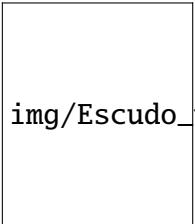




img/FING.PNG



img/Escudo\_uncuyo.jpg

# Proyecto Final de Estudios

INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

FACULTAD DE INGENIERÍA - UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO

ROBOT PARALELO PICK-AND-PLACE CON VISIÓN  
ARTIFICIAL PARA LA PREPARACIÓN DE PEDIDOS

Director: Ing. Eric Sanchez

Emanuel Agüero, Agustín Lezcano

Mendoza, Argentina

2026

## **Agradecimientos**

*A nuestras familias y seres queridos, por acompañarnos en cada paso de este trayecto con paciencia y cariño incondicional.*

*A nuestros compañeros y futuros colegas, con quienes transitamos aulas y pasillos.*

*A nuestro Director de Proyecto, Eric Sanchez, por su generosa guía y por representar para nosotros un referente de integridad y vocación profesional.*

*A la universidad pública, que nos brindó las herramientas y el espacio para formarnos como profesionales al servicio de la sociedad.*

*A la Asociación de Mecatrónica, que nos brindó un espacio para compartir ideas y aprender entre compañeros.*

## Resumen

Se desarrolló un sistema robótico paralelo pick-and-place capaz de detectar y trasladar objetos utilizando visión artificial. El proyecto integra cinemática, control de movimiento, planificación de trayectorias y un sistema de visión que identifica objetos en una cinta transportadora simulada. La comunicación entre los módulos se implementó con ROS2, coordinando el procesamiento de visión y el control del STM32.

**Palabras clave:** Robot paralelo, pick-and-place, cinemática, Denavit-Hartenberg, visión artificial, YOLOv11, ROS2.

## Abstract

A parallel pick-and-place robotic system capable of detecting and moving objects using artificial vision was developed. The project integrates kinematics, motion control, trajectory planning, and a vision system that identifies objects on a simulated conveyor belt. Communication between modules was implemented with ROS2, coordinating vision processing and STM32 control.

**Keywords:** Parallel robot, pick-and-place, kinematics, Denavit-Hartenberg, artificial vision, YOLOv11, ROS2.

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>7</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>7</b>
<b>3. Estado del arte</b>	<b>8</b>
<b>4. Funcionamiento general</b>	<b>9</b>
<b>5. Herramientas utilizadas en el proyecto</b>	<b>10</b>
<b>6. Diagrama de conexiones</b>	<b>11</b>
<b>7. Descripción del hardware</b>	<b>12</b>
7.1. Microcontrolador STM32F446RE . . . . .	12
7.2. CNC Shield . . . . .	12
7.3. Driver de motores . . . . .	13
7.4. Sensor de ángulo . . . . .	14
7.5. Multiplexor I2C TCA9548A . . . . .	15
<b>8. Esquema tecnológico</b>	<b>15</b>
<b>9. Cinemática</b>	<b>16</b>
9.1. Denavit-Hartenberg . . . . .	16
9.2. Cinemática directa . . . . .	16
9.3. Cinemática inversa . . . . .	17
<b>10. Mejoras mecánicas</b>	<b>20</b>
10.1. Descripción general . . . . .	20
10.2. Datos de diseño y conteo de dientes . . . . .	21
10.3. Condición de distancia entre ejes . . . . .	22
10.4. Relaciones de transmisión y resolución angular . . . . .	22
10.5. Sensado de ángulos . . . . .	23
10.6. Cambios en el modelado cinemático . . . . .	24
<b>11. Circuito electrónico del electroimán</b>	<b>24</b>
<b>12. Visión artificial</b>	<b>25</b>
12.1. Dataset y entrenamiento . . . . .	26
12.2. Preparación del dataset . . . . .	27
12.3. Entrenamiento en Google Colab . . . . .	27
12.4. Parámetros de entrenamiento: <i>epochsz</i> e <i>imgsz</i> . . . . .	28
12.5. Evaluación del modelo . . . . .	29
12.6. Inferencia y detección de objetos . . . . .	29
12.7. Cálculo de posición del objeto detectado . . . . .	30

<b>13. Desarrollo del Firmware</b>	<b>31</b>
13.1. Arquitectura general . . . . .	31
13.2. Módulos básicos . . . . .	32
13.2.1. Programación motores . . . . .	32
13.2.2. Programación sensores de ángulo . . . . .	32
13.2.3. Programación cinemática . . . . .	33
13.2.4. Generación de Trayectorias sincronizadas . . . . .	33
<b>14. Integración de ROS, microROS y FreeRTOS en Sistemas Embebidos</b>	<b>36</b>
14.1. ROS . . . . .	36
14.2. microROS . . . . .	39
14.3. FreeRTOS . . . . .	39
14.4. Integración: ROS2 – microROS – FreeRTOS . . . . .	40
14.5. Flujo de información en trayectorias . . . . .	42
<b>15. Ensayos realizados</b>	<b>44</b>
15.1. Ensayo de carga electroimán . . . . .	44
15.2. Ensayo de calibración de sensores de ángulo . . . . .	44
15.3. Ensayos cinemáticos . . . . .	45
15.4. Comunicación ROS2/microROS . . . . .	45
15.5. Ensayo de Área de trabajo del robot . . . . .	46
15.6. Ensayo de visión artificial . . . . .	49
15.6.1. Detección del patrón y cálculo de la relación mm/px . . . . .	49
15.6.2. Ensayo de detección mediante YOLOv11n . . . . .	49
15.7. Ensayo de trayectoria . . . . .	50
15.8. Ensayo completo . . . . .	53
<b>16. Futuras mejoras</b>	<b>57</b>
<b>17. Conclusiones</b>	<b>59</b>
<b>18. Anexo</b>	<b>61</b>
18.1. Teorema del coseno . . . . .	61
18.2. Colas FreeRTOS . . . . .	61
18.3. Interfaces internas de ROS . . . . .	62
18.4. Task de microROS . . . . .	62
18.5. ROS_DOMAIN . . . . .	63
18.6. Función de control de trayectoria . . . . .	64

# Índice de figuras

1.	Robots con visión artificial . . . . .	8
2.	Foto real del Robot . . . . .	9
3.	Diagrama de conexiones . . . . .	11
4.	Microcontrolador STM32 Núcleo . . . . .	12
5.	Placa CNC Shield . . . . .	12
6.	Driver DRV8825 con sus conexiones . . . . .	13
7.	Modos de conexión para realizar micropasos . . . . .	13
8.	Módulo de encoder magnético AS5600 . . . . .	14
9.	Módulo de encoder magnético AS5600 . . . . .	15
10.	Multiplexor I <sup>2</sup> C TCA9548A . . . . .	15
11.	Diagrama general . . . . .	16
12.	Referencias del método geométrico . . . . .	18
13.	Esquema de eslabones simplificado . . . . .	18
14.	Dimensiones de interés para cálculo de $q_4$ . . . . .	19
15.	Comparación vista lateral de versión con servo vs con motores Paso a Paso . . . . .	20
16.	Comparación vista en perspectiva de versión con servo vs con motores Paso a Paso . . . . .	21
17.	Alineamiento axial entre sensor AS5600 e imán montado sobre eje de articulación . . . . .	24
18.	Esquemático y placa electrónica de control del solenoide . . . . .	25
19.	Imágenes del dataset . . . . .	26
20.	Predicción de modelo YOLOv11 . . . . .	28
21.	Curvas de resultado de inferencia de YOLOv11n . . . . .	29
22.	Esquema de posición Robot-Cámara-Objeto . . . . .	31
23.	Posiciones, velocidades y aceleraciones del parámetro $s$ . . . . .	35
24.	Posiciones, velocidades y aceleraciones articulares . . . . .	35
25.	Trayectoria en el espacio de trabajo interpolada con B-Spline . . . . .	36
26.	Gráfico de nodos ROS . . . . .	37
27.	Mapa conceptual de las conexiones entre el orquestador y el esclavo . . . . .	39
28.	Diagrama de conexiones entre nodos . . . . .	41
29.	Flujo de datos en trayectorias . . . . .	43
30.	Espacio de trabajo teórico . . . . .	47
31.	Espacio de trabajo articular con restricción $z = 0$ . . . . .	47
32.	Espacio de trabajo articular (Zoom) . . . . .	48
33.	Espacio de trabajo real, plano XZ . . . . .	48
34.	Ensayo de calibración para obtener relación mm/px . . . . .	49
35.	Ensayo de detección de herramientas y posicionamiento respecto origen del robot .	50
36.	Comparación de trayectorias real y teórica con sus respectivas ganancias . . . . .	52
37.	Errores de posición con sus respectivas ganancias . . . . .	53
38.	Interfaz de usuario . . . . .	55
39.	Foto real del robot realizando <i>pick-and-place</i> . . . . .	56
40.	Triángulo general donde se aplica el Teorema del Coseno. . . . .	61
41.	Funcionamiento de colas . . . . .	62
42.	Interfaces internas de ROS . . . . .	63

## Índice de tablas

1.	Parámetros Denavit-Hartenberg . . . . .	16
2.	Frecuencias de PWM y velocidades en motores/eslabones . . . . .	32
3.	Descripción de tópicos más relevantes . . . . .	42
4.	Comparación de máximos valores absolutos de errores en la trayectoria respecto a $K_p$ . . . . .	51
5.	Protocolo de inicio para el sistema distribuido ROS2 / microROS . . . . .	54

## 1. Introducción

El proyecto desarrollado consiste en el diseño e implementación de un sistema robótico paralelo para operativa *pick-and-place*, cuyo objetivo principal es trasladar objetos desde un punto inicial (A) hasta un punto final (B) a partir de su detección mediante técnicas de visión artificial. El sistema está orientado a manipular objetos que arriban desde lo que se simula ser una cinta transportadora, identificarlos dentro del espacio de trabajo y posicionarlos de manera precisa en un contenedor correspondiente a un pedido, simulando un flujo típico de procesos logísticos modernos.

Para esto, se realizó la modificación estructural y funcional de un robot modelo MK2, reemplazando sus servomotores originales por motores Paso a Paso en todas sus articulaciones, con el fin de mejorar la precisión de posicionamiento y el control del movimiento. El efecto final incorpora un electroimán que permite la sujeción de piezas metálicas durante el ciclo operativo.

El desarrollo abarca múltiples áreas: la modificación estructural hacia motores Paso a Paso; el cálculo de la cinemática directa e inversa del manipulador; la integración y calibración de los motores; y la planificación de trayectorias que permitan un movimiento suave, eficiente y seguro del robot. Asimismo, se integra un sistema de visión artificial basado en algoritmos de inferencia para la detección y localización de objetos en el entorno.

Finalmente, se implementa una arquitectura de comunicación mediante **ROS2**, por medio de la cual se establecen nodos dedicados a la interacción entre la computadora encargada del procesamiento de visión y el envío de consignas de posición, y el microcontrolador STM32 responsable del control de los motores. Esta infraestructura permite el intercambio confiable de información entre los distintos módulos del sistema y constituye la base para la coordinación del proceso completo de manipulación robótica.

## 2. Objetivos

Se busca llegar a un prototipo funcional, y que el sistema esté modularizado de tal manera que el proyecto pueda ser continuado por otros alumnos interesados. Este desarrollo, enmarcado en el Proyecto Final de Estudios, se realizó con recursos del laboratorio Rosetta.

También, a tener un software bien definido y robusto para que luego se pueda cambiar el robot, si así se desea, y el enfoque del trabajo sea en el hardware o en la parte mecánica, quitando el peso de realizar un trabajo desde cero. Los objetivos específicos se listan a continuación:

- Implementación y desarrollo del firmware de bajo nivel para el control de cada motor.
- Desarrollo basado en la extensibilidad y flexibilidad del código para un posible desarrollo futuro.
- Utilización del protocolo MQTT para la comunicación entre usuarios y servidor, de manera que se pueda expandir fácilmente el número de usuarios del sistema.
- Integración de los subsistemas de control y envío/recepción de consignas.
- Diseño de un algoritmo de Visión Artificial para la detección de objetos.
- Posicionamiento para cumplir con los pedidos y confirmación de tarea completada.

### 38 3. Estado del arte

39 En los últimos años, la integración de visión artificial en sistemas robóticos industriales ha  
 40 impulsado manipuladores más autónomos, precisos y adaptables, destacándose diversos desarrollos  
 41 que han marcado el rumbo de esta tecnología, como se muestra en la Figura 1.

- 42
- **Dex-Net** (UC Berkeley) ha sido una de las referencias más influyentes en el área. Su contribución principal se basa en el uso de grandes bases de datos sintéticas para entrenar redes neuronales capaces de predecir puntos de agarre fiables incluso en objetos desconocidos. Este enfoque demostró que la simulación masiva combinada con *deep learning* puede ofrecer soluciones robustas para tareas de *bin picking*.

43

  - **DoraPicker** (Dora Robotics) se orienta al ámbito logístico, integrando visión 3D y algoritmos de segmentación para identificar y extraer objetos variados de estanterías o contenedores. Su arquitectura evidencia la viabilidad de sistemas completamente autónomos para manipular productos de diferentes formas y tamaños.

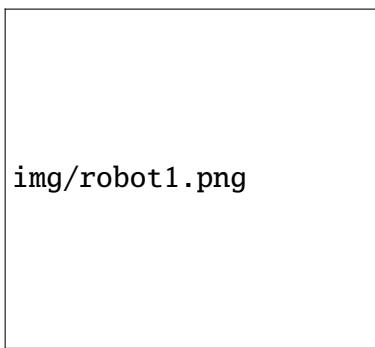
44

  - **Cartman**, desarrollado para el Amazon Robotics Challenge, propone un diseño cartesiano combinado con algoritmos de reconocimiento y planificación eficientes. Su participación demostró que una integración cuidadosa entre percepción y mecánica puede mejorar la confiabilidad en la manipulación de objetos desordenados o deformables.

45

  - **Cambrian Vision** representa un enfoque industrial consolidado, ofreciendo módulos de visión 3D y algoritmos de IA listos para su incorporación en líneas de producción. Su fortaleza está en la detección rápida y la reducción del tiempo de configuración por parte del operador.

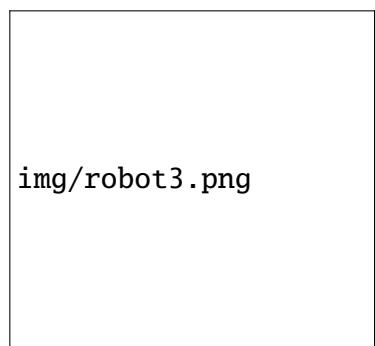
46



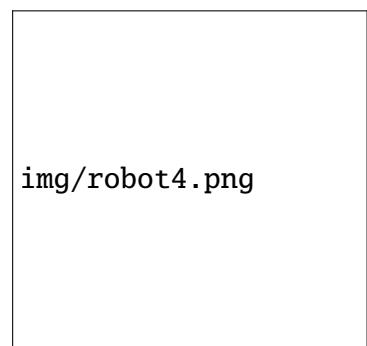
(a) Robot Dex-Net



(b) Robot DoraPicker



(c) Robot Cartman



(d) Robot Cambrian Vision

Figura 1: Robots con visión artificial

## 58 4. Funcionamiento general

59 El funcionamiento integral del sistema robótico desarrollado se basa en la interacción coordinada  
60 entre tres módulos principales: el sistema de visión artificial, el orquestador, y el robot físico equipado  
61 con motores Paso a Paso (ver Figura 2). Cada uno de estos componentes cumple un rol esencial  
62 dentro del ciclo operativo del robot *pick-and-place*, permitiendo que el flujo completo (desde la  
63 detección del objeto hasta su deposición final) se lleve a cabo de manera precisa, repetible y segura.

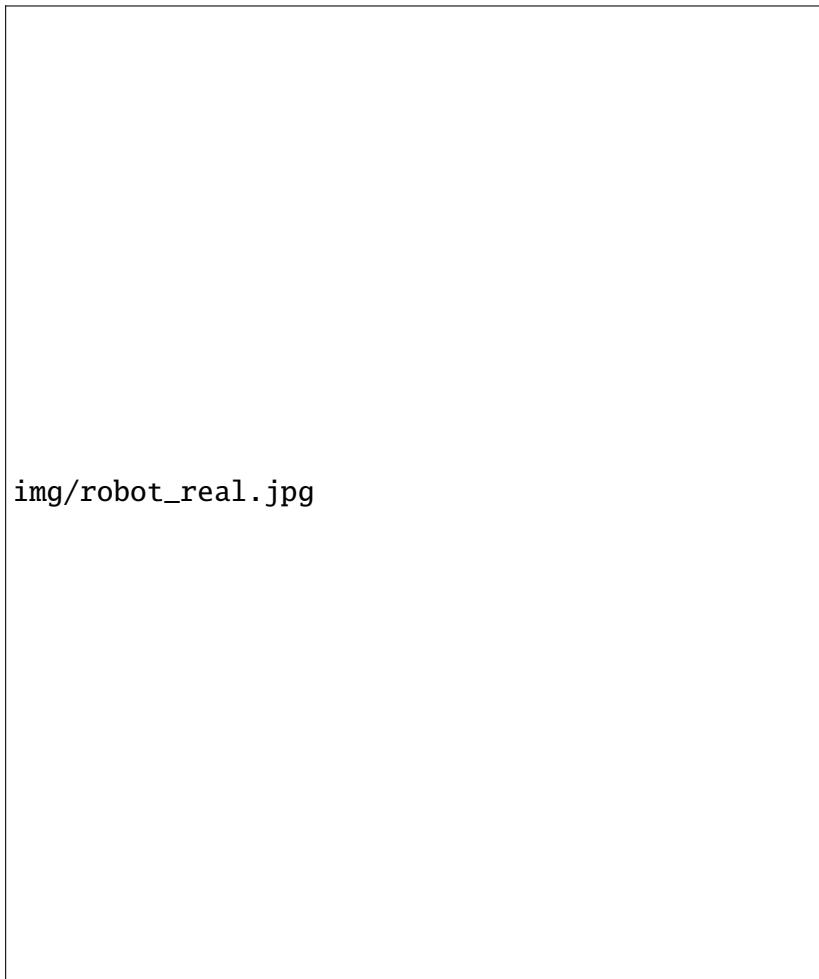


Figura 2: Foto real del Robot

64 En primer lugar, el proceso se inicia con la captura de imágenes de la zona de trabajo mediante  
65 una cámara montada en una posición fija y debidamente calibrada respecto al robot. Esta cámara  
66 observa el área donde los objetos -provenientes de una simulación de cinta transportadora- ingresan  
67 al campo visual. A partir de estas imágenes, un modelo de visión artificial ejecuta un algoritmo de  
68 inferencia que identifica cada pieza de interés y determina la posición bidimensional del centro de  
69 su *bounding-box*. Esta localización inicial se encuentra en coordenadas de imagen (píxeles), por lo  
70 que, mediante la utilización de un factor de conversión mm/px obtenido en la etapa de calibración  
71 geométrica, se transforma dicha posición al sistema de referencia físico del robot. Adicionalmente,  
72 la altura (Z) del objeto se obtiene a partir de una base de datos que asocia cada categoría detectada  
73 con su correspondiente dimensión real.

74 Una vez determinada la ubicación tridimensional del objeto, esta información es transmitida

75 al módulo de planificación de movimiento implementado sobre la computadora principal, donde  
 76 existe un orquestador que utiliza microROS para enviar comandos de posición al robot mediante  
 77 comunicación serial. Actualmente, se utiliza el envío de consignas articulares, pero el robot es capaz  
 78 de resolver la cinemática inversa y dar consigna a los motores. Además se envían los comandos de  
 79 *homing* y parada de emergencia.

80 El microcontrolador es capaz de realizar los cálculos de cinemática directa e inversa del robot  
 81 paralelo, permitiendo definir los ángulos articulares requeridos para alcanzar tanto la posición de  
 82 recogida como la posición final donde el objeto será depositado. Para garantizar movimientos suaves  
 83 y evitar esfuerzos innecesarios sobre la estructura, cada articulación sigue un perfil de velocidad que  
 84 asegura aceleraciones y desaceleraciones controladas y limitadas a las velocidades y aceleraciones  
 85 máximas de los motores. Este enfoque permite un desplazamiento eficiente, reduciendo vibraciones  
 86 y mejorando la repetibilidad del posicionamiento.

87 El control de los motores Paso a Paso se realiza a través del microcontrolador STM32, el  
 88 cual recibe las consignas articulares mediante nodos de comunicación basados en ROS2. Esta  
 89 arquitectura distribuida facilita el intercambio de mensajes entre los distintos módulos, desacoplando  
 90 el procesamiento intensivo de visión del control de bajo nivel de los actuadores. El STM32 se  
 91 encarga de generar las señales de paso y dirección, ejecutar los perfiles de velocidad y supervisar el  
 92 cumplimiento temporal de cada trayectoria articulada.

93 Finalmente, el efecto final equipado con un electroimán realiza la sujeción y liberación de las  
 94 piezas metálicas durante el ciclo de trabajo. Una vez que el robot alcanza la posición de destino,  
 95 el sistema desactiva el electroimán para depositar el objeto en el contenedor asignado. Con esto  
 96 concluye el ciclo operativo, tras lo cual el robot retorna a una posición segura de espera, quedando  
 97 preparado para procesar el siguiente objeto detectado.

98 Se decidió utilizar ROS (Robot Operating System) en su versión 2 debido a su amplia adopción  
 99 tanto en el ámbito académico como en la industria, donde se perfila como un estándar de facto. Al  
 100 tratarse de una plataforma *open-source* y multiplataforma, cuenta con una comunidad activa y extensa  
 101 que garantiza su mantenimiento, evolución y actualización continua. Pese a su nombre, no es un  
 102 sistema operativo sino un SDK (Software Development Kit). Este conjunto de librerías y herramientas  
 103 proporciona una arquitectura altamente modular, permitiendo desarrollar componentes para distintas  
 104 plataformas y en diversos lenguajes de programación. Dado que ROS2 es agnóstico al lenguaje, el  
 105 desarrollador puede concentrarse en la lógica de aplicación, mientras que la infraestructura de  
 106 comunicación entre módulos es gestionada de manera transparente por ROS2<sup>1</sup>.

## 107 5. Herramientas utilizadas en el proyecto

108 Para el desarrollo integral del proyecto se emplearon un conjunto de herramientas de diseño,  
 109 hardware y software que permitieron abordar de manera coordinada los distintos aspectos mecánicos,  
 110 electrónicos y de control del sistema.

111 ■ **Mecánica:** El diseño estructural del robot se realizó principalmente en *Solid Edge*, donde  
 112 se modelaron las piezas individuales y se verificó el ensamblaje completo del robot. Para el  
 113 diseño específico de engranajes se utilizó *Fusion 360* y *OrcaSlicer* como laminador de las  
 114 piezas impresas en 3D.

115 ■ **Hardware:** El sistema de control se basa en el microcontrolador *STM32F446RE*, junto con  
 116 una placa CNC Shield para el control de motores Paso a Paso. La medición de posición angular

<sup>1</sup>En el anexo 18.3 hay más información acerca de la infraestructura ROS

en cada articulación se realizó mediante sensores magnéticos **AS5600**, conectados a través de un multiplexor I<sup>2</sup>C **TCA9548A**, permitiendo la lectura de múltiples dispositivos con una única interfaz de comunicación.

- **Software:** La programación del microcontrolador se desarrolló en **STM32CubeIDE**, donde se configuraron periféricos, temporizadores y tareas en tiempo real. El modelado y análisis cinemático inicial del robot, así como la verificación del espacio de trabajo, se llevaron a cabo en **MATLAB**. La implementación de la cinemática inversa, la planificación de trayectorias y la comunicación mediante sockets con el módulo de visión se desarrollaron en **Python**, integrando estos procesos dentro del orquestador del sistema. Para la detección de piezas y determinación del punto objetivo se utilizó el modelo **YOLOv1In**, entrenado con un *dataset* propio de piezas. El diseño de la placa electrónica destinada al control del electroimán se realizó en **KiCad**, incluyendo el esquemático y el ruteo de la PCB. Por último, se empleó **microROS**, que corre sobre **FreeRTOS**, el sistema operativo en tiempo real sobre el microcontrolador. También del lado de la computadora, se tiene a **ROS2**, que actuó como orquestador general del proyecto y permitió estructurar la comunicación entre los distintos módulos del sistema.

## 6. Diagrama de conexiones

El sistema se encuentra compuesto por una placa de desarrollo **STM32F446RE**, sobre la que se encuentra montada una **CNC Shield** para la conexión de drivers **DRV8825** de 3 motores Paso a Paso, 3 sensores **AS5600** para la medición de ángulos absolutos mediante efecto Hall, un multiplexor **TCA9548A** que permite gestionar múltiples dispositivos I<sup>2</sup>C con direcciones idénticas en un mismo bus, y una placa electrónica propia que permite la alimentación segura hacia el electroimán.

En la Figura 3 se puede observar el diagrama de conexiones con todos los elementos mencionados. Cabe aclarar que la placa electrónica para el accionamiento del electroimán se ha representado con un transistor NPN.

A large empty rectangular box representing the connection diagram.

img/DiagramaConex.png

Figura 3: Diagrama de conexiones

## 141 7. Descripción del hardware

### 142 7.1. Microcontrolador STM32F446RE

143 La placa *Nucleo-F446RE* (ver Figura 4) incorpora el microcontrolador *STM32F446RE* de 32  
 144 bits, basado en arquitectura ARM Cortex-M4 de hasta 180 MHz, con 512 KB de memoria Flash  
 145 y 128 KB de SRAM. Esta placa ofrece una amplia disponibilidad de periféricos de comunicación  
 146 (UART, SPI, I<sup>2</sup>C, CAN) y una distribución de pines compatible con el formato Arduino, lo que  
 147 facilita la integración con expansiones como la *CNC Shield*. El microcontrolador se encarga de la  
 148 generación de señales PWM, la lectura de sensores por I<sup>2</sup>C, y la gestión del sistema de control.

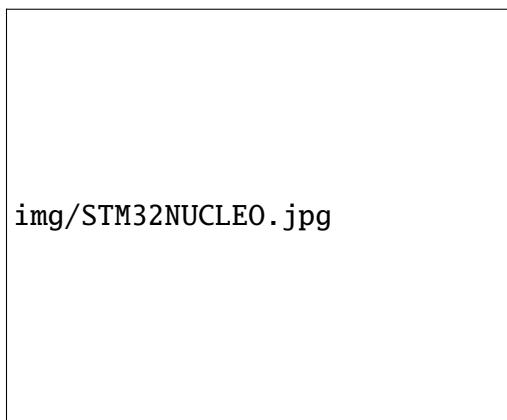


Figura 4: Microcontrolador STM32 Núcleo

### 149 7.2. CNC Shield

150 La *CNC Shield* (ver Figura 5) utilizada es una expansión diseñada originalmente para placas  
 151 Arduino UNO, pero resulta compatible con la placa Nucleo-F446RE gracias a su distribución de  
 152 pines y niveles lógicos de 3.3 V – 5 V. Esta placa permite la conexión directa de drivers de motores  
 153 Paso a Paso, ofreciendo pines dedicados para STEP, DIR, y EN. Además, dispone de bornes para  
 154 alimentación externa, jumpers para configuración de micropasos, y conectores auxiliares para finales  
 155 de carrera. De esta forma, el STM32 puede controlar varios motores Paso a Paso mediante salidas  
 156 digitales dedicadas, sin necesidad de circuitos adicionales.



Figura 5: Placa CNC Shield

### 157 7.3. Driver de motores

158 El módulo *DRV8825* (ver Figura 6a) se utiliza como driver para el control de motores Paso  
 159 a Paso bipolares desde el STM32. Este dispositivo integra la electrónica necesaria para generar  
 160 las secuencias de corriente requeridas por las bobinas del motor, permitiendo controlar tanto la  
 161 dirección de giro como el avance por pasos mediante dos señales digitales de entrada: DIR y STEP,  
 162 respectivamente. Incorpora un regulador de corriente ajustable mediante un potenciómetro integrado,  
 163 que permite limitar la corriente máxima por fase del motor, protegiendo al mismo y al driver ante  
 164 sobrecorrientes. Para determinar el valor de corriente máxima por bobina ( $I_{max}$ ), se debe medir con  
 165 un voltímetro la tensión de referencia  $V_{ref}$  entre el terminal del potenciómetro y masa (GND), y luego  
 166 aplicar la relación aproximada:

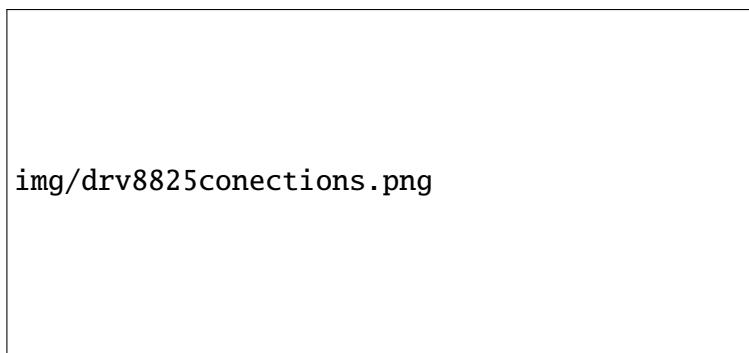
$$I_{max} = 2 \cdot V_{ref} \quad (1)$$

167 Esta ecuación constituye una aproximación útil para el dimensionamiento inicial, aunque el valor  
 168 real puede variar ligeramente según tolerancias y condiciones de operación.

169 La conexión general del *DRV8825* con el sistema se muestra en la Figura 6b, donde se detallan  
 170 las entradas de control, las salidas hacia el motor y la alimentación. Asimismo, en la Figura 7 se  
 171 ilustran las configuraciones de los pines MODE0, MODE1 y MODE2 que permiten seleccionar el modo  
 172 de micropaso deseado. Para este proyecto se conectaron los pines MODE0 y MODE1 al voltaje de  
 173 alimentación del microcontrolador para activar el modo de 1/8 de paso.



(a) Driver DRV8825



(b) Conexiones DRV8825

Figura 6: Driver DRV8825 con sus conexiones



Figura 7: Modos de conexión para realizar micropasos

## 174 7.4. Sensor de ángulo

175 Para la medición del ángulo de cada eslabón se seleccionó el sensor *AS5600* (ver Figura 8).  
 176 Este dispositivo corresponde a un sensor de posición angular sin contacto, basado en el principio  
 177 de detección del campo magnético generado por un imán colocado sobre el eje de rotación. El  
 178 sensor determina la orientación del campo magnético y entrega la posición angular absoluta con  
 179 una resolución de 12 bits, equivalente a 4096 pasos por revolución. La elección de este sensor se  
 180 basó en su alta resolución, facilidad de lectura mediante el bus I<sup>2</sup>C y buena inmunidad al ruido  
 181 electromagnético.

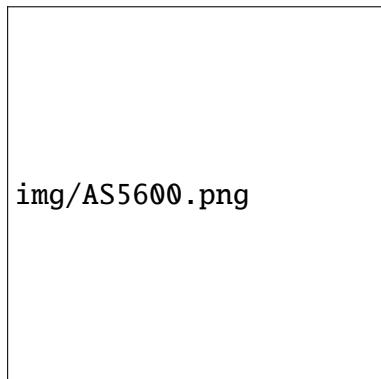


Figura 8: Módulo de encoder magnético AS5600

182 Sus principales características son:

- 183 ■ **Resolución:** 12 bits (4096 pasos/rev), equivalente a aproximadamente 0,0879°/*paso*
- 184 ■ **Rango angular:** programable; por defecto cubre 0–360°. Se puede configurar el ángulo  
185 máximo (**MANG**) y la posición cero (**ZPOS**)
- 186 ■ **Interfaces:**
  - 187 • I<sup>2</sup>C con dirección fija de 7 bits **0x36**.
  - 188 • Salida PWM, donde el ciclo de trabajo representa el ángulo medido (frecuencia configu-  
189 rable por registro)
- 190 ■ **Velocidad del bus I<sup>2</sup>C:** hasta 400 kHz

191 En el montaje de los ejes se instaló un imán de neodimio en el extremo de cada eje, ubicado  
 192 frente al sensor *AS5600* de manera centrada. Se optó por utilizar el protocolo I<sup>2</sup>C por la fiabilidad  
 193 en la medición y velocidad del bus. El valor angular bruto (*raw*) entregado por el módulo a través  
 194 de I<sup>2</sup>C varía entre 0 y 4095, representando el rango completo de 0° a 360° de manera proporcional.

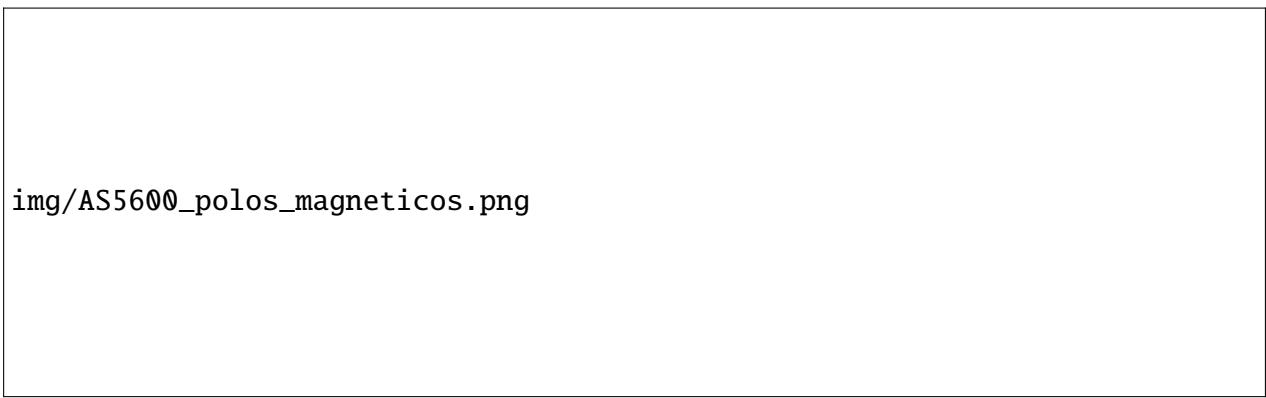
195 El registro de salida de ángulo está compuesto por dos bytes (**MSB** y **LSB**) que conforman el valor  
 196 digital de 12 bits. El cálculo del ángulo en grados se obtiene mediante la expresión:

$$\text{angle\_deg} = \frac{\text{raw}}{4096} \times 360^\circ \approx \text{raw} \times 0,0879^\circ \quad (2)$$

197 donde *raw* ∈ [0, 4095] corresponde al valor digital leído del registro de salida.

198 En la Figura 9 se observa una representación esquemática del imán con sus polos (Norte y  
 199 Sur) frente al sensor. Puede observarse que para un ángulo de 0° el sensor entrega un valor de

200 RAW\_ANGLE = 0, para  $90^\circ$  el valor es RAW\_ANGLE = 1024, para  $180^\circ$  RAW\_ANGLE = 2048, y para  
 201  $270^\circ$  RAW\_ANGLE = 3072. Cabe destacar que  $360^\circ$  coincide con  $0^\circ$ , y que las posiciones  $0^\circ$ – $180^\circ$  y  
 202  $90^\circ$ – $270^\circ$  presentan polaridades magnéticas invertidas, evitando así ambigüedades en la detección  
 203 de posición.

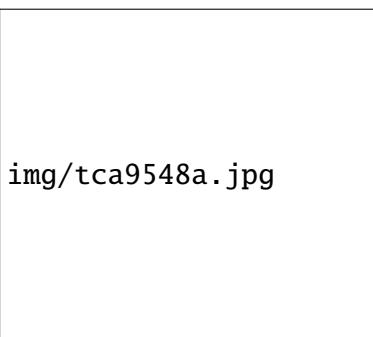


img/AS5600\_polos\_magenticos.png

Figura 9: Módulo de encoder magnético AS5600

## 204 7.5. Multiplexor I<sup>2</sup>C TCA9548A

205 El TCA9548A (ver Figura 10) es un multiplexor I<sup>2</sup>C de 8 canales independientes que permite  
 206 conectar hasta ocho dispositivos I<sup>2</sup>C con direcciones repetidas, seleccionando el canal activo me-  
 207 diante comandos enviados desde el microcontrolador principal. Cada canal actúa como una línea  
 208 I<sup>2</sup>C aislada (SDA y SCL), evitando conflictos de dirección entre sensores idénticos como el AS5600.  
 209 El STM32 se comunica con el TCA9548A mediante su interfaz I<sup>2</sup>C principal, y activa cada canal  
 210 según el sensor que se desea leer. Este componente amplía la escalabilidad del sistema, permitiendo  
 211 el uso de múltiples sensores sin modificar el hardware base.



img/tca9548a.jpg

Figura 10: Multiplexor I<sup>2</sup>C TCA9548A

## 212 8. Esquema tecnológico

213 En la Figura 11 se presenta un diagrama general simplificado que presenta los módulos principales  
 214 del sistema robótico: el de visión, el orquestador (que hace uso de la información del módulo de  
 215 visión) y el brazo robótico (que recibe las instrucciones de alto nivel del orquestador y realiza el  
 216 control a bajo nivel).

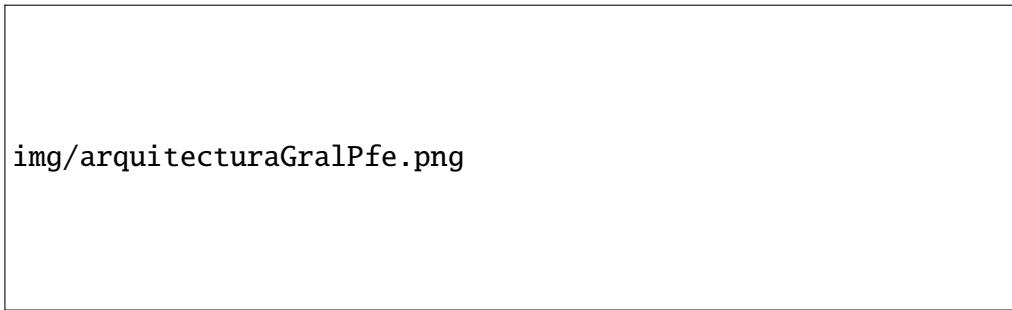


Figura 11: Diagrama general

## 217 9. Cinemática

218 A continuación se presenta la resolución de los problemas de cinemática, fundamentales para  
 219 poder traducir las consignas en ángulos de giro para los motores. Esto se logra mediante la cinemática  
 220 inversa, es decir que se pasa del espacio de trabajo al espacio articular. Para más profundidad al  
 221 respecto, se pueden consultar las siguientes referencias: [Barrientos et al., 2007], [Craig, 2006],  
 222 [Corke, 2017], [Mark W. Spong, 2005], [Torres et al., 2002].

### 223 9.1. Denavit-Hartenberg

224 Teniendo en cuenta las dimensiones del robot, se describió la morfología del mismo siguiendo  
 225 la convención Denavit-Hartenberg. Como resultado, se simplifica la estructura dividiendo al brazo  
 226 en eslabones (obteniendo la Tabla 1), y se resuelve el problema de la cinemática directa a través  
 227 de transformaciones homogéneas. Para esto se tuvieron en cuenta los eslabones activos; además se  
 228 consideró un eslabón que actúa como articulación o grado de libertad virtual con el fin de simplificar  
 229 los cálculos (se verá el desarrollo en la sección 9.3). Un desarrollo similar que puede ser consultado  
 230 en [Zhou et al., 2020]. La ventaja de usar el método Denavit-Hartenberg es que permite simplificar  
 231 el cambio de posición y orientación de un punto a otro en una concatenación de movimientos de  
 232 traslación y rotación (dos rotaciones y dos traslaciones para cada desplazamiento desde un punto de  
 233 origen a otro, en el sistema de referencia elegido).

$\theta$	d	a	$\alpha$
$q_1$	L1	0	$\pi/2$
$q_2$	0	L2	0
$q_3$	0	L3	0
$q_4$	0	L4	0

Tabla 1: Parámetros Denavit-Hartenberg

### 234 9.2. Cinemática directa

235 Cada “desplazamiento” entre el origen de un sistema de referencia y otro del eslabón siguiente  
 236 se puede representar mediante una matriz de transformación homogénea.

$${}^{i-1}T_i = \text{Rot}(z_{i-1}, \theta_i) \cdot \text{Tras}(z_{i-1}, d_i) \cdot \text{Tras}(x_i, a_i) \cdot \text{Rot}(x_i, \alpha_i) \quad (3)$$

237 A su vez, considerando el origen del primer sistema de referencia y el del último (que puede  
 238 coincidir con un extremo del robot, donde irá colocada la herramienta de ser necesario), se puede  
 239 relacionar en el desplazamiento del punto de origen del sistema de referencia al extremo, siguiendo  
 240 la fórmula siguiente:

$${}^{base}T_{extremo} = {}^{base}T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot \dots \cdot {}^{n-1}T_n \cdot {}^nT_{extremo} \quad (4)$$

### 241 9.3. Cinemática inversa

242 El robot de este proyecto, es de tipo paralelo o de cadena cinemática cerrada. Para la resolución  
 243 de la cinemática inversa, se ha optado por hacer una simplificación y considerar al mismo como  
 244 cadena cinemática abierta. Como se menciona en la Sección 9.1, se considera un eslabón virtual.  
 245 Esta articulación siempre mantiene la horizontalidad o paralelismo respecto al plano XY sobre el que  
 246 está apoyada la base del robot, siempre que el robot se encuentre dentro del espacio de trabajo. Los  
 247 eslabones pasivos o conducidos se pueden calcular de manera similar, pero no inciden en los cálculos  
 248 para la cinemática inversa. Dado el funcionamiento del robot y para hacer una simplificación en los  
 249 cálculos, solo se considera la posición del efecto final, no la orientación.

250 Se nombran las articulaciones tales como se indican en la Figura 12a. Otra cosa a destacar es que  
 251 no todas las articulaciones se mueven de manera directa, sino que algunas de ellas son conducidas,  
 252 por ejemplo la articulación 4 depende de los movimientos de las articulaciones anteriores, y la  
 253 articulación pasiva 3, depende del movimiento de la articulación activa 3'. Aquí se consideró que  
 254 el eslabón 3 comienza en la intersección con el extremo final del eslabón 2, evitando añadir a los  
 255 cálculos el eslabón activo y el pasivo vinculados. Se puede ver un detalle de esto en la Figura 13.

256 Dadas las limitaciones de movimiento (límites articulares) y la configuración del robot, que tiene  
 257 restricciones físicas debido a la cadena cerrada, se llega a tener una única solución posible para un  
 258 punto objetivo en el espacio, que es "codo arriba".

259 Otra aclaración es que los ángulos  $q_i$  obtenidos no representan los ángulos de giro de sus  
 260 respectivos motores (a excepción del eslabón 1), aunque se puede llegar al valor de los mismos  
 261 fácilmente. Se los representará con  $\alpha$  y  $\beta$ . Una vez hechas las consideraciones previas, se pasa  
 262 a hacer la representación de los parámetros Denavit-Hartenberg (ver Tabla 1). Para la resolución  
 263 del problema de cinemática inversa, se utiliza el método geométrico. Se considera la estrategia de  
 264 desacople cinemático [Pieper, 1968]. En otras palabras, se separa "brazo" de "muñeca". El método  
 265 utilizado es una adaptación ya que este método es válido para robots de 6 grados de libertad. Teniendo  
 266 en cuenta el desacople mencionado anteriormente, se refiere a la posición de la muñeca referida a la  
 267 posición del extremo del robot, menos la distancia del eslabón  $L_4$  con valor absoluto  $L_4$  y orientación  
 268  $\vec{x}_4$ . Las variables articulares se indican con  $q_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) y corresponden a los eslabones 1, 2 y 3  
 269 correspondientes.

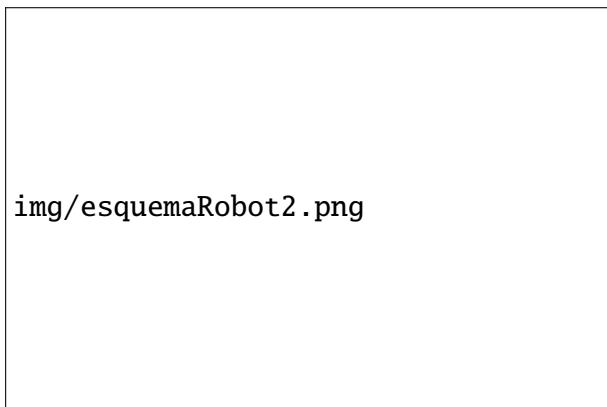
$$P_M = P_F - L_4 \cdot \vec{x}_4 \quad (5)$$

270 El primer ángulo se obtiene de manera directa según la proyección sobre el eje XY (véase Figura 12b):

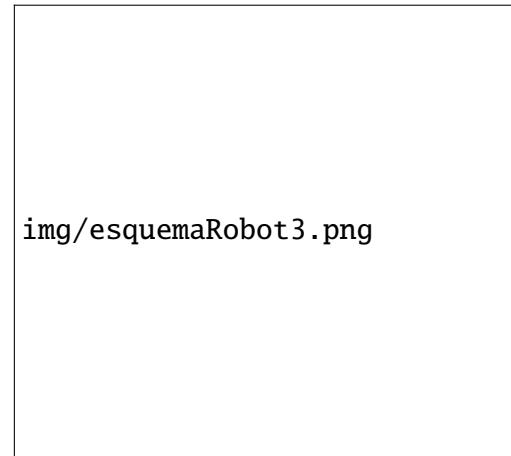
$$q_1 = \arctan \left( \frac{{}^0Y_M}{{}^0X_M} \right) \quad (6)$$

$$d = \sqrt{{}^1X_M^2 + {}^1Y_M^2} \quad (7)$$

$$B = \arctan \left( \frac{{}^0X_M}{{}^0Y_M} \right) \quad (8)$$



(a)



(b)

Figura 12: Referencias del método geométrico

271 Por el teorema del coseno, si se tienen las longitudes de los eslabones se puede determinar  
 272 el ángulo entre el eslabón  $L_2$  y el vector  $d$  que representa la distancia entre  $P_M$  y el sistema de  
 273 referencia 1. Con estos valores se puede calcular el valor de la variable articular  $q_2$ . Como se indicó  
 274 previamente, se elige la disposición “codo arriba”.

$$L_3^2 = d^2 + L_2^2 - 2 \cdot d \cdot L_2 \cdot \cos(C) \quad (9)$$

$$C = \arccos \left( \frac{d^2 + L_2^2 - L_3^2}{2 \cdot d \cdot L_2} \right) \quad (10)$$

$$q_2 = B \pm C \quad (11)$$

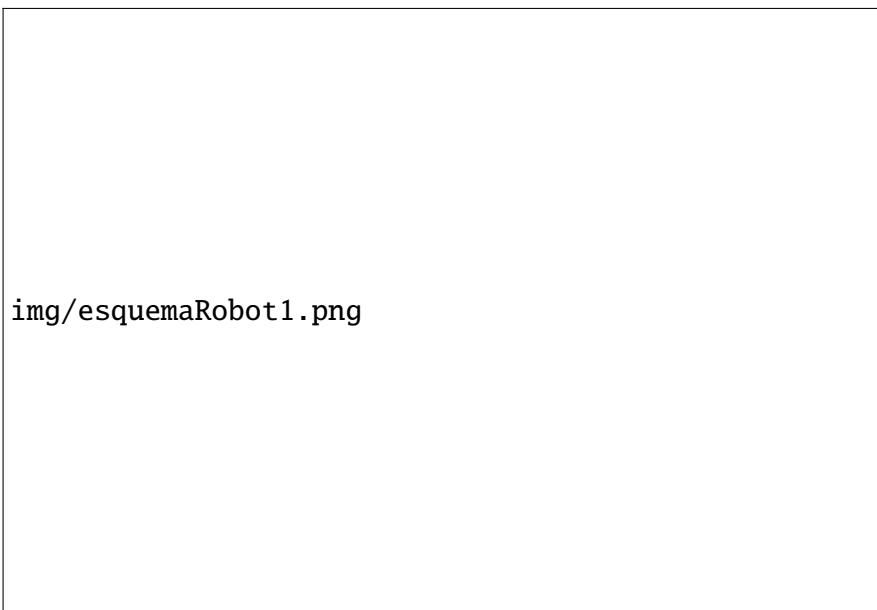


Figura 13: Esquema de eslabones simplificado

275 Tomando el mismo triángulo generado entre el vector distancia  $d$ ,  $L_2$  y  $L_3$ , y haciendo uso del  
276 teorema del coseno, se puede determinar el ángulo  $\psi$ , y con este obtener  $q_3$ .

$$d^2 = L_2^2 + L_3^2 - 2 \cdot L_2 \cdot L_3 \cos(\psi) \quad (12)$$

$$\psi = \arccos\left(\frac{L_2^2 + L_3^2 - d^2}{2 \cdot L_2 \cdot L_3}\right) \quad (13)$$

$$q_3 = \pi - \psi \quad (14)$$

277 Para obtener la posición del extremo final, se usa el eslabón  $L_4$  y se considera un grado de  
278 libertad ficticio,  $q_4$ , el cual se obtiene de manera similar a las variables articulares anteriores (ver  
279 Figura 14). Para encontrar el vector  $r$  que representa la distancia entre el extremo del eslabón 2 y  
280  $P_F$ , se resuelve algebraicamente:

$${}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \cdot {}^3T_4 = {}^0T_4 \Rightarrow {}^2P_F = ({}^0T_1 \cdot {}^1T_2)^{-1} \cdot {}^0T_4 \quad (15)$$

$$r^2 = L_3^2 + L_4^2 - 2 \cdot L_3 \cdot L_4 \cdot \cos(\gamma) \quad (16)$$

$$\gamma = \arccos\left(\frac{L_3^2 + L_4^2 - r^2}{2 \cdot L_3 \cdot L_4}\right) \quad (17)$$

$$q_4 = \pi - \gamma \quad (18)$$

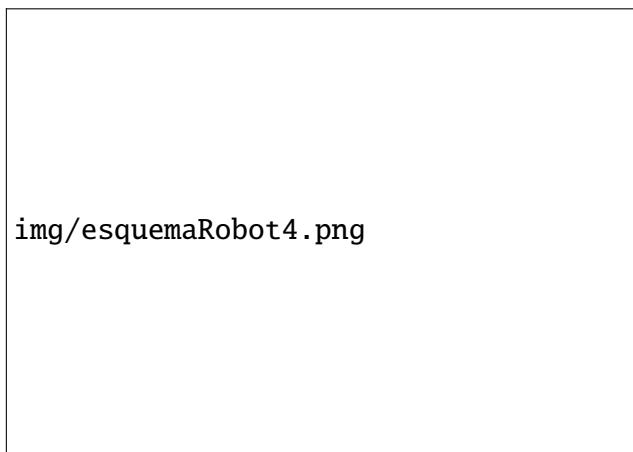


Figura 14: Dimensiones de interés para cálculo de  $q_4$

281 Cabe destacar que las variables articulares representan de manera teórica los ángulos sucesivos  
282 que deben tener los eslabones entre si. Dadas las características constructivas del robot, los ángulos  
283 de giro de cada motor se calculan de la siguiente manera:

$$q_{1m} = q_1 \quad (19)$$

$$q_{2m} = \frac{\pi}{2} - q_2 \quad (20)$$

$$q_{3m} = -(q_2 + q_3) \quad (21)$$

## 284 10. Mejoras mecánicas

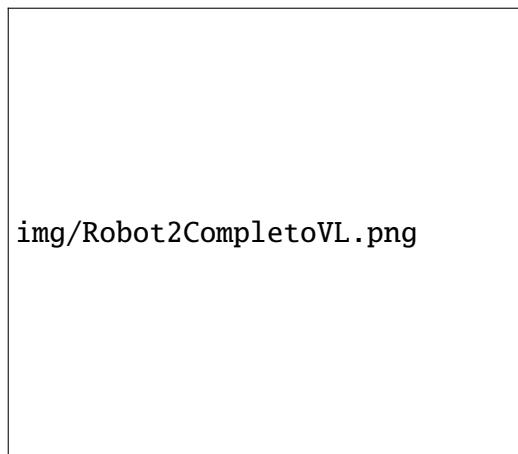
285 Durante la elaboración del proyecto, se fueron realizando distintas pruebas de manera iterativa,  
286 y se llegó a la conclusión de que para que el robot pueda cumplir con las consignas de manera  
287 correcta, deberían hacerse adaptaciones.

### 288 10.1. Descripción general

289 Se reemplazaron los servomotores MG996R que poseía originalmente por motores Paso a Paso  
290 en las articulaciones 2 y 3 del Robot. La articulación 1 (base) ya contaba con un motor Paso a  
291 Paso previamente instalado pero era accionada mediante una correa tipo GT2. En la nueva versión,  
292 se diseñaron pares de engranajes de transmisión para cada articulación. Para la base se empleó un  
293 módulo de transmisión  $m = 1$ . Para las articulaciones 2 y 3 se seleccionó  $m = 1,5$  con el fin de  
294 aumentar el tamaño de los dientes, mejorando así el contacto entre engranajes. Esto permite una  
295 transmisión de carga más robusta y reduce la probabilidad de deslizamientos o pérdida de pasos bajo  
296 esfuerzo. Estas mejoras se pueden ver en las Figuras 15 y 16.

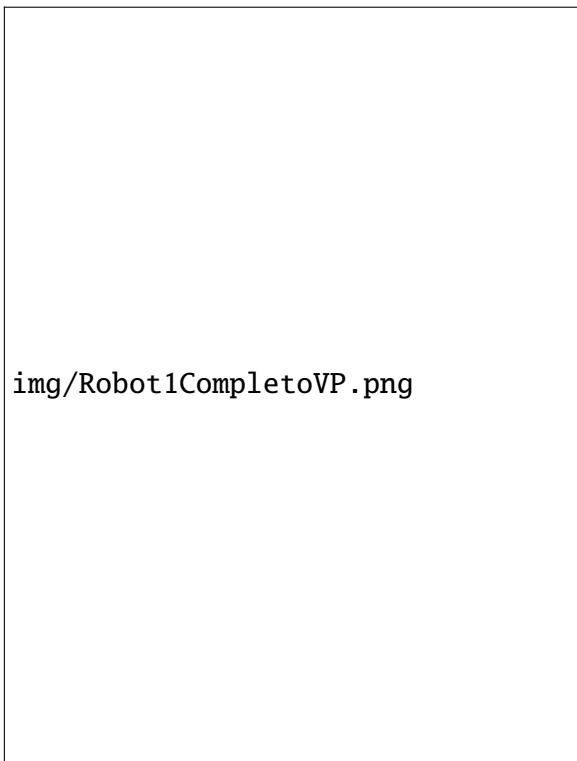


img/Robot1CompletoVL.png



img/Robot2CompletoVL.png

Figura 15: Comparación vista lateral de versión con servo vs con motores Paso a Paso



img/Robot1CompletoVP.png



img/Robot2CompletoVP.png

Figura 16: Comparación vista en perspectiva de versión con servo vs con motores Paso a Paso

## 297 10.2. Datos de diseño y conteo de dientes

298 Los pares de ruedas dentadas definidos son:

- 299   ■ **Base (articulación 1):** engranaje de la articulación  $z_{a1} = 108$  dientes; engranaje del motor  
300     $z_{m1} = 19$  dientes; módulo  $m_1 = 1$ .
- 301   ■ **Articulaciones 2 y 3:** engranaje de la articulación  $z_{a2} = z_{a3} = 32$  dientes; engranaje del motor  
302     $z_{m2} = z_{m3} = 12$  dientes; módulo  $m_2 = m_3 = 1,5$ .

303 Para referencia, el diámetro primitivo de un piñón/rueda se calcula como:

$$D = m \cdot z \quad (22)$$

304 donde  $D$  es el diámetro primitivo (en mm),  $m$  el módulo (mm) y  $z$  el número de dientes.

305 Aplicando la relación anterior se obtienen los diámetros primitivos:

$$\begin{cases} D_{m1} &= m_1 \cdot z_{m1} = 1 \times 19 = 19 \text{ mm} \\ D_{a1} &= m_1 \cdot z_{a1} = 1 \times 108 = 108 \text{ mm} \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} D_{m2} &= m_2 \cdot z_{m2} = 1,5 \times 12 = 18 \text{ mm} \\ D_{a2} &= m_2 \cdot z_{a2} = 1,5 \times 32 = 48 \text{ mm} \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} D_{m3} &= m_3 \cdot z_{m3} = 1,5 \times 12 = 18 \text{ mm} \\ D_{a3} &= m_3 \cdot z_{a3} = 1,5 \times 32 = 48 \text{ mm} \end{cases} \quad (25)$$

### 306 10.3. Condición de distancia entre ejes

307 El proceso de cálculo de engranajes y pruebas fue iterativo, pero la base del robot ya se encontraba  
 308 diseñada. Para no cambiar el diseño 3D de la base, se impuso la restricción de que la distancia entre  
 309 ejes para las articulaciones 2 y 3 es igual a 33 mm. La suma de los radios primitivos debe cumplir:

$$r_m + r_a = \text{distancia entre ejes} \quad (26)$$

310 Considerando a  $r_m$  y  $r_a$  como los radios de  $D_m$  y  $D_a$  respectivamente. Expresado en función de  
 311 los diámetros, la ecuación queda:

$$D_m + D_a = 2 \times \text{distancia entre ejes} \quad (27)$$

312 para el caso de las articulaciones 2 y 3 se verifica:

$$D_{m2} + D_{a2} = D_{m3} + D_{a3} = 18 + 48 = 66 \text{ mm} \Rightarrow \text{distancia entre ejes} = 33 \text{ mm} \quad (28)$$

313 Este resultado explica por qué la combinación  $m_2 = m_3 = 1,5$ ,  $z_{m2} = z_{m3} = 12$  y  $z_{a2} = z_{a3} = 32$   
 314 fue elegida: satisface exactamente la restricción geométrica impuesta por el ensamblaje y además da  
 315 números de dientes enteros. El cálculo se realizó de manera iterativa (búsqueda de pares  $(z_m, z_a)$ )  
 316 para que sean números enteros compatibles con  $D_m + D_a = 66 \text{ mm}$  hasta encontrar combinaciones  
 317 prácticas que cumplieran con los requisitos geométricos y de relación de transmisión.

318 Para la base, con  $m_1 = 1$  se tiene:

$$D_{m1} + D_{a1} = 19 + 108 = 127 \text{ mm} \Rightarrow \text{distancia entre ejes (base)} = 63,5 \text{ mm} \quad (29)$$

319 A diferencia de las articulaciones 2 y 3, en la base del robot no fue necesario realizar un  
 320 proceso iterativo para ajustar la relación de engranajes con el objetivo de agrandar los dientes del  
 321 mismo. Esto se debe a que la fuerza peso del robot no es transmitida a través de los dientes del  
 322 engranaje de la base, sino que es soportada estructuralmente por los elementos mecánicos. En  
 323 consecuencia, el dimensionamiento del tren de engranajes no estuvo condicionado por esfuerzos  
 324 verticales significativos, permitiendo adoptar directamente un módulo de  $m_1 = 1$ , el cual satisface  
 325 adecuadamente la distancia entre ejes requerida de 63,5 mm.

### 326 10.4. Relaciones de transmisión y resolución angular

327 La relación de transmisión (reductor) entre motor y articulación se obtiene por

$$i = \frac{z_a}{z_m} \quad (30)$$

328 Para los pares diseñados:

$$\begin{cases} i_1 &= \frac{108}{19} \approx 5,6842 \\ i_2 &= i_3 = \frac{32}{12} = \frac{8}{3} \approx 2,6667 \end{cases} \quad (31)$$

329 Si el motor Paso a Paso presenta un ángulo de avance por paso completo igual a  $\theta_{\text{step}} = 1,8^\circ$  (por  
 330 ejemplo, en motores de 200 pasos por revolución), entonces el incremento angular que experimenta  
 331 la articulación por cada paso del motor viene dado por:

$$\theta_{out} = \frac{\theta_{step}}{i} \quad (32)$$

332 Reemplazando los respectivos valores:

$$\begin{cases} \theta_{out1} = \frac{1,8^\circ}{5,6842} \approx 0,3167^\circ \text{ por paso del motor 1} \\ \theta_{out2} = \theta_{out3} = \frac{1,8^\circ}{2,6667} \approx 0,6750^\circ \text{ por paso de motores 2 y 3} \end{cases} \quad (33)$$

333 Para mejorar la resolución del sistema de accionamiento, se implementó *micropaso* de 1/8 en los  
334 motores. Bajo este esquema, el ángulo por micropaso está dado por:

$$\theta_{microstep} = \frac{1,8^\circ}{8} = 0,225^\circ \quad (34)$$

335 Dada una relación de reducción  $i$ , el incremento angular de cada articulación por micropaso del  
336 motor es:

$$\theta_{out} = \frac{\theta_{microstep}}{i} \quad (35)$$

337 Por lo tanto, para las tres articulaciones del robot:

$$\begin{cases} \theta_{out1} = \frac{0,225^\circ}{5,6842} \approx 0,0396^\circ \\ \theta_{out2} = \theta_{out3} = \frac{0,225^\circ}{2,6667} \approx 0,0843^\circ \end{cases} \quad (36)$$

338 El número total de micropasos por revolución del motor pasó a ser:

$$N_{microsteps\_per\_rev} = 200 \times 8 = 1600 \quad (37)$$

## 339 10.5. Sensado de ángulos

340 Para la medición de la posición angular en las articulaciones se incorporaron sensores magnéticos  
341 AS5600, ubicados enfrentados a los engranajes correspondientes. Cada sensor funciona en conjunto  
342 con un imán de neodimio que se encuentra acoplado mecánicamente al eje del propio engranaje, de  
343 modo que la rotación del conjunto se traduzca directamente en la variación del campo magnético  
344 percibido por el sensor. El ángulo medido es relativo, por lo tanto requiere de una meticulosa  
345 calibración que permita tener una referencia consistente respecto a los ejes del robot y garantizar  
346 mediciones precisas.

347 El principio de funcionamiento del AS5600 se basa en la detección de la orientación del campo  
348 magnético generado por el imán. Para garantizar una lectura estable, lineal y precisa, el *datasheet*  
349 especifica que la separación axial entre el sensor y el imán debe mantenerse dentro del rango  
350 recomendado de [0,5; 3] mm., además admite un desalineamiento axial de 0,25mm. Fuera de este  
351 intervalo pueden presentarse errores de medición, pérdida de resolución o incluso la imposibilidad  
352 de detectar correctamente el campo magnético.

353 Entonces, durante el montaje se prestó especial atención a la alineación del imán con el centro  
354 del chip y al control de la distancia sensor-imán, asegurando que ambos parámetros se mantuvieran  
355 dentro de las tolerancias indicadas por el fabricante. Como se puede observar en la Figura 17, se  
356 diseñó una pieza que fue capaz de posicionar el sensor centrado respecto al imán. Su diseño permite  
357 absorber pequeños desplazamientos generados por las tolerancias que manejan las piezas (impresas  
358 en 3D) y los movimientos relativos al conjunto imán-sensor. Esto permitió obtener una señal angular  
359 confiable, que es una condición fundamental para el control preciso de las articulaciones.



Figura 17: Alineamiento axial entre sensor AS5600 e imán montado sobre eje de articulación

## 360 10.6. Cambios en el modelado cinemático

361 Dado que se conservaron las longitudes de los eslabones principales, la matriz de parámetros  
 362 Denavit–Hartenberg del robot no sufrió grandes modificaciones salvo por el primer parámetro de la  
 363 primera articulación (desplazamiento a lo largo del eje  $z$ ). En términos prácticos:

- 364   ■ Los parámetros  $\{a_i, \alpha_i, d_i, \theta_i\}$  permanecieron invariantes para los eslabones superiores salvo  
 365   por  $d_1$  (altura de la articulación 1 a lo largo del eje  $z$ ) que se ajusta para reflejar la nueva  
 366   geometría del alojamiento y la interfase entre la base y el primer engranaje.
- 367   ■ Esto implica que las transformaciones homogéneas y la cinemática directa/inversa se conser-  
 368   varon esencialmente, siendo necesario únicamente actualizar el parámetro afectado y volver a  
 369   validar la cinemática numérica.

## 370 11. Circuito electrónico del electroimán

371 Se evaluaron dos opciones de conmutación: transistor NPN y MOSFET de canal N. Teniendo  
 372 la resistencia de la bobina medida ( $123,5\Omega$ ) y sabiendo que se la va a alimentar con  $12V$ , por Ley  
 373 de Ohm la corriente de trabajo es  $\frac{12V}{123,5\Omega} \approx 97mA$ , la cual es reducida para los dos componentes  
 374 propuestos, por lo que ambas soluciones son realizables. Sin embargo, por criterios de eficiencia,  
 375 escalabilidad y fiabilidad, se optó por utilizar MOSFET de canal N.

376 Como se tuvo a disposición un MOSFET no-logic-level, es decir, con un voltaje Gate-Source  
 377  $V_{GS} > 5V$  y el nivel lógico de salida del STM32 es de  $3,3V$ , fue necesario utilizar un transistor  
 378 como level-shifter/pull-down. De esta manera, se llevó la Gate del MOSFET a  $12 V$  para garantizar  
 379 conducción plena ( $V_{GS} \approx 12V$ ). Esta solución invirtió la lógica de la señal (el electroimán se  
 380 enciende con una salida lógica en *LOW*), pero evitó la limitación de  $3,3V$  del STM32 sin necesidad

381 de drivers dedicados. El circuito actúa como una etapa de conmutación de potencia controlada por el  
 382 microcontrolador: cuando la salida digital del STM32 conmuta, el transistor NPN modula el voltaje  
 383 en la compuerta del MOSFET, saturándolo o bloqueándolo según el nivel lógico. El transistor se  
 384 satura con una salida lógica en *LOW* y se bloquea con una salida lógica en *HIGH*. De este modo,  
 385 el MOSFET conmuta la alimentación del electroimán, permitiendo su activación o desactivación  
 386 desde la señal de control.

387 Se desarrolló una placa electrónica para controlar la alimentación del electroimán, acorde al  
 388 diagrama esquemático de la Figura 18a. Se agregó un diodo flyback en paralelo al mismo y en  
 389 polarización inversa para proteger los componentes electrónicos de los picos de voltaje generados  
 390 por el colapso del campo magnético cuando se desenergiza. El diodo ofrece un camino de baja  
 391 impedancia para la corriente inducida, disipándola de manera segura y previniendo daños a otros  
 392 componentes sensibles como el MOSFET. Puede observarse en la Figura 18b la placa electrónica  
 393 en 3D.

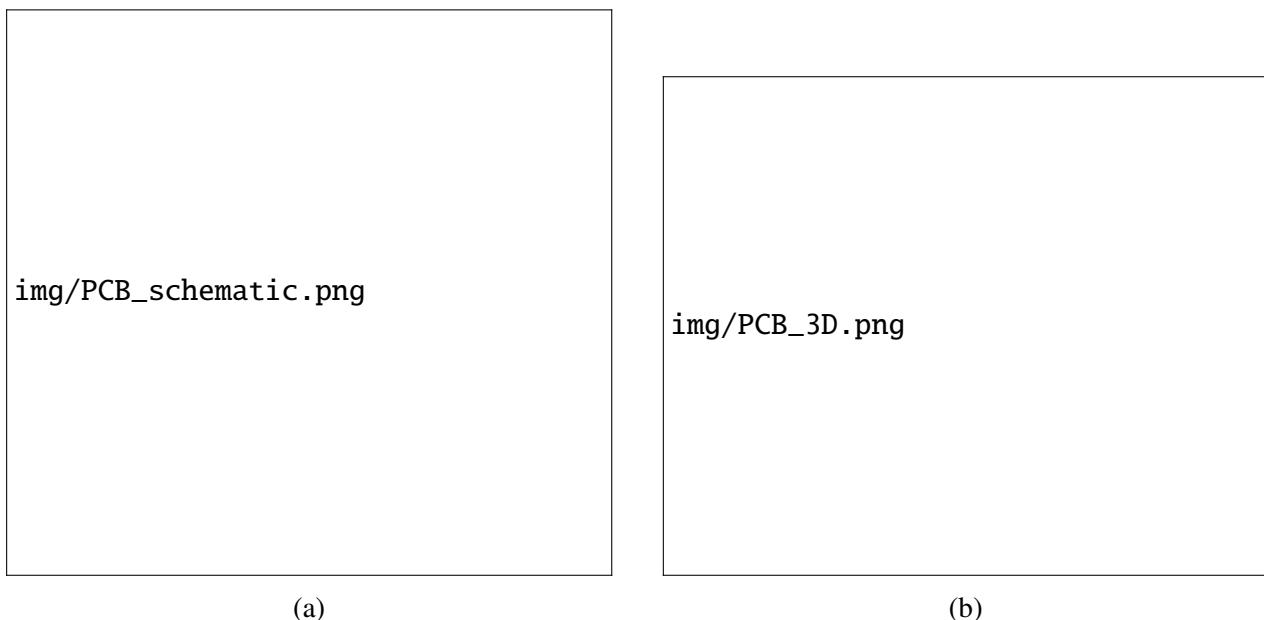


Figura 18: Esquemático y placa electrónica de control del solenoide

## 394 12. Visión artificial

395 Para la detección automática de objetos se empleó un modelo basado en **YOLOv11n** (You Only  
 396 Look Once, versión 11 nano), desarrollado por Ultralytics. Este modelo se caracteriza por su equili-  
 397 bri entre precisión y velocidad, siendo ampliamente utilizado en tareas de visión artificial en tiempo  
 398 real. YOLOv11 realiza la detección de objetos mediante una red neuronal convolucional que procesa  
 399 una imagen completa en una sola pasada, dividiéndola en celdas que predicen simultáneamente las  
 400 coordenadas de los objetos y sus respectivas probabilidades de pertenencia a una clase.

## 401 12.1. Dataset y entrenamiento

402 Se generó un dataset propio con las siguientes categorías:

- 403 ■ Llave fija.
- 404 ■ Llave tubo.
- 405 ■ Mecha.
- 406 ■ Tornillo.
- 407 ■ Tuerca.
- 408 ■ Resorte.
- 409 ■ Rodamiento.
- 410 ■ Punta de destornillador.

411 La elección de estas piezas se fundamenta en que son piezas metálicas, de un tamaño y peso  
412 adecuado que es soportado por el electroimán. Además, otro aspecto importante es que son piezas  
413 simétricas, considerando un eje longitudinal y uno transversal. Esto último, aporta al hecho de que al  
414 reconocer el objeto dentro de la imagen capturada de una vista superior, el centro de la *bounding-box*  
415 de los objetos coincidirá con mucha precisión con el centro de gravedad del objeto. De esta manera,  
416 asumiendo esta simplificación, se facilita encontrar el punto por el que debe sujetar el electroimán  
417 a las piezas en cuestión. Se puede observar en la Figura 19 algunas imágenes que forman parte del  
418 dataset.

img/dataset1.jpg

img/dataset2.jpg

img/dataset3.jpg

img/dataset4.jpg

Figura 19: Imágenes del dataset

## 419 12.2. Preparación del dataset

- 420   ■ **Captura de imágenes:** el conjunto de datos (dataset) fue elaborado con imágenes capturadas  
421   de las herramientas a detectar en distintas condiciones de iluminación, distancia y orientación,  
422   de modo que el modelo pueda generalizar adecuadamente ante variaciones del entorno.
- 423   ■ **Etiquetado:** cada imagen fue anotada manualmente usando una herramienta llamada Label-  
424   Studio, el cual es un software Open-Source de etiquetado de datos. Una vez terminado se  
425   exportó empleando el formato YOLO, el cual asocia a cada objeto detectado una etiqueta que  
426   incluye su clase y las coordenadas normalizadas del cuadro delimitador (*bounding-box*).
- 427   ■ **Entrenamiento y validación:** Los archivos de anotación se organizaron junto a las imágenes  
428   dentro de una estructura de directorios compatible con YOLOv11, y se definió un archivo  
429   data.yaml donde se especifican las rutas a las carpetas de entrenamiento y validación, así  
430   como los nombres de las clases. Posteriormente, el conjunto de datos total se dividió en un  
431   90 % para entrenamiento y un 10 % para validación, asegurando una distribución balanceada  
432   de las clases.

## 433 12.3. Entrenamiento en Google Colab

434   El proceso de entrenamiento se realizó en la plataforma Google Colab, aprovechando la dispon-  
435   ibilidad de unidades GPU para acelerar el cálculo. En primer lugar, se instaló el paquete oficial de  
436   Ultralytics mediante el comando:

```
437 ! pip install ultralytics
438 1
```

440   Luego, se ejecutó el entrenamiento con el siguiente comando base:

```
441 ! yolo detect train data=/content/data.yaml model=yolov11n.pt epochs=60
442 1 imgs=640
443
```

445   En este comando se especifica:

- 446   ■ **data:** ruta al archivo de configuración del conjunto de datos
- 447   ■ **model:** arquitectura base seleccionada. En este caso, YOLOv11n, que es una versión liviana  
448   adecuada para pruebas iniciales
- 449   ■ **epochs:** número de iteraciones completas sobre el conjunto de entrenamiento
- 450   ■ **imgs:** tamaño al que se redimensionan las imágenes de entrada (640 píxeles)

451   Durante el entrenamiento, YOLOv11 optimiza los pesos de la red minimizando una función de  
452   pérdida compuesta, que considera la precisión de las *bounding-box*, la clasificación correcta de las  
453   clases y la confianza de detección. La fase de validación se ejecuta automáticamente al finalizar cada  
454   epoch, utilizando el 10 % del conjunto de datos reservado específicamente para este propósito. Esta  
455   separación garantiza que la evaluación del desempeño del modelo se realice sobre muestras que no  
456   fueron empleadas durante el entrenamiento, evitando así una estimación artificialmente optimista  
457   de su capacidad predictiva. De lo contrario, el modelo podría incurrir en *overfitting*, fenómeno en  
458   el cual aprende patrones excesivamente específicos del conjunto de entrenamiento —incluyendo  
459   ruido o particularidades irrelevantes— y, como consecuencia, presenta un deterioro significativo en  
460   su desempeño cuando se enfrenta a nuevas imágenes. La validación con datos no vistos permite  
461   monitorear este comportamiento y constituye una herramienta fundamental para asegurar la correcta  
462   generalización del modelo.

## 463 12.4. Parámetros de entrenamiento: *epochs* e *imgsz*

464 Durante el proceso de entrenamiento del modelo YOLOv11, dos parámetros influyen significa-  
 465 tivamente en el rendimiento final: el número de *epochs* y el tamaño de imagen (*imgsz*).

466 El parámetro *epochs* define la cantidad de veces que el modelo recorre completamente el conjunto  
 467 de datos durante el entrenamiento. Un número mayor de *epochs* permite que la red neuronal ajuste  
 468 mejor sus pesos y mejore su capacidad de generalización; sin embargo, un valor excesivo puede  
 469 conducir al *overfitting*.

470 Por otro lado, el parámetro *imgsz* especifica la resolución a la cual se redimensionan las imágenes  
 471 antes de ingresar a la red. Un tamaño mayor proporciona más detalle y mejora la precisión de  
 472 detección, aunque también incrementa el tiempo de entrenamiento y el uso de memoria. En cambio,  
 473 un tamaño menor reduce los requisitos computacionales y acelera el proceso, pero puede disminuir  
 474 la exactitud en la identificación de objetos pequeños o con bordes finos.

475 En este proyecto se seleccionaron los valores de *epochs* = 60 y *imgsz* = 640, donde se puede  
 476 afirmar que se pudo optimizar la precisión del modelo sin comprometer significativamente el tiempo  
 477 de entrenamiento ni la velocidad de inferencia.

478 En la Figura 20 se presenta un ejemplo de las predicciones obtenidas tras el entrenamiento del  
 479 modelo. Cada elemento identificado en la escena se encuentra delimitado mediante una *bounding-*  
 480 *box*, acompañada por su correspondiente probabilidad de clasificación -expresada como un valor  
 481 entre 0 y 1- que refleja el nivel de certeza del modelo respecto de dicha detección.



Figura 20: Predicción de modelo YOLOv11

482 Se observa que todos los objetos presentes en la imagen fueron reconocidos correctamente,  
 483 alcanzando valores de confianza elevados en todas las categorías, con un mínimo de 0,80. Este com-  
 484 portamiento evidencia una adecuada capacidad del modelo para discriminar entre clases visualmente  
 485 similares, incluso bajo condiciones de iluminación natural y fondos no totalmente uniformes.

486 De esta manera, resulta destacable que el modelo logra identificar objetos que se encuentran  
 487 parcialmente solapados. A pesar de esta superposición, las *bounding-boxes* se ajustan correctamente  
 488 a los contornos de cada herramienta, lo que indica que la red es capaz de extraer características

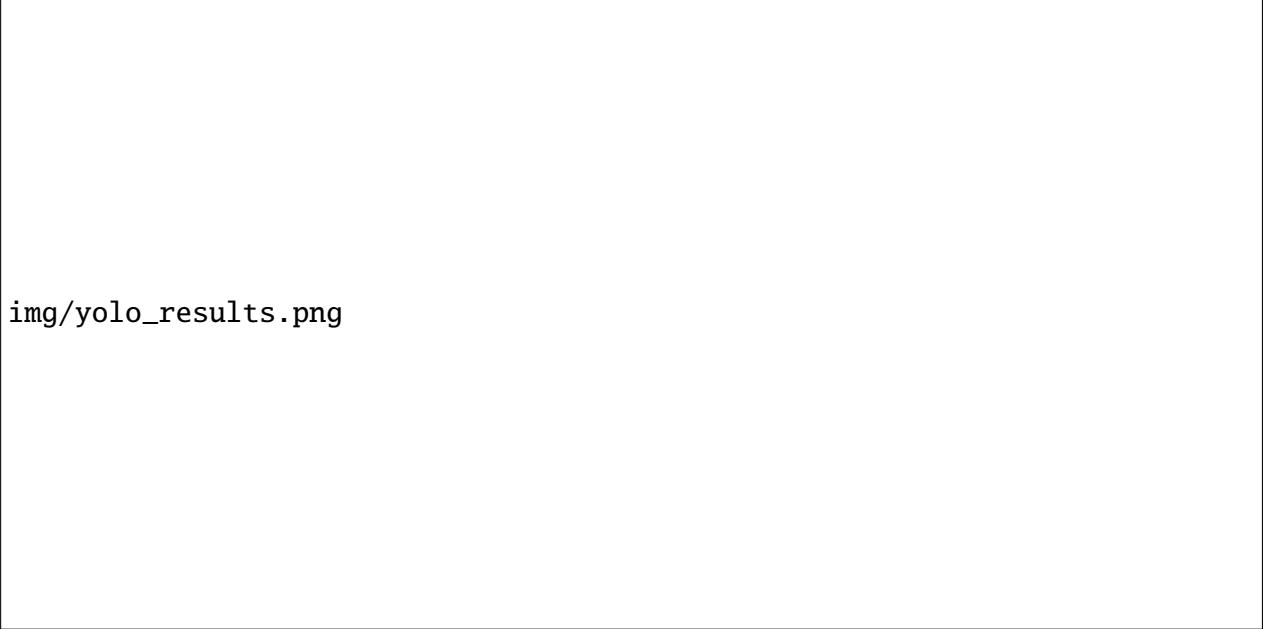
robustas y mantener un desempeño consistente ante escenas con occlusiones leves. Este tipo de comportamiento es especialmente relevante para aplicaciones prácticas, donde las piezas rara vez se encuentran totalmente aisladas o perfectamente separadas dentro del campo visual.

## 12.5. Evaluación del modelo

Al concluir el entrenamiento, se generan métricas de desempeño como:

- **Precision (P)**: proporción de verdaderos positivos respecto a todas las detecciones positivas.
- **Recall (R)**: proporción de verdaderos positivos detectados respecto al total de objetos reales.
- **mAP-0.5 (mean Average Precision)**: promedio de precisión considerando un umbral de intersección sobre unión de 0.5, utilizado como indicador global del rendimiento del modelo.

A partir de estas métricas, se selecciona la mejor versión del modelo (archivo `best.pt`), la cual presenta el equilibrio óptimo entre precisión y generalización. Este modelo puede posteriormente exportarse a formatos optimizados como `.tflite` o `.onnx`, según el entorno de ejecución deseado (por ejemplo, para una Raspberry Pi). En la Figura 21 se observa el resultado de inferencia obtenido con el modelo entrenado.



img/yolo\_results.png

Figura 21: Curvas de resultado de inferencia de YOLOv11n

## 12.6. Inferencia y detección de objetos

Una vez finalizado el entrenamiento, el modelo es capaz de realizar inferencia sobre nuevas imágenes o secuencias de video. El proceso de detección consiste en los siguientes pasos:

1. La imagen de entrada se redimensiona al tamaño requerido ( $640 \times 640$  píxeles) y se normaliza.
2. El modelo predice, para cada celda de la imagen, un conjunto de posibles cuadros delimitadores con sus respectivas probabilidades de clase.

509     3. Se aplica un filtrado de confianza y una técnica denominada *Non-Maximum Suppression*  
 510     (NMS) para eliminar detecciones redundantes.

511     4. Finalmente, se generan los cuadros delimitadores (*bounding-boxes*) y etiquetas de clase co-  
 512     rrespondientes a los objetos detectados.

513     El resultado es una salida visual o estructurada en la que cada objeto reconocido aparece  
 514     identificado por su categoría y su nivel de confianza, representado como un porcentaje sobre la imagen  
 515     original. El modelo resultante logró una detección precisa y estable, manteniendo un equilibrio  
 516     adecuado entre velocidad de procesamiento e identificación confiable de objetos.

## 517     12.7. Cálculo de posición del objeto detectado

518     Una vez verificada la detección correcta del objeto en la imagen, junto con la delimitación precisa  
 519     de su *bounding-box*, y considerando la simplificación previamente establecida de que el centro de  
 520     la *bounding-box* coincide con un alto grado de precisión con el centro de gravedad de la pieza, el  
 521     siguiente paso consiste en traducir esta información visual en datos útiles para el robot. En particular,  
 522     el robot requiere como entrada la posición espacial del objeto detectado, expresada en coordenadas  
 523     compatibles con su plano de trabajo.

524     Para posibilitar esta conversión, resulta indispensable ubicar la cámara en una posición fija y  
 525     conocida respecto de la base del robot, manteniendo constante la altura durante todo el proceso de  
 526     operación. Esta condición permite asegurar que la relación geométrica entre el sistema de visión  
 527     y el espacio de trabajo permanezca invariable, habilitando así una transformación coherente entre  
 528     coordenadas de imagen y coordenadas físicas.

529     En la Figura 22 se puede apreciar una representación de la vista superior del sistema robótico,  
 530     donde el círculo representa el robot, que su base es el origen de referencia. El cuadrado es la cámara  
 531     y el punto es el centro de gravedad del objeto detectado. De esta manera, la cámara existirá en la  
 532     posición  $(X_{cam}, Y_{cam})$  respecto del origen del robot. Mientras que el objeto detectado, se encuentra  
 533     en una posición relativa respecto a la cámara  $(X'_{obj}, Y'_{obj})$ . Manteniendo fija la posición de la cámara,  
 534     podremos encontrar con precisión la posición del objeto detectado respecto el origen del robot. El  
 535     hecho de que el eje vertical sea  $X$  (positivo hacia arriba) y el horizontal sea  $Y$  (positivo hacia la  
 536     izquierda), no es arbitrario sino que coincide con la dirección de los ejes de la base del robot.

537     La localización del objeto en la imagen se obtiene a partir del centro de la *bounding-box*, sin  
 538     embargo, dicha medida está expresada en píxeles. Por lo tanto, es necesario aplicar un factor de  
 539     conversión entre píxeles y milímetros (mm/px), determinado por la calibración previa del sistema.  
 540     Una vez conocido este factor, es posible calcular la posición del objeto en el plano  $X-Y$  mediante la  
 541     siguiente relación:

$$\mathbf{pos}_{obj\_mm} = \mathbf{pos}_{cam} + \mathbf{pos}_{obj\_px} \times f \quad (38)$$

542     donde  $f$  representa el factor de conversión mm/px obtenido experimentalmente,  $\mathbf{pos}_{cam}$  corres-  
 543     ponde a la posición fija de la cámara en el plano, y  $\mathbf{pos}_{obj\_px}$  es la posición del centro del objeto  
 544     detectado en coordenadas de imagen (pixeles).

545     Finalmente, para completar la terna de coordenadas del objeto, el valor de  $Z$  se determina a partir  
 546     de una base de datos que almacena la altura asociada a cada categoría de pieza reconocida. De esta  
 547     manera, el sistema es capaz de reconstruir la posición tridimensional del objeto. Se puede entender  
 548     la posición según la ecuación:

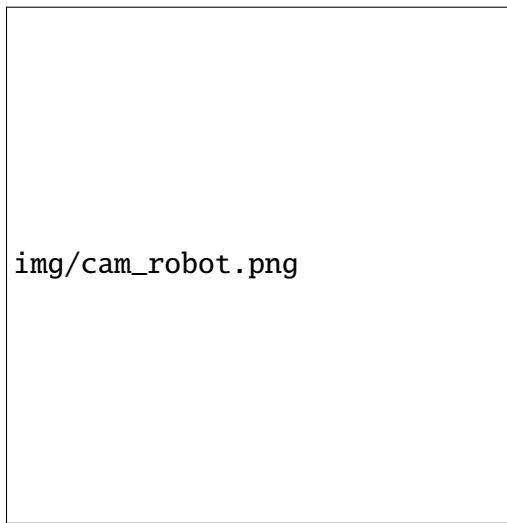


Figura 22: Esquema de posición Robot-Cámara-Objeto

$$\mathbf{pos}_{obj-mm} = \begin{bmatrix} x_{obj} \\ y_{obj} \end{bmatrix} \quad (39)$$

549 donde se puede observar que el vector posición  $\mathbf{pos}_{obj-mm}$  se desglosa en sus componentes  $x_{obj}$   
550 e  $y_{obj}$ . Así, el vector de posición del objeto queda:

$$\begin{bmatrix} x_{obj} \\ y_{obj} \\ z_{obj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} pos_{obj-mm} \\ z_{database} \end{bmatrix} \quad (40)$$

## 551 13. Desarrollo del Firmware

552 En esta sección se describe el funcionamiento de los elementos que componen el firmware, así  
553 como el diseño de la arquitectura definida para poder comunicar al robot con el orquestador. Se optó  
554 por usar microROS ya que permite darle modularidad al sistema, permitiendo que sea escalable y en  
555 caso de requerir más funcionalidades, se puede crear un tópico y añadir un *callback* que responda a  
556 este mismo.

### 557 13.1. Arquitectura general

558 El sistema consta de un orquestador, que es el encargado de enviar consignas de alto nivel al robot.  
559 En el proyecto se ejecuta sobre una computadora personal, pero podría ser un microprocesador, como  
560 por ejemplo alguno integrado en las placas Raspberry®. Desde el orquestador se envían comandos  
561 de posición al robot, tanto articular como en el espacio cartesiano; además se envían los comandos  
562 de Homing y de parada de emergencia. El envío de consignas de velocidad y aceleración se deja  
563 como trabajo futuro.

564 Es una variante de ROS para microcontroladores. Diseñado por *eProsim*, presenta una evolución  
565 a la comunicación entre microcontrolador y otro microprocesador o computadora respecto a *ROS1*.  
566 La elección de este enfoque se debe a que se puede adaptar rápidamente al ecosistema ROS, y  
567 reemplaza al ROS-bridge *rosserial*, ya que ROS1 ya llegó a su *EOL* (no tiene más soporte oficial).

568 Para que la comunicación entre el nodo ROS del orquestador y el robot se pueda dar, se debe  
 569 tener un agente que se encarga de realizar una “traducción” de DDS a micro-XRCE DDS.

## 570 13.2. Módulos básicos

### 571 13.2.1. Programación motores

572 Se programaron los motores Paso a Paso de forma que la generación de pulso en el pin STEP  
 573 de cada driver *DRV8825* sea controlada por PWM. Un gran beneficio de esto es que la generación  
 574 de pulso por PWM no consume recursos de software del STM32 ya que de esta tarea se encarga el  
 575 hardware del mismo. De esta manera, se dedicó a cada motor un timer correspondiente.

576 La programación por PWM requiere calcular el valor requerido en los registros ARR (Auto  
 577 Reload Register) y PSC (Prescaler). Al cambiar la velocidad requerida por cada motor en trayec-  
 578 torias complejas, es necesario recalcular estos valores constantemente para generar la frecuencia  
 579 correspondiente por PWM. El período se calcula como:

$$\text{Periodo} = \frac{(ARR + 1) \times (PSC + 1)}{\text{Freq\_Clock}} \quad (41)$$

580 Despejando de la ecuación, el cálculo de ARR para una frecuencia determinada de *Periodo* es:

$$ARR = \frac{\text{Periodo} \times \text{Freq\_Clock}}{PSC + 1} - 1 \quad (42)$$

581 Considerando que en la interrupción de PWM los motores realizan un micropaso a la vez, se  
 582 puede entender a la frecuencia del PWM como *steps/s*. En la Tabla 2 se detallan los valores de  
 583 frecuencia por PWM con la velocidad de los motores y en los eslabones (carga de cada motor) en  
 584 múltiples unidades.

	Frecuencia PWM [Hz]						
	50	100	200	300	400	500	1000
<b>Motores 1,2,3 [rev/s]</b>	0.03125	0.0625	0.125	0.1875	0.25	0.3125	0.625
<b>Motores 1,2,3 [rpm]</b>	1.875	3.75	7.5	11.25	15	18.75	37.5
<b>Motores 1,2,3 [°/s]</b>	11.25	22.5	45	67.5	90	112.5	225
<b>Carga 1 [rev/s]</b>	0.0055	0.0110	0.0220	0.0330	0.0440	0.0550	0.1100
<b>Carga 1 [rpm]</b>	0.3299	0.6597	1.3194	1.9792	2.6389	3.2986	6.5972
<b>Carga 1 [°/s]</b>	1.9792	3.9583	7.9167	11.8750	15.8333	19.7917	39.5833
<b>Carga 2 y 3 [rev/s]</b>	0.0117	0.0234	0.0469	0.0703	0.0938	0.1172	0.2344
<b>Carga 2 y 3 [rpm]</b>	0.7031	1.4063	2.8125	4.2188	5.6250	7.0313	14.0625
<b>Carga 2 y 3 [°/s]</b>	4.2188	8.4375	16.8750	25.3125	33.7500	42.1875	84.3750

Tabla 2: Frecuencias de PWM y velocidades en motores/eslabones

### 585 13.2.2. Programación sensores de ángulo

586 Para la adquisición de los ángulos articulares se utiliza un multiplexor I<sup>2</sup>C *TCA9548A*, cuya  
 587 función es permitir la lectura independiente de varios sensores AS5600 que comparten la misma  
 588 dirección I<sup>2</sup>C. El microcontrolador habilita uno de los ocho canales del multiplexor escribiendo un

589 byte en su registro de control, donde cada bit activa un canal distinto. De esta manera, sólo el sensor  
 590 asociado al canal seleccionado queda accesible en el bus I<sup>2</sup>C para la siguiente lectura.

591 Una vez elegido el canal correspondiente, se accede a los registros del AS5600 para obtener los  
 592 dos bytes que contienen la medida angular en formato *raw*. Dichos bytes se combinan y se extraen  
 593 los 12 bits significativos del valor, que representan el ángulo absoluto del imán en un rango de 0  
 594 a 4095. Dependiendo de la disposición mecánica del sensor respecto del eje, puede ser necesario  
 595 invertir el sentido de algunas lecturas para mantener un sistema de referencia coherente entre todas  
 596 las articulaciones.

597 El valor *raw* obtenido se convierte a grados mediante la relación:

$$\theta = \frac{\text{raw}}{4096} \cdot 360^\circ \quad (43)$$

598 Posteriormente, el ángulo se reexpresa en el rango [-180, 180), lo cual simplifica los cálculos  
 599 de control y evita discontinuidades cuando el valor se hace negativo.

600 Dado que en algunas ocasiones pueden producirse lecturas erróneas por ruidos en la comuni-  
 601 cación I<sup>2</sup>C o por pequeñas perturbaciones durante la adquisición, se incorpora un mecanismo de  
 602 rechazo de picos. Este consiste en comparar la lectura actual con la lectura previa: si la diferencia  
 603 entre ambas supera un umbral preestablecido, se considera que la medición no es válida y se man-  
 604 tiene el último valor fiable. Si la variación se encuentra dentro del límite permitido, la lectura se  
 605 acepta como correcta. Este criterio resulta suficiente para los sensores AS5600, ya que el ángulo  
 606 real normalmente varía de manera continua y suave entre muestras, por lo que los saltos abruptos  
 607 suelen indicar claramente una lectura incorrecta.

### 608 13.2.3. Programación cinemática

609 Inicialmente, la cinemática del manipulador fue desarrollada y verificada en *MATLAB*, lo que  
 610 permitió asegurar la coherencia entre el modelo teórico y el comportamiento físico del robot. Una  
 611 vez validado el modelo, se realizaron pruebas donde se implementó el cálculo de la cinemática  
 612 inversa directamente sobre el microcontrolador *STM32F446RE*, aprovechando la *Floating Point*  
 613 *Unit (FPU)* integrada, para operar con aritmética en coma flotante simple y alcanzar desempeño  
 614 en tiempo real. Sin embargo, la resolución final de la cinemática se trasladó a Python, ya que  
 615 forma parte de una función que es llamada por el orquestador del sistema, responsable también del  
 616 cálculo de la trayectoria. Esta decisión permitió simplificar los procesos de cálculo y validación  
 617 dentro del espacio de trabajo, además de contribuir a minimizar el consumo de memoria en el  
 618 microcontrolador. Asimismo, el tiempo de cálculo de la trayectoria no supera los 35ms, por lo  
 619 que resulta lo suficientemente bajo como para justificar su ejecución en Python. De este modo,  
 620 la generación de consignas articulares y la planificación del movimiento quedan integradas en un  
 621 mismo entorno de procesamiento.

### 622 13.2.4. Generación de Trayectorias sincronizadas

623 La generación de trayectorias sincronizadas para el robot se divide en dos partes: la definición de  
 624 la forma geométrica en el espacio cartesiano y la asignación de una ley de movimiento temporal que  
 625 respete las limitaciones dinámicas de los motores Paso a Paso. Esta separación permite desacoplar  
 626 el problema geométrico del dinámico, simplificando el diseño y análisis de la trayectoria.

627 La primer parte consiste en establecer un conjunto de puntos de control (*waypoints*) en el espacio  
 628 cartesiano, que terminan definiendo la ruta que debe seguir el efecto final. En este nivel, solo importa  
 629 la geometría: el punto inicial *A*, el punto final *B* y los puntos de paso obligatorios que garantizan,

630 por ejemplo evitar obstáculos. A partir de los puntos definidos, se genera una curva paramétrica  
 631  $p(s)$  suave en el espacio cartesiano interpolada utilizando B-Splines cúbicas:

$$p(s) = [x(s), y(s), z(s)], \quad s \in [0, 1] \quad (44)$$

632 Donde el parámetro  $s$  es geométrico y no representa tiempo físico. El uso de B-Splines cúbicas  
 633 garantiza continuidad de segundo orden ( $C^2$ ), es decir:  $p(s)$ ,  $p'(s)$  y  $p''(s)$  son continuas, lo que  
 634 significa que no habrá saltos infinitos en velocidad o aceleración. Una propiedad relevante de las  
 635 B-Splines es que permite generar curvas que pasen específicamente por los puntos asignados (se les  
 636 asigna gran peso) o simplemente aproximarse para asegurar suavidad en la curvatura (se les asigna  
 637 poco peso), para más información consultar [BSp, 2001]. Para este proyecto se asignó:

- 638 ■ Gran peso en los extremos, para garantizar pasar exactamente por las posiciones inicial y final
- 639 ■ Poco peso en los puntos intermedios, para evitar cambios bruscos en posición o velocidad

640 Para cada punto  $p(s)$  se resuelve la cinemática inversa, obteniendo la trayectoria articular:

$$q(s) = [q_1(s), q_2(s), q_3(s)] \quad (45)$$

641 La evolución del parámetro  $s$  en el tiempo queda definida por un polinomio de grado 5. A  
 642 continuación, se puede observar el polinomio y sus dos siguientes derivadas respecto al tiempo.

$$s(t) = a_5\tau^5 + a_4\tau^4 + a_3\tau^3 + a_2\tau^2 + a_1\tau + a_0, \quad \tau = \frac{t}{T} \quad (46)$$

$$\dot{s}(t) = \frac{1}{T} (5a_5\tau^4 + 4a_4\tau^3 + 3a_3\tau^2 + 2a_2\tau + a_1) \quad (47)$$

$$\ddot{s}(t) = \frac{1}{T^2} (20a_5\tau^3 + 12a_4\tau^2 + 6a_3\tau + 2a_2) \quad (48)$$

643 Siendo  $T$  el tiempo total de la trayectoria. Para encontrar los valores de los coeficientes es  
 644 necesario establecer 6 condiciones de contorno:

$$\begin{cases} s(0) = 0, & s(T) = 1 \\ \dot{s}(0) = 0, & \dot{s}(T) = 0 \\ \ddot{s}(0) = 0, & \ddot{s}(T) = 0 \end{cases}$$

645 Al aplicar estas condiciones y resolviendo el sistema de ecuaciones, los coeficientes resultantes  
 646 son:  $a_0 = a_1 = a_2 = 0$     $a_3 = 10$     $a_4 = -15$     $a_5 = 6$ . De esta manera, el polinomio  $s(t)$  con sus  
 647 respectivas derivadas queda de la siguiente manera:

$$s(t) = 6\tau^5 - 15\tau^4 + 10\tau^3 \quad (49)$$

$$\dot{s}(t) = \frac{1}{T} (30\tau^4 - 60\tau^3 + 30\tau^2) \quad (50)$$

$$\ddot{s}(t) = \frac{1}{T^2} (120\tau^3 - 180\tau^2 + 60\tau) \quad (51)$$

648 Se puede observar la representación gráfica de estas ecuaciones en la Figura 23. El procedimiento  
 649 mencionado desacopla la forma de la trayectoria de su evolución temporal, permitiendo posteriormente  
 650 aplicar técnicas de *time-scaling*, que consiste en escalar la trayectoria paramétrica a un tiempo  
 651  $T$  para satisfacer los límites de velocidad y aceleración en la articulación más exigida:

$$|\dot{q}| \leq \dot{q}_{max}, \quad |\ddot{q}| \leq \ddot{q}_{max} \quad (52)$$

652 Luego se relacionan las derivadas temporales con el parámetro geométrico:

$$\dot{q}(t) = \frac{dq}{ds} \dot{s}(t) \quad (53)$$

$$\ddot{q}(t) = \frac{d^2q}{ds^2} \dot{s}^2(t) + \frac{dq}{ds} \ddot{s}(t) \quad (54)$$

653 Combinando la geometría  $q(s)$  con la ley temporal  $s(t)$  se obtienen:  $q(t)$ ,  $\dot{q}(t)$  y  $\ddot{q}(t)$ , que  
 654 constituyen las trayectorias articulares físicamente realizables por los motores (ver Figura 24). La  
 655 representación de la trayectoria interpolada en el espacio de trabajo con puntos de control se puede  
 656 ver en la Figura 25.

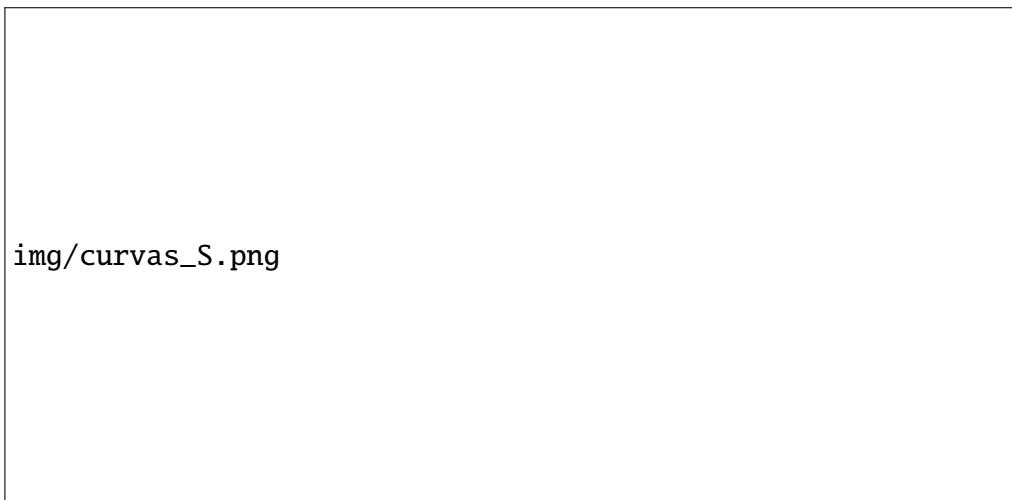


Figura 23: Posiciones, velocidades y aceleraciones del parámetro  $s$

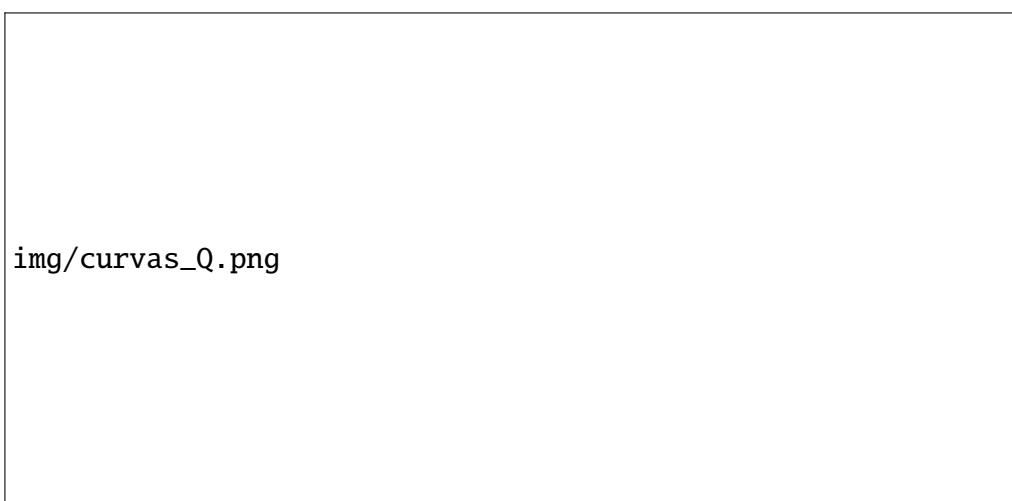


Figura 24: Posiciones, velocidades y aceleraciones articulares



Figura 25: Trayectoria en el espacio de trabajo interpolada con B-Spline

## 657 14. Integración de ROS, microROS y FreeRTOS en Sistemas 658 Embebidos

659 El objetivo de esta sección es describir de manera general la arquitectura de integración entre el  
660 nodo orquestador y el microcontrolador, enfatizando los roles de cada componente y su relación en  
661 el sistema robótico.

662 El control de alto nivel (control supervisor) se hace en la computadora, y este nodo envía las  
663 consignas de posición, homing, parada de emergencia. El sistema de mensajería de ROS permite  
664 disminuir el tiempo de desarrollo del envío de información entre los sistemas a través de modos que se  
665 comunican con un patrón *publisher/subscriber* anónimo. El microcontrolador ejecuta microROS, una  
666 variante de ROS que se ejecuta dentro de una *Task* de FreeRTOS. La misma está dedicada a la creación  
667 de *executors*, que manejan la comunicación entre los nodos y las publicaciones/suscripciones.

### 668 14.1. ROS

669 ROS2 provee distintos mecanismos de comunicación entre módulos, que son objetos llamados  
670 nodos. Los mecanismos de comunicación son interfaces, quienes permiten el intercambio de in-  
671 formación entre nodos de manera estructurada. Las principales son mensajes, servicios y acciones,  
672 cada una diseñada para diferentes patrones de comunicación dentro del sistema.

673 Los mensajes se transmiten a través de tópicos, siguiendo el patrón publisher/subscriber, como  
674 se mencionó anteriormente. Cualquier nodo que publique un mensaje en un tópico determinado  
675 puede ser recibido por todos los nodos suscritos a él. Este mecanismo es ideal para flujos de datos  
676 continuos o asincrónicos, como sensores o comandos periódicos. En este caso se envían las consignas  
677 de posición mediante tópicos con un tiempo periódico fijo.

678 Los servicios implementan un modelo *request/response*, permitiendo que un nodo solicite una  
679 operación a otro y reciba una respuesta inmediata. Son adecuados para interacciones puntuales que  
680 requieren confirmación o retorno de datos.

681 Las acciones están diseñadas para tareas que requieren más tiempo en completarse. Una acción  
682 está compuesta por dos servicios (uno para enviar el objetivo *-goal-* y otro para obtener el resultado

final) y un flujo de mensajes publicados en un tópico para proporcionar retroalimentación durante la ejecución. Otra diferencia entre acciones y servicios es que las primeras pueden ser canceladas.

En la Figura 26 se pueden ver los nodos correspondientes al orquestador ROS (llamado “minimal\_publisher”) y los nodos correspondientes al módulo de cálculo de trayectoria y al de la interfaz de usuario. El sentido de las flechas es desde el publicador hacia el suscriptor.

img/rosgraph.png

Figura 26: Gráfico de nodos ROS

La comunicación entre nodos viene dada por un protocolo basado en UDP, y se debe respetar la red en la que se comunican los nodos. Por ejemplo, se puede tener grupos de nodos con un propósito en la misma red que otro grupo. Para esto se usa el **ROS DOMAIN**, que en este caso es 0, lo que quiere decir que el rango de conexión aceptado para las conexiones es entre los puertos 7400 y 7651 (más detalles en 18.5).

Se eligieron tipos de mensajes *core* de ROS para ser enviados. Estos son del tipo **Point** y **Bool**. También se pueden enviar mensajes de tipo String y hacer una “traducción” de una trama personalizada. En este caso se optó por usar unos tipos de mensajes nativos, pero también se pueden crear mensajes personalizados (formato .msg). A continuación se muestra un mensaje de tipo nativo. Con el siguiente comando se puede ver el tipo de mensaje, en este caso de tipo Point.

```
ros2 interface show geometry_msgs/msg/Point
# This contains the position of a point in free space
float64 x
float64 y
float64 z
```

Estructura de mensaje Point

706 Se pueden crear mensajes personalizados, con el formato <tipo de dato><nombre\_variable>  
 707 y ubicando el archivo en la carpeta msg en el proyecto. Por ejemplo, para el envío de comandos para  
 708 variables articulares, se usó esta configuración:

```
709 1 float64[3] q          # Angulos de las articulaciones (posicion)
710 2 float64[3] qd        # Velocidades angulares
711 3 int32 t_total       # Tiempo total
712 4 int32 traj_state    # Estado de la trayectoria
```

### Estructura de mensaje Point

715 Se podría, por ejemplo, agregar un header con el *timestamp* del mensaje, y algún flag. Los mensajes  
 716 pueden ser compuestos por otros mensajes, por ejemplo:

```
717 1 ros2 interface show std_msgs/msg/Header
718 2
719 3 # Standard metadata for higher-level stamped data types.
720 4 # This is generally used to communicate timestamped data
721 5 # in a particular coordinate frame.
722 6 # Two-integer timestamp that is expressed as seconds and nanoseconds.
723 7
724 8 builtin_interfaces/Time stamp
725 9     int32 sec
726 10    uint32 nanosec
727 11
728 12 # Transform frame with which this data is associated.
729 13 string frame_id
```

### Ejemplo de estructura compuesta

732 Para extender ROS a microcontroladores, se utiliza *microROS* (ver 14.2). La arquitectura típica  
 733 sigue el siguiente esquema:

- 734 1. **ROS2 en un sistema host:** nodos más complejos, planificación y coordinación.
- 735 2. **microROS en un microcontrolador:** tareas de interpretación de consignas y adquisición de  
 736 sensores.
- 737 3. **FreeRTOS:** como RTOS subyacente.
- 738 4. **microROS Agent:** como puente entre DDS y DDS-XRCE.

739 Esta estructura permite que un microcontrolador se comporte como un nodo ROS nativo desde  
 740 la perspectiva del resto del sistema. En la Figura 27 se puede apreciar un detalle.

741 Como mención, se puede agregar que las mediciones de las variables articulares pueden ser  
 742 guardadas en una cola RTOS y ser enviadas a un publisher mediante un tópico.

743 Otro dato no menos relevante es que se pueden elegir diversas estrategias para enviar y recibir  
 744 consignas, mensajes de ACK/NAK, mensajes de debug o valores de sensores. En el caso de estudio  
 745 actual se optó por distintos *topics*, por una cuestión de facilidad de desarrollo y prototipado. Otra  
 746 opción disponible era hacer uso de *actions*. Por ejemplo, se podría enviar la consigna de posición  
 747 deseada (goal), obtener el resultado y estar suscrito a un tópico de feedback que tendría las posiciones  
 748 actuales de los motores.

749 Cabe destacar que ROS tiene una estructura interna que se debe seguir, porque en ella se  
 750 indican los nodos, a qué clases corresponden, las dependencias y demás. Además de esto cuenta con  
 751 herramientas que ya facilitan este tipo de configuraciones.



img/diagramaObjetosROS\_completo.png

Figura 27: Mapa conceptual de las conexiones entre el orquestador y el esclavo

## 14.2. microROS

El stack microROS es una versión reducida de ROS2 diseñada específicamente para microcontroladores con recursos limitados de RAM, CPU y energía. Se desarrolla como proyecto *open source* desde 2018. Hace uso del protocolo DDS-XRCE, una variante ligera del DDS utilizada por ROS2 que permite la serialización y transporte eficiente de mensajes. El objetivo de este software stack es que el código de ROS2 sea fácilmente portable a microcontroladores [Belsare et al., 2023]. El stack microROS utiliza la arquitectura en capas de ROS y reutiliza la mayor cantidad de paquetes de ROS2.

Entre las principales características, se puede mencionar que, además de contar con APIs similares a ROS2 (optimizadas para baja memoria), se cuenta con soporte para distintos RTOS y para diferentes canales de comunicación. En la capa de Middleware, usa una implementación del standard DDS-XRCE de eProsima, Micro XRCE-DDS (DDS For Extremely Resource Constrained Environments). Para poder comunicar el microcontrolador con el orquestador, se necesita un agente que hace de puente entre DDS y DDS-XRCE.

La configuración de los nodos y del *executor* se hacen en una tarea de FreeRTOS. Las suscripciones y publicaciones a los distintos tópicos (considerando tipos de datos), los timers (si los hay) y el enlace con los callbacks asociados a cada tópico) son manejadas por el *executor*.

El flujo se puede resumir de la siguiente manera: se inicia el transporte (UART en este caso) y el middleware, luego se especifican los publishers/subscribers o timers si los hubiera, se define el executor asociado y se mantiene sincronizado con el agente. Se considera la liberación de recursos en caso de que se finalice la comunicación.

## 14.3. FreeRTOS

FreeRTOS es un sistema operativo de tiempo real ampliamente utilizado en sistemas embebidos y está diseñado para microcontroladores. Provee un modelo simple de multitarea con prioridades explícitas, colas, semáforos y temporizadores. En este proyecto se ha optado por usar FreeRTOS. Cabe destacar al haber una tarea dedicada a microROS no se bloquean tareas críticas dentro del sistema.

El nodo microROS necesita al menos 10 kB de memoria en el stack para poder ejecutarse, y la comunicación serial se hace mediante UART con DMA. Se tienen distintos tipos de transports, se elige DMA porque no usa tiempo de procesamiento en la CPU, lo cual evita sobrecargas. Es

782 importante que el canal Rx esté configurado como circular <sup>2</sup>. Otro detalle a mencionar es que  
 783 para la programación en el microcontrolador se usó la API de CMSIS que viene integrada en los  
 784 microcontroladores ST. Esta misma sirve como capa de abstracción porque se pueden usar sus  
 785 funciones y las mismas pueden servir para otro RTOS subyacente, como por ejemplo Zephyr.

786 FreeRTOS administra los recursos temporales y de concurrencia, mientras que microROS ges-  
 787 tiona la comunicación a nivel de middleware.

788 Entre las funcionalidades principales de FreeRTOS se encuentran:

- 789 ■ **Tasks:** hilos ligeros con prioridad configurada. Como se ve en la gráfica presentada anterior-  
 790 mente, hay tareas para el control de los motores, para el cálculo de la cinemática y para el  
 791 modo homing.
- 792 ■ **Queues:** se usan para que haya comunicación segura entre tareas. Se pueden hacer colas y  
 793 arrays de colas. Este último caso sirve para `mid_JointQueue`, así se separa una cola por motor.
- 794 ■ **Timers:** ejecución periódica controlada por el RTOS.
- 795 ■ **APIs seguras para ISR:** integración con interrupciones externas. Se pueden configurar en el  
 796 caso de parada de emergencia.
- 797 ■ **Gestión de memoria configurable:** importante dado que microROS favorece esquemas estáti-  
 798 cos. Por cuestiones de funcionamiento, la tarea asignada a microROS debería tener al menos  
 799 10 kB.

800 La selección adecuada de prioridades entre tareas de control y tareas asociadas a microROS es  
 801 crítica para cumplir *deadlines*.

#### 802 14.4. Integración: ROS2 – microROS – FreeRTOS

803 El ecosistema general puede describirse mediante tres niveles:

- 804 1. **Nivel de aplicación (ROS2):** nodos de planificación, control de alto nivel e interfaces de  
 805 usuario.
- 806 2. **Nivel de middleware:** ROS2 utiliza DDS completo; microROS emplea DDS-XRCE con un  
 807 agente como intermediario.
- 808 3. **Nivel embebido (microcontrolador):** FreeRTOS ejecuta las tareas del sistema y el *rclc*  
 809 *executor* procesa los callbacks de microROS.

810 Teniendo en cuenta estos puntos, se presenta un gráfico (Figura 28) desde el punto de vista de ROS,  
 811 con la información de los nodos correspondientes al orquestador y al agente del microcontrolador.

812 Este enfoque desacopla el control de alto nivel del control en tiempo real, permitiendo un diseño  
 813 robusto y escalable. Entrando más en detalle, se pueden diferenciar las distintas partes del sistema.  
 814 En la computadora, el sistema está compuesto por 4 nodos principales:

<sup>2</sup>Así el DMA escribe de manera continua los datos entrantes en un búfer sin requerir reinicio manual ni intervención constante de la CPU. Una vez que se reciben todos los bytes de datos, se reinicia el contador y el DMA continua recibiendo datos

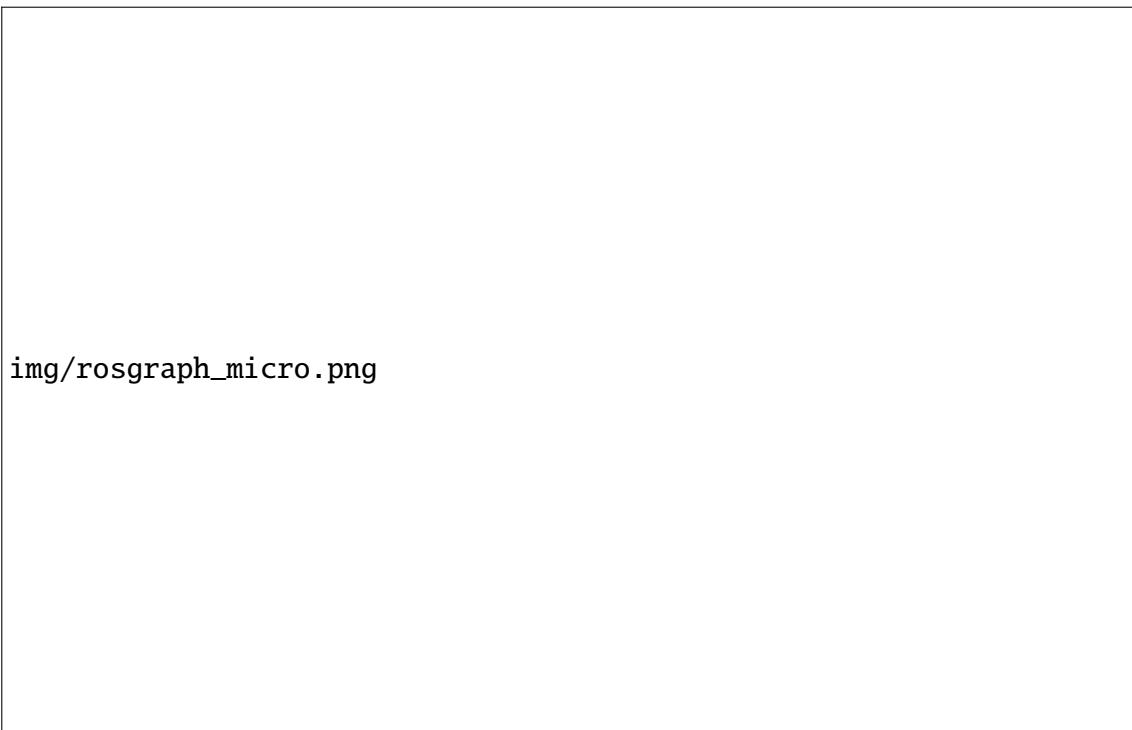


Figura 28: Diagrama de conexiones entre nodos

- **robot\_ui:** Interfaz de usuario que permite enviar comandos al robot, carga de trayectorias CSV y comunicación con servidores externos.
- **trajectory\_planner:** Nodo encargado de la planificación de trayectorias. Recibe posiciones cartesianas y genera trayectorias articulares interpoladas, publicando mensajes del tipo extra\_interfaces/Trama (posiciones  $q$ , velocidades  $\dot{q}$ , tiempo y estado de trayectoria).
- **publisher:** es el encargado de comunicar la interfaz de usuario con el microcontrolador, así como con el planificador de trayectoria.
- **microROS Agent:** actúa como puente de comunicación (*bridge*), traduciendo los mensajes DDS de ROS2 al protocolo XRCE-DDS utilizado por el microcontrolador a través de la interfaz UART.

En la Tabla 3 se muestra una breve descripción de los tópicos utilizados, el tipo de mensaje utilizado, el sentido de la comunicación y un detalle funcional.

El firmware del STM32 implementa un sistema multitarea basado en FreeRTOS cuyas tareas principales son:

- **StartDefaultTask:** Tarea de inicialización que configura el transporte UART, crea el nodo microros\_pubsub\_rclc y ejecuta el bucle del executor para despachar los callbacks de las subscripciones.
- **StartMotorControlTask:** Tarea consumidora responsable de ejecutar los movimientos de cada motor. Inicializa los métodos relacionados a la inicialización de las consignas PWM.

Tópico	Tipo de mensaje	Dirección	Descripción
/microROS/homing	std_msgs/Bool	ROS ⇒ STM32	Comando de homing
/microROS/cmd	extra_interfaces/Trama	ROS ⇒ STM32	Trayectoria articular
/microROS/inverse	geometry_msgs/Point	ROS ⇒ STM32	Posición cartesiana (cinemática inversa)
/microROS/string_publisher	std_msgs/String	STM32 ⇒ ROS	Realimentación de posición

Tabla 3: Descripción de tópicos más relevantes

- 834           ■ **Callbacks de suscripción:** Incluyen cmd\_callback (trayectorias), homing\_callback (referenciado) e inverse\_kinematics\_callback (coordenadas cartesianas). El microcontrolador es capaz  
 835           de realizar los cálculos de cinemática directa e inversa internamente.  
 836

837           El flujo de datos sigue una secuencia definida para garantizar la integridad de los comandos:

- 838           1. **Fase de Recepción:** Al recibir un mensaje, el executor invoca el cmd\_callback, que convierte  
 839           el mensaje a una estructura interna JOINT\_POS\_t y la deposita en la cola mid\_JointQueue  
 840           mediante osMessageQueuePut().  
 841           2. **Sincronización:** La cola funciona como un mailbox (tamaño unitario); si llega un comando  
 842           nuevo, el anterior es sobrescrito para evitar datos obsoletos.  
 843           3. **Fase de Ejecución:** la tarea lee la cola, e inicia el movimiento mediante Timers de hardware  
 844           en modo PWM. La rutina de interrupción HAL\_TIM\_PeriodElapsedCallback() actualiza la  
 845           posición en tiempo real.  
 846           4. **Fase de Retroalimentación:** la posición se guarda en mid\_FeedbackQueue al completar el  
 847           movimiento. Un temporizador de software (500 ms) consulta esta cola y publica el estado en  
 848           el tópico /microROS/string\_publisher utilizando rcl\_publish().

#### 849           14.5. Flujo de información en trayectorias

850           El flujo de información más completo es el de generación de trayectorias de múltiples objetivos.  
 851           Para realizar una determinada trayectoria, se detallan a continuación los pasos que se aplican desde  
 852           la publicación de los comandos de posición hasta la ejecución en el microcontrolador:

- 853           1. **robot.ui:** el nodo de interfaz gráfica recibe la ruta con el archivo que contiene los objetos solicitados, simulando así un determinado pedido. Publica en el tópico /robot.ui/load\_objects, donde es consumido por el nodo publisher.  
 854  
 855           2. **publisher:** este nodo se encarga de la comunicación con el servidor, donde recibe la posición xyz del objetivo por socket, la decodifica y publica en el tópico /ROS/trajectory\_planning, donde es consumido por el nodo trajectory\_planner.

- 859 3. **trajectory\_planner**: este nodo se encarga de la generación de las trayectorias considerando el  
 860 interpolador B-Spline y la ley de tiempo de polinomio de grado 5 (Ecuación 46). La trayectoria  
 861 sincronizada es determinada por los puntos de inicio, fin y posibles puntos intermedios. Se  
 862 la discretiza con un paso de tiempo fijo, que para este proyecto se estableció en  $\Delta t = 45ms$ ,  
 863 el cual es un valor de compromiso entre rendimiento y movimientos suaves en el robot.  
 864 A continuación, se publican las posiciones objetivo en el tópico `/planner/path` y son  
 865 consumidas por el publisher, quien las envía al microcontrolador.
- 866 4. **startMotorControlTask**: el callback de microROS subscripto a `/microROS/cmd` se encarga  
 867 de realizar una adaptación del mensaje y colocarlo en cola (como se menciona en la sección  
 868 14.4). Cada punto de la trayectoria se categoriza en uno de los siguientes estados: inicio,  
 869 durante, finalización. El estado es guardado en la variable `traj_state` de la estructura `Trama`  
 870 y su valor se traducirá en el control de trayectoria mediante **trajectoryControl**, inicio y parada  
 871 de los timers PWM.
- 872 5. **trajectoryControl**: es la función encargada del control de trayectoria. Toma como parámetros  
 873 la posición  $q(i)$ , la velocidad  $q_d(i)$  y qué motor se desea controlar. Realiza un control de  
 874 posición corrigiendo la velocidad con un control proporcional. La variación de velocidad se  
 875 traduce de  $^{\circ}/s$  a  $steps/s$  con la correspondiente relación de transmisión por motor y los  
 876 micropasos por revolución. Cuando se desea detener los timers, se realiza una compensación  
 877 de posición hacia la posición objetivo hasta situarse dentro de un error de tolerancia de  $0,2^{\circ}$ .<sup>3</sup>

878 El flujo mencionado anteriormente se puede ver en la Figura 29.

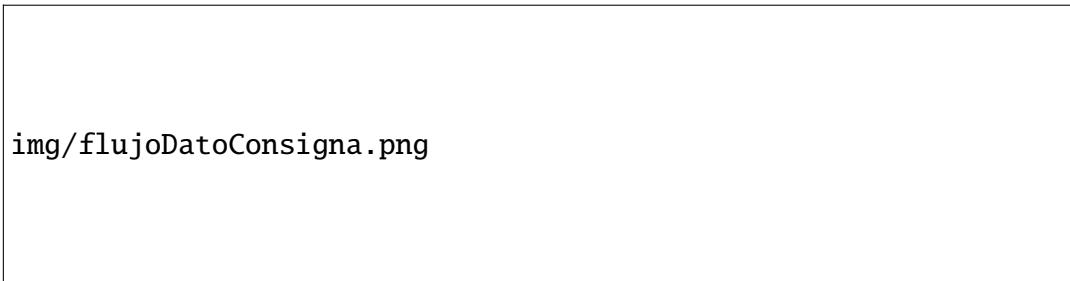


Figura 29: Flujo de datos en trayectorias

<sup>3</sup>Ver función de control en 18.6

## 879 15. Ensayos realizados

### 880 15.1. Ensayo de carga electroimán

881 Con el fin de determinar las capacidades reales de sujeción del efecto final, se realizaron  
882 diversos ensayos experimentales sobre el electroimán instalado en el robot. Estos ensayos permitieron  
883 caracterizar el comportamiento del sistema ante variaciones en la masa, la geometría y la distancia  
884 de las piezas a manipular.

885 En primer lugar, se evaluó la carga máxima que el electroimán puede sostener de manera  
886 confiable. Se comprobó que el límite práctico se alcanza cuando se sujetan piezas de 135 g. La  
887 sujeción fue realizada respecto del centro de gravedad de las piezas, ya que más allá de este punto, el  
888 peso realiza momento que aumenta la carga efectiva, lo que reduce la capacidad de sujeción y puede  
889 comprometer la estabilidad durante el traslado. Por esta razón, se considera que la manipulación  
890 debe realizarse preferentemente tomando la pieza lo más cerca posible de su centro de gravedad y  
891 se debe tener en cuenta este valor de peso máximo por pieza.

892 Otro aspecto analizado fue la máxima distancia admisible entre la superficie del electroimán y  
893 la pieza para que la sujeción sea efectiva. Los ensayos realizados permitieron establecer que, para el  
894 electroimán utilizado, la distancia límite es de aproximadamente 4 mm. Esto implica que, siempre  
895 que el robot se posicione por debajo de ese valor, la atracción magnética será suficiente para asegurar  
896 la captura del objeto. Este valor deja un buen margen sobre el cual puede posicionarse el electroimán  
897 al intentar sujetar piezas.

898 Por último, se verificó la presencia de magnetismo remanente una vez que el electroimán es  
899 desenergizado. Este efecto provoca que objetos de muy baja masa (menores a 20 g) permanezcan  
900 adheridos al electroimán aún sin corriente. Si bien este fenómeno no afecta significativamente  
901 la manipulación de piezas más pesadas, es relevante tenerlo en cuenta en aplicaciones donde la  
902 liberación precisa del objeto sea un requisito fundamental. Finalmente se descubrió que agregando  
903 un fino aislante a la base del electroimán, los objetos de baja masa caen por su propio peso.

### 904 15.2. Ensayo de calibración de sensores de ángulo

905 La calibración de los sensores magnéticos AS5600 se llevó a cabo mediante un procedimiento  
906 experimental destinado a obtener una referencia angular absoluta confiable. Para esto, se usó un  
907 sensor inercial MPU6050, el cual se colocó directamente sobre los eslabones accionados por los  
908 motores correspondientes, de modo que proporcionara una medida del ángulo real respecto al eje X  
909 del robot.

910 El proceso consistió en posicionar cada eslabón en una orientación conocida y fácilmente  
911 identificable: 0° para el eslabón 1, 90° para el eslabón 2 y 0° para el eslabón 3. Una vez fijada cada  
912 posición y registrado el ángulo mediante el MPU6050, se procedió a leer el valor entregado por el  
913 sensor AS5600. Debido a que la medición del AS5600 depende directamente de la orientación del  
914 imán de neodimio solidario al eje, fue necesario realizar ajustes iterativos en la posición del imán  
915 hasta que la lectura reportada coincidiera con el ángulo de referencia establecido por el MPU6050.

916 Este método de calibración fue imprescindible porque el AS5600 no mide ángulos absolutos  
917 en un sistema de coordenadas físico predefinido, sino la rotación relativa del campo magnético  
918 generado por el imán. De esta manera, la alineación precisa entre el campo magnético y el sistema  
919 de coordenadas del robot fue esencial para garantizar coherencia entre el ángulo medido y la  
920 orientación real del eslabón.

### 921 15.3. Ensayos cinemáticos

922 En la etapa inicial del proyecto, el cálculo de la cinemática inversa del robot fue desarrollado  
 923 y evaluado en *MATLAB*. Una vez verificada la validez del modelo, el algoritmo fue trasladado al  
 924 *STM32* haciendo uso de su *FPU*. Aun así, las consignas de movimiento para cada articulación se  
 925 realizan en *Python* con el objetivo de simplificar la verificación dentro del área de trabajo.

926 Las pruebas realizadas confirmaron que el efecto final se desplaza con precisión hacia los  
 927 puntos definidos por la cinemática inversa, demostrando la correcta implementación del algoritmo  
 928 y su adecuada integración con el sistema de control del robot.

929 Mediante ensayos experimentales se verificó que los motores Paso a Paso, operando bajo carga,  
 930 pueden alcanzar una velocidad máxima de aproximadamente 75 rpm (equivalente a 450°/s). Sin  
 931 embargo, con el fin de garantizar un funcionamiento seguro y permitir una observación más clara  
 932 del movimiento durante las pruebas y la operación normal, se decidió limitar la velocidad máxima  
 933 de trabajo a 37.5 rpm (225°/s). Este valor proporciona un margen adecuado para evitar pérdidas de  
 934 pasos y asegurar desplazamientos suaves y controlados en todas las articulaciones.

### 935 15.4. Comunicación ROS2/microROS

936 En esta etapa se ensayó la comunicación entre el orquestador (la computadora en este caso) y  
 937 el robot (el microcontrolador STM32). Como se mencionó anteriormente, se debieron configurar  
 938 múltiples cosas. De manera algorítmica, se puede listar un paso a paso para poder conectar el agente  
 939 microROS a la computadora:

- 940 1. **Preparación del entorno en el host:** En la computadora que ejecutará ROS2 se utiliza Docker  
 941 para desplegar el entorno del microROS Agent. Este contenedor incluye todas las dependencias  
 942 necesarias (DDS, transportes, compiladores y herramientas) y evita configuraciones manuales  
 943 en el sistema operativo.
- 944 2. **Obtención de las herramientas de microROS para CubeMX:** En el entorno de desarrollo  
 945 del firmware se clonian los repositorios de `micro_ros_setup` (con soluciones listas) o  
 946 `micro_ros_stm32cubemx_utils` (para el caso de una placa genérica ST). Estas utilidades permiten  
 947 generar automáticamente el código de integración entre el microcontrolador, FreeRTOS y  
 948 el cliente microROS (`rclc`).
- 949 3. **Generación del proyecto STM32:** se puede usar cualquier IDE o editor, en el caso de este  
 950 proyecto se usó STMCube IDE, por lo tanto se adaptó con Cube MX. Se genera el proyecto  
 951 con los módulos necesarios: soporte UART, inicialización del RTOS, asignación de memoria  
 952 y creación de la tarea encargada de ejecutar el cliente microROS.
- 953 4. **Configuración del transporte microROS:** Se configura UART con DMA circular y se registran  
 954 las funciones de apertura, cierre, lectura y escritura con `rmw_uros_set_custom_transport`.  
 955 Esta capa adapta la comunicación ROS2 al hardware embebido.
- 956 5. **Inicialización del cliente microROS:** En la tarea principal de FreeRTOS se configuran el  
 957 asignador de memoria, el soporte `rclc`, el nodo microROS, y los publicadores y suscriptores.  
 958 Además, se crea un ejecutor que administra la ejecución de callbacks cuando llegan mensajes  
 959 desde el agente.

960     6. **Lanzamiento del microROS Agent en Docker:** Se descarga con Docker el entorno de com-  
 961       pilación preconfigurado. En el host se ejecuta el contenedor Docker del microROS Agent, que  
 962       actúa como puente entre ROS2 y el microcontrolador. El agente traduce mensajes DDS/RTPS  
 963       a un transporte serial o UDP, y los reenvía al cliente microROS. El agente se inicia de la  
 964       siguiente manera:  
 965

```
1 ros2 run micro_ros_agent micro_ros_agent serial --dev <device> -v6
2
```

Inicialización de Agente (device: dispositivo USB por ejemplo)

969     7. **Conexión y operación:** Una vez que el microcontrolador inicia su tarea microROS, establece  
 970       comunicación con el agente. A partir de ahora y gracias al Agente, microROS se empieza a  
 971       ver como un nodo.

972       Un detalle que vale aclarar es que durante estas pruebas hubo errores con el manejo de colas en  
 973       los callbacks que son ejecutados por, valga la redundancia, el *executor*. Para esto, se debe asegurar  
 974       un correcto limpiado de los elementos que son consumidos, y se debe prestar especial atención  
 975       al tipo de datos que se cargan, ya que en la creación de las mismas se define el tamaño de cada  
 976       elemento. Otro detalle importante es que la interfaz serial (UART) encargada de la comunicación  
 977       ROS/microROS, esté configurada con DMA y el canal Rx debe ser **Circular**.

978       La solución que se brindó fue la siguiente: antes de insertar el dato, verificar si la cola está  
 979       llena; en ese caso, eliminar el elemento más antiguo para asegurar que el valor actualizado pueda  
 980       almacenarse. Luego, intentar colocar el nuevo mensaje en la cola y reportar un error si la operación  
 981       no pudo completarse. De esta manera, la función garantiza que siempre exista un *setpoint* vigente  
 982       sin bloquear la ejecución del sistema.

```
983
984 1 // Poner message type Point en queue
985 2 osStatus_t xStatus; // container para Overwrite wrapper
986 3 CARTESIAN_POS_t dummy;
987 4
988 5
989 6 if (osMessageQueueGetSpace(mid_PositionQueue) == 0) {
990 7     osMessageQueueGet(mid_PositionQueue, &dummy, NULL, 0); // eliminar
991 8     el mas antiguo
992 9 }
993 10 xStatus = osMessageQueuePut(mid_PositionQueue, &xSetpointToSend,
994 11 osPriorityNormal, 10);
995 12 if (xStatus != osOK) {
996 13     printf( "Could not send to the queue.\r\n" );
997 14 }
```

Fragmento de escritura en cola

## 999 15.5. Ensayo de Área de trabajo del robot

1000       Se calculó el espacio de trabajo físico del robot en MATLAB en un plano XZ, donde solo las  
 1001       articulaciones **q<sub>2</sub>** y **q<sub>3</sub>** pueden moverse. Esto se realizó en un cálculo iterativo de la cinemática  
 1002       directa del robot, sabiendo los ángulos máximos y mínimos dados por el rango articular. la Figura  
 1003       30 representa este espacio de trabajo, que si se puede observar, se lo limitó a puntos con  $z \geq 0$  para  
 1004       tener como límite mínimo de  $z$  al plano base del robot ( $z = 0$ ).

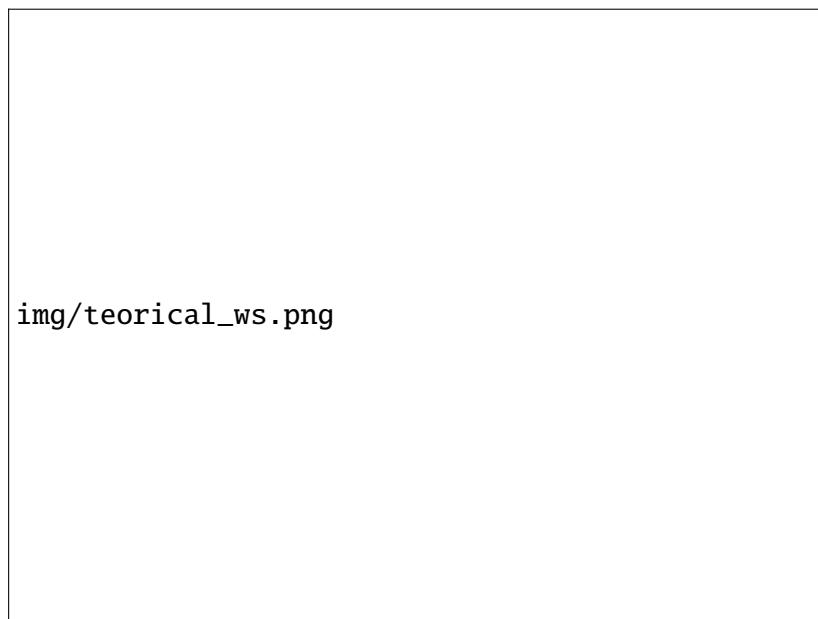


Figura 30: Espacio de trabajo teórico

Este espacio de trabajo es teórico, es decir que no representa en su totalidad el movimiento del robot, ya que el mismo tiene limitaciones físicas que impiden lograr ciertos ángulos. Se realizaron ensayos empíricos que demuestran que no todo el rango de ángulos de las articulaciones  $q_2$  y  $q_3$  es alcanzable, sino que existen colisiones dadas por la geometría de los eslabones. Se generó una tabla (Figura 31) que combina  $q_2$  y  $q_3$  donde se colorean las celdas de verde si esa combinación es alcanzable dentro del espacio de trabajo, sino de color rojo.

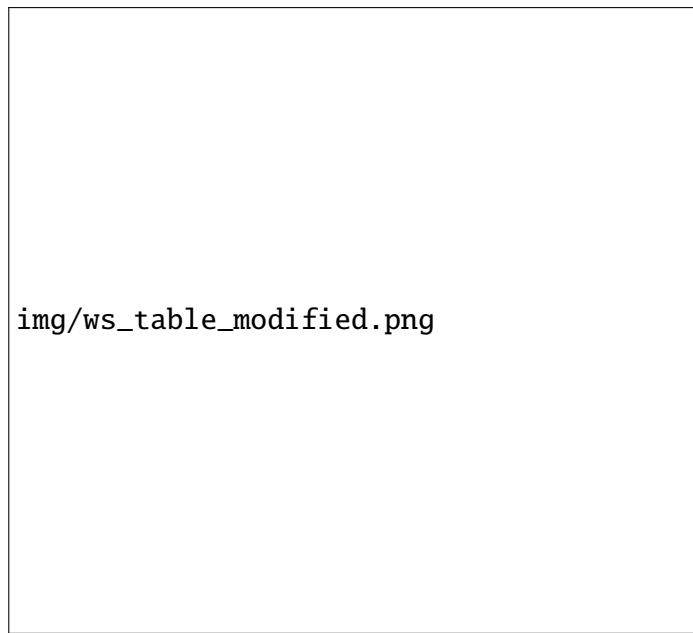


Figura 31: Espacio de trabajo articular con restricción  $z = 0$

La Figura 32 presenta un zoom de la esquina superior derecha de la tabla, donde se pueden observar los pares de ángulos válidos dentro del espacio de trabajo. Con esta información, se realizó

1013 un nuevo cálculo de los puntos en el espacio teniendo en cuenta las limitaciones físicas, que se puede  
1014 observar en la Figura 33.

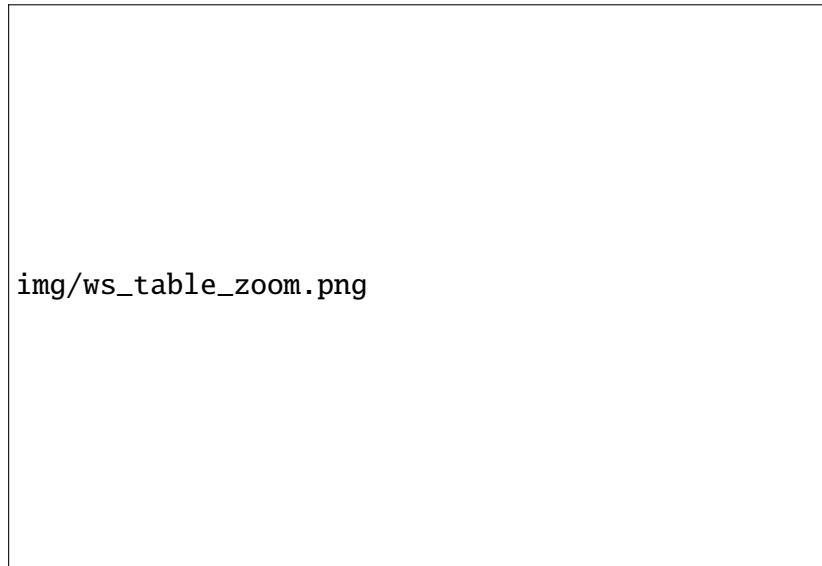


Figura 32: Espacio de trabajo articular (Zoom)

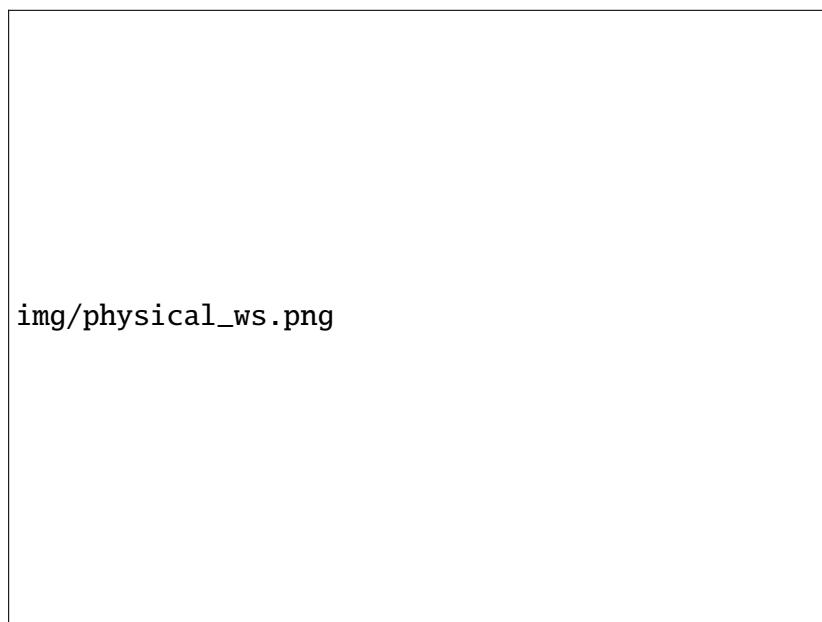


Figura 33: Espacio de trabajo real, plano XZ

1015 Se observó que existe un reducido rango de posiciones alcanzables en el plano  $z = 0$ , mientras  
1016 que a mayor altura se iba incrementando. Se optó por “elevar” la base de posicionamiento de piezas  
1017 a 40mm de la base del robot para tener mayor rango en este plano.

1018 Este ensayo permitió encontrar experimentalmente los puntos del espacio de trabajo tanto cartesi-  
1019ano como articular. Se guardó la tabla en formato .csv y durante la planificación de una trayectoria,  
1020 cada punto es verificado consultando este archivo con el objetivo de comprobar que la posición so-  
licitada pertenece al espacio de trabajo. De esta manera, se evita intentar alcanzar posiciones no

1022 alcanzables. En caso que algún punto se encuentre fuera del mismo, la trayectoria no es genera-  
1023 da. Como mejora futura, se propone implementar un algoritmo de planificación que reprograme  
1024 automáticamente los puntos intermedios que queden fuera del espacio de trabajo para ajustarlos a  
1025 posiciones alcanzables; en cambio, si el punto inicial no pudiera ser alcanzado, el sistema debería  
1026 notificarlo mediante un mensaje de error claro y específico.

## 1027 **15.6. Ensayo de visión artificial**

1028 En esta etapa se realizaron dos ensayos complementarios de visión artificial: uno basado en  
1029 técnicas clásicas con *OpenCV* y otro utilizando un modelo de detección por *deep learning*. El  
1030 objetivo principal fue evaluar la capacidad del sistema para identificar correctamente objetos dentro  
1031 del área de trabajo y obtener su posición en coordenadas reales mediante la relación *mm/px*.

### 1032 **15.6.1. Detección del patrón y cálculo de la relación mm/px**

1033 Se desarrolló un código en Python utilizando *OpenCV* para detectar una figura rectangular o  
1034 cuadrada cuyas dimensiones son conocidas. Esta figura puede ser desde una tarjeta de débito/crédito,  
1035 una placa impresa en 3D o hasta un cuadrado impreso (ver Figura 34). De esta manera, se utilizó  
1036 esta forma como patrón que sirvió como referencia geométrica para calcular la relación mm/px,  
1037 necesaria para transformar coordenadas de imagen en coordenadas reales del robot.

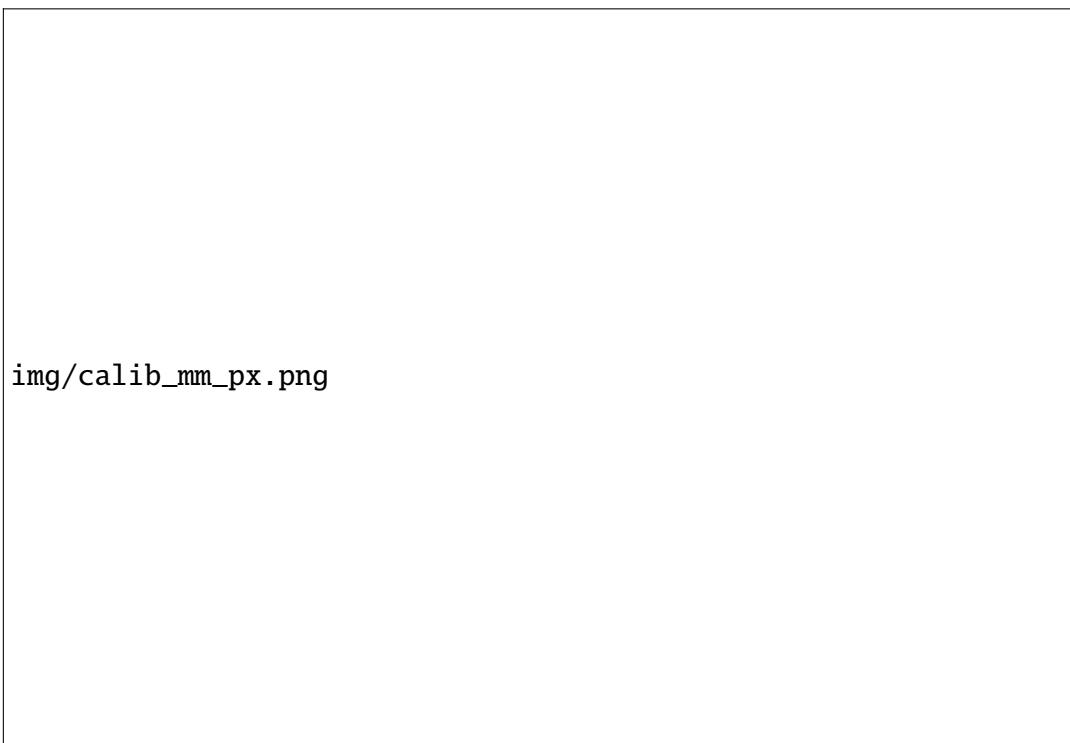


Figura 34: Ensayo de calibración para obtener relación mm/px

### 1038 **15.6.2. Ensayo de detección mediante YOLOv11n**

1039 Además del procesamiento clásico, se evaluó el modelo entrenado con *YOLOv11n* para la detec-  
1040 ción de herramientas pertenecientes al dataset propio del proyecto. El modelo demostró capacidad

1041 para identificar correctamente cada una de las clases consideradas, incluso ante variaciones mode-  
 1042 radas de iluminación, con exceso de brillo, con piezas superpuestas entre sí y con piezas recortadas  
 1043 en los límites de la imagen.

1044 Una vez detectado un objeto y conocido el centro de su *bounding-box*, fue posible determinar  
 1045 su posición real respecto del origen del robot utilizando la relación mm/px previamente calibrada.  
 1046 Para esto se emplea la Ecuación 38, que permite transformar coordenadas de imagen al sistema de  
 1047 referencia del robot.

1048 Es importante remarcar que, para garantizar la validez de esta conversión, fue necesario fijar  
 1049 tanto la posición del robot como la de la cámara, evitando desplazamientos relativos que pudieran  
 1050 modificar la calibración. La precisión obtenida depende directamente de la estabilidad mecánica del  
 1051 montaje y de una correcta determinación del factor *mm/px*.

1052 Como se puede apreciar en la Figura 35, se realizó la correcta detección de la herramienta y fue  
 1053 posible encontrar el centro de la *bounding-box*, donde se realizó la conversión a *mm* y se referenció  
 1054 este punto respecto al origen del robot.

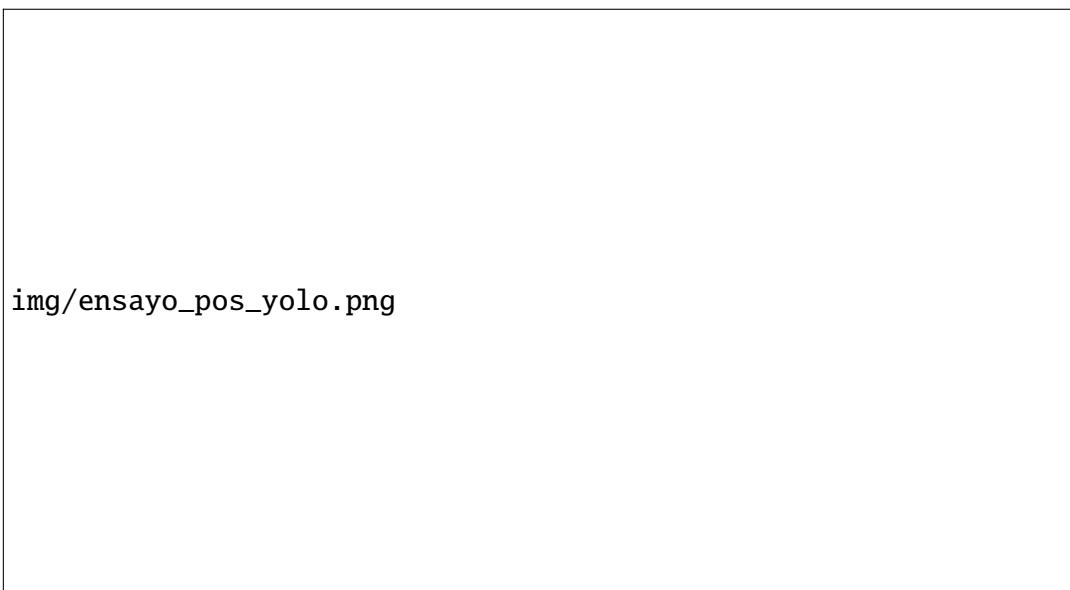


Figura 35: Ensayo de detección de herramientas y posicionamiento respecto origen del robot

1055 Es importante realizar una aclaración respecto a la metodología empleada en este ensayo. Si  
 1056 bien el modelo de detección fue entrenado utilizando múltiples entidades de cada herramienta,  
 1057 algunas de ellas presentan variaciones de altura dentro de su misma categoría. Esta condición no  
 1058 resulta compatible con la suposición utilizada durante la planificación del movimiento, donde se  
 1059 considera una única altura representativa por clase de objeto. De esta manera, el uso de diversas  
 1060 entidades en el entrenamiento tuvo como objetivo principal mejorar la robustez del modelo de visión,  
 1061 mientras que en la práctica del proceso de manipulación, se requiere que los objetos de una misma  
 1062 categoría mantengan la misma altura. Si se aceptaran distintas alturas por cada objeto, se requerirían  
 1063 subcategorías de cada herramienta, lo cual se considera trabajo a futuro como mejora del proyecto.

## 1064 15.7. Ensayo de trayectoria

1065 Con el objetivo de evaluar el desempeño del sistema de control, se realizó un ensayo de segui-  
 1066 miento de trayectoria, en el cual el robot debía recorrer un perfil previamente planificado, de forma

que se registró en todo momento el error de posición de cada articulación. La trayectoria realizada es la de la Figura 24. El análisis se centró en comparar la referencia generada por el planificador con la respuesta real medida mediante los sensores angulares integrados en cada eje.

En una primera aproximación, el control se planteó como un seguimiento punto a punto de la posición y la velocidad de referencia. Sin embargo, se observó que el uso exclusivo de la velocidad calculada por la trayectoria no resultaba suficiente para garantizar un seguimiento preciso. Esto se debe a que el modelo cinemático no contempla ciertos efectos presentes en el sistema real: por un lado, los motores Paso a Paso poseen una velocidad mínima efectiva para producir movimiento, por debajo de la cual no se generan pasos; por otro, aparecen fenómenos como vibraciones, pequeñas holguras mecánicas y no idealidades en la transmisión. De esta manera, asumir que cada articulación reproducirá fielmente velocidades arbitrariamente bajas conduce a errores acumulativos durante el movimiento.

Para mitigar estos efectos, se cerró el lazo utilizando la medición de posición de cada articulación. Se implementó un control proporcional sobre la velocidad, tomando como referencia el error de posición instantáneo. El esquema adoptado se describe mediante las siguientes ecuaciones:

$$q_{error} = q_{ref} - current\_angle \quad (55)$$

$$v_{new} = v_{ref} + K_p \cdot q_{error} \quad (56)$$

Siendo  $q_{ref}$  y  $v_{ref}$  la posición y velocidad de referencia en cada instante de la trayectoria. Este planteo combina un término *feedforward* de velocidad ( $v_{ref}$ ), que impone la trayectoria deseada, con un término proporcional de realimentación ( $K_p \cdot q_{error}$ ), encargado de corregir desvíos. Cuando el error de posición se reduce, el comportamiento está dominado por la velocidad planificada, mientras que ante errores significativos, el término proporcional adquiere mayor peso, incrementando o reduciendo la velocidad según el eje se encuentre atrasado o adelantado respecto de la referencia de posición. De esta forma, el sistema compensa desviaciones en tiempo real sin modificar la estructura general del plan de movimiento.

El parámetro  $K_p$  fue ajustado experimentalmente, buscando un compromiso entre rapidez de corrección y estabilidad del movimiento. Valores bajos producían un seguimiento no muy preciso, mientras que valores muy elevados generaban oscilaciones y mayor sensibilidad al ruido. Como se muestra en las Figuras 36, 37 y la Tabla 4, el valor  $K_p = 5,0$  resultó ser el más adecuado para el sistema implementado, permitiendo un seguimiento cercano a la trayectoria teórica sin introducir inestabilidades apreciables. A partir de este valor, no se apreciaron aportes significativos a la reducción de error de posición. Se pudo observar que aproximadamente a mitad de la trayectoria de la articulación 1 (cuando alcanza velocidad máxima), existe un error de posición que no logró ser compensado con el aumento de  $K_p$ , por lo tanto, una posible mejora podría ser un control proporcional-derivativo.

	$K_p$					
	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
$q_{error1}$	19.88	9.77	8.54	7.92	7.53	7.44
$q_{error2}$	19.09	3.65	1.89	1.07	1.07	1.07
$q_{error3}$	12.05	5.92	3.76	2.76	2.15	1.75

Tabla 4: Comparación de máximos valores absolutos de errores en la trayectoria respecto a  $K_p$



Figura 36: Comparación de trayectorias real y teórica con sus respectivas ganancias



Figura 37: Errores de posición con sus respectivas ganancias

## 1100 15.8. Ensayo completo

1101 El funcionamiento del sistema de control distribuido depende de una secuencia de inicialización  
 1102 para la comunicación mediante el protocolo XRCE-DDS entre el orquestador (ROS2) y el nodo  
 1103 embebido (microROS).

1104 **Prerrequisitos del Sistema:** antes de iniciar el despliegue de los nodos, se deben verificar las  
 1105 siguientes condiciones operativas:

- 1106   ■ **Servidor de Visión:** el servidor de visión artificial debe estar iniciado y en estado de escucha  
   1107 para el procesamiento de imágenes en tiempo real.
- 1108   ■ **Compilación del Espacio de Trabajo:** el workspace de ROS2 debe estar correctamente  
   1109 construido mediante la herramienta colcon build.
- 1110   ■ **Hardware:** el microcontrolador STM32F446RE debe estar conectado por UART/USB, con  
   1111 los permisos de puerto configurados (e.g., sudo chmod 666 /dev/ttyACM0).
- 1112   ■ **Firmware:** el *firmware* basado en FreeRTOS y microROS debe estar cargado y en ejecución  
   1113 en el *target* embebido.

Para iniciar el servidor de visión se debe ejecutar el siguiente comando de ejemplo:

```
1114
1115
1116 1 python3 yolo_with_socket.py --model best.pt --source /dev/video2 --thresh 0.75
1117   --resolution 1280x720
```

Los argumentos usados son:

- **model:** archivo con los mejores pesos del entrenamiento
- **source:** fuente de las imágenes, en este caso la cámara. En el caso de estar en un sistema operativo Linux, para encontrar el dispositivo se puede ejecutar el comando:  
v4l2-ctl --list-devices
- **thresh:** es el umbral a partir del cual detectará objetos, representado como flotante entre 0 y 1. Valores bajos pueden involucrar que el sistema detecte ruido, detectando así objetos que no formaron parte del dataset. Por defecto tiene el valor de 0,75
- **resolution:** resolución de la cámara. Se debe llegar a una solución de compromiso entre resolución y detección precisa de objetos del dataset (baja resolución implica más FPS pero puede bajar la precisión de la detección). Por defecto, para la cámara del proyecto se utiliza  $1280 \times 720$
- **mm\_px:** relación de mm\_px calculada previamente. Se ha fijado un valor por defecto de 0,236 que corresponde a que los objetos detectados se encuentran a  $40mm$  respecto de la base del robot, pero hay que tener en cuenta que una variación de la resolución de la cámara o distancia cámara/objetos modificará este valor

**Secuencia de Ejecución de Nodos:** Para que el sistema funcione correctamente, se debe seguir el orden de ejecución detallado en la Tabla 5. Es crítico que el agente y el nodo de visión estén operativos antes de lanzar el planificador.

Orden	Componente	Comando de ejecución
1	Agente microROS	<code>ros2 run micro_ros_agent micro_ros_agent serial --dev [puerto] -v6</code>
2	Talker	<code>ros2 run robot_control talker</code>
3	Trajectory Planner	<code>ros2 run robot_control trajectory_planner</code>
4	Interfaz de Usuario	<code>ros2 run robot_control robot_ui</code>

Tabla 5: Protocolo de inicio para el sistema distribuido ROS2 / microROS

**Funcionalidades del Nodo de Interfaz:** El nodo `robot_ui` (Figura 38) actúa como el punto de entrada para el operador, permitiendo la interacción con el brazo robótico mediante las siguientes funciones principales:

1. **Control Directo y Gestión de Estado (Opciones 1, 2, 4, 5 y 7):** se envían comandos directos al robot. Esto incluye rutinas de *homing*, consignas de posición directa (*Cinemática directa*) y el control del electroimán. Incluye funciones de seguridad, como la gestión de la parada de emergencia (*E-Stop*), y permite la solicitud de telemetría para visualizar la posición articular real reportada por el microcontrolador a través del tópico de retroalimentación.

- 1146 2. **Cinemática Inversa (Opción 3):** permite el envío de coordenadas cartesianas ( $x, y, z$ ) mediante mensajes de tipo `geometry_msgs/Point`. El sistema realiza una validación previa de los datos de entrada contra los límites físicos del espacio de trabajo antes de publicar la consigna para el cálculo de los ángulos articulares. Actualmente, esta opción es solo para validación, ya que el planificador de trayectoria genera consignas articulares directamente.
- 1147  
1148  
1149  
1150
- 1151 3. **Configuración de Rangos de Validación (Opción 6):** habilita la modificación de los límites locales de la interfaz para variables articulares ( $^{\circ}$ ) y cartesianas (metros). Esta función opera exclusivamente de forma interna en el nodo de UI para filtrar comandos fuera de rango, por lo que no genera tráfico de comunicación con el resto de los nodos del sistema.
- 1152  
1153  
1154
- 1155 4. **Comunicación Externa (Opción 9):** implementa un cliente de `sockets` para la solicitud de pedidos a un servidor externo. Esta función requiere la existencia previa de un archivo `.csv` que contenga los objetos a solicitar.
- 1156  
1157

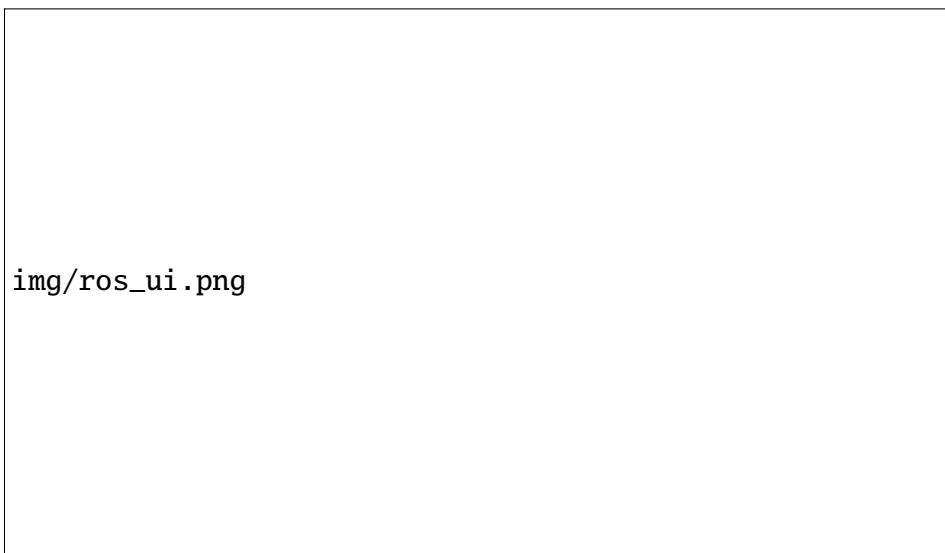


Figura 38: Interfaz de usuario

```
1158
1159 1 # Ejecucion del agente en Ubuntu 22.04
1160 2 ros2 run micro_ros_agent micro_ros_agent serial --dev /dev/ttyACM0 -b 115200
```

## Ejemplo de ejecución del agente microROS

1162 En el esquema propuesto se define el punto A como la posición en el espacio asociada a cada  
 1163 objeto detectado en el área de trabajo, mientras que el punto B corresponde a una ubicación fija  
 1164 y conocida que representa el contenedor final (caja, pallet o depósito). El procedimiento completo  
 1165 se estructura como un ciclo repetitivo de manipulación que parte siempre desde la posición de  
 1166 referencia o *homing*, garantizando condiciones iniciales conocidas para cada operación.

1167 El ensayo comienza con la lectura de un archivo `.csv` que contiene la lista de objetos solicitados  
 1168 en el pedido. Este archivo es cargado a través de la interfaz gráfica (Opción 9), lo que permite  
 1169 inicializar la secuencia de tareas. Una vez cargada la lista, el nodo *Talker*, que opera como cliente  
 1170 *socket*, establece comunicación con el servidor de visión artificial. Para cada elemento de la lista, el  
 1171 cliente envía una solicitud con el nombre del objeto (por ejemplo, “tuerca”).

1172 El servidor procesa la imagen adquirida por la cámara, ejecuta el modelo de detección y responde  
1173 con la posición tridimensional del objeto en un formato codificado como cadena de caracteres:  
1174  $Xx.xYy.yZz.z$  donde cada valor representa las coordenadas cartesianas del punto A en el sistema  
1175 de referencia del robot. En caso de que el objeto no sea detectado dentro del campo visual, el servidor  
1176 devuelve  $X0.0Y0.0Z0.0$ , lo cual actúa como condición de error o ausencia.

1177 El nodo cliente decodifica la cadena recibida, separando los valores de X, Y y Z, y construye así el  
1178 punto objetivo A. Con esta información, el planificador de trayectorias genera la primera trayectoria  
1179 en línea recta  $Homing \Rightarrow A$ . Una vez alcanzado este punto, se activa el electroimán para efectuar  
1180 la sujeción de la pieza. Posteriormente, se calcula y ejecuta la segunda trayectoria:  $A \Rightarrow B$  donde  
1181 pasa por un punto intermedio y se genera una trayectoria como la de la Figura 25. Al llegar al punto  
1182 B, el electroimán se desactiva para liberar el objeto en el contenedor. Finalmente se ejecuta la tercer  
1183 trayectoria en línea recta:  $B \Rightarrow Homing$  restableciendo la condición inicial del robot.

1184 Este ciclo completo se repite secuencialmente para cada elemento contenido en el archivo .csv,  
1185 hasta procesar la totalidad del pedido. De esta manera, el sistema implementa un flujo automatizado  
1186 de tipo *pick-and-place*, integrando percepción, planificación de trayectoria y control del efecto final  
1187 dentro de una arquitectura distribuida basada en comunicación por *sockets*. En la Figura 39 se puede  
1188 ver el sistema completo.



Figura 39: Foto real del robot realizando *pick-and-place*

## 1189 16. Futuras mejoras

1190 Si bien el sistema robótico cumplió con las expectativas, es necesario considerar que existen  
1191 múltiples mejoras a implementar a futuro que mejoran el rendimiento, la robustez y permiten  
1192 acercarse más a implementaciones de robots industriales:

- 1193 1. **Servomotor en efecto final:** para que el efecto final pueda realizar rotaciones. Esto permitiría  
1194 ampliar la versatilidad del manipulador, facilitando tareas que requieran orientación precisa  
1195 de la pieza, como ensamblado o posicionamiento angular específico.
- 1196 2. **Gripper en efecto final:** para que tenga la posibilidad de sujetar piezas de distintos materiales  
1197 y geometrías. De este modo, el sistema podría adaptarse a aplicaciones más variadas.
- 1198 3. **Control PD:** para mitigar aún más los errores durante la trayectoria. La incorporación de  
1199 una acción derivativa contribuiría a mejorar la respuesta dinámica del sistema, reduciendo  
1200 vibraciones y tiempos de establecimiento.
- 1201 4. **Sistema en Tiempo Real:** debería asegurarse determinismo a la hora de enviar las consignas  
1202 desde el orquestador al robot. Esto relacionado al envío de consignas desde el orquestador al  
1203 microcontrolador (requiere construir el kernel en el sistema operativo -Linux por ejemplo)
- 1204 5. **Interfaz de usuario:** necesaria para generar consignas y para mover el robot en modo *Jog*. Se  
1205 podría tener una interfaz más amigable para el usuario, como así automatizar la inicialización  
1206 de los nodos que forman parte del sistema.
- 1207 6. **Generación de trayectoria:** realizar trayectorias de manera más intuitiva y asegurar en todo  
1208 momento encontrarse dentro del espacio de trabajo, en caso que se intente alcanzar un punto  
1209 fuera de éste, recalcularlo. Otra opción compatible con *ROS* es usar la librería *moveIt* para  
1210 enviar las consignas en alto nivel. Además, se podría implementar una trayectoria vertical a  
1211 velocidad reducida al acercarse al objetivo de carga/descarga, tal como realizan los autómatas  
1212 con función *pick-and-place*.
- 1213 7. **Ampliar dataset:** agregando imágenes del entorno normal de operación para evitar falsa  
1214 detección de objetos y agregar objetos similares a cada categoría para evitar *overfitting*.  
1215 Además, que existan subcategorías por cada una de las ya existentes para ampliar la base de  
1216 datos de alturas.
- 1217 8. **Visión artificial:** reemplazar la cámara actual con una estereoscópica para realizar un cálculo  
1218 automático de la altura del objeto y que de esta manera se calcule la relación *px/mm* de  
1219 manera dinámica.
- 1220 9. **Evitar colisiones:** usar la cámara ya existente para poder detectar elementos extraños y  
1221 lanzar algún mensaje de error/alarma y frenar el movimiento, en el caso de que el robot esté  
1222 moviéndose.
- 1223 10. **Generación de algoritmos de búsqueda:** tal como A\*, para evitar colisiones de objetos en el  
1224 espacio de trabajo y evitar llegar a límites articulares. Mas detalles y más soluciones pueden  
1225 ser encontradas en [Lynch, 2017].
- 1226 11. **Automatización de pedidos:** que exista un algoritmo de Inteligencia Artificial capaz de  
1227 encontrar las mejores trayectorias en función de múltiples pedidos.

- 1228 12. **Mejoras de ROS:** mejoras de bajo costo de implementación, que contribuyen a la simulación  
1229 y al análisis del comportamiento del robot. Por ejemplo, el uso de *ROS bag* para hacer testing  
1230 y debug, y también Gazebo para la creación de entornos virtuales, o incluso el desarrollo de  
1231 un *digital twin* del sistema.

## 1232 17. Conclusiones

1233 Durante la ejecución del proyecto, aparecieron numerosos retos relacionados con limitaciones  
1234 en la práctica y alteraciones de diseño no contempladas desde el principio. Específicamente, los  
1235 problemas de precisión y la necesidad de un rediseño electromecánico alargaron el tiempo dedicado  
1236 a la programación, ya que fue preciso incluir nuevos sensores junto con su lógica de control y las  
1237 adaptaciones electrónicas necesarias.

1238 Se concluye del proceso que para optimizar los recursos y reducir correcciones, es importante  
1239 una planificación adecuada y un modelado estricto desde el principio. Esto se considera relevante  
1240 en cada etapa del proyecto, desde la idea inicial hasta la implementación final.

1241 En este desarrollo, implementar *topics* se consideró suficiente para cumplir con los requerimientos  
1242 definidos. Si se define un comportamiento similar para los *callbacks* asociados a los mismos, puede  
1243 llegar a haber algún conflicto. Esto se solventó definiendo una máquina de estados y manejo de colas  
1244 *FIFO* en el RTOS que aseguró que los llamados sean no simultáneos.

1245 Por limitaciones de tiempo, no se pudo terminar todas las funcionalidades proyectadas. Se decidió  
1246 descartar el módulo MQTT, ya que al analizarlo se vio que el aporte de este a la eficiencia general  
1247 del sistema era escaso en comparación con el esfuerzo adicional que suponía su incorporación.

1248 El desarrollo del sistema robótico paralelo pick-and-place implementa tecnologías que se están  
1249 usando en la industria e hizo posible comprobar la unión exitosa de cuatro campos esenciales:  
1250 planificación de movimiento, visión artificial, control de motores Paso a Paso y gestión de sistema  
1251 operativo en tiempo real (*FreeRTOS + microROS*). Durante el desarrollo del proyecto, se verificó  
1252 que la arquitectura sugerida tiene la capacidad de identificar objetos en el área de trabajo, calcular las  
1253 trayectorias requeridas y llevar a cabo los movimientos del manipulador con una precisión adecuada  
1254 para realizar su función logística simulada.

1255 Se lograron mediciones exactas gracias a la calibración de los sensores AS5600 y a la implemen-  
1256 tación de un proceso sistemático para referenciar los ángulos articulares, lo cual fue fundamental  
1257 para el adecuado desempeño de la cinemática inversa. Además, los ensayos con el electroimán  
1258 posibilitaron la determinación experimental de los límites operativos del sistema de sujeción.

1259 En cuanto a la visión artificial, los ensayos realizados con métodos tradicionales de OpenCV  
1260 y modelos de inferencia basados en YOLOv11n demostraron que se puede identificar y localizar  
1261 objetos con buena exactitud, siempre que el sistema tenga una calibración espacial apropiada y una  
1262 referencia constante de posición entre la cámara y el robot. Esto hizo posible obtener con precisión  
1263 la ubicación de los objetos y convertirla al sistema de coordenadas del manipulador para llevar a  
1264 cabo el ciclo completo de *pick-and-place*.

1265 La cinemática inversa, que se calculó y validó en MATLAB al principio, demostró un correcto  
1266 funcionamiento cuando fue trasladada al STM32, desde donde las instrucciones articulares se produ-  
1267 jeron correctamente. Esta migración probó que fue factible implementar los algoritmos directamente  
1268 en el hardware de control sin poner en riesgo la velocidad de respuesta del sistema. Aún así, cabe  
1269 destacar que para tener mayor facilidad de validación en la generación de trayectorias, se optó por  
1270 realizar la cinemática inversa en el orquestador (ROS2 en la computadora).

1271 El conjunto de ensayos realizados (mecánicos, electrónicos, de comunicación, de control y de  
1272 visión) hizo posible verificar que el robot funciona conforme al modelo teórico y que las resolu-  
1273 ciones de diseño tomadas se convierten en un proceso estable. El sistema resultante ofrece una  
1274 plataforma firme para futuros trabajos que se enfoquen en optimizar la velocidad, la exactitud del  
1275 posicionamiento, la robustez del sistema de visión y la autonomía general del manipulador.

## 1276 Referencias

- 1277 [BSp, 2001] (2001). B-splines and their properties. <https://pages.cs.wisc.edu/~deboor/toast/>. Accessed: 2026-10-15.
- 1278 [YOL, 2024] (2024). Ros 2 interfaces overview. <https://docs.ultralytics.com/models/yolo11/>. Accessed: 2025-06-15.
- 1281 [ros, 2025] (2025). Ros 2 interfaces overview. <https://docs.ros.org/en/humble/Concepts/Basic/About-Interfaces.html>. Accessed: 2025-02-20.
- 1283 [Barrientos et al., 2007] Barrientos, A., Peñin, L. F., Belaguer, C., and Aracil, R. (2007). *Fundamentos de Robótica*. McGraw Hill.
- 1285 [Barry, 2016] Barry, R. (2016). *Mastering the FreeRTOS Real Timer Kernel: A Hands-On Tutorial Guide*.
- 1287 [Belsare et al., 2023] Belsare, K., Rodriguez, A. C., Sánchez, P. G., Hierro, J., Ko Icon, T., Lange, R., Lütkebohle, I., Malki, A., Losa, J. M., Melendez, F., Rodriguez, M. M., Nordmann, A., Staschulat, J., , and von Mendel, J. (2023). *Micro-ROS*, pages 3–55. Springer.
- 1290 [Biagiotti and Melchiorri, 2008] Biagiotti, L. and Melchiorri, C. (2008). *Trajectory Planning for Automatic Machines and Robots*. Springer Publishing Company.
- 1292 [Corke, 2017] Corke, P. (2017). Robotics, vision and control: Fundamental algorithms in matlab® second, completely revised, extended and updated edition. *Springer Tracts in Advanced Robotics №118*.
- 1295 [Craig, 2006] Craig, J. J. (2006). *Robótica*. Pearson Educación.
- 1296 [Lynch, 2017] Lynch, F. C. P. K. M. (2017). *Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control*. Cambridge University Press.
- 1298 [Mark W. Spong, 2005] Mark W. Spong, Seth Hutchinson, M. V. (2005). *Robot Modeling and Control*. Wiley.
- 1300 [Pieper, 1968] Pieper, D. L. (1968). The kinematics of manipulators under computer control.
- 1301 [Torres et al., 2002] Torres, F., Pomares, J., Gil, P., Puente, S. T., and Aracil, R. (2002). *Robots y Sistemas Sensoriales*. Pearson Educación, S. A.
- 1303 [Zhou et al., 2020] Zhou, Z., Zhang, X., Gao, Y., Wu, D., and Dong, W. (2020). Design and kinematics analysis of a percutaneous needle insertion robotic system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 825(1):012009.

## 1306 18. Anexo

### 1307 18.1. Teorema del coseno

1308 Ampliamente usado en geometría, es muy útil para realizar desarrollos de cinemática inversa  
 1309 geométrica de robots serie, como el caso de estudio. El mismo postula:

1310 Sea un triángulo con lados  $a, b$  y  $c$ , opuestos a los ángulos  $A, B$  y  $C$  respectivamente, entonces:

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2 \cdot a \cdot b \cdot \cos(\alpha)$$

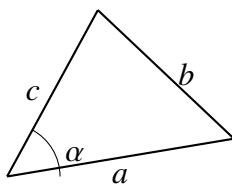


Figura 40: Triángulo general donde se aplica el Teorema del Coseno.

### 1311 18.2. Colas FreeRTOS

1312 Para poder comunicar entre distintas tareas o entre “callbacks” se usan colas de tipo FIFO  
 1313 (*First In, First Out*) el funcionamiento está explicado en detalle en [Barry, 2016]. Los elementos a  
 1314 almacenar en las colas pueden ser de distinto tamaño, por eso al crearlas se define el tamaño del dato  
 1315 a almacenar en cada elemento y la cantidad de elementos a almacenar.

1316 El acceso a escribir datos en las colas se da según la prioridad de la tarea, y al llenarse el *buffer* se  
 1317 mantiene la prioridad. Una vez liberado el primer elemento, se hace un desplazamiento de elementos  
 1318 y la tarea con más prioridad asigna el elemento a la última posición de la cola. También existe el caso  
 1319 de que el elemento provenga de una interrupción (ISR), entonces este elemento pasa a tener mayor  
 1320 prioridad y se ubica en la primera posición de la cola. En la imagen 41 (presentada en [Barry, 2016])  
 1321 se puede ver una secuencia básica de lectura y escritura en colas.

1322 A continuación se muestra un ejemplo, en pseudocódigo, para la creación de colas en el hilo  
 1323 principal, antes de que el Scheduler tome el control:

```

1325 1 INICIAR creacion de colas de comunicacion
1326 2
1327 3 // Crear cola para posiciones cartesianas
1328 4 crear cola PositionQueue con capacidad 1 elemento de tipo CARTESIAN_POS_t
1329 5 si la cola no pudo crearse:
1330 6   registrar error "No se pudo crear PositionQueue"
1331 7
1332 8 // Crear colas individuales para cada motor
1333 9 para i desde 0 hasta N_MOTORS - 1:
1334 10   crear cola JointQueue[i] con capacidad 1 elemento tipo float
1335 11   si la cola i no pudo crearse:
1336 12     registrar error "No se pudo crear JointQueue[i]"
1337 13
1338 14 FINALIZAR creacion de colas
  
```

Pseudocódigo: manejo de colas

1340 Se debe especificar el tamaño de cada elemento y la cantidad de elementos que tiene cada cola.

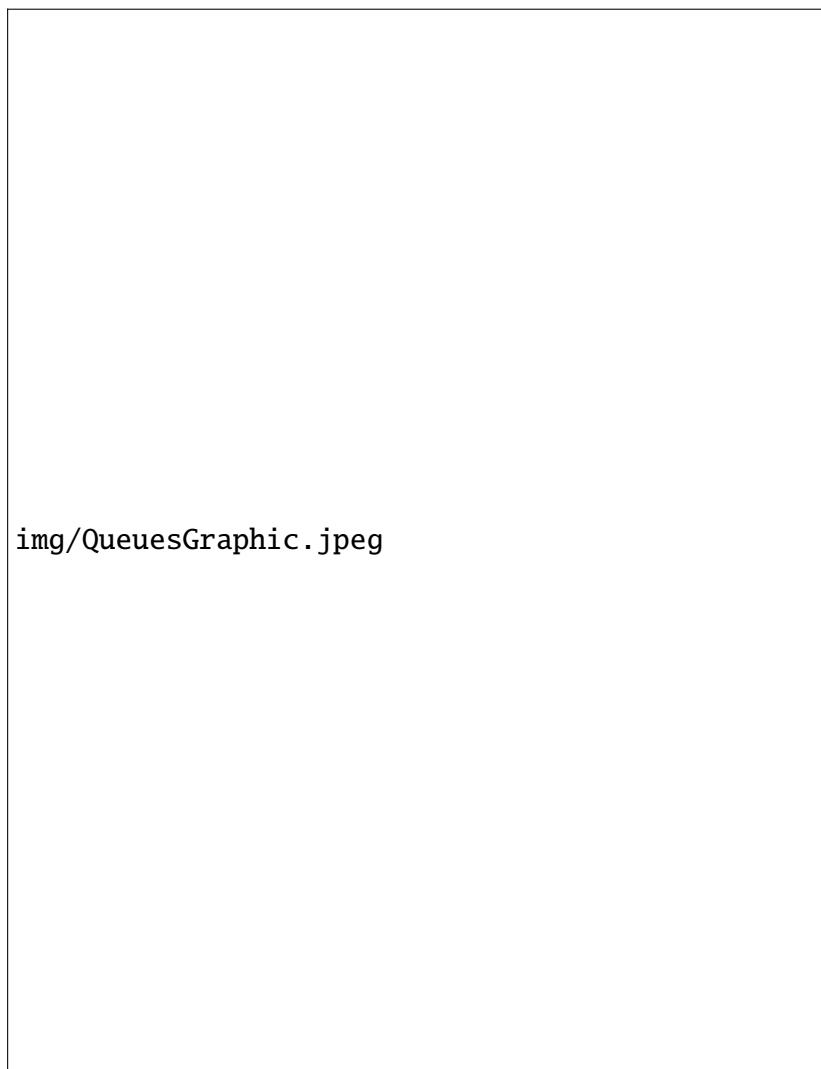


Figura 41: Funcionamiento de colas

### 1341 18.3. Interfaces internas de ROS

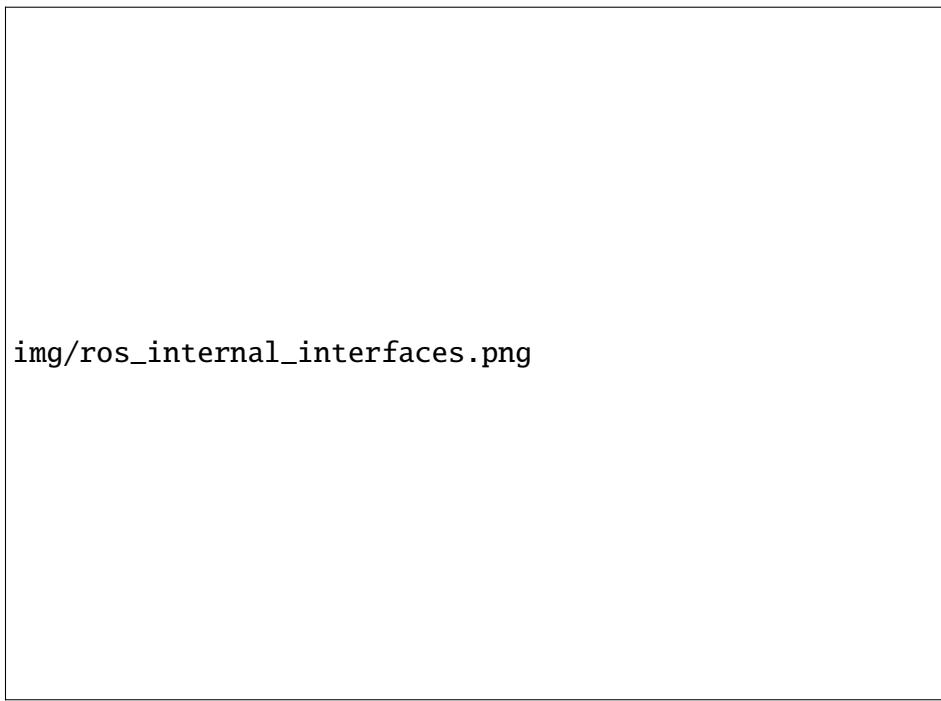
1342 A nivel de capas de abstracción, ROS cuenta con dos que son las principales: la interfaz de  
1343 librería de cliente, que es `rcl` (ROS Client Library), que brinda soporte a las librerías de cliente (la  
1344 capa superior) tales como `rclcpp` y `rclpy`; por otro lado está la interfaz de *Middleware*, que abstrae  
1345 a `rcl` de las capas de implementación de middleware específicas (Fast-DDS, Cyclone, etc)<sup>4</sup>.

### 1346 18.4. Task de microROS

1347 En el firmware, el RTOS ejecuta una tarea específica, en la cual está el núcleo de microROS. En  
1348 primer lugar, se configura un transporte personalizado para microROS. En este caso, se emplea una  
1349 interfaz UART y se registran explícitamente las funciones de apertura, cierre, lectura y escritura del  
1350 canal físico. Posteriormente, se redefine el asignador de memoria por defecto de ROS2 mediante un  
1351 conjunto de funciones compatibles con FreeRTOS.

1352 A continuación, se inicializa la estructura `rclc_support`, se crea el nodo microROS y se definen

<sup>4</sup>DDS: Data Distribution Service. Es un middleware estandarizado



img/ros\_internal\_interfaces.png

Figura 42: Interfaces internas de ROS

1353 los mensajes utilizados por los distintos canales de comunicación. Se instancian suscriptores y  
1354 publicadores asociados a tópicos específicos, cada uno enlazado a un tipo de mensaje en particular.  
1355 Finalmente, se configura un executor, el cual gestiona la ejecución de las funciones de callback  
1356 cuando se reciben nuevos datos. El bucle principal de la tarea ejecuta periódicamente dicho executor,  
1357 asegurando el procesamiento continuo de mensajes entrantes desde el agente ROS2, mientras que  
1358 la interacción con el planificador del sistema operativo se controla mediante retardos explícitos. las  
1359 funciones de finalización que se encuentran al final del bucle para realizar una limpieza de memoria  
1360 y evitar fugas; en el funcionamiento normal del microcontrolador, no se llega hasta este punto. El  
1361 código correspondiente se encuentra en el repositorio Proyecto Final de Estudios.

## 1362 18.5. ROS DOMAIN

1363 El **ROS\_DOMAIN\_ID** es una variable de entorno de ROS2 que permite segmentar una red  
1364 física en múltiples redes lógicas independientes. Su función principal es evitar la interferencia entre  
1365 diferentes grupos de robots o grupos de nodos que operan en la misma infraestructura, ya que solo  
1366 los nodos que comparten el mismo identificador de dominio pueden descubrirse y comunicarse entre  
1367 sí.

1368 Para establecer la conexión, el middleware DDS utiliza este ID para calcular automáticamente los  
1369 puertos **UDP** necesarios para el intercambio de datos y el descubrimiento de nodos. Específicamente,  
1370 cada dominio abre puertos de **multicast** que permiten a los nodos “anunciarse” y encontrarse dentro  
1371 de un grupo, además de puertos de **unicast** dedicados para la comunicación directa entre procesos.  
1372 Al basarse en UDP, se tiene un descubrimiento dinámico y rápido en la red.

## 1373 18.6. Función de control de trayectoria

1374 Se muestra a continuación la función `trajectoryControl` en pseudocódigo, que ha sido  
 1375 implementada en el STM32 y es encargada de controlar el seguimiento preciso de la trayectoria. La  
 1376 función realiza las siguientes tareas:

- 1377 1. Calcula el error de posición
- 1378 2. Genera un comando de velocidad con feedforward y control proporcional
- 1379 3. Convierte la velocidad a `steps/s`
- 1380 4. Define la dirección según la velocidad
- 1381 5. Escribe la dirección al pin digital
- 1382 6. Establece la velocidad del PWM por motor

```

1383
1384 1   funcion trajectoryControl(q_ref, qd_ref, m):
1385 2     // Calcular error de posicion
1386 3     q_err = q_ref - m.currentAngle
1387 4
1388 5     // Calcular comando de velocidad (feedforward + feedback proporcional)
1389 6     v_cmd = qd_ref + KP_POS * q_err
1390 7
1391 8     // Convertir velocidad a Hz (pasos por segundo)
1392 9     v_hz = valor_absoluto(v_cmd) * DEG_TO_STEPS * m.i
1393 10
1394 11    // Limitar velocidad maxima y minima
1395 12    si v_hz > 1000 entonces
1396 13      v_hz = 1000
1397 14    fin si
1398 15
1399 16    si v_hz < 1 entonces
1400 17      v_hz = 1 // para evitar division por cero
1401 18    fin si
1402 19
1403 20    // Determinar direccion del motor
1404 21    si v_cmd >= 0 entonces
1405 22      m.dir = ENCENDIDO // GPIO_PIN_SET
1406 23    si no
1407 24      m.dir = APAGADO // GPIO_PIN_RESET
1408 25    fin si
1409 26
1410 27    // Actualizar direccion en el pin correspondiente
1411 28    EscribirPin(m.DIR_PORT, m.DIR_PIN, m.dir)
1412 29
1413 30    // Configurar velocidad del motor paso a paso
1414 31    Stepper_SetSpeed(m.timer, m.timerChannel, v_hz)
1415 32 fin funcion

```

Pseudocódigo de `trajectoryControl`