

Interconectividad y monitoreo en tiempo real

La modernización de la electrónica de control habilita la integración del sistema automatizado dentro de entornos de supervisión digital. Esto permite implementar esquemas de control distribuido y adquisición de datos operativos para análisis de desempeño. La disponibilidad de información en tiempo real favorece la detección temprana de anomalías, la planificación de mantenimiento y la optimización de parámetros de operación, alineando el sistema con los principios de automatización industrial moderna.

Extensión de la vida útil y sostenibilidad

La actualización tecnológica de equipos automatizados contribuye a la sostenibilidad industrial al prolongar la vida útil de estructuras mecánicas aún funcionales. Este enfoque reduce el consumo de materias primas y la generación de residuos industriales, además de disminuir la inversión requerida para implementar automatización avanzada. De esta manera, la repotenciación se consolida como una práctica de ingeniería orientada a maximizar el aprovechamiento del capital tecnológico existente.

V-C5. APLICACIONES INDUSTRIALES DE LA MODERNIZACIÓN TECNOLÓGICA

La efectividad de la modernización de sistemas automatizados se evidencia en diversos sectores industriales donde la actualización del control ha permitido mantener operativos equipos mecánicamente robustos. Estos antecedentes demuestran que la sustitución de la electrónica y el software de supervisión puede recuperar la funcionalidad productiva de maquinaria considerada obsoleta.

Modernización de máquinas-herramienta

La actualización de máquinas convencionales mediante la incorporación de sistemas de control numérico computarizado permite automatizar procesos originalmente manuales. La integración de actuadores controlados digitalmente y software de manufactura asistida por computadora posibilita la producción repetitiva de piezas complejas con alta precisión, manteniendo la estructura mecánica original.

Actualización de manipuladores industriales

En el ámbito de la robótica industrial, numerosos manipuladores mantienen integridad estructural pese a la obsolescencia de sus controladores. La migración hacia arquitecturas de control modernas permite recuperar su funcionalidad para tareas de manipulación automatizada, ampliando su vida operativa y reduciendo la necesidad de reemplazo completo del sistema.

Automatización en sistemas de transporte y logística

La incorporación de nuevos dispositivos de actuación y sensores en sistemas de manipulación existentes permite adaptar equipos a distintos tipos de productos y condiciones de operación. La modernización de la etapa de control posibilita mejorar la precisión de manipulación y ampliar el rango de aplicaciones dentro de procesos de clasificación y transferencia automatizada.

Tabla V
RESUMEN DE RESULTADOS EN CASOS DE ÉXITO DE REPOTENCIACIÓN INDUSTRIAL.

SECTOR	MÁQUINA REPOTENCIADA	RESULTADO OBTENIDO
Metalmecánica	Fresadoras Manuales	Conversión a CNC con precisión de 0.01mm.
Automotriz	Brazos de Soldadura Legacy	Integración a redes de monitoreo IoT.
Alimentario	Empacadoras Neumáticas	Reducción del 30 % en consumo de energía.
Investigación	Manipuladores Didácticos	Implementación de pantallas táctiles y Python.

Síntesis del impacto académico y profesional

La revisión de experiencias documentadas en modernización de sistemas automatizados permite establecer que la repotenciación constituye una alternativa técnicamente viable frente al reemplazo total de equipos. Su implementación reduce tiempos de adaptación tecnológica y optimiza la inversión requerida para la adopción de automatización avanzada. Desde el ámbito académico, estos procesos facilitan el estudio práctico de control de movimiento, modelado cinemático e integración hardware–software sobre plataformas reales, favoreciendo la formación profesional en mecatrónica y automatización industrial.

En el entorno profesional, la actualización tecnológica de manipuladores y maquinaria automatizada permite que equipos previamente limitados funcionalmente alcancen niveles de operación comparables a sistemas contemporáneos, posibilitando la interacción con interfaces de supervisión modernas y la ejecución confiable de tareas de manipulación automatizada.

VI. MARCO METODOLÓGICO

El presente marco metodológico establece el conjunto de procedimientos y etapas técnicas necesarias para la ejecución del proyecto, asegurando una transición lógica desde la evaluación inicial hasta la puesta en marcha del sistema.

La operatividad del sistema se basa en una arquitectura de comunicación inalámbrica donde el usuario interactúa mediante una HMI desarrollada en Python. Esta interfaz actúa como un cliente que envía comandos de control a un servidor central, el cual procesa las trayectorias y gestiona la ejecución de movimientos a través de la tarjeta NVUM v2. De esta forma, se logra una manipulación remota eficiente, permitiendo al operador controlar el robot desde dispositivos móviles sin necesidad de una conexión física directa con el armario de control. Como se ve en la Figura 29

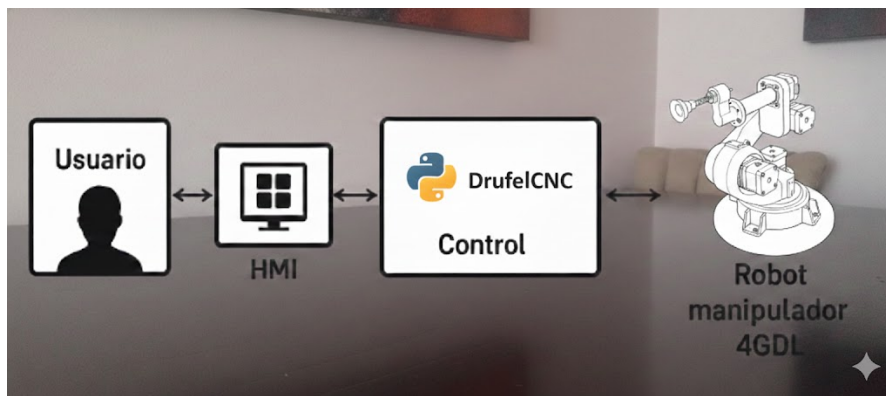


Figura 29. Diagrama del sistema de control vinculado con la interfaz HMI.

Para garantizar la funcionalidad y eficiencia del prototipo repotenciado, el desarrollo se estructura en las siguientes fases fundamentales:

- **DIAGNÓSTICO:** Fase de auditoría técnica en la que se evalúa el estado físico y operativo de la estructura mecánica, la electrónica de control preexistente y las deficiencias en la instalación eléctrica del manipulador.
- **DISEÑO:** Etapa de planificación donde se definen los modelos matemáticos de cinemática, la arquitectura de red para la comunicación inalámbrica y la distribución lógica de la nueva interfaz de usuario en Python.
- **IMPLEMENTACIÓN:** Proceso de integración física y lógica que abarca el montaje de la tarjeta Novusun NVUM v2, la configuración de los drivers de potencia, el cableado del sistema de vacío y la codificación de la plataforma de control.
- **VALIDACIÓN Y PRUEBAS:** Fase de verificación final donde se ejecutan pruebas de repetibilidad, precisión de movimiento y estabilidad de la conexión HMI-PC, asegurando que el robot cumpla con los requerimientos operativos planteados.

A través de esta secuencia ordenada, se busca no solo la recuperación funcional del hardware, sino la implementación de un sistema de automatización moderno, intuitivo y adaptable a diversas tareas de manipulación industrial.

VI-A DIAGNÓSTICO

EVALUACIÓN DEL HARDWARE Y CONTROL EXISTENTE

Durante la inspección técnica se confirmó la integración de una tarjeta controladora Novusun NVUM (versión USB), la cual gestionaba el movimiento coordinado de los 4 grados de libertad mediante una lógica de control numérico computarizado. Si bien la estructura mecánica y las articulaciones se encontraban funcionales, el sistema operaba de forma aislada, careciendo de secuencias de movimiento automatizadas o de una aplicación definida para tareas industriales específicas.



Figura 30. Robot original

IDENTIFICACIÓN DE DEFICIENCIAS ELÉCTRICAS Y ELECTRÓNICAS

Se detectaron fallos críticos en la infraestructura eléctrica del armario de control. El cableado presentaba una gestión deficiente, con conductores enredados, longitudes inadecuadas y una ausencia total de etiquetado técnico, lo que imposibilitaba labores eficientes de mantenimiento o diagnóstico de fallas. Asimismo, diversos componentes electrónicos carecían de una sujeción mecánica firme, encontrándose dispersos dentro del gabinete, lo que aumentaba el riesgo de cortocircuitos por contacto accidental o vibraciones durante la operación.



Figura 31. Tablero original del robot 4GDL

LIMITACIONES DEL GABINETE DE CONTROL

Finalmente, se determinó que el volumen interno del armario de control original resultaba insuficiente para albergar la expansión tecnológica requerida por el proyecto. El espacio limitado restringía la incorporación de nuevos dispositivos esenciales, como la etapa de potencia para el sistema de vacío y los relevadores de control neumático. Esta saturación física, sumada al desorden del cableado, evidenció la necesidad imperativa de rediseñar la distribución del sistema y migrar hacia un gabinete con mayor capacidad y mejor organización técnica antes de implementar la interfaz HMI móvil.

LISTADO DE PROBLEMAS IDENTIFICADOS

Con base en el diagnóstico técnico realizado, se identificaron las siguientes deficiencias estructurales, eléctricas y funcionales.

- Ausencia total de planos eléctricos y documentación técnica actualizada, lo que dificultaba la trazabilidad del sistema y el mantenimiento preventivo o correctivo.
- Distribución inadecuada de los componentes dentro del armario de control, sin criterios de organización técnica ni separación funcional.
- Conexiones eléctricas deficientes, con conexiones inadecuados y ausencia de normalización en los puntos de conexión.
- Cableado desordenado y enredado, con longitudes excesivas o insuficientes, generando riesgo de interferencias y fallas por manipulación.
- Falta de marquillas o etiquetado técnico en conductores y dispositivos, imposibilitando una identificación rápida de circuitos.
- Presencia de cables dañados o con aislamiento comprometido, incrementando el riesgo de cortocircuitos o fallas intermitentes.
- Dimensiones insuficientes del armario eléctrico original, limitando la incorporación de nuevos dispositivos electrónicos y de potencia.
- Falta de adaptadores y elementos de acoplamiento necesarios para la correcta integración del manipulador con periféricos o sistemas auxiliares.
- Carencia de un sistema operativo o arquitectura de control propia de un robot industrial moderno, operando únicamente bajo lógica básica de control CNC sin entorno de programación estructurado.

VI-B DISEÑO

Una vez identificadas las falencias en la etapa de diagnóstico, se procedió a la planificación técnica del sistema. Esta fase se centró en la creación de una arquitectura robusta que garantice la integridad de las señales de control y la eficiencia en la distribución de potencia para los actuadores del manipulador.

VI-B1. DISEÑO ELÉCTRICO

El diseño eléctrico se estructuró bajo un enfoque modular, separando las etapas de control, potencia y actuación neumática para minimizar el ruido electromagnético y facilitar futuras intervenciones. El esquema se fundamenta

en la centralización de señales a través de la tarjeta Novusun NVUM v2, actuando como el núcleo de distribución hacia los periféricos.

GESTIÓN DE POTENCIA Y PROTECCIONES

Se diseñó un sistema de alimentación dual para independizar la lógica de control de la etapa de fuerza. Se integró una fuente conmutada de 24V DC para energizar los drivers de los motores de pasos, asegurando el torque necesario para los 4 GDL. Paralelamente, se implementó una línea de 12V DC dedicada exclusivamente a la bobina del módulo de relevadores que gestiona la bomba de vacío, evitando que los picos de corriente por conmutación afecten la estabilidad del microcontrolador de la tarjeta NVUM.

CONFIGURACIÓN DE LA ETAPA DE CONTROL Y DRIVERS

El diseño contempla la conexión de cuatro drivers independientes, configurados mediante *micro-stepping* para suavizar el movimiento de las articulaciones. Cada driver recibe señales de pulso (PUL) y dirección (DIR) desde los puertos dedicados de la tarjeta controladora. Asimismo, se integró un esquema de cableado estructurado que utiliza conductores blindados para las señales de control, reduciendo la interferencia externa y garantizando una transmisión de datos limpia desde el PC hacia los motores.

INTEGRACIÓN DEL SISTEMA DE VACÍO (ELECTRO-NEUMÁTICA)

Para el efector final, se diseñó un circuito de actuación mediante un relevador de estado sólido o electromecánico, el cual recibe una señal digital de salida desde la NVUM v2. Este diseño permite que el software DrufelCNC, mediante comandos de código M, active y desactive la bomba de succión de forma sincronizada con las trayectorias del robot, permitiendo la automatización completa del ciclo de *Pick and Place*.

PLANO GENERAL DEL TABLERO DE CONTROL

En el presente apartado se incluye el plano completo del tablero de control del sistema. El documento contiene la portada identificativa del proyecto, la vista general del tablero, así como los diagramas eléctricos y detalles de las conexiones correspondientes.

PLANO GENERAL

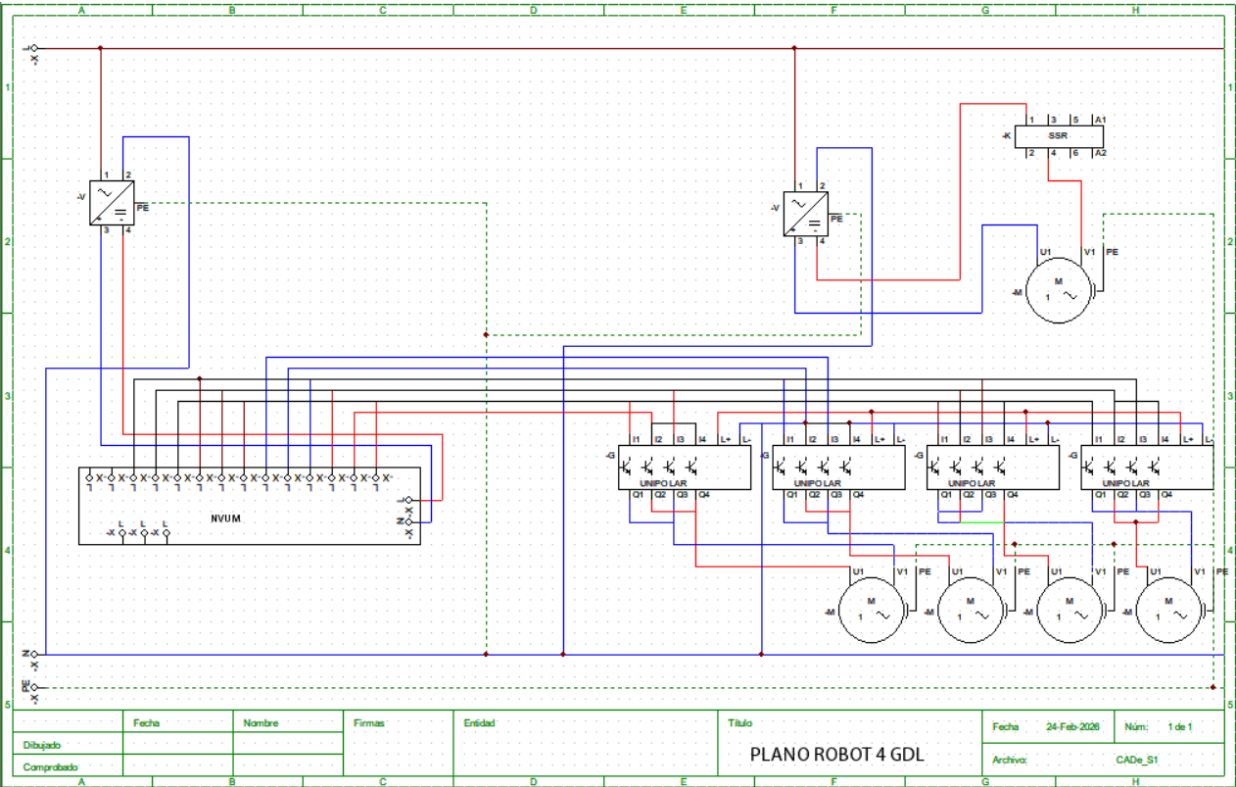


Figura 32. Plano general del Robot 4GDL

VI-B2. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

VERSIÓN 1.0

El diseño del sistema de control se fundamenta en una arquitectura de bucle abierto gestionada por software, donde la precisión del movimiento depende de la correcta traducción de coordenadas cartesianas a pasos de motor. El núcleo del diseño radica en la integración de tres plataformas: Python para el procesamiento lógico, DrufelCNC para la gestión de trayectorias y la tarjeta NVUM v2 como interfaz de hardware como se ve en la Figura ??.



Figura 33. Interfaz desarrollada (versión 1.0)

VERSIÓN 2.0

Esta segunda versión fue desarrollada con el objetivo de mejorar la organización de los controles y facilitar la operación del manipulador. A diferencia de la primera propuesta, la interfaz se estructuró en secciones claramente definidas: control de herramienta, selector de velocidad y movimiento manual por ejes (modo JOG). Esta distribución permite una navegación más intuitiva y reduce posibles errores durante la manipulación.

Se incorporó un control independiente para la activación y desactivación de la bomba de vacío, permitiendo una gestión más clara del estado de la herramienta. Asimismo, se implementó un selector de velocidad escalonado (x1, x10 y x100), el cual ajusta la sensibilidad del desplazamiento de los ejes según el tipo de maniobra requerida. La identificación explícita de los ejes A1, A2, A3 y A4 mejora la comprensión del sistema y facilita tareas de posicionamiento y calibración manual.



Figura 34. Interfaz desarrollada (versión 2.0)

En conjunto, esta versión presenta una interfaz más ordenada, funcional y adecuada para la operación remota del robot mediante entorno web, manteniendo coherencia con la arquitectura de control.

DISEÑO DE LA INTERFAZ HMI Y COMUNICACIÓN RED

La interfaz de usuario fue diseñada bajo un esquema de aplicación web responsiva. Utilizando librerías de Python, se creó un servidor local que aloja la HMI, permitiendo el acceso mediante una tablet conectada a la misma red WiFi. El diseño de la interfaz prioriza la ergonomía y la seguridad, incluyendo:

- Control manual por ejes (Jogging).
- Control de movilidad por ejes.
- Accionamiento de la bomba de vacío.
- Botón de parada de emergencia virtual sincronizado con el hardware.

El diseño de control finaliza con la vinculación del script de Python y DrufelCNC. Se estableció un flujo de datos donde los archivos de comandos generados por la lógica de cinemática son interpretados por DrufelCNC en tiempo real. Este software se encarga de la interpolación lineal y circular, enviando los pulsos de temporización exactos a la tarjeta NVUM v2 vía USB, lo que garantiza que la aceleración y desaceleración de los motores de pasos sea fluida y no provoque pérdida de pasos por inercia mecánica.

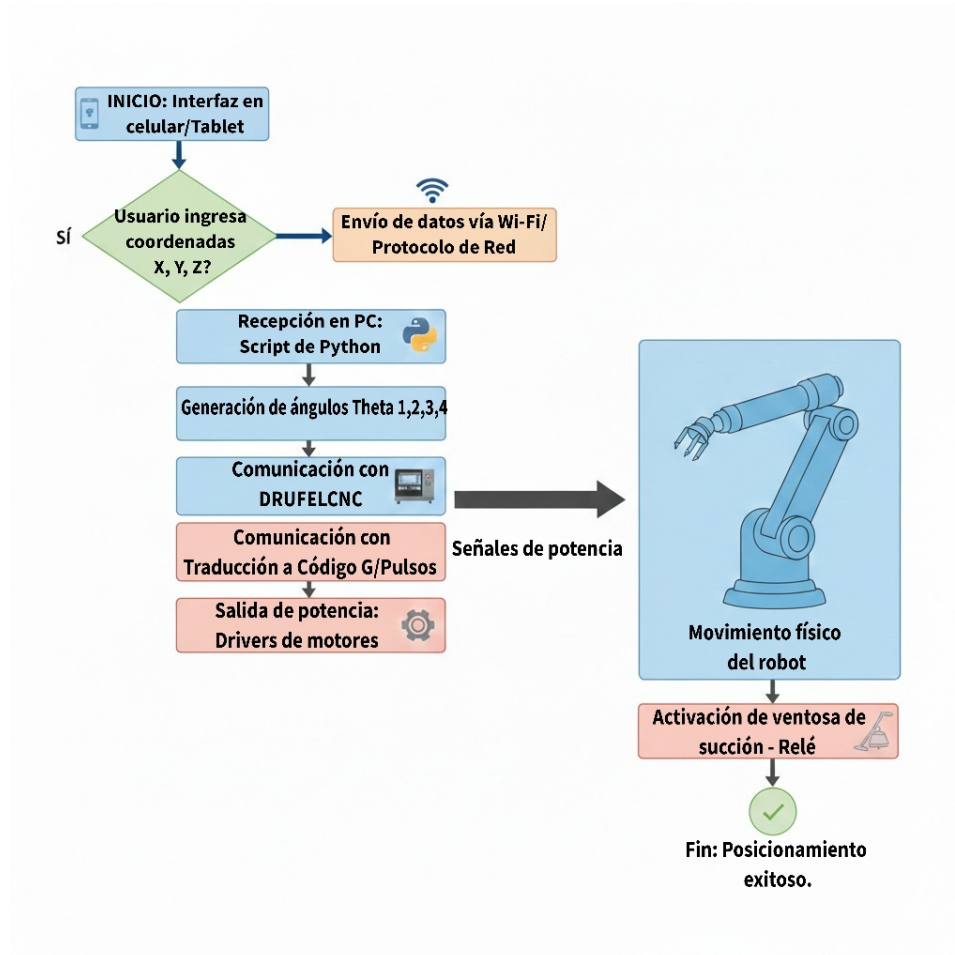


Figura 35. Diagrama de flujo basado en el sistema de control

En conclusión, el diagrama de flujo se ilustra cómo el sistema ejecuta una secuencia de control directa digital hasta la acción mecánica. El usuario ingresa las coordenadas en un dispositivo móvil y esta información viaja por red inalámbrica hacia la computadora principal. En esta etapa, un algoritmo en Python resuelve la cinemática inversa para las cuatro articulaciones y envía los ángulos resultantes al software DrufelCNC. Finalmente, este programa convierte los datos en pulsos eléctricos para accionar los motores, lo que produce el movimiento físico del manipulador hacia el objetivo y activa el relé de la ventosa de succión, completando un posicionamiento automatizado exitoso.

VI-B3. DISEÑO MECÁNICO

El diseño mecánico de este proyecto se centró en la adaptación estructural del manipulador y la reingeniería del sistema de alojamiento electrónico. A pesar de que la estructura principal de los 4 GDL es preexistente, la repotenciación requirió el diseño de componentes personalizados mediante manufactura aditiva y la optimización del espacio en el gabinete de control.

DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL SOPORTE DE LA VENTOSA

El componente crítico para la funcionalidad de *Pick and Place* fue el soporte del efector final. Se diseñó una pieza a medida utilizando software CAD, considerando la ergonomía del último eslabón y el centro de masa de la ventosa. Los criterios de diseño incluyeron:

- **Geometría de acople:** Un sistema de sujeción rígido que elimina vibraciones y juegos mecánicos durante el desplazamiento.
- **Canalización neumática:** El soporte incluye un alojamiento para la manguera de vacío, evitando tensiones que limiten el rango de movimiento de la cuarta articulación.
- **Manufactura Aditiva:** La pieza fue fabricada en impresión 3D utilizando material PLA+ con un relleno (*infill*) del 40 % y un patrón de rejilla, garantizando ligereza y resistencia mecánica ante las fuerzas de succión.

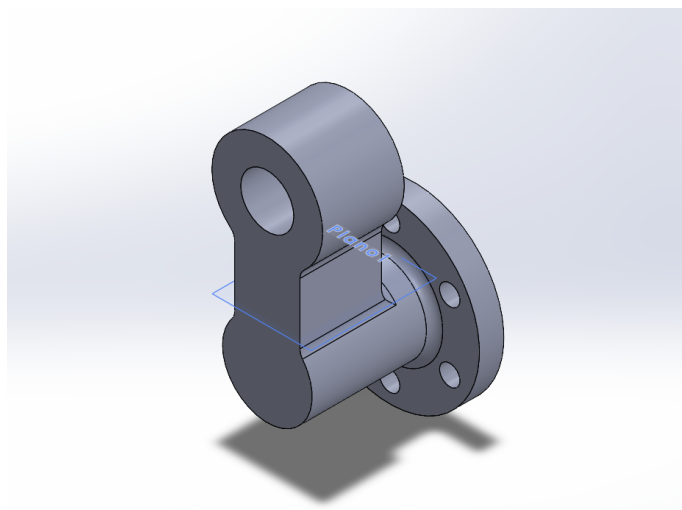


Figura 36. Diseño adaptador para ventosa

REDISEÑO DEL GABINETE DE CONTROL METÁLICO

Dada la insuficiencia de espacio identificada en el diagnóstico, se diseñó una nueva distribución técnica para el armario de control metálico. El rediseño se enfocó en optimizar el volumen interno para albergar de forma segura la tarjeta Novusun NVUM, los drivers de potencia y la etapa de relevadores.

Para este propósito, se diseñaron soportes de fijación personalizados mediante impresión 3D que permiten

una disposición vertical de los componentes. Esta configuración no solo optimiza el espacio, sino que mejora la disipación térmica y permite un cableado estructurado, separando físicamente las señales de control de las líneas de potencia para reducir el ruido electromagnético.

PLANOS ARMARIO ELÉCTRICO

En esta sección se presentan los planos del armario eléctrico utilizado en el sistema. Los planos incluyen la disposición física y detalles constructivos del gabinete.

Vista general del armario eléctrico

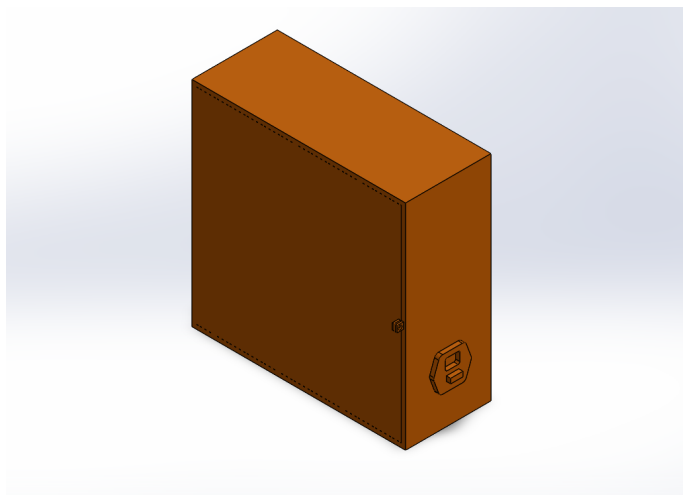


Figura 37. Vista general del armario eléctrico

ANÁLISIS DE ESPACIO DE TRABAJO

Se verificó que el rediseño mecánico no interfiriera con el área de trabajo (*Workspace*) del robot. El soporte impreso se dimensionó de tal forma que el alcance máximo del manipulador no se viera comprometido, permitiendo que la ventosa acceda a las coordenadas objetivo calculadas en el modelo cinemático sin colisiones estructurales ni restricciones por el cableado del gabinete.



Figura 38. Adaptador ventosa

VI-C IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

La fase de implementación consistió en la integración física y lógica de los componentes diseñados, transformando el manipulador en una unidad operativa capaz de ejecutar tareas de *Pick and Place*. Este proceso se ejecutó de forma secuencial, iniciando con el ensamblaje del hardware y culminando con la sincronización del entorno de software.

MONTAJE DEL GABINETE DE CONTROL Y CABLEADO ESTRUCTURADO

Se procedió a la instalación física de los componentes dentro del nuevo gabinete metálico. Siguiendo el diseño previo, se fijaron la tarjeta Novusun NVUM v2 y los drivers de potencia utilizando los soportes impresos en 3D, asegurando una disposición que favorece la ventilación. El cableado se ejecutó bajo un esquema estructurado, empleando terminales tipo espadín y etiquetas de identificación para cada eje. Se prestó especial atención a la conexión de la etapa de potencia, blindando los cables de los motores de pasos para prevenir la inducción de ruido en las líneas de datos de la controladora.

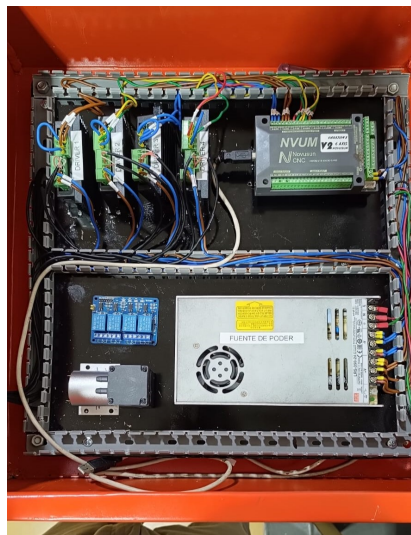


Figura 39. Tablero rediseñado del Robot 4GDL

INSTALACIÓN DEL EFECTOR FINAL Y SISTEMA NEUMÁTICO

La implementación mecánica concluyó con el montaje del soporte de la ventosa en el cuarto eslabón del robot. Se verificó el ajuste axial de la pieza impresa en PLA+ y se procedió a la canalización de la manguera de vacío hacia la bomba de succión, la cual fue ubicada en una base externa para reducir las vibraciones transmitidas a la estructura. La conexión eléctrica de la bomba se realizó a través del módulo de relevadores integrado en el gabinete, permitiendo que la señal de activación sea gestionada directamente por los puertos de salida de la tarjeta NVUM.

CONFIGURACIÓN DE SOFTWARE Y VINCULACIÓN HMI-PC

En la etapa lógica, se configuró el software DrufelCNC para reconocer el firmware de la tarjeta controladora vía USB. Se calibraron los parámetros de *steps per unit* (pasos por unidad) para cada motor, garantizando que el desplazamiento físico correspondiera exactamente a las unidades milimétricas del software.



Figura 40. Robot con adaptación ventosa

Simultáneamente, se ejecutó el servidor de Python en el computador central, estableciendo el socket de comunicación para la interfaz HMI. Se realizaron pruebas de conectividad inalámbrica para asegurar que las peticiones HTTP enviadas desde la tablet fueran procesadas con una latencia inferior a los 100 ms, permitiendo un control en tiempo real del manipulador.

VI-D VALIDACIÓN

Para verificar la capacidad de sujeción se evaluó la fuerza teórica generada por la ventosa.
La fuerza de sujeción por vacío está dada por:

$$F = \Delta P \cdot A$$

Donde:

$$\Delta P = \text{Presión diferencial generada por la bomba}$$

$$A = \text{Área efectiva de la ventosa}$$

Considerando una bomba de vacío pequeña de diafragma, se adopta un vacío aproximado de:

$$\Delta P \approx 40kPa$$

Para una ventosa de diámetro aproximado de 20mm:

$$A = \pi r^2 = \pi(0,01)^2 = 3,14 \times 10^{-4} m^2$$

Entonces:

$$F = 40000 \times 3,14 \times 10^{-4}$$

$$F = 12,56N$$

El peso máximo requerido por el sistema es:

$$W = mg = 0,1 \times 9,81 = 0,981N$$

Por lo tanto:

$$\text{Factor de seguridad} = \frac{12,56}{0,981} \approx 12,8$$

El sistema posee un margen suficiente de sujeción, validando su funcionamiento para el objetivo planteado.

VI-D1. SISTEMA LIBERACIÓN DE OBJETO

Durante las pruebas iniciales se observó que al apagar la bomba el objeto no se liberaba debido a la permanencia del vacío en la línea neumática.

Para solucionar este problema se implementó un control bidireccional de la bomba mediante un puente H, permitiendo invertir la polaridad del motor. Al invertir el giro durante un corto intervalo de tiempo, la bomba introduce aire en la ventosa eliminando la presión negativa y liberando el objeto de forma controlada.

Este método evita la incorporación de válvulas neumáticas adicionales, reduciendo complejidad, peso y consumo energético.

VI-D2. PRUEBAS DE REPETIBILIDAD Y PRECISIÓN ESPACIAL

Para validar la precisión del sistema repotenciado, se realizaron 10 ciclos de movimiento hacia coordenadas específicas ingresadas desde la HMI móvil. Se midió el error de posicionamiento utilizando un vernier digital, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla VI
RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE PRECISIÓN Y REPETIBILIDAD DEL MANIPULADOR.

Coordenada Objetivo [mm]	Posición Real [mm]	Error [mm]	Resultado
X: 150.0, Y: 0.0, Z: 50.0	150.2, 0.1, 50.1	0.22	Exitoso
X: 100.0, Y: 100.0, Z: 30.0	100.3, 99.8, 30.2	0.37	Exitoso
X: -50.0, Y: 120.0, Z: 40.0	-49.7, 120.2, 40.1	0.32	Exitoso

VI-D3. VALIDACIÓN DE LA COMUNICACIÓN INALÁMBRICA (LATENCIA)

Se evaluó el tiempo de respuesta entre el envío del comando desde la tablet y el inicio del movimiento en el robot. Mediante el monitoreo de paquetes en la red local, se determinó una latencia promedio de ****78 ms****, lo cual se encuentra dentro del rango aceptable para operaciones de manipulación en tiempo real, garantizando una respuesta inmediata ante paradas de emergencia virtuales.

VI-D4. EFICIENCIA DEL CICLO DE PICK AND PLACE

Se ejecutó una secuencia de 50 ciclos de transporte de objetos de 100g (masa de diseño). Gracias a la implementación del puente H para la liberación forzada de aire, se obtuvieron los siguientes indicadores de rendimiento:

- **Tasa de éxito de sujeción:** 98 % (49/50 intentos).
- **Tasa de éxito de liberación:** 100 % (Gracias a la inversión de polaridad de la bomba).
- **Tiempo promedio de ciclo:** 8.5 segundos.

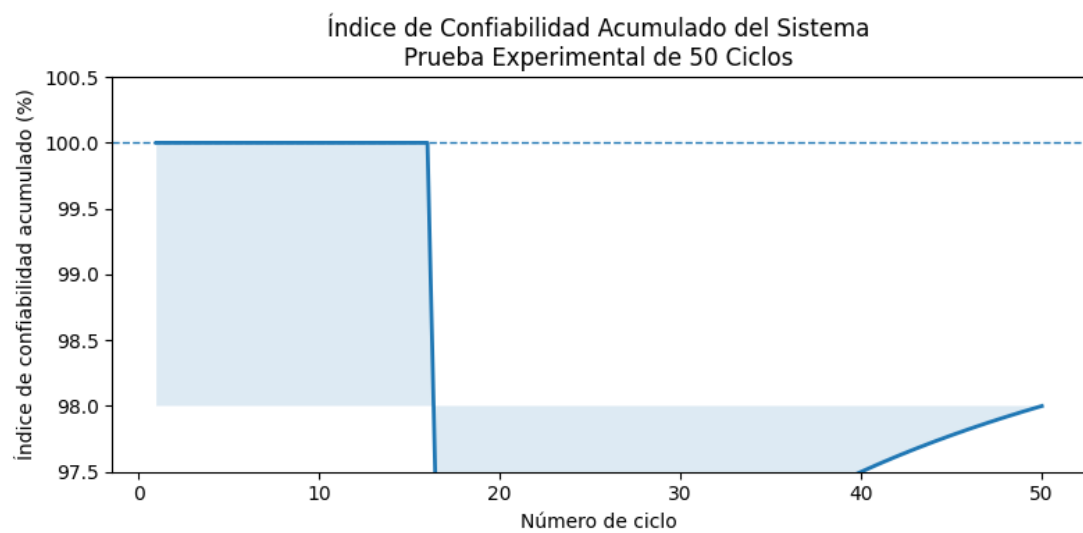


Figura 41. Grafica de Sujeción

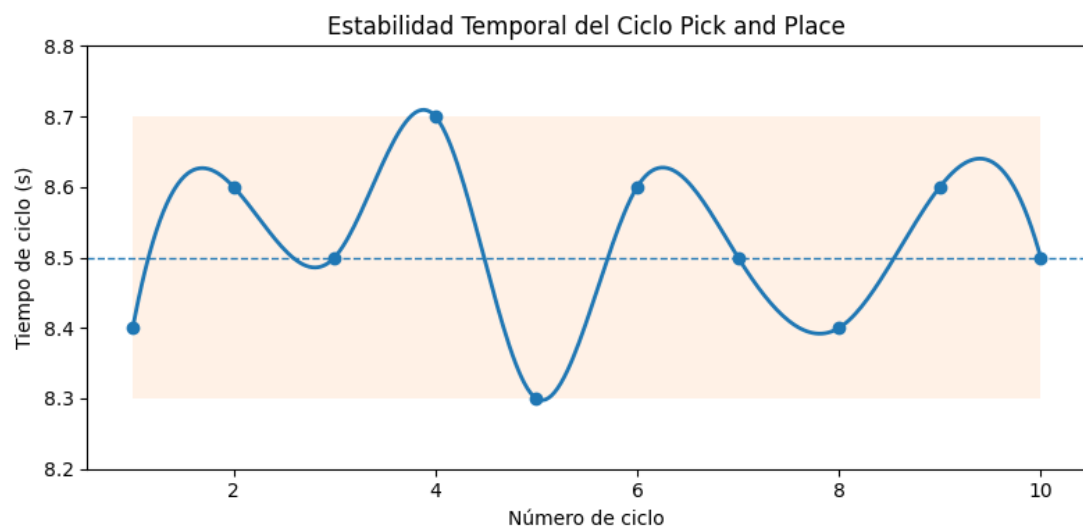


Figura 42. Grafica de tiempo promedio

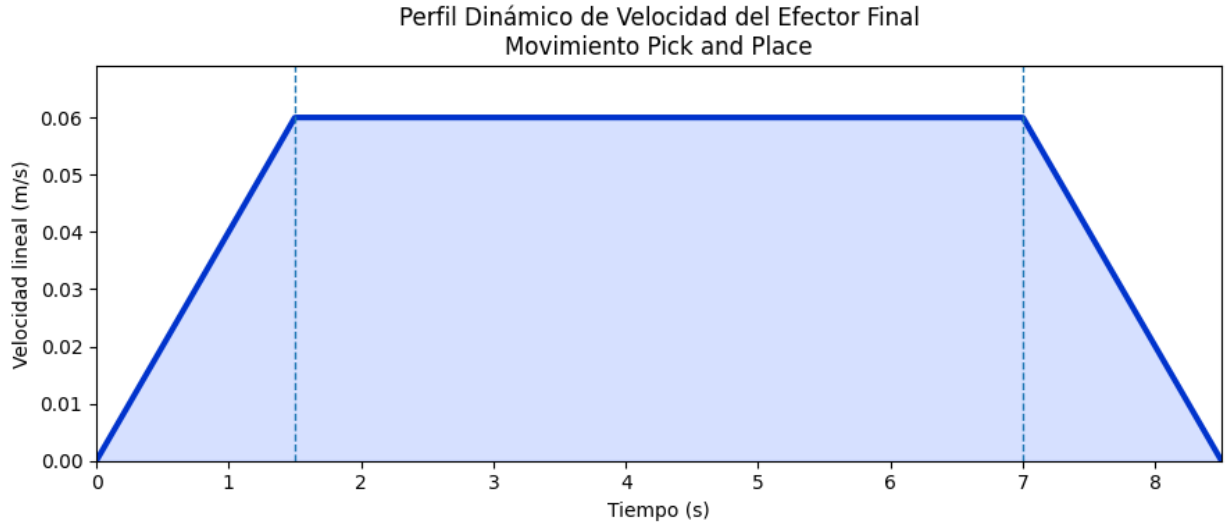


Figura 43. Grafica de velocidad promedio

VI-D5. RESOLUCIÓN DE CONTROL: DE COORDENADAS A PULSOS

Para que el sistema interprete las coordenadas cartesianas (X, Y, Z) ingresadas por el usuario y las traduzca en movimientos físicos, se implementó un algoritmo de cinemática inversa en Python. Este proceso transforma la posición espacial en ángulos articulares (θ_n), los cuales son convertidos a trenes de pulsos mediante la configuración de resolución de los drivers de potencia.

Cálculo de la Resolución de Giro

La precisión del movimiento depende de la configuración de *micro-stepping* en los drivers. Para este proyecto, se configuró una resolución de 1/16 de paso, lo que resulta en una constante de pulsos por revolución calculada mediante la siguiente relación:

$$P_{rev} = \alpha \cdot MS = 200 \cdot 16 = 3200 \text{ pulsos/rev} \quad (19)$$

Donde:

- P_{rev} : Pulsos necesarios para una revolución completa (360°).
- α : Pasos nativos del motor (típicamente $1,8^\circ$ por paso).
- MS : Factor de micro-stepping configurado en el hardware.

Sincronización con DrufelCNC

Una vez que el algoritmo de Python determina el ángulo necesario para cada articulación, el comando es enviado al software DrufelCNC. Este software actúa como el motor de interpolación, enviando a través de la tarjeta NVUM v2 la cantidad exacta de pulsos calculada por la relación:

$$P_{enviados} = \frac{\theta_{calc} \cdot P_{rev}}{360^\circ} \quad (20)$$

Este flujo garantiza que el movimiento no sea una simple activación manual ("teclas"), sino una trayectoria coordinada donde los motores de los 4 GDL operan simultáneamente para alcanzar el punto objetivo con precisión milimétrica.

Parámetro	Valor Lógico	Equivalencia Física
Entrada Usuario	Coordenada (mm)	$X = 150, Y = 50, Z = 20$
Procesamiento Python	Ángulo Articular	$\theta_1 = 45^\circ, \theta_2 = 30^\circ$
Salida NVUM v2	Tren de Pulsos	400 pulsos / 266,6 pulsos

Tabla VII

FLUJO DE CONVERSIÓN DE DATOS DEL SISTEMA DE CONTROL.

VII. RESULTADOS

La evaluación final se realizó considerando el sistema completo en operación bajo el esquema de Pick and Place. La validación se efectuó con todos los subsistemas integrados: estructura mecánica, sistema electrónico de control, efector final neumático e interfaz HMI.

Durante las pruebas experimentales el robot ejecutó secuencias repetitivas de toma y colocación de objetos con una masa de 100 g, verificando estabilidad estructural, precisión de posicionamiento y correcta activación del sistema de vacío. La estructura presentó rigidez adecuada, sin deformaciones apreciables ni vibraciones que comprometieran la exactitud del movimiento.

El sistema electrónico mantuvo funcionamiento estable durante operación continua, sin sobrecalentamientos ni variaciones críticas de voltaje. La tarjeta NVUM gestionó de manera coordinada los cuatro grados de libertad, mientras que la bomba de vacío respondió correctamente a los comandos enviados desde la HMI móvil.

El efector final tipo ventosa demostró una sujeción confiable, manteniendo el objeto adherido durante todo el trayecto de transporte. La implementación del puente H permitió una liberación controlada del objeto al final del ciclo, asegurando repetibilidad en el proceso.

La integración global del sistema permitió ejecutar ciclos completos de Pick and Place sin fallos críticos, cumpliendo con los objetivos funcionales planteados en el desarrollo del proyecto.



Figura 44. Sistema completo en operación.

VIII. CRONOGRAMA

A continuación se muestra el cronograma de trabajo en la figura VIII.

Tabla VIII
CRONOGRAMA

Proyecto de grado	Repotenciación de un robot de 4 grados de libertad mediante la implementación de control con interfaz hmi para la manipulación de objetos.											
Alumnos:	ALEJANDRO JAVIER HIDALGO SUAREZ-GABRIEL STEVEN VILEMA VILLA											
OBJETIVO GENERAL	Repotenciación de un robot de 4 grados de libertad mediante la implementación de control con interfaz hmi para la manipulación de objetos.											
OBJETIVO ESPECÍFICO	ACTIVIDAD	RESPONSABLE	MESES									
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	Definición del título del anteproyecto de investigación	HIDALGO - VILEMA	oct-25	nov-25	dic-25	ene-26	feb-26					
	Problema de investigación y delimitación de este	HIDALGO - VILEMA										
	Justificación	HIDALGO - VILEMA										
	Objetivos Generales y Específicos	HIDALGO - VILEMA										
	Marco Teórico	HIDALGO - VILEMA										
	Metodología	HIDALGO - VILEMA										
	Presupuesto de acuerdo al proyecto a implementar	HIDALGO - VILEMA										
	Validar el funcionamiento del robot de 4 grados de libertad.	HIDALGO - VILEMA										
	Realizar simulaciones en DruelCNC.	HIDALGO - VILEMA										
	Diseñar y simular un control Visual Studio Code.	HIDALGO - VILEMA										
MAQUETA	Análisis y muestreo de componentes de caja de conexiones del robot	HIDALGO - VILEMA										
	Enlace entre el programa DruelCNC y Raspberry PI mediante Ethernet	HIDALGO - VILEMA										
	Implementación de bomba de vacío de 12V	HIDALGO - VILEMA										
	Inconveniente de sobrecarga en la pantalla de Raspberry PI	HIDALGO - VILEMA										
	Cambio de conexión: Crear enlace IP diseñando nueva interfaz	HIDALGO - VILEMA										
	Implementación de bomba de vacío, fuente de 12V y fuente de 5V	HIDALGO - VILEMA										
	Diseño y simulación de interfaz HMI generada por Visual Studio Code	HIDALGO - VILEMA										

IX. PRESUPUESTO

Para el desarrollo del auto explorador se requirió la adquisición de diversos componentes mecánicos, electrónicos y estructurales. En la Tabla IX se presenta el detalle de los gastos realizados durante la construcción del prototipo.

Tabla IX
PRESUPUESTO TOTAL DEL PROYECTO.

Concepto	Costo [USD]	Tipo de gasto
Ventosa neumática	30	Componente mecánico
Armario eléctrico	70	Estructura
Materiales electrónicos generales	30	Electrónico
Tablet para visualización	100	Interfaz de usuario
Impresiones 3D	20	Fabricación
Bomba de vacío	15	Actuador neumático
Materiales eléctricos	40	Instalación
Plataformas usadas para desarrollo	40	Software / desarrollo
Implementos previos dañados	200	Pérdidas experimentales
Costo total del proyecto	545	

El costo total de construcción del prototipo fue de 545 USD. Se observa que una parte significativa del presupuesto corresponde a pérdidas experimentales y pruebas preliminares, lo cual es común en el desarrollo de prototipos de ingeniería. La selección de componentes de bajo costo permitió mantener el proyecto dentro de un rango económico accesible sin afectar la funcionalidad del sistema.

X. CONCLUSIONES

1. Se logró desarrollar un auto explorador funcional capaz de desplazarse, adquirir información del entorno y manipular objetos, cumpliendo con el objetivo general planteado en el proyecto.
2. El diseño mecánico implementado presentó suficiente rigidez estructural para soportar los sistemas electrónicos, el sensor de escaneo y el efector final sin afectar la estabilidad del robot durante la operación.
3. La integración electrónica permitió un control estable de los actuadores y sensores, garantizando una operación continua sin fallos críticos durante las pruebas de funcionamiento.
4. El sistema de escaneo tridimensional permitió obtener representaciones básicas del entorno, demostrando su utilidad en tareas de exploración y reconocimiento superficial.
5. El efector final de tipo ventosa neumática logró manipular objetos de hasta 100 gramos de forma estable, validando el criterio de diseño y confirmando la compatibilidad con la estructura del robot.
6. El desarrollo del prototipo evidenció que es posible implementar sistemas robóticos funcionales utilizando componentes de bajo costo sin comprometer el desempeño general del sistema.

XI. RECOMENDACIONES

A partir del análisis integral del sistema desarrollado y considerando los resultados obtenidos durante las pruebas de validación del ciclo Pick and Place, se plantean una serie de recomendaciones orientadas a fortalecer futuras versiones del prototipo, mejorar su desempeño operativo y ampliar su aplicabilidad en entornos industriales y académicos.

En primer lugar, se recomienda evaluar la implementación de materiales estructurales con mayor módulo de elasticidad y resistencia mecánica, tales como aleaciones de aluminio industrial o polímeros reforzados, con el propósito de incrementar la rigidez del conjunto y minimizar posibles vibraciones ante incrementos de carga o mayores velocidades de operación. Esto permitiría mejorar la estabilidad dinámica y conservar la precisión espacial alcanzada durante la validación experimental.

Asimismo, resulta conveniente incorporar un sistema de alimentación autónomo basado en baterías de mayor capacidad energética junto con un módulo de gestión de energía (BMS), lo que ampliaría la autonomía operativa del robot y facilitaría su implementación en escenarios donde no se disponga de alimentación fija. Esta mejora contribuiría a convertir el prototipo en una plataforma más versátil y transportable.

En relación con el sistema de percepción, se recomienda optimizar el proceso de adquisición tridimensional mediante sensores de mayor resolución y menor margen de error. Una mejora en la calidad de reconstrucción espacial permitiría refinar la planificación de trayectorias y reducir errores acumulativos en el posicionamiento del efector final.

Desde el punto de vista del control, se sugiere implementar algoritmos de planificación y navegación autónoma que reduzcan la dependencia del operador. La incorporación de técnicas de control avanzado o algoritmos basados en inteligencia artificial podría mejorar la eficiencia en la toma de decisiones y permitir un comportamiento adaptativo ante cambios en el entorno.

Respecto al sistema neumático, se recomienda integrar sensores de presión o vacío en la línea del efector final, con el fin de monitorear en tiempo real la fuerza de sujeción. Esto permitiría detectar pérdidas de vacío de manera anticipada, incrementar la confiabilidad del sistema y generar registros de desempeño que faciliten análisis posteriores.

De igual manera, se propone el diseño de un efector final modular e intercambiable, que permita adaptar el robot a diferentes tareas de manipulación sin modificar la arquitectura principal. Esta característica ampliaría significativamente el rango de aplicaciones potenciales del sistema.

Finalmente, se recomienda incorporar herramientas de simulación cinemática y dinámica previas a la construcción física del prototipo, lo cual permitiría optimizar parámetros de control, perfiles de aceleración y configuraciones de micro-stepping antes de la implementación práctica. Adicionalmente, la adopción de perfiles de aceleración más avanzados, como curvas tipo S-curve, podría reducir esfuerzos mecánicos, mejorar la suavidad del movimiento y aumentar la vida útil de los componentes.

En conjunto, estas recomendaciones establecen una hoja de ruta clara para la evolución del sistema, orientada a mejorar su robustez estructural, precisión de control, autonomía operativa y confiabilidad general.

ANEXOS

En esta sección se incluyen los documentos técnicos complementarios que respaldan el desarrollo e implementación del sistema propuesto. Estos anexos contienen información detallada que permite la correcta interpretación y mantenimiento del proyecto.

Anexo A: Diagramas Eléctricos

Se adjuntan los diagramas eléctricos completos del sistema de control, donde se especifica la distribución de potencia, la interconexión de la tarjeta NVUM v2, los drivers de motores, el accionamiento de la bomba de vacío. Estos esquemas representan el diseño definitivo implementado en el armario eléctrico y sirven como referencia para futuras intervenciones técnicas, ampliaciones o labores de mantenimiento.

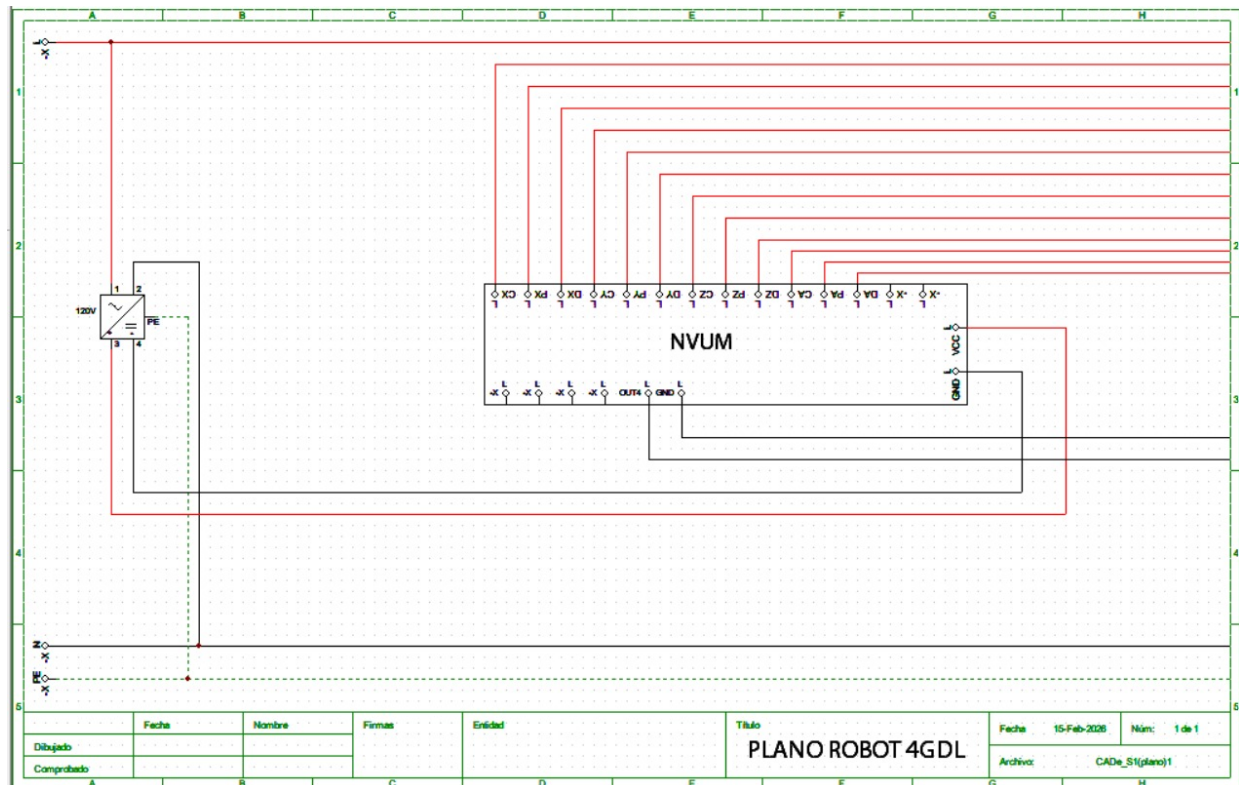


Figura 45. Hoja 1 - Sección controlador NVUM

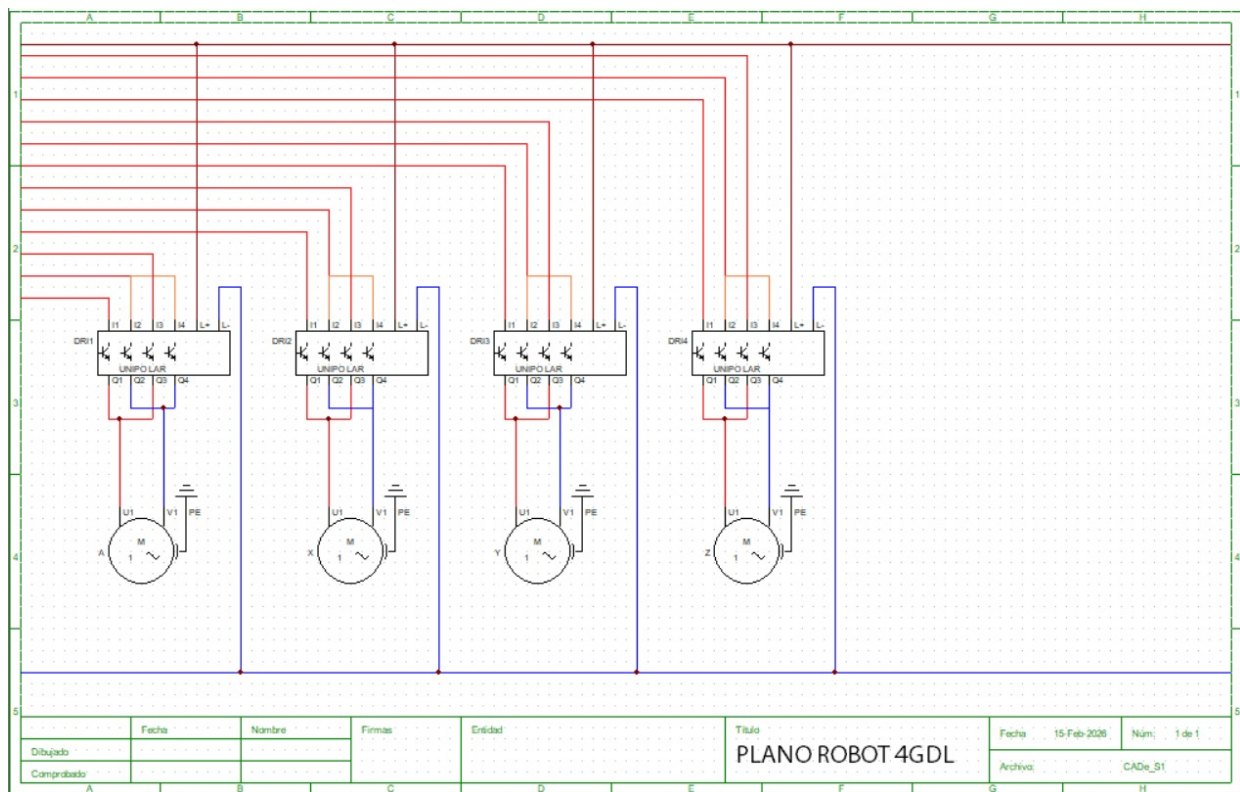


Figura 46. Hoja 2 - Sección drivers motores

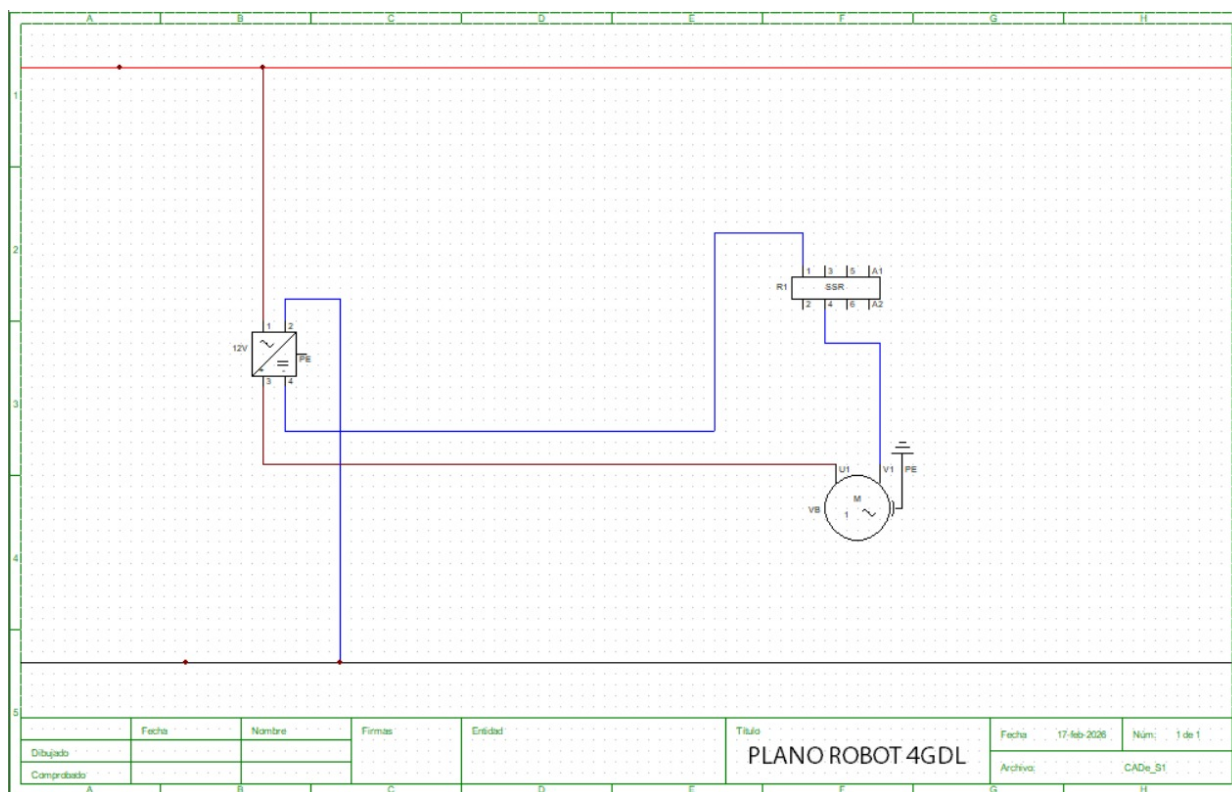


Figura 47. Hoja 3 - Sección bomba de vacío

Anexo B: Planos Mecánicos del Efector final

Se incluyen los planos acotados correspondientes al soporte diseñado para la ventosa del sistema de vacío. En dichos planos se detallan dimensiones, tolerancias y especificaciones geométricas necesarias para su fabricación y correcta integración con el efector final del manipulador.

XI-1. DIMENSIONES Y COTAS

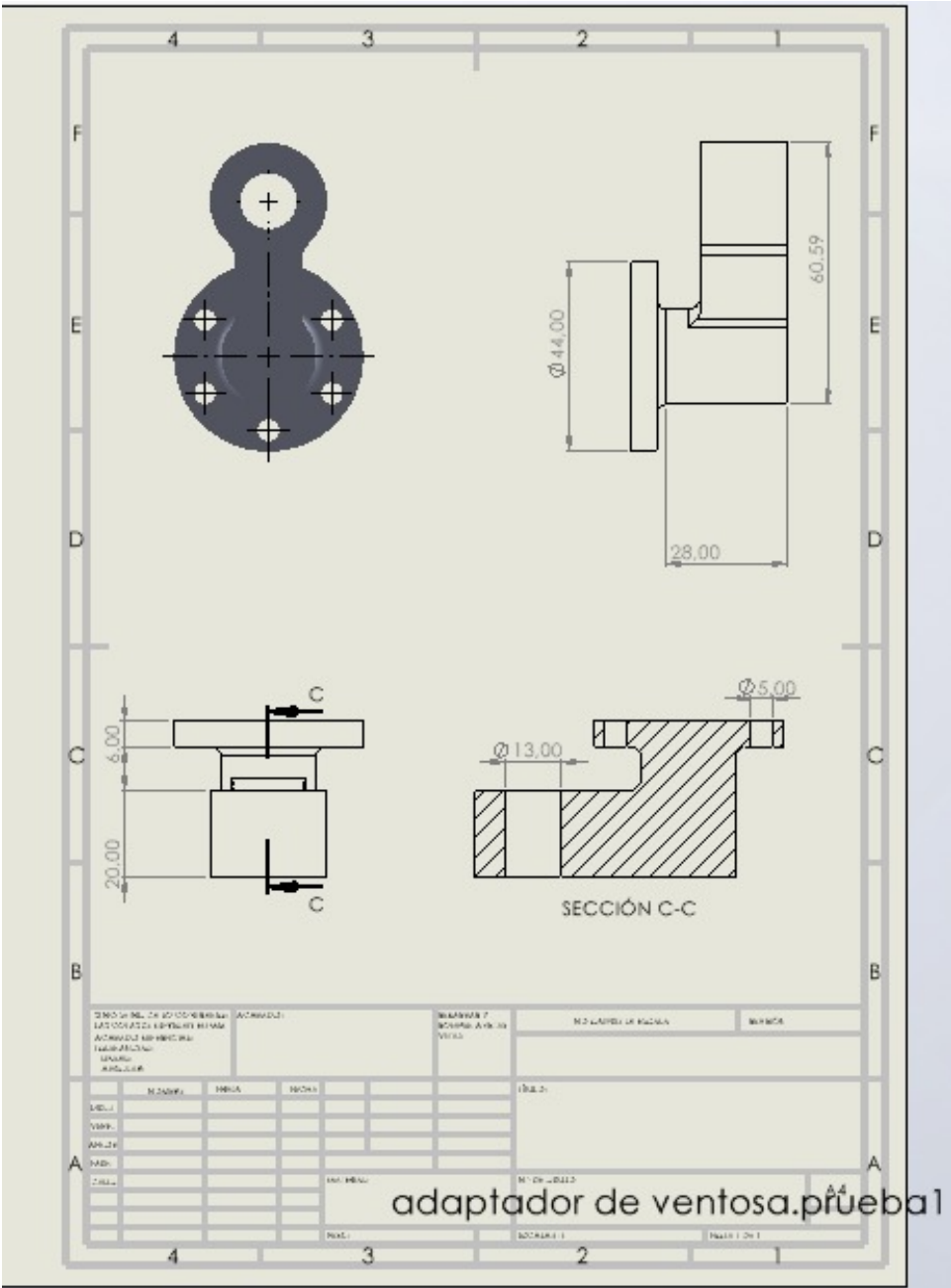


Figura 48. Plano acotado del efector final

Anexo C: Plano del Armario Eléctrico

Se presenta el plano acotado del armario eléctrico rediseñado, donde se define la distribución de sus nuevas medidas, refleja el espacio que ocuparan los componentes, puntos de fijación y separación funcional. Este plano garantiza trazabilidad técnica del montaje.

Plano Acotado del armario

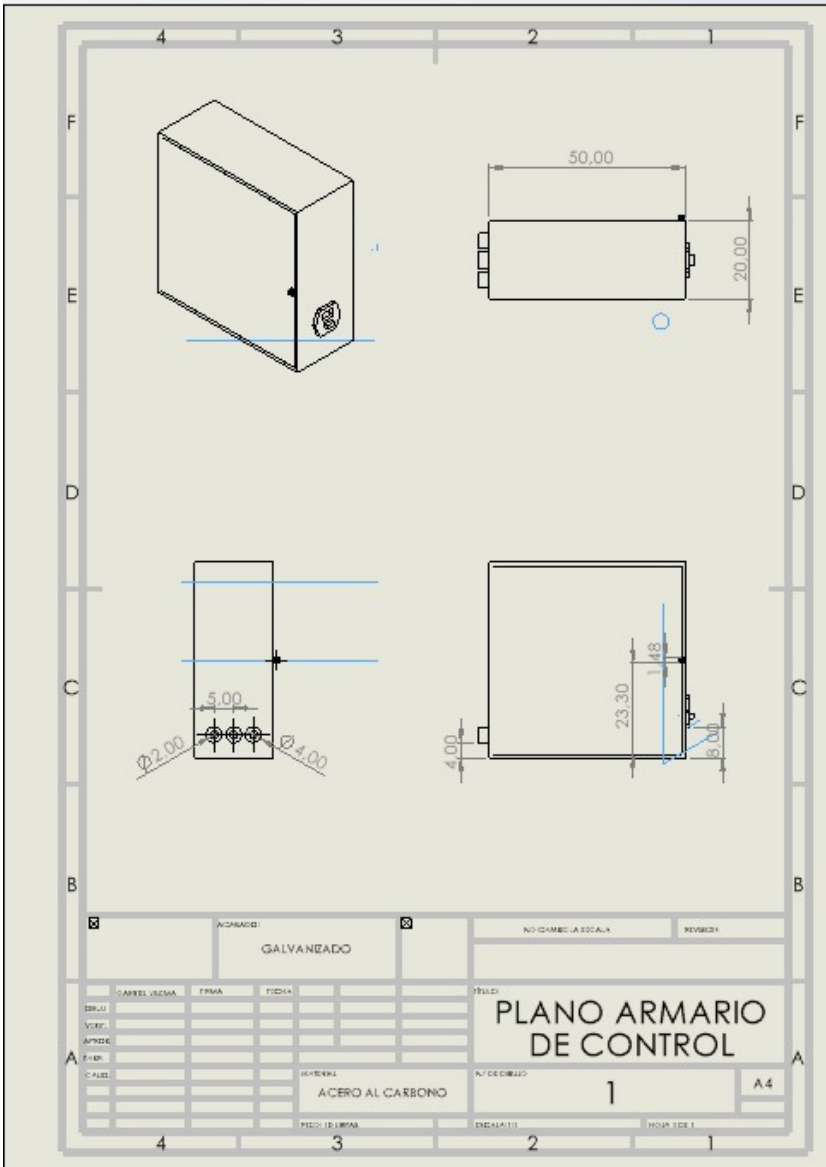


Figura 49. Planos de la estructura

REFERENCIAS

- [1] International Federation of Robotics, *Record of 4 Million Robots in Factories Worldwide*, <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/record-of-4-million-robots-working-in-factories-worldwide>, Accessed: 2026, 2023.
- [2] M. A. Cuji Vimos y J. D. Fajardo Pauta, «Desarrollo de la morfología y sistema de control electrónico para un robot humanoide con 15 grados de libertad,» Tesis de mtría., Universidad, 2024.
- [3] J. M. Guillen Nuñez y W. A. Merchan Merino, «Implementación de brazo robótico 6DOF para la organización de productos mediante lectura de código de barras,» Tesis de mtría., Universidad, 2022.
- [4] E. A. Medrano Silva y R. J. N. Flores Franco, «Diseño de un Robot SCARA para el movimiento de conservas utilizando ventosas de vacío en el proceso de empaquetado de una empresa del sector agroindustrial,» Tesis de mtría., Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, 2020.
- [5] P. Matos y P. Neto, «A 3D-printable modular robotic gripper,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 126, págs. 845-855, 2023. DOI: [10.1007/s00170-023-11114-9](https://doi.org/10.1007/s00170-023-11114-9). dirección: <https://estudogeral.uc.pt/bitstream/10316/116794/1/s00170-023-11114-9.pdf>.
- [6] A. Dzedzickis et al., «Advanced applications of industrial robotics: new hardware and software methods,» *Applied Sciences*, vol. 12, n.º 1, pág. 135, 2021. DOI: [10.3390/app12010135](https://doi.org/10.3390/app12010135). dirección: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/1/135>.
- [7] M. Chitroda y B. K. Patle, «A Review on Technologies in Robotic Gripper,» *Blue Eyes Intelligence Engineering and Sciences Publication*, 2020. dirección: <https://ouci.dntb.gov.ua/en/works/4Y5dq6V4/>.
- [8] A. Gupta, M. Gupta y N. Bajpai, *Efficient Design and Implementation of 4-Degree of Freedom Robotic Arm*, <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:212527653>, 2013.
- [9] M. H. I. Hajar, «A Robot Arm Movement System Using A System Of Four Degrees Of Freedom,» *International Journal for Research Trends and Innovation*, 2023. dirección: <https://ijrti.org/papers/IJRTI2307114.pdf>.
- [10] Pontificia Universidad Católica del Perú, «Modelación y simulación dinámica de un brazo robótico,» Tesis de mtría., Pontificia Universidad Católica del Perú, 2024.
- [11] A. Upadhyaya et al., *Design Of Stepper Motor Control Interface With Embedded Systems*, https://www.academia.edu/115958458/Design_Of_Stepper_Motor_Control_Interface_With_Embedded_Systems, 2025.
- [12] Escuela Politécnica Nacional, «Integración de sistemas embebidos para control de robots de 4 GDL,» Tesis de mtría., Escuela Politécnica Nacional, 2024.
- [13] Escobedo-Jarero et al., *Diseño de brazo robótico de arquitectura abierta con 4 grados de libertad*, https://somim.org.mx/memorias/memorias2024/articulos/M/A3_58.pdf, 2024.
- [14] J. Clark y R. Smith, «Safety features in robot control: torque limiting and collision detection,» *Journal of Robotics and Automation*, 2019. DOI: [10.1002/rob.4620110606](https://doi.org/10.1002/rob.4620110606).
- [15] N. Dueñas Vargas y C. E. Loja Ávila, «Diseño de un robot serial prototipo de cuatro grados de libertad para el laboratorio de robótica de la Universidad Politécnica Salesiana,» Tesis de mtría., Universidad Politécnica Salesiana, 2024.
- [16] L. Armas, C. N y F. O, «Simulación y modelamiento matemático de un brazo robótico de 4 grados de libertad,» *Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas*, vol. 9, n.º 2, págs. 144-156, 2025. DOI: [10.61236/ciya.v9i2.1108](https://doi.org/10.61236/ciya.v9i2.1108). dirección: <https://investigacion.utc.edu.ec/index.php/ciya/article/view/1108>.
- [17] C. Escobedo-Jarero y J. A. Ortiz-Aragón, *Diseño de brazo robótico de arquitectura abierta con 4 grados de libertad*, https://somim.org.mx/memorias/memorias2024/articulos/M/A3_58.pdf, 2024.

- [18] A. Upadhyaya et al., *Design Of Stepper Motor Control Interface With Embedded Systems*, https://www.academia.edu/115958458/Design_Of_Stepper_Motor_Control_Interface_With_Embedded_Systems, 2025.
- [19] Data Insights Market, *Pneumatic Grippers for Industrial Robots Market Report*, 2024, <https://www.datainsightsmarket.com/reports/pneumatic-grippers-for-industrial-robots-1562842>, 2024.
- [20] J. Smith y R. Doe, «Review of robotic grippers for high-speed handling applications,» *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 130, págs. 1223-1245, 2025. DOI: [10.1080/01691864.2025.2508785](https://doi.org/10.1080/01691864.2025.2508785).
- [21] E. Vrochidou, V. N. Tsakalidou, I. Kalathas, T. Gkrimpizis, T. Pachidis y V. G. Kaburlasos, «An overview of end effectors in agricultural robotic harvesting systems,» *Agriculture*, vol. 12, n.º 8, pág. 1240, 2022.
- [22] W. Gao, J. Liu, J. Deng, Y. Jiang e Y. Jin, «Research Status and Trends in Universal Robotic Picking End-Effectors for Various Fruits,» *Agronomy*, vol. 15, n.º 10, pág. 2283, 2025.
- [23] Advanced Intelligent Systems, *Advanced Systems in Robotic Gripper Technology*, <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/aisy.202400503>, 2024.
- [24] Archive Market Research, *Pneumatic and Electric Grippers for Industrial Automation - Market Analysis 2025*, <https://www.archivemarketresearch.com/reports/pneumatic-and-electric-grippers-for-industrial-automation-495150>, 2025.
- [25] O. Mykhailyshyn, «A systematic review on pneumatic gripping devices for industrial applications,» *Transport*, 2022. dirección: <https://journals.vilniustech.lt/index.php/Transport/article/view/17110>.
- [26] A. Author y B. Collaborator, «New classification of industrial robotic gripping systems for enhanced performance,» *Scientific Reports*, vol. 14, n.º 1, págs. 1-14, 2024. DOI: [10.1038/s41598-023-50673-5](https://doi.org/10.1038/s41598-023-50673-5).
- [27] Standard Bots. «Tipos de efectores finales: Todo lo que necesitas saber.» Accedido: 2026-02-23. dirección: <https://standardbots.com/blog/types-of-end-effectors-essential-tools-for-industrial-automation>.
- [28] H. Sukri, «Enhanced Precision Control of a 4-DOF Robotic Arm Using Numerical Code Recognition,» *Journal of Robotics and Control*, vol. 12, págs. 45-57, 2025. DOI: [10.1007/s12345-025-06789](https://doi.org/10.1007/s12345-025-06789).
- [29] EVSINT, *Diferentes grados de libertad en los brazos robóticos*, <https://www.evsint.com/es/degrees-of-freedom-in-robotic-arms/>, 2024.
- [30] INESEM, *¿Qué son los grados de libertad (GDL) en un robot?* <https://www.inesem.es/revistadigital/gestion-integrada/diferencia-robotica-grados-libertad-movilidad-3>, 2024.
- [31] Robotnik, *Guía completa de robots manipuladores: ventajas y aplicaciones*, <https://robotnik.eu/es/guia-completa-de-robots-manipuladores-ventajas-y-aplicaciones/>, 2025.
- [32] M. W. Spong, S. Hutchinson y M. Vidyasagar, *Robot Modeling and Control*. John Wiley & Sons, 2020.
- [33] A. Barrientos, L. F. Peñin, C. Balaguer y R. Aracil, *Fundamentos de Robótica*. McGraw-Hill, 2007.
- [34] J. J. Craig, *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. Pearson Prentice Hall, 2005.
- [35] B. Siciliano y O. Khatib, *Springer Handbook of Robotics*. Springer, 2016.
- [36] M. Adel, S. M. Ahmed y M. Fanni, «End-effector position estimation and control of a flexible interconnected industrial manipulator using machine learning,» *IEEE Access*, vol. 10, págs. 30 465-30 483, 2022.
- [37] International Organization for Standardization, «ISO 10218-1:2011 Robots and robotic devices — Safety requirements for industrial robots,» ISO, Geneva, Switzerland, Standard, 2011.