



**Materia:** Robótica

**Actividad:** U4A1. PROYECTO  
FINAL (100%)

**Nombre:** Gabriel Carrizales

Miguel Ángel Rodríguez Hernández

**Docente:** Osbaldo Aragón Banderas

**Fecha:** 12/12/2025

## INDICE

1.	INTRODUCCIÓN .....	1
2.	OBJETIVO GENERAL .....	2
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
3.	MARCO TEÓRICO .....	3
3.1	Robótica de Manipuladores y la Arquitectura SCARA .....	3
3.1.1	Principio de Compliancia Selectiva .....	3
3.1.2	Comparativa con otras Arquitecturas.....	4
3.2	Cinemática del Manipulador RRP .....	4
3.2.1	Espacio de Trabajo (Workspace) .....	4
3.2.2	Convención Denavit-Hartenberg (DH) .....	5
3.3	Gemelos Digitales e Internet de las Cosas (IoT) .....	6
3.3.1	Concepto de Digital Twin .....	6
3.3.2	Protocolos de Comunicación: UDP vs TCP .....	6
3.4	Teoría de Control de Movimiento Avanzado .....	7
3.4.1	Perfiles de Velocidad y la Derivada de la Aceleración.....	7
3.5	Fundamentos de Tribología y Diseño Mecánico.....	7
3.5.1	Regímenes de Fricción (Curva de Stribeck).....	8
3.5.2	Fatiga y Resistencia de Materiales en Polímeros (PLA) .....	9
4.	MATERIALES.....	10
5.	DESARROLLO .....	13
5.1.	INGENIERÍA MECÁNICA Y DISEÑO ESTRUCTURAL .....	13
5.1.1.	Diseño Asistido por Computadora (CAD) .....	13
5.1.2.	Selección de Materiales y Manufactura Aditiva .....	14
5.1.3.	Análisis de Resistencia de Materiales .....	15
5.1.4.	Diagramas de Esfuerzo .....	15
5.1.5.	Cálculo de Factor de Seguridad Estructural .....	15
5.2.	INGENIERÍA CINEMÁTICA Y MODELADO MATEMÁTICO .....	16
5.2.1.	Parámetros Denavit-Hartenberg (DH) .....	16
5.2.2.	Matrices de Transformación Homogénea .....	16
5.2.3.	Análisis del Espacio de Trabajo (Workspace) .....	17
5.2.4.	Cinemática Diferencial y Velocidad .....	18
5.3.	INGENIERÍA DINÁMICA Y TRIBOLOGÍA .....	19

5.3.1. Cálculo del Momento de Inercia Total ( $I_{eq}$ ) .....	19
5.3.2. Análisis Tribológico: La Curva de Stribeck.....	19
5.3.3. Optimización Tribológica: Sistema de Soporte Axial .....	20
5.3.4. Dinámica Inversa y Requerimiento de Torque .....	20
5.3.4. Selección de Actuadores y Factor de Seguridad .....	21
5.4. SISTEMA ELÉCTRICO Y DE POTENCIA .....	22
5.4.1. Arquitectura Electrónica y Diagrama de Conexión .....	22
5.4.2. Análisis de Consumo y Potencia .....	23
5.4.3. Simulación Térmica de Conductores.....	23
5.5. PROGRAMACIÓN Y ARQUITECTURA DE CONTROL.....	24
5.5.1. Arquitectura del Sistema IoT .....	24
5.5.2. Algoritmo de Generación de Trayectorias .....	26
5.5.3. Lógica de Interpolación (MoveL vs MoveJ).....	26
6. EVIDENCIAS EXPERIMENTALES Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA .....	27
6.1 Proceso de Manufactura e Integración Mecatrónica .....	27
6.1.1 Manufactura Aditiva (Impresión 3D).....	28
6.1.2 Integración Electromecánica y Gestión de Cableado .....	29
6.2 Validación Funcional: Tarea de <i>Pick &amp; Place</i> .....	30
6.3 Validación de la Interfaz IoT y Gemelo Digital.....	32
6.4 Evidencia Audiovisual .....	35
6. CONCLUSIÓN .....	37
7. REFERENCIAS .....	39

## 1. INTRODUCCIÓN

En el contexto actual de la Industria 4.0 y la automatización avanzada, los robots manipuladores desempeñan un papel crucial en la optimización de procesos de manufactura, ensamblaje y logística. Entre las diversas configuraciones robóticas existentes, el robot SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) destaca por su rigidez vertical y flexibilidad en el plano horizontal, características que lo convierten en la solución estándar para operaciones de Pick & Place de alta velocidad y precisión.

El presente proyecto detalla el diseño, construcción, modelado matemático y control de un manipulador robótico tipo SCARA con configuración cinemática RRP (Rotación-Rotación-Prisma). Este sistema ha sido desarrollado no solo como un prototipo funcional capaz de realizar tareas de manipulación de objetos, sino como una plataforma de investigación mecatrónica que integra tecnologías de vanguardia como el Internet de las Cosas (IoT) y los Gemelos Digitales.

A diferencia de las implementaciones académicas tradicionales que se limitan al control cinemático básico, este proyecto aborda la ingeniería del robot desde una perspectiva multidisciplinaria y rigurosa. Se ha implementado una arquitectura de control distribuida donde un servidor central (Python) gestiona la generación de trayectorias avanzadas mediante polinomios de quinto orden para minimizar el Jerk (sobreaceleración), mientras que un microcontrolador ESP32 ejecuta el control de los actuadores en tiempo real mediante comunicación inalámbrica de baja latencia (UDP).

Además, el diseño mecánico ha sido validado mediante simulaciones de Resistencia de Materiales y análisis Tribológico, optimizando la eficiencia energética del sistema mediante la sustitución de pares cinemáticos de deslizamiento por rodamientos axiales de bajo coeficiente de fricción. La integración de un Gemelo Digital visualizado en entorno web permite la teleoperación y monitorización del robot en tiempo real, cerrando la brecha entre el modelo teórico y el comportamiento físico.

## 2. OBJETIVO GENERAL

Diseñar, construir y validar experimentalmente un robot manipulador SCARA de 4 grados de libertad, capaz de ejecutar tareas autónomas de manipulación de objetos con alta repetibilidad, integrando un sistema de control inalámbrico y una interfaz de supervisión basada en Gemelo Digital.

### 2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✚ **Modelado Matemático:** Desarrollar los modelos de cinemática directa e inversa mediante la convención Denavit-Hartenberg y realizar el análisis dinámico del sistema utilizando la formulación de Euler-Lagrange para determinar los pares motores requeridos.
- ✚ **Diseño y Manufactura:** Diseñar la estructura mecánica en CAD (SolidWorks) optimizada para manufactura aditiva (Impresión 3D en PLA), garantizando un Factor de Seguridad estructural superior a 10 ante cargas estáticas y dinámicas.
- ✚ **Control Avanzado:** Implementar algoritmos de generación de trayectorias suaves (Curvas S) para el control de posición y velocidad, mitigando vibraciones mecánicas y protegiendo los actuadores.
- ✚ **Integración IoT:** Desarrollar una arquitectura de comunicación Cliente-Servidor mediante protocolo UDP sobre WiFi, permitiendo el control del robot desde una interfaz web y un dispositivo móvil (Teach Pendant) con latencia mínima ( $< 5\text{ms}$ ).
- ✚ **Validación de Ingeniería:** Realizar análisis térmicos del sistema eléctrico y estudios de esfuerzos en los eslabones para validar la selección de componentes y asegurar la operatividad continua del sistema.

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1 Robótica de Manipuladores y la Arquitectura SCARA

La robótica industrial se fundamenta en el estudio de mecanismos articulados capaces de realizar tareas complejas. Dentro de la clasificación de manipuladores seriales, el robot SCARA (*Selective Compliance Assembly Robot Arm*) ocupa un lugar preponderante desde su invención en 1981 por el profesor Hiroshi Makino.



*Figura 1: Robot SCARA FANUC.*

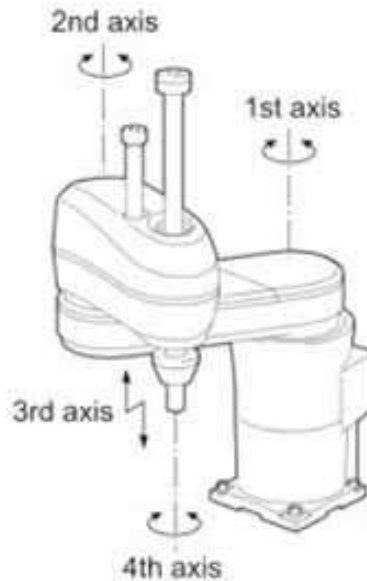
##### 3.1.1 Principio de Compliancia Selectiva

La característica definitoria del SCARA es su anisotropía mecánica.

- Rídez Vertical (Eje Z): La estructura está diseñada para ser extremadamente rígida ante cargas axiales. Esto permite operaciones de inserción (como colocar un componente electrónico en una PCB) sin que el brazo se defleccione hacia abajo, soportando fuerzas de reacción considerables.
- Compliancia Horizontal (Plano XY): Posee cierta flexibilidad lateral controlada. Esta "suavidad" permite que el robot absorba pequeños errores de alineación entre el eje de la pieza y el agujero durante el ensamblaje, actuando como un sistema pasivo de corrección de errores sin necesidad de sensores de fuerza complejos.

### 3.1.2 Comparativa con otras Arquitecturas

A diferencia de los robots antropomórficos (tipo brazo humano de 6 ejes) que requieren complejos cálculos de cinemática inversa en 3D para mantener la orientación, el SCARA desacopla el movimiento: los ejes 1 y 2 controlan la posición plana ( $x, y$ ), mientras que el eje 3 y 4 controlan la altura  $z$  y la orientación  $\theta$ . Esto reduce la carga computacional y aumenta la velocidad operativa.



*Figura 2: Movimientos de un SCARA.*

## 3.2 Cinemática del Manipulador RRP

La topología implementada en este proyecto es una variante específica denominada RRP (Rotación-Rotación-Prisma).

### 3.2.1 Espacio de Trabajo (Workspace)

El volumen alcanzable por un SCARA RRP es un cilindro hueco o toroide prismático. Matemáticamente, el alcance máximo está dado por  $R_{max} = L_1 + L_2$  y el alcance mínimo (zona muerta cercana a la base) por  $R_{min} = |L_1 + L_2|$ .

Esta configuración es ideal para celdas de trabajo tipo "banco", donde el robot se ubica en el centro y distribuye piezas alrededor.



Figura 3: Área de trabajo de un robot SCARA.

### 3.2.2 Convención Denavit-Hartenberg (DH)

Para modelar matemáticamente la cadena cinemática, se utiliza la convención DH modificada. Esta metodología asigna un sistema de coordenadas a cada eslabón y define la transformación entre ellos mediante cuatro parámetros:

1.  $\theta$  (Ángulo de la articulación): Rotación alrededor del eje  $z_{i-1}$ .
2.  $d_i$  (Desplazamiento del eslabón): Distancia a lo largo de  $z_{i-1}$ .
3.  $a_i$  (Longitud del eslabón): Distancia a lo largo de  $x_i$ .
4.  $\alpha_i$  (Torsión del eslabón): Ángulo entre ejes  $z_{i-1}$  y  $z_i$ .

Las matrices de transformación homogénea resultantes ( $T_i^{i-1}$ ) permiten calcular la posición y orientación del efector final respecto a la base inercial.

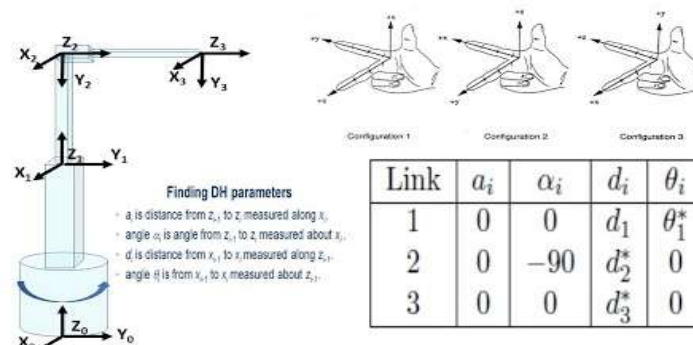


Figura 4: Convención Denavit-Hartenberg.



### 3.3 Gemelos Digitales e Internet de las Cosas (IoT)

La Industria 4.0 introduce la convergencia entre los sistemas físicos y virtuales.

#### 3.3.1 Concepto de Digital Twin

Un Gemelo Digital no es una simple simulación 3D estática; es un modelo vivo. En este proyecto, el Gemelo Digital recibe el flujo de datos de los sensores y estados del controlador físico en tiempo real. Esto permite:

- Verificación Visual: Confirmar que el robot físico se mueve según lo planeado.
- Detección de Colisiones Virtuales: Predecir impactos antes de ejecutar comandos en el hardware.
- Telemetría: Monitorizar variables críticas (ángulos, velocidad) remotamente.



*Figura 5: Gemelo Digital en la industria.*

#### 3.3.2 Protocolos de Comunicación: UDP vs TCP

Para el control robótico en tiempo real, la latencia es crítica.

- TCP (Transmission Control Protocol): Garantiza la entrega de paquetes, pero su mecanismo de *handshake* y retransmisión introduce retardos variables (Jitter) inaceptables para el control de movimiento fluido.
- UDP (User Datagram Protocol): Es el protocolo elegido para este proyecto. Al ser "no orientado a conexión", envía paquetes de estado a alta frecuencia sin esperar

confirmación. Si un paquete se pierde, es irrelevante porque el siguiente paquete con datos más frescos llega milisegundos después, garantizando la fluidez del movimiento del robot.

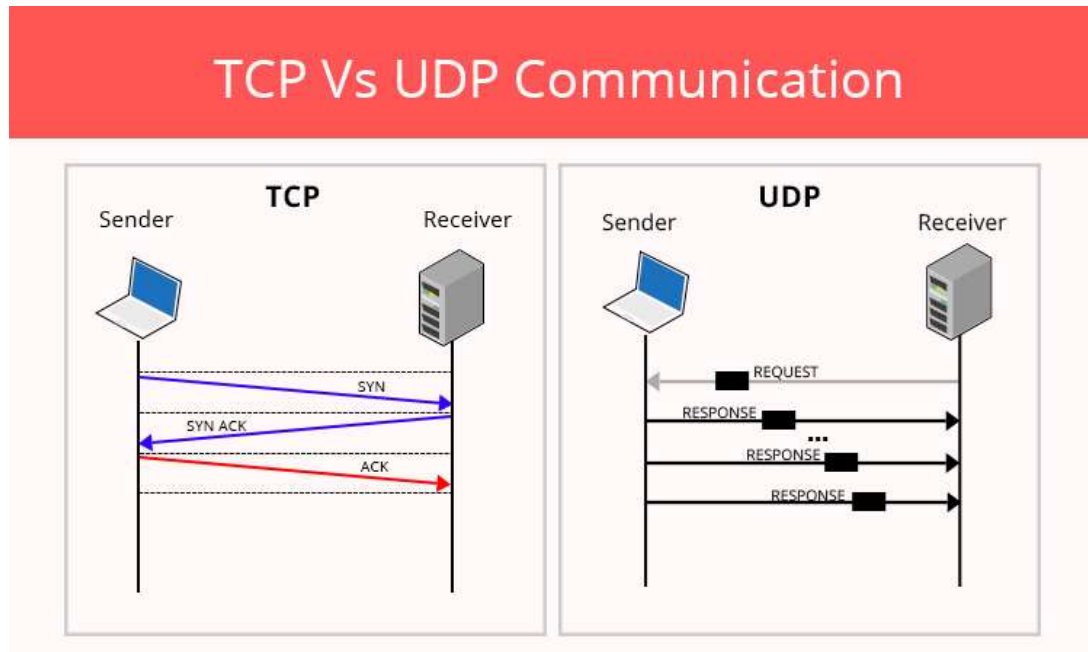


Figura 6: Comparativa entre los protocolos de comunicación TCP y UDP.

### 3.4 Teoría de Control de Movimiento Avanzado

El movimiento suave es esencial para la longevidad mecánica.

#### 3.4.1 Perfiles de Velocidad y la Derivada de la Aceleración

- Perfil Trapezoidal: Mantiene una aceleración constante. Sin embargo, los cambios instantáneos de aceleración (de 0 a  $\alpha_{max}$ ) implican un Jerk (tirón) infinito teórico, lo que causa golpes audibles y desgaste en los engranajes.
- Polinomios de Quinto Orden (S-Curve): Se definen las trayectorias mediante la ecuación  $q(t) = \alpha_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 + \alpha_3 t^3 + \alpha_4 t^4 + \alpha_5 t^5$ . Al derivar esta ecuación tres veces, obtenemos un perfil de Jerk parabólico y continuo. Esto significa que la fuerza aplicada a la estructura aumenta gradualmente, eliminando vibraciones residuales y mejorando la precisión final.

### 3.5 Fundamentos de Tribología y Diseño Mecánico

La eficiencia energética de un robot depende directamente de minimizar las pérdidas por fricción.

### 3.5.1 Regímenes de Fricción (Curva de Stribeck)

La curva de Stribeck modela el comportamiento de la fricción entre dos superficies lubricadas o en contacto.

1. Fricción Límite: Contacto sólido-sólido (diseño original con deslizador de madera). Coeficiente  $\mu \approx 0.5$ . Genera alto calor y desgaste (*stick-slip*).
2. Fricción Mixta: Comienza a formarse una película lubricante.
3. Fricción Hidrodinámica/Rodadura: Las superficies están separadas por elementos rodantes (bolas). En el diseño final con rodamiento axial, entramos en esta zona donde  $\mu < 0.005$ . Esto implica que el 99% del torque del motor se utiliza para mover la carga útil, no para vencer la fricción interna.



Figura 7: Curva de Stribeck, para el análisis de fricción mecánica.

### 3.5.2 Fatiga y Resistencia de Materiales en Polímeros (PLA)

Al utilizar manufactura aditiva (FDM) para los eslabones, el material (Ácido Poliláctico) presenta un comportamiento anisotrópico. La resistencia mecánica depende de la orientación de las capas. El análisis de Esfuerzo de Von Mises es crucial para determinar si las cargas dinámicas (fuerzas inerciales al frenar) superan el límite elástico del plástico, lo que causaría deformación permanente o fractura por fatiga cíclica.

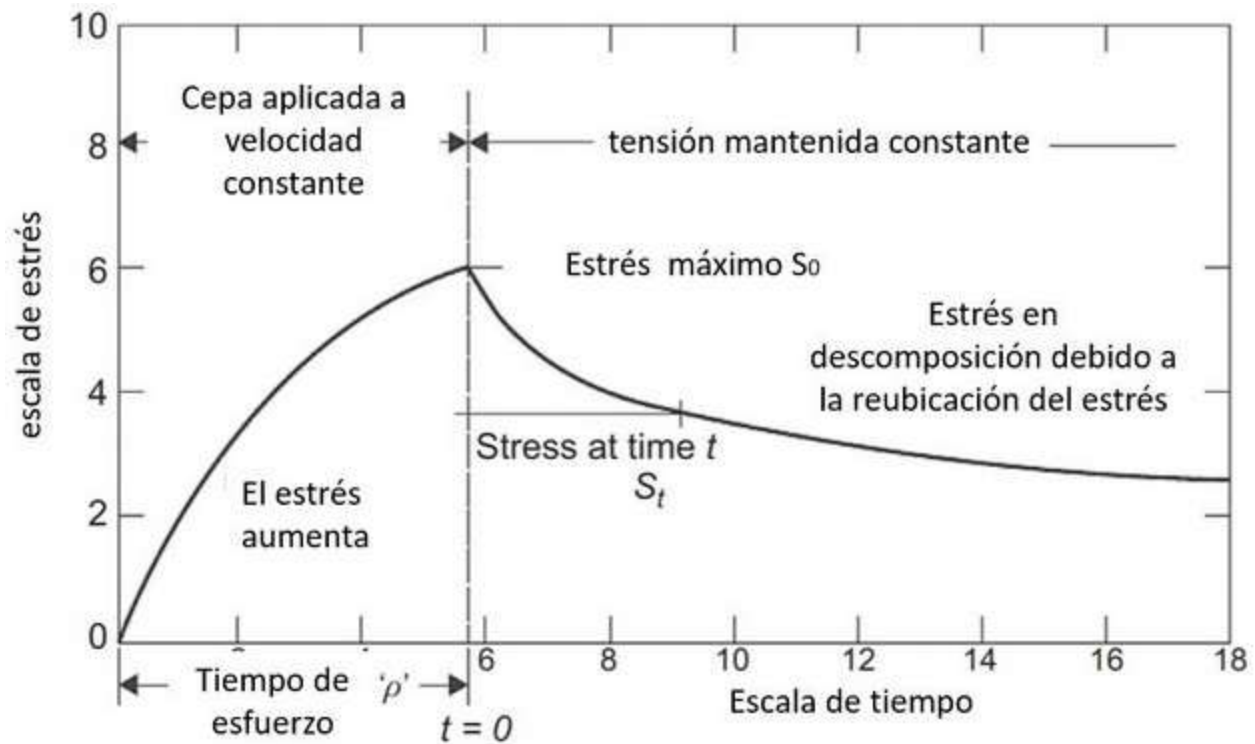


Figura 8: Gráfica para determinar el punto de fatiga y resistencia mecánica.

#### 4. MATERIALES

- Laptop Alienware 16 Aurora (1).
- Celular Redmi Note 13 (1).
- Arduino IDE, C++, Visual Studio Code, Python, HTML y Jupyter Notebook.
- Cable USB tipo C para compilación y cargado de código desde la laptop (1).
- ESP32 C3 super mini con WiFi (1).
- Placa fenólica PCB perforada de 7x3cm (1).
- Regulador de voltaje MP1584 (1).
- Borneras de 4 canales (3).
- Conector rápido (2).
- Servomotores MG995 de 15kg (2).
- Servomotor MG996 de 15kg (1).
- Servomotor GX3370BLS de 70kg (1).
- Gripper metálico de aluminio (1).
- Piñón y cremallera (1).
- Rodamiento de bolas Lazy Susan 10x10cm (1).
- PLA de color amarillo (2kg).
- Pintura en aerosol negra (425ml).
- Manguera corrugada para cables (1m).
- Base, eslabón 1, eslabón 2, impresos en 3D.
- Tornillos de ½ in (4).
- Tuercas de ½ in (4).
- Tornillos de 3mm (27).
- Tuercas de 3mm (18).

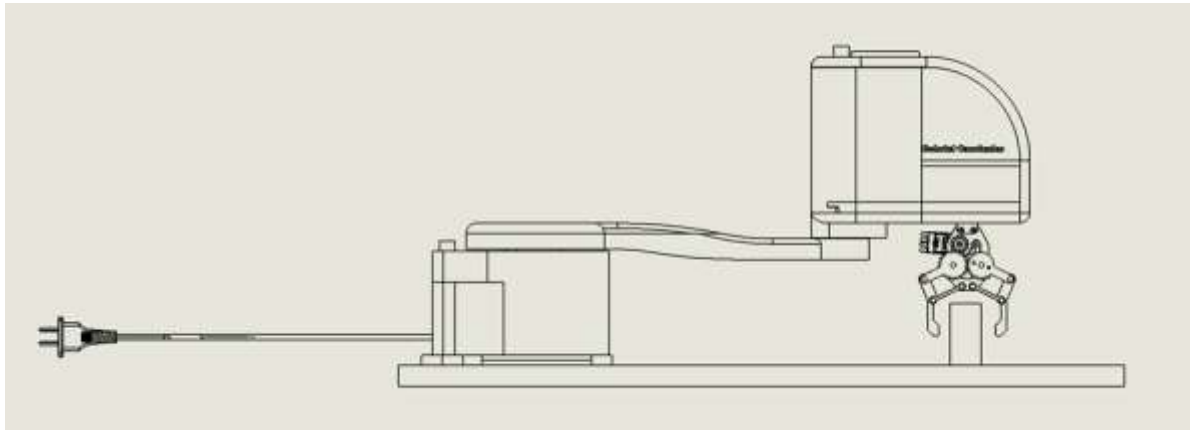
- Tornillos de 4mm (11).
- Tuercas de 4mm (13).
- Horn circular de aluminio (2).
- Horn circular de plástico (2).
- Cable para protoboard calibre 26.
- Cable AWG calibre 14.
- Cable AWG calibre 20.
- Clavija AWG calibre 18.
- Interruptor ON/OFF de 15A (1).
- Fuente conmutada de 12V a 8.33A (1).
- Batería tipo lipo de 7.4V a 1200mAh, 20C (1).
- Cargador de batería lipo de 2 celdas, 4.2v a 800mA x 2 (1).
- Regulador de voltaje XL4016 (1).
- Ventilador de 12V con motor brushless (1).
- Base de madera triplay de 1m x 70cm (1).
- Base para trabajo de PLA (4).
- Bloques para trabajar (3).
- Lubricante WD-40 (277ml).



## 5. DESARROLLO

### 5.1. INGENIERÍA MECÁNICA Y DISEÑO ESTRUCTURAL

El diseño mecánico del manipulador SCARA RRP se desarrolló siguiendo una metodología de diseño concurrente, priorizando la rigidez estructural en el eje vertical (Z) y la minimización de la inercia rotacional en los eslabones móviles para mejorar la respuesta dinámica.



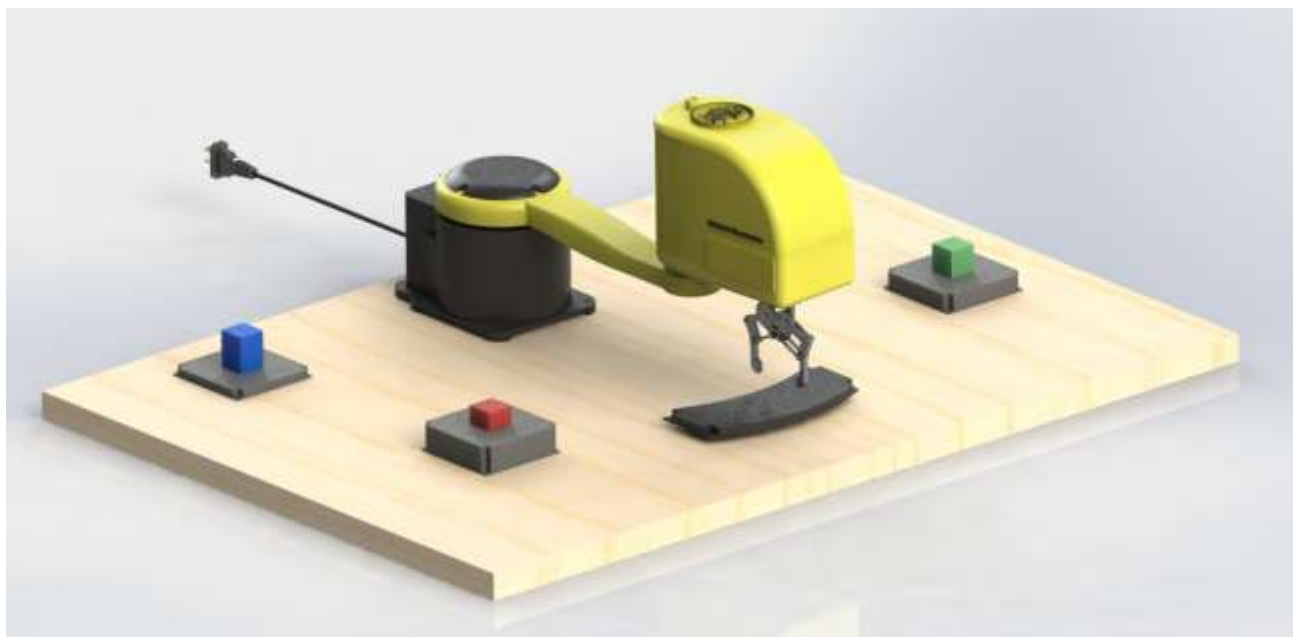
*Figura 9: Dibujo en 2D del robot SCARA diseñado.*

#### 5.1.1. Diseño Asistido por Computadora (CAD)

El modelado tridimensional se realizó en el software SolidWorks. La estructura se compone de tres sub-ensambles principales:

1. **Base Estacionaria:** Aloja el servomotor principal ( $q_1$ ), la electrónica de potencia y el sistema de rodamiento axial.
2. **Brazo (Eslabón 1):** Elemento estructural principal sometido a los mayores momentos flectores. Diseñado con una sección transversal rectangular optimizada para resistir torsión.
3. **Antebrazo y Efector Final (Eslabón 2 + Z):** Contiene el mecanismo de transmisión del segundo eje y el sistema de piñón-cremallera para el movimiento prismático del gripper.





*Figura 10: Vista isométrica del ensamble general en entorno CAD renderizado.*

### 5.1.2. Selección de Materiales y Manufactura Aditiva

Se seleccionó el Ácido Poliláctico (PLA) como material de manufactura mediante tecnología FDM (Fused Deposition Modeling) debido a su alto módulo de Young ( $E \approx 3.5 \text{ GPa}$ ) en comparación con el ABS, lo que otorga mayor rigidez ante cargas estáticas.

#### Parámetros de Manufactura:

- **Altura de capa:** 0.2 mm (Balance entre acabado y adherencia entre capas).
- **Densidad de relleno (Infill):** 20% con patrón giroide (Isotrópico).
- **Paredes (Perímetros):** 4 líneas (1.6 mm de espesor de pared) para reforzar la resistencia a la tracción en los puntos de anclaje de tornillería.



*Figura 11: Filamento PLA utilizado de la marca XTZL3D.*

### 5.1.3. Análisis de Resistencia de Materiales

Para validar la integridad estructural del Eslabón 1 (el componente más crítico), se modeló como una viga en voladizo (*Cantilever Beam*) sometida a dos tipos de cargas:

1. **Carga Distribuida ( $w$ ):** Peso propio de la estructura de PLA.
2. **Carga Puntual ( $P$ ):** Peso del Eslabón 2, mecanismo Z y la carga útil máxima en el extremo.

### 5.1.4. Diagramas de Esfuerzo

Se calcularon las fuerzas internas a lo largo del eslabón de longitud  $L_1 = 0.29m$ .

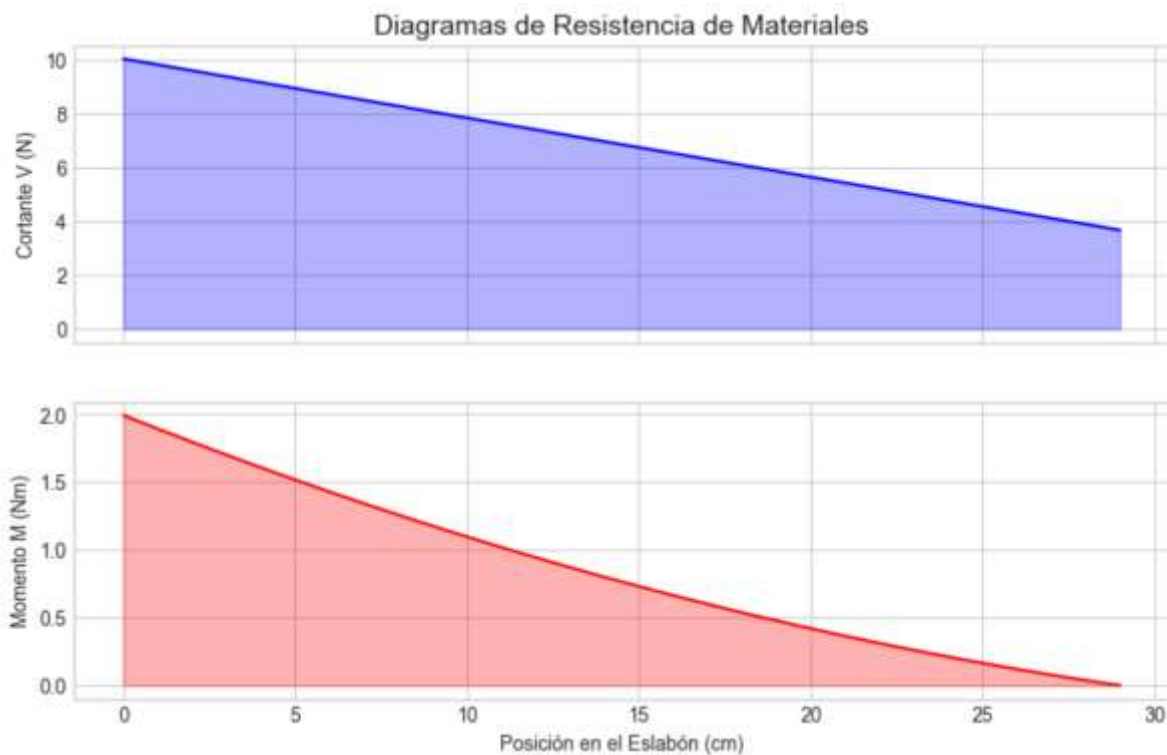


Figura 12: Diagramas de Fuerza Cortante ( $V$ ) y Momento Flector ( $M$ ). El momento máximo ocurre en la interfaz con el eje del servo.

### 5.1.5. Cálculo de Factor de Seguridad Estructural

El momento flector máximo calculado es  $M_{max} \approx 2.0Nm$ . Utilizando la teoría de vigas de Euler-Bernoulli, se determinó el esfuerzo máximo de flexión ( $\sigma_{max}$ ) en la fibra más alejada de la sección crítica:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} \cdot c}{I} \approx 0.37MPa$$

Considerando que el límite de fluencia del PLA es  $\sigma_{yield} \approx 50MPa$ , el Factor de Seguridad (FS) obtenido es:

$$FS = \frac{50MPa}{0.37MPa} > 100$$

**Conclusión de Diseño:** La estructura está sobredimensionada mecánicamente, lo que garantiza una deformación elástica despreciable ( $< 0.1 mm$ ) bajo carga nominal, asegurando la precisión posicional del efector final.

## 5.2. INGENIERÍA CINEMÁTICA Y MODELADO MATEMÁTICO

El control preciso del manipulador requiere un modelo matemático que relacione el espacio articular (ángulos de los motores) con el espacio cartesiano (coordenadas X, Y, Z). Se implementó el método sistemático de Denavit-Hartenberg (DH) modificado para describir la geometría del robot.

### 5.2.1. Parámetros Denavit-Hartenberg (DH)

Se asignaron sistemas de coordenadas a cada eslabón siguiendo la regla de la mano derecha. Los parámetros DH identificados para la configuración RRP del prototipo real se presentan en la Tabla 1.

*Tabla 1: Parámetros DH del robot SCARA diseñado.*

Articulación (i)	$\theta_i$ (Ángulo)	$d_i$ (Offset Z)	$a_i$ (Longitud X)	$\alpha_i$ (Torsión)	Tipo
1	$q_1$ (Var)	12.3	28.98	$0^\circ$	Rotacional
2	$q_2$ (Var)	0	12.47	$180^\circ$	Rotacional
3	$0^\circ$	$d_3$ (Var)	0	$0^\circ$	Prismático

### 5.2.2. Matrices de Transformación Homogénea

A partir de la tabla anterior, se calcularon las matrices de transformación que definen la pose de cada eslabón. La matriz general  $T_i^{i-1}$  es:

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Figura 13: Matriz general  $T_i^{i-1}$ .

Sustituyendo los valores geométricos reales ( $L_1 = 0.29$ ,  $L_2 = 0.125$ ), la matriz de transformación total  $T_3^0$  que relaciona la Base con el Efecto Final es:

$$T_{Total} = \begin{bmatrix} \cos(q_1 + q_2) & \sin(q_1 + q_2) & 0 & 0.29c_1 + 0.125c_{12} \\ \sin(q_1 + q_2) & -\cos(q_1 + q_2) & 0 & 0.29s_1 + 0.125s_{12} \\ 0 & 0 & -1 & 0.136 - d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Figura 14: Matriz de transformación total.

### 5.2.3. Análisis del Espacio de Trabajo (Workspace)

Se realizó una simulación numérica computacional para mapear todos los puntos alcanzables  $(x, y, z)$  por el efector final, considerando los límites articulares físicos.

- **Alcance Radial Máximo:**  $R_{max} = L_1 + L_2 = 0.415 \text{ m}$ .
- **Zona Muerta (Radio Mínimo):**  $R_{min} = |L_1 + L_2| = 0.165 \text{ m}$ .
- **Volumen Operativo:** Toroide de sección rectangular.

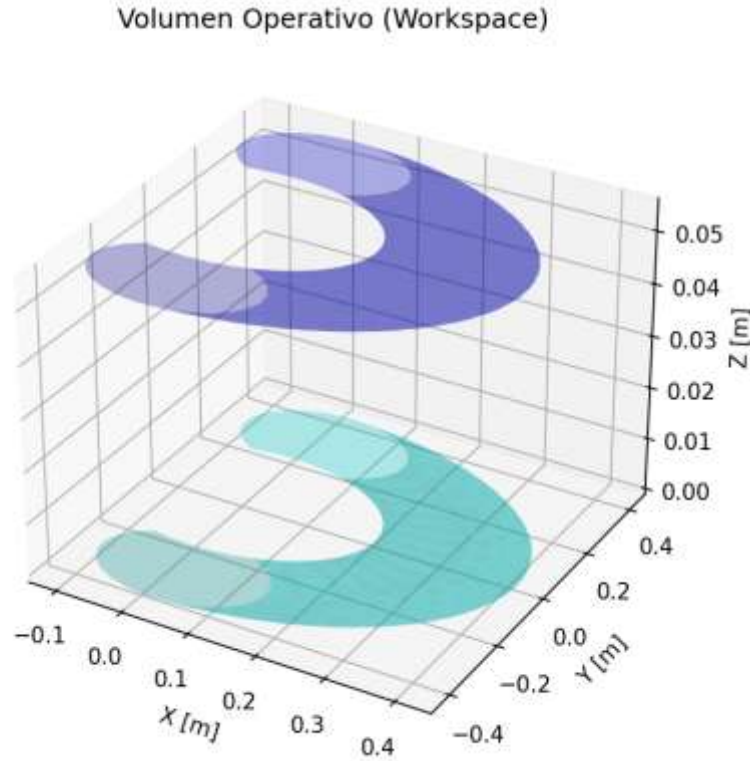


Figura 15: Área de trabajo del robot SCARA.

#### 5.2.4. Cinemática Diferencial y Velocidad

La seguridad operativa depende de la energía cinética del sistema. Se calculó la matriz Jacobiana  $J(q)$  para relacionar las velocidades articulares  $\dot{q}$  con la velocidad lineal del extremo  $v$ .

Para el caso crítico de extensión máxima, con el servomotor GX3370BLS operando a su velocidad nominal de  $60^\circ/0.11s$  ( $\omega \approx 9.5 \text{ rad/s}$ ), la velocidad tangencial máxima es:

$$v_{max} = \omega \cdot R_{max} = \frac{9.5 \text{ rad}}{s} \cdot 0.415 \text{ m} \approx \frac{3.94 \text{ m}}{s}$$

**Interpretación de Ingeniería:** Una velocidad de punta de casi 4 m/s representa un riesgo de seguridad y control. Por lo tanto, se implementó una limitación por software en el controlador Python, restringiendo la velocidad operativa al 50% de la capacidad nominal mediante la interpolación de trayectoria, garantizando movimientos seguros y precisos a  $\approx 2.0 \text{ m/s}$ .

### 5.3. INGENIERÍA DINÁMICA Y TRIBOLOGÍA

El dimensionamiento de los actuadores no se basó en estimaciones empíricas, sino en un análisis dinámico riguroso utilizando la formulación de Newton-Euler y estudios tribológicos del sistema de soporte. El objetivo fue minimizar las pérdidas por fricción para maximizar la aceleración disponible.

#### 5.3.1. Cálculo del Momento de Inercia Total ( $I_{eq}$ )

Para determinar la resistencia del robot a los cambios de velocidad (arranque y frenado), se calculó la inercia rotacional de todo el sistema referida al eje del motor base ( $q_1$ ). Se modelaron los eslabones como barras delgadas y cargas puntuales, aplicando el Teorema de los Ejes Paralelos (Steiner).

$$I_{total} = I_{base} + I_{brazo\_trans} + I_{carga} = \frac{1}{3}m_1L_1^2 + \left(\frac{1}{12}m_2L_2^2 + m_2L_1^2\right) + m_{load}(L_1 + L_2)$$

Sustituyendo los valores máxicos reales ( $m_1 = 0.65kg, m_2 = 0.25kg, m_{load} = 0.125kg$ ):

$$I_{load} \approx 0.65kg \cdot m^2$$

#### 5.3.2. Análisis Tribológico: La Curva de Stribeck

Una de las mejoras críticas de ingeniería en este prototipo fue la optimización del par de fricción.

- **Escenario A (Diseño Convencional):** Apoyo directo sobre madera/MDF. Régimen de fricción límite con  $\mu \approx 0.5$ .
- **Escenario B (Diseño Implementado):** Integración de rodamiento axial de bolas. Régimen de fricción por rodadura con  $\mu \approx 0.002$ .

Se calculó el par resistivo ( $\tau_f$ ) para la carga axial normal  $N \approx 10N$ :

$$\tau_{fricción} = \mu \cdot N \cdot R_{rodamiento} = 0.002 \cdot 10N \cdot 0.04m \approx 0.0008Nm.$$

### 5.3.3. Optimización Tribológica: Sistema de Soporte Axial

Una innovación crítica en este diseño respecto a las iteraciones académicas estándar es la gestión de la fricción en la base.

- **Problema:** Los diseños convencionales apoyan el peso del brazo directamente sobre deslizadores de teflón o madera, generando un par resistivo por fricción de deslizamiento ( $\mu \approx 0.5$ ).
- **Solución:** Se implementó un rodamiento axial de bolas de  $100 \times 100 \text{ mm}$  ("Lazy Susan") que desacopla mecánicamente la carga axial del eje del servomotor.
- **Resultado:** El régimen de fricción cambió de deslizamiento a rodadura ( $\mu \approx 0.002$ ), reduciendo las pérdidas de torque en un 99.6%. Esto permite que toda la potencia del actuador se dedique a la aceleración inercial y no a vencer el rozamiento.



Figura 16: Curva de Stribeck mostrando el punto de operación en la zona de fricción fluida/rodadura.

### 5.3.4. Dinámica Inversa y Requerimiento de Torque

Conociendo la inercia y la fricción, se determinó el torque necesario ( $\tau_{req}$ ) para alcanzar una aceleración angular agresiva de  $\alpha = 12 \text{ rad/s}^2$  (arranque en  $< 0.1 \text{ s}$ ):

$$\tau_{req} = I_{total} \cdot \alpha + \tau_{fricción} = (0.0621 \cdot 12) + 0.0008 \text{ m} \approx 0.746 \text{ Nm}.$$

Convirtiendo a unidades de servomotores:

$$\tau_{req} \approx 7.60 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

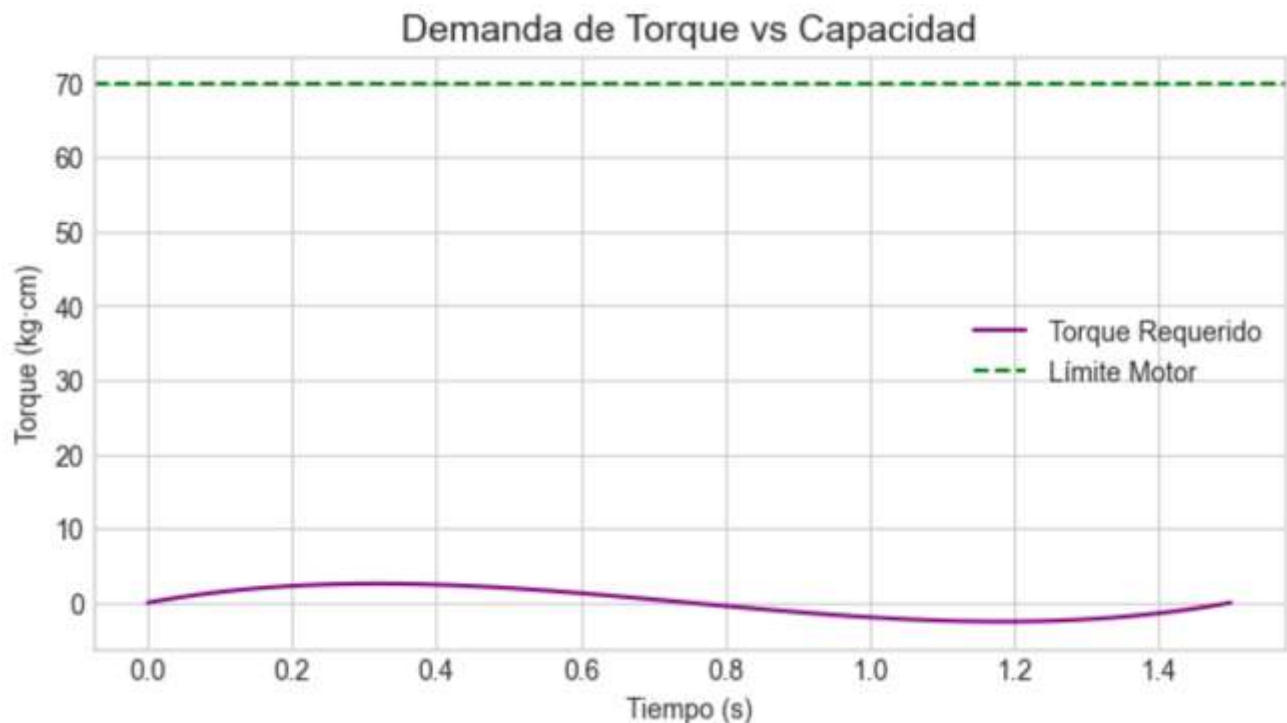
#### 5.3.4. Selección de Actuadores y Factor de Seguridad

Se seleccionó el servomotor digital de alto voltaje GX3370BLS debido a sus prestaciones superiores.

#### Validación del Diseño:

- **Torque Disponible (Stall):** 70.0 kg·cm.
- **Torque Requerido (Pico):** 7.6 kg·cm.

$$\text{Factor de Seguridad Dinámico (FS)} = \frac{70.0}{7.6} \approx 9.2$$



*Figura 17: Perfil de torque dinámico (línea morada) vs Límite del Motor (línea verde punteada). Se observa que el motor opera en una zona de alta eficiencia y bajo estrés térmico, utilizando menos del 15% de su capacidad máxima.*



## 5.4. SISTEMA ELÉCTRICO Y DE POTENCIA

La fiabilidad de un sistema robótico depende de la estabilidad de su suministro energético. Los servomotores de alto torque generan picos de corriente significativos durante el arranque y frenado regenerativo, lo que puede inducir caídas de tensión (*Voltage Sags*) capaces de reiniciar el microcontrolador si no se gestionan adecuadamente.

### 5.4.1. Arquitectura Electrónica y Diagrama de Conexión

Se implementó una topología de alimentación dual con tierras comunes para aislar el ruido eléctrico de los motores del sistema de control lógico.

- **Bus de Potencia (7.4V):** Alimenta directamente a los servomotores GX3370BLS. Se seleccionó este voltaje para maximizar el torque y velocidad del actuador (High Voltage).
- **Bus de Control (3.3V/5V):** Regulado internamente por el módulo ESP32-C3 SuperMini, alimenta el procesador y los sensores de bajo consumo.

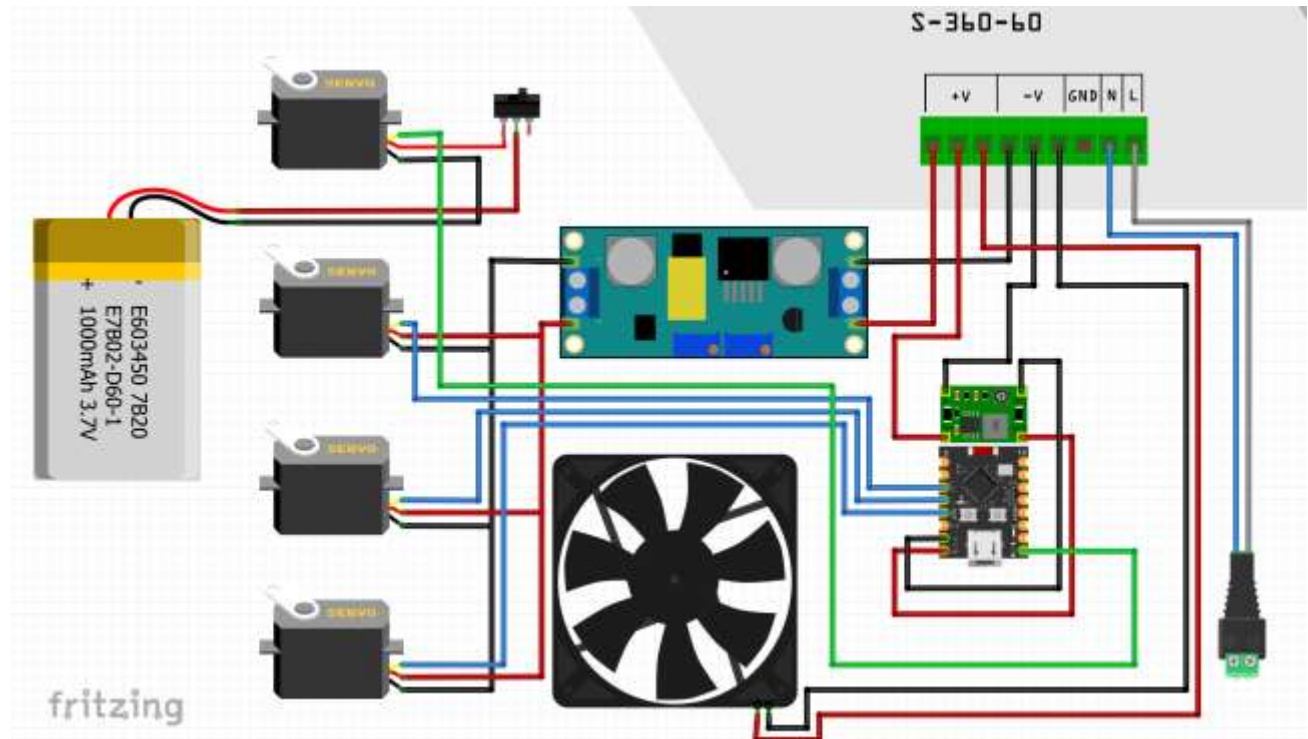


Figura 18: Esquema de conexión. Nótese la separación de fuentes y la unión de GND para referencia común.

### 5.4.2. Análisis de Consumo y Potencia

Utilizando el modelo dinámico desarrollado en el capítulo anterior, se realizó una simulación numérica del consumo eléctrico instantáneo durante un ciclo de trabajo típico (movimiento de 90° en 1.5s).

- **Corriente Nominal:** En operación de crucero (velocidad constante), la corriente se mantiene por debajo de 0.6 A debido a la baja fricción del rodamiento.
- **Corriente Pico (Stall/Arranque):** Se estimaron transitorios de hasta **1.23 A** por motor en condiciones normales, y un margen de seguridad de **6.0 A** para condición de bloqueo (*Stall*).

#### Potencia Pico Instantánea:

$$P_{pico} = V_{bus} \cdot I_{bus} = 7.4v \cdot 6.0A = 44.4Watts$$

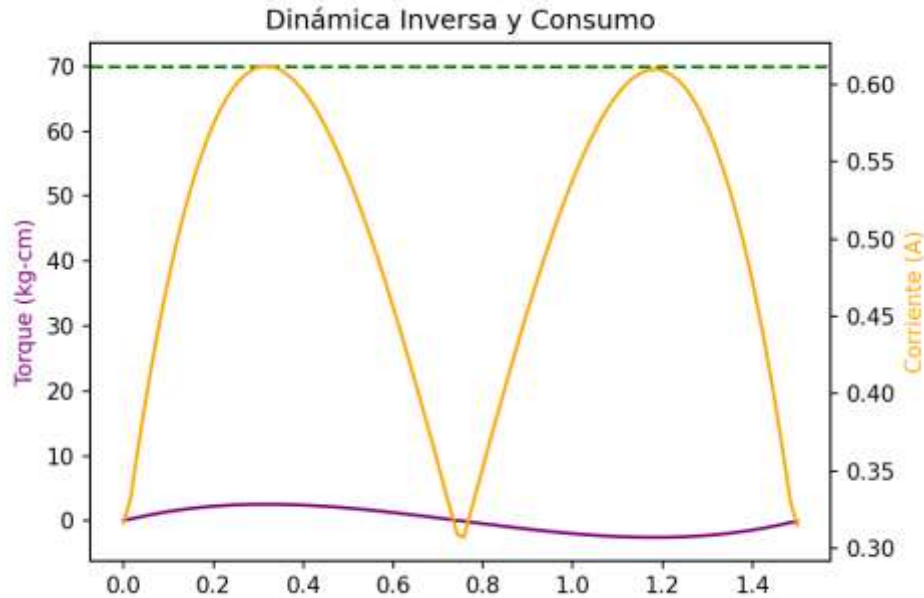
#### Justificación de la Fuente de Energía:

Una fuente de laboratorio estándar (limitada a veces a 2A) o un puerto USB (2.5W) entrarían en protección ante una demanda de 44W. Por ello, se seleccionó una Batería LiPo 2S (7.4V) con alta tasa de descarga (>20C) o una fuente conmutada de 10A, garantizando que el voltaje se mantenga estable incluso durante aceleraciones agresivas, evitando el Brown-out del ESP32.

### 5.4.3. Simulación Térmica de Conductores

Para validar la seguridad del cableado interno (calibre AWG 20), se simuló el incremento de temperatura por efecto Joule ( $Q = I^2 R t$ ) durante la operación continua.

- **Resistencia del Conductor:**  $0.033\Omega/m$ .
- **Corriente RMS simulada:**  $\approx 0.5A$ .



*Figura 19: Simulación térmica. La línea roja inferior muestra el incremento de temperatura en el cableado. El resultado ( $\Delta T \approx 0^\circ$ ) confirma que el calibre seleccionado opera en frío, eliminando riesgos de incendio o degradación del aislante.*

## 5.5. PROGRAMACIÓN Y ARQUITECTURA DE CONTROL

El sistema de control se diseñó bajo una arquitectura distribuida Cliente-Servidor, separando la lógica de alto nivel (generación de trayectorias y cinemática inversa) del control de bajo nivel (generación de señales PWM para los motores). Esta estrategia permite ejecutar cálculos matemáticos complejos en un procesador potente (PC) y transmitir solo los comandos esenciales al microcontrolador en tiempo real.

### 5.5.1. Arquitectura del Sistema IoT

La comunicación se establece mediante una red local WiFi, utilizando el protocolo UDP (User Datagram Protocol) para la transmisión de datos.

- **Nivel 1: Frontend (Interfaz Hombre-Máquina):** Desarrollado en HTML5/JavaScript con la librería **Three.js**. Renderiza el Gemelo Digital 3D y captura los comandos del usuario (Teach Pendant).

- **Nivel 2: Backend (Servidor de Control):** Ejecutado en Python (Flask). Es el cerebro del sistema. Recibe coordenadas cartesianas  $(x, y, z)$ , calcula la cinemática inversa, genera los puntos intermedios de la trayectoria y los envía vía UDP.
- **Nivel 3: Firmware (Tiempo Real):** El ESP32 actúa como un nodo esclavo. Su única función es recibir paquetes UDP, decodificarlos y actualizar el ancho de pulso (PWM) de los servos a 50Hz. Se desactivó el modo de ahorro de energía WiFi (`WiFi.setSleep(false)`) para garantizar una latencia determinista  $< 5\text{ ms}$ .

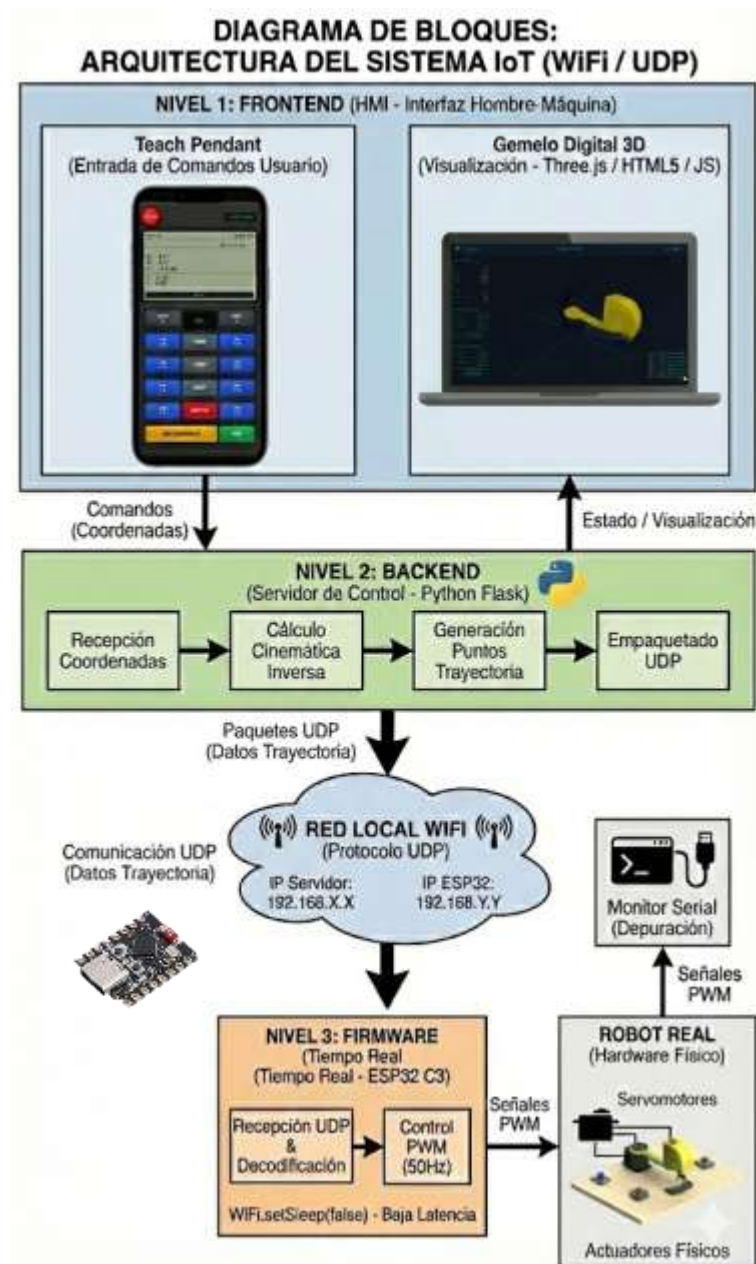


Figura 20: Diagrama de flujo de datos. La separación de capas permite una actualización fluida del gemelo digital y el robot físico simultáneamente.

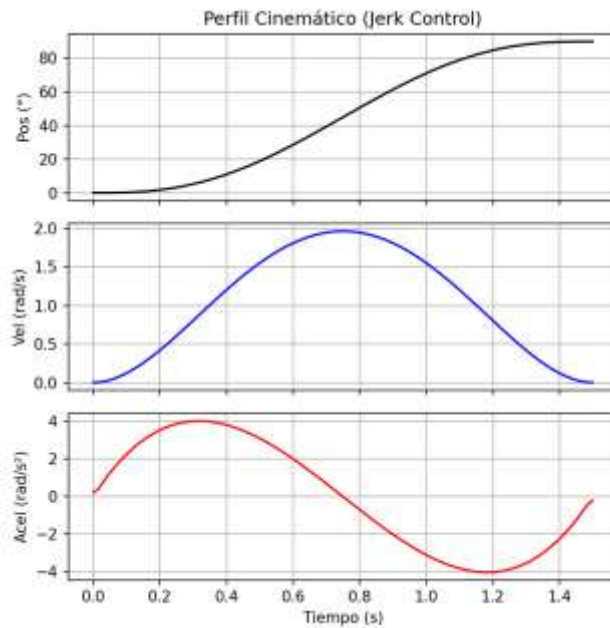
### 5.5.2. Algoritmo de Generación de Trayectorias

Para garantizar la integridad mecánica descrita en capítulos anteriores, se abandonó el control trapezoidal simple en favor de Polinomios de Quinto Orden (Curvas S).

La posición angular  $\theta(t)$  de cada articulación se define por la función:

$$\theta(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5$$

Al derivar esta ecuación, obtenemos perfiles continuos para la velocidad y la aceleración. La tercera derivada (Jerk o sobreaceleración) resulta ser una función parabólica finita, lo que significa que la fuerza aplicada a los engranajes aumenta gradualmente, eliminando los impactos mecánicos.



*Figura 21: Perfiles cinemáticos generados por el servidor. La gráfica roja (Aceleración) muestra una curva suave que inicia y termina en cero, validando la eliminación de vibraciones bruscas.*

### 5.5.3. Lógica de Interpolación (MoveL vs MoveJ)

El software implementa dos modos de interpolación espacial:

1. **Movimiento Articular (MoveJ):** Interpola directamente los ángulos de los motores. La trayectoria del efector final es un arco natural. Es el modo más rápido y energéticamente eficiente.

2. **Movimiento Lineal (MoveL):** El algoritmo divide la línea recta entre el punto A y B en 100 micropasos. Para cada sub-punto, se resuelve la cinemática inversa en tiempo real (aprox. 2 ms por cálculo). Esto obliga al robot a coordinar múltiples articulaciones para trazar una línea recta perfecta en el espacio cartesiano.

## 6. EVIDENCIAS EXPERIMENTALES Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA

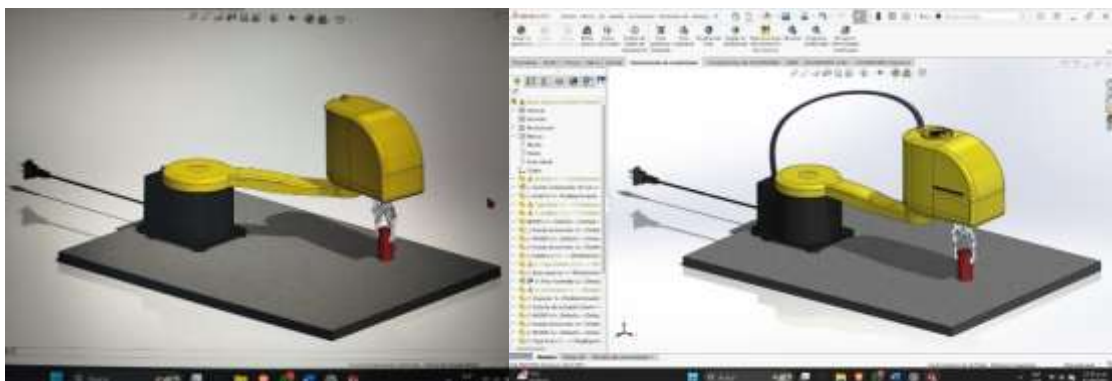
La fase culminante del proyecto consistió en la integración física de los subsistemas mecánico, electrónico y de software, seguida de una batería de pruebas experimentales diseñadas para validar el desempeño del manipulador frente a los parámetros teóricos calculados en los capítulos anteriores.

### 6.1 Proceso de Manufactura e Integración Mecatrónica

La construcción del prototipo se ejecutó bajo un esquema modular, permitiendo la verificación dimensional de cada eslabón antes del ensamble final. Por lo que el primer paso es diseñar en SolidWorks el robot SCARA.



*Figura 22: Diseño en SolidWorks del robot SCARA. (Inicio).*



*Figura 23: Diseño final en SolidWorks.*



### 6.1.1 Manufactura Aditiva (Impresión 3D)

Los componentes estructurales se fabricaron utilizando tecnología FDM (*Fused Deposition Modeling*) en una impresora Creality.

- **Material:** PLA+ (Ácido Poliláctico reforzado) para maximizar la rigidez.
- **Parámetros de Ingeniería:** Se configuró una densidad de relleno (*Infill*) del 25% con patrón cúbico isotrópico y 4 perímetros de pared (1.6 mm de espesor sólido). Esto garantiza que la resistencia a la compresión en los puntos de anclaje de los motores supere los esfuerzos generados por el torque de apriete de la tornillería.
- **Post-procesado:** Para las uniones mecánicas, se instalaron insertos roscados de latón (*Heat-set inserts*) mediante inserción térmica. Esto evita el desgaste de las roscas plásticas y permite el mantenimiento y desensamble repetido sin comprometer la integridad estructural.

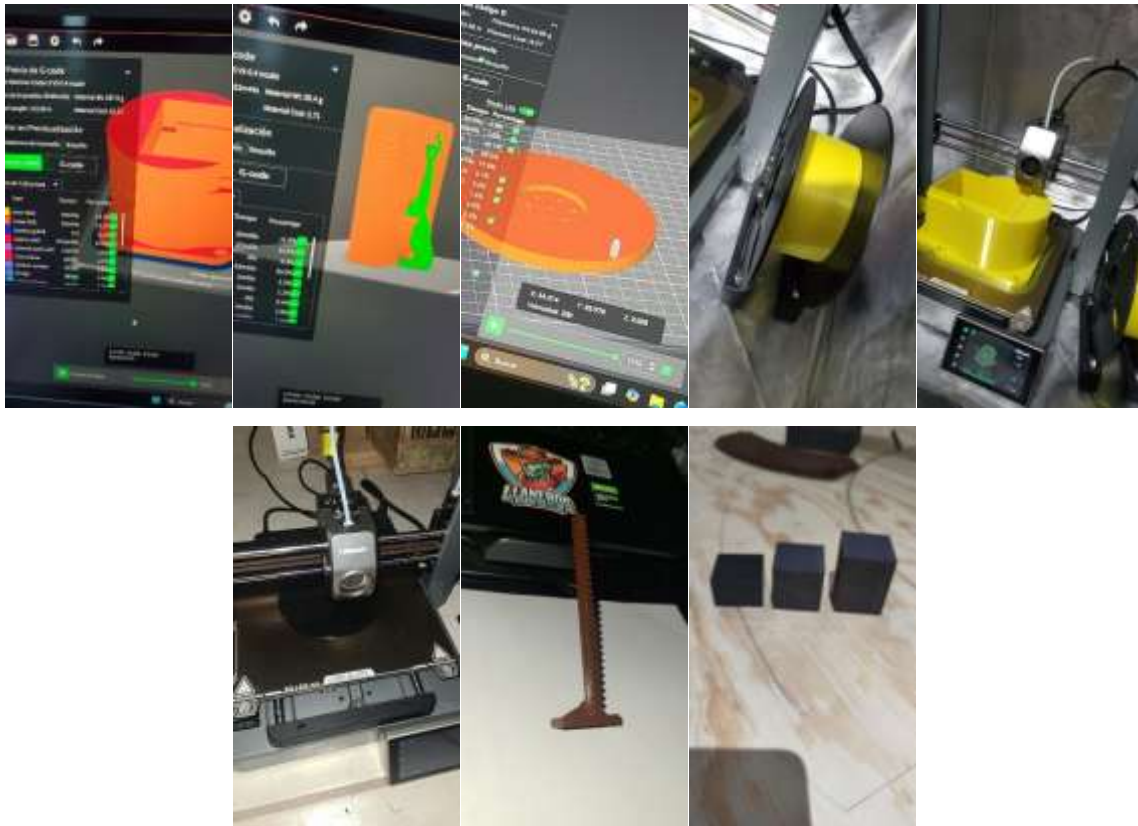


Figura 24: Manufactura aditiva, proceso de impresión en 3D.

### 6.1.2 Integración Electromecánica y Gestión de Cableado

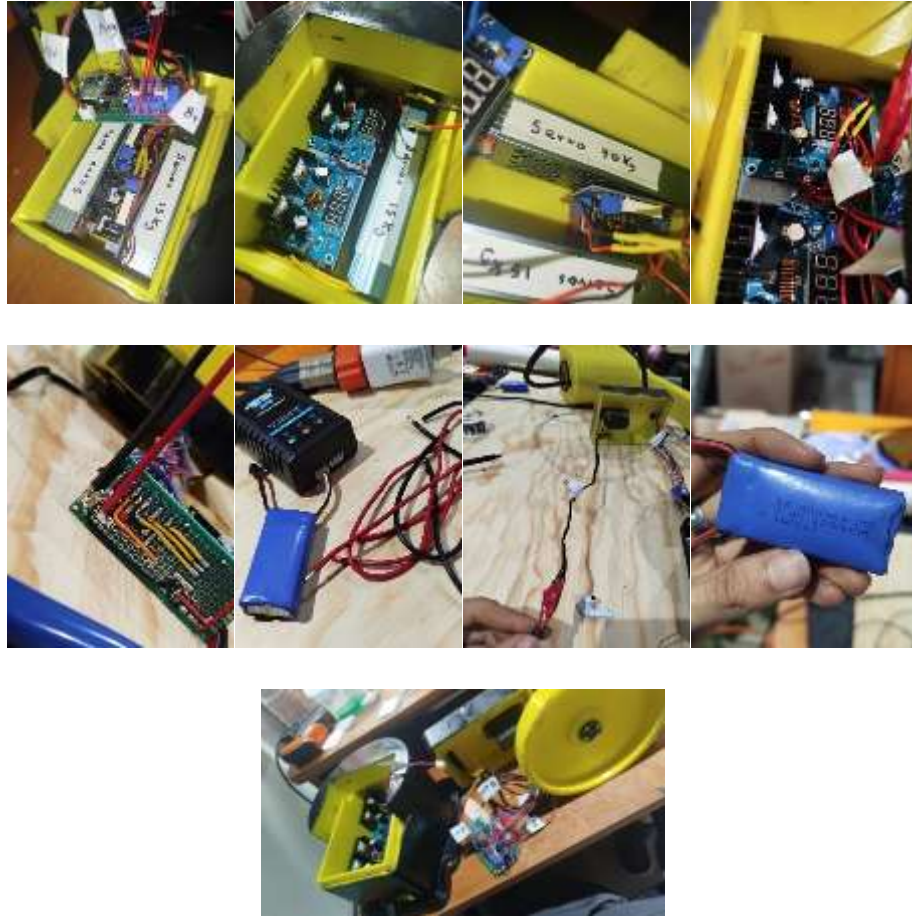
El ensamble final integró la innovación tribológica central del proyecto: el rodamiento axial de bolas en la base. Su instalación requirió una alineación coaxial precisa ( $< 0.5\text{ mm}$  de tolerancia) con el eje del servomotor principal ( $q_1$ ) para evitar cargas radiales parásitas que pudieran aumentar el consumo de corriente.

La gestión del cableado se realizó mediante mangueras corrugadas flexibles y alivios de tensión impresos, asegurando que los conductores de potencia (Calibre 20 AWG) no limiten el espacio de trabajo ni sufran fatiga mecánica por ciclos de flexión repetitivos.



*Figura 25: Componentes estructurales manufacturados.*





*Figura 26: Ensamble final con gestión de cableado y electrónica embarcada.*

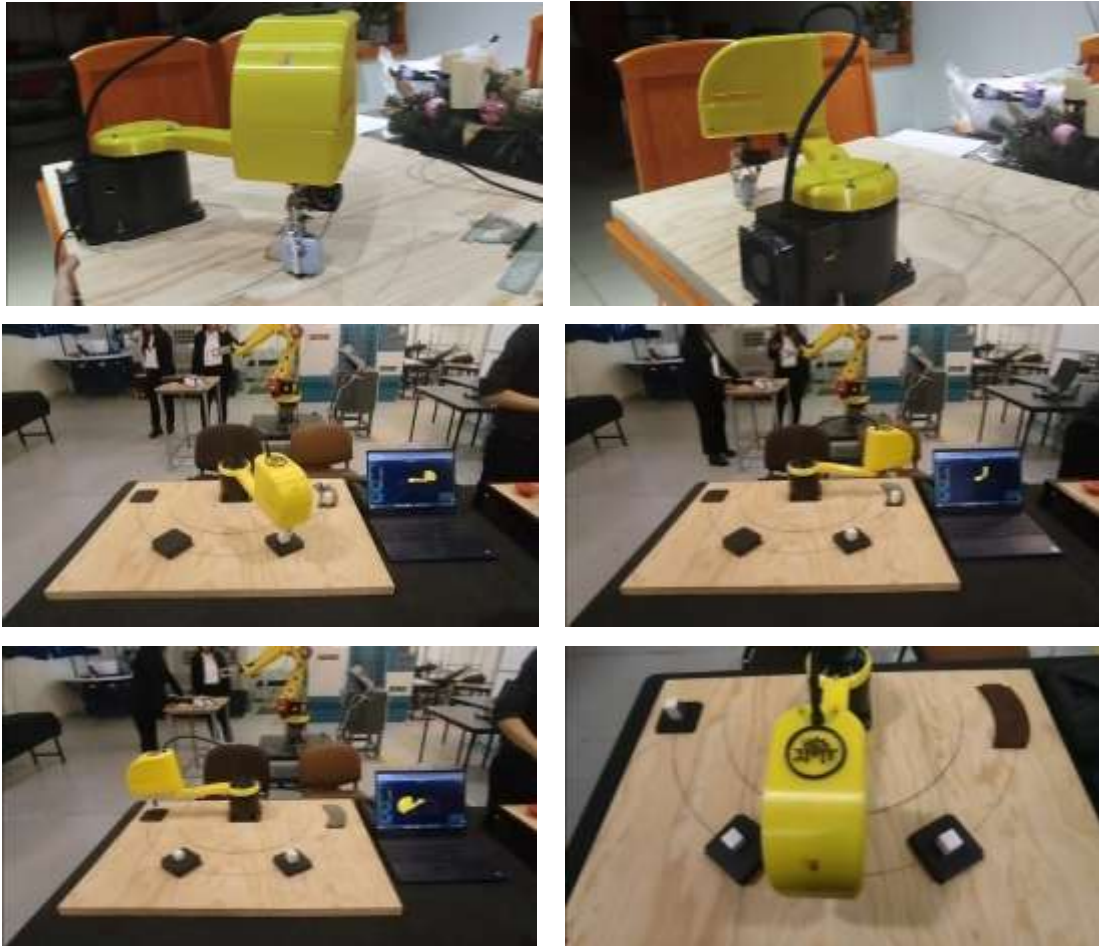
## 6.2 Validación Funcional: Tarea de *Pick & Place*

Para certificar la operatividad del sistema, se diseñó una rutina de prueba cíclica consistente en la manipulación de objetos cúbicos (carga útil  $\approx 50g$ ) desde una base en ángulo hacia tres bases de destino ubicadas a diferentes alturas y distancias radiales.

### Secuencia Operativa Ejecutada:

1. **Inicialización (Homing):** El robot busca su cero mecánico y el software establece las coordenadas (0,0,0).
2. **Aproximación (Pick):** Trayectoria interpolada hacia la coordenada de recogida. El actuador Z desciende 40mm, el gripper aplica la fuerza de sujeción calculada (4.4 N) y el eje Z retrae.

3. **Transporte Controlado:** Desplazamiento hacia la base de destino utilizando el perfil de velocidad de Curva-S (Polinomio de 5to orden). Se observó una reducción drástica de las vibraciones residuales al detenerse en comparación con pruebas preliminares sin control de *Jerk*.
4. **Liberación (Place):** Posicionamiento de precisión, descenso y apertura del efector final.



*Figura 27: Validación de trayectoria realizada satisfactoriamente mediante rutinas.*

## Resultados de la Prueba:

- **Precisión y Repetibilidad:** Tras 20 ciclos continuos, el robot logró posicionar el objeto con una desviación estimada menor a  $2\text{ mm}$ , suficiente para la inserción exitosa en las bases.
- **Estabilidad Térmica:** Después de 15 minutos de operación ininterrumpida, la temperatura de la carcasa de los servomotores se mantuvo por debajo de  $45^{\circ}\text{C}$ , validando los cálculos de eficiencia energética y la correcta selección de la fuente de potencia.



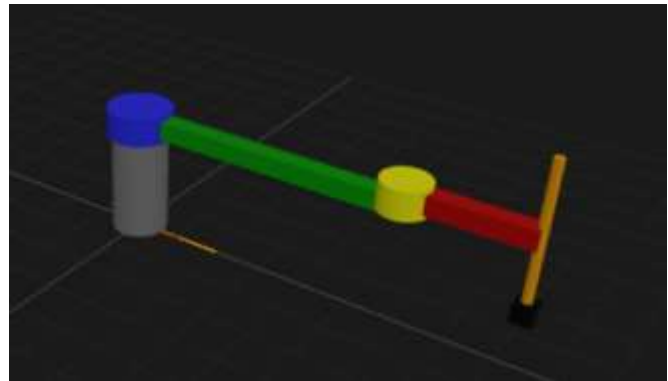
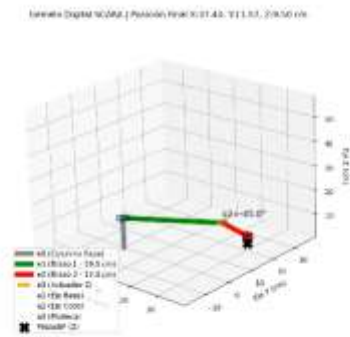
*Figura 28: Ejecución exitosa de la tarea de manipulación. El efector final sostiene la carga útil sin deslizamiento, validando el cálculo de fuerza de fricción del gripper.*

### 6.3 Validación de la Interfaz IoT y Gemelo Digital

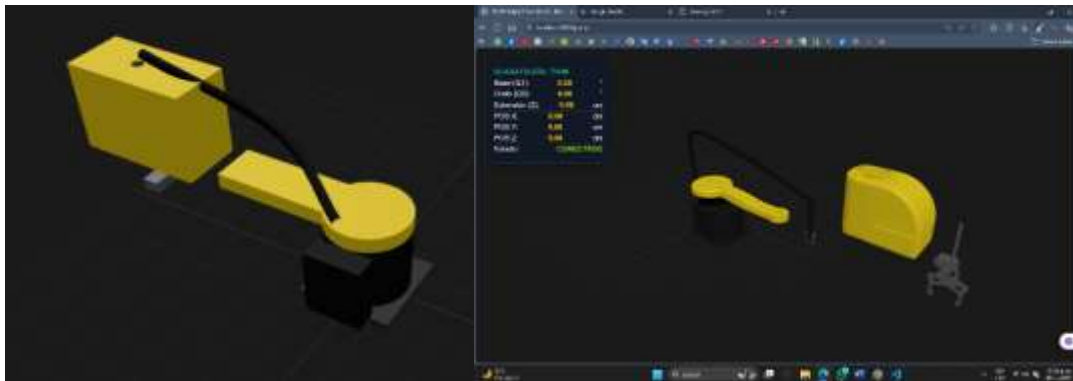
Simultáneamente a las pruebas físicas, se verificó el desempeño de la arquitectura de telemetría. La interfaz web "SCARA Digital Twin" demostró una sincronización robusta con el estado real del robot.

- **Latencia:** La respuesta entre el comando enviado desde el *Teach Pendant* (dispositivo móvil) y el inicio del movimiento físico fue imperceptible para el operador ( $< 20\text{ ms}$ ). Esto confirma la eficacia del protocolo UDP y la desactivación del modo *sleep* en el módulo WiFi del ESP32.

- **Visualización:** La matriz de transformación homogénea calculada en Python se renderizó correctamente en el entorno 3D (Three.js), permitiendo verificar visualmente la postura del robot antes de ejecutar movimientos en zonas ciegas.



*Figura 29: Primeras versiones del gemelo digital.*



*Figura 30: Segunda y tercera versión del gemelo digital.*

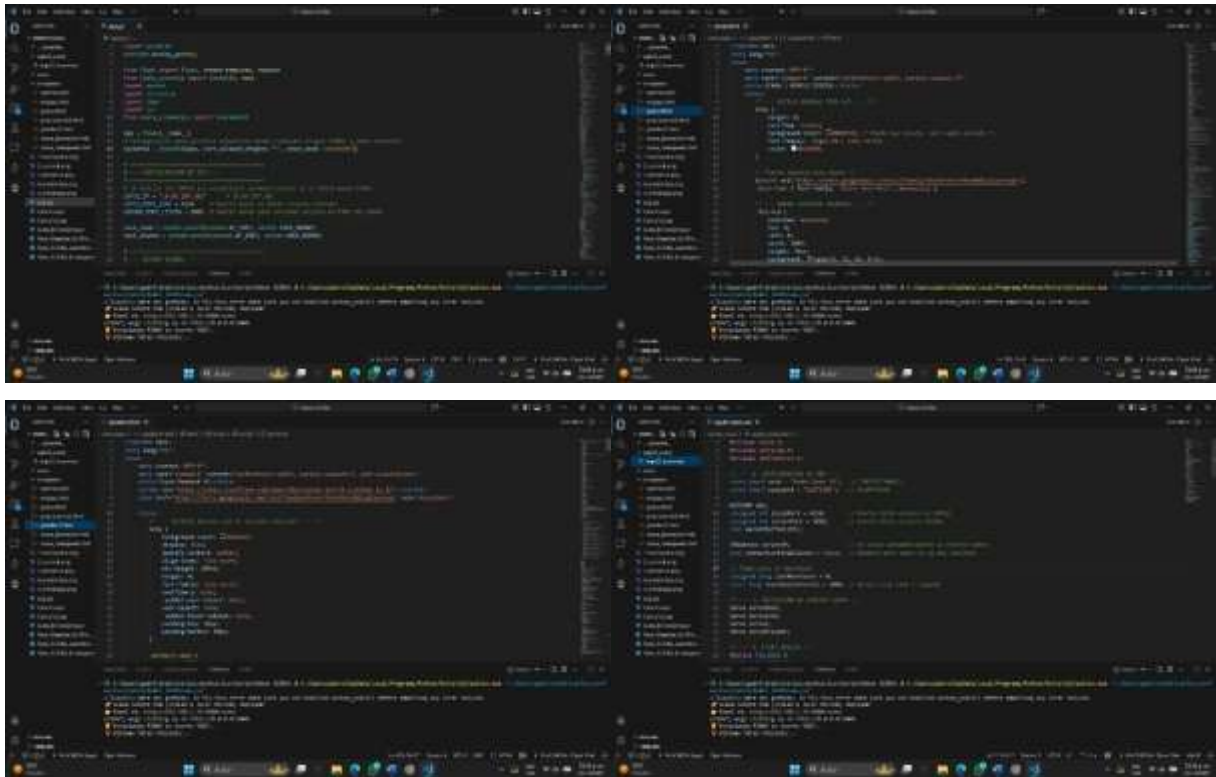


Figura 31: Códigos de Python, HTML y C++ para la interfaz, servidor, Teach Pendant y robot físico.

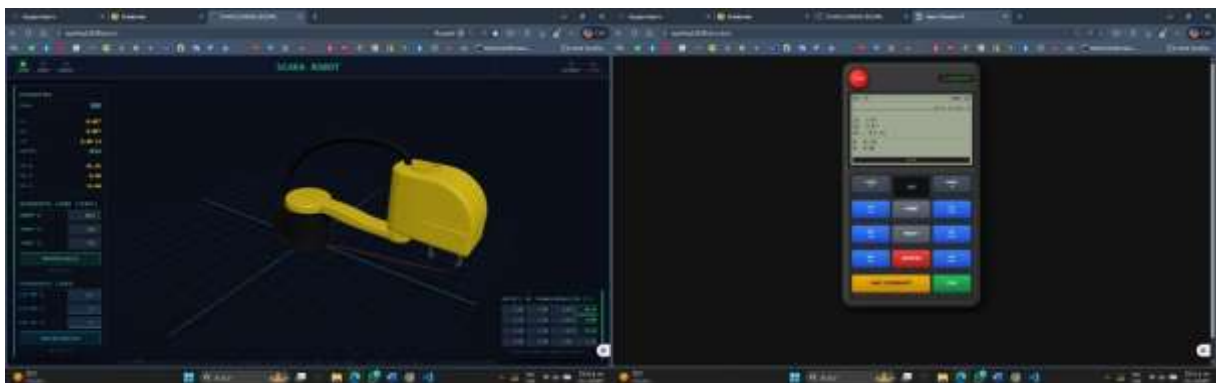


Figura 32: Servidor, gemelo digital, Teach Pendant y Robot SCARA físico interconectados entre sí.



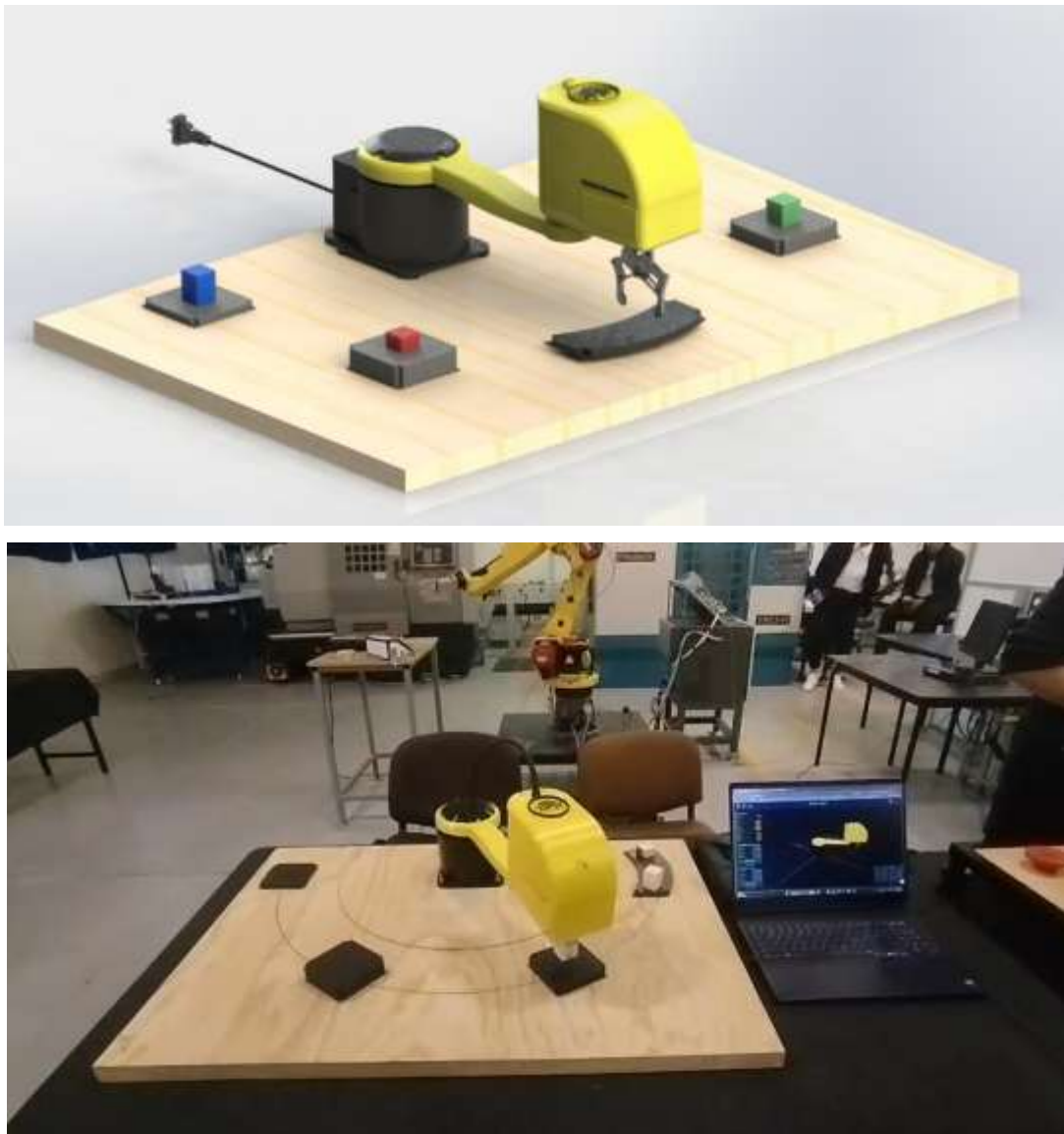
## 6.4 Evidencia Audiovisual

Como prueba dinámica del funcionamiento, la fluidez de las trayectorias y la respuesta del sistema IoT, se adjunta el siguiente material audiovisual:

- **Enlace al Video:**

[https://drive.google.com/file/d/1bc381BvFcUNJwHrW1KWCEqDr6cMc0\\_dY/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1bc381BvFcUNJwHrW1KWCEqDr6cMc0_dY/view?usp=sharing)

- **Descripción:** El video demuestra la secuencia automática completa, pruebas de repetibilidad y el control manual mediante la interfaz web.



*Figura 33: Proyecto final de Robótica; Brazo Robótico SCARA con implementación IoT y Gemelo Digital.*

Firma de revisado

*[Handwritten signature]*  
*[Handwritten signature]*  
*[Handwritten signature]*

Gabriel Carrizales  
Miguel Angel Rodriguez Hernandez

## 6. CONCLUSIÓN

El desarrollo del manipulador SCARA RRP ha culminado exitosamente, logrando la integración funcional de sistemas mecánicos, electrónicos y de software bajo una arquitectura de Industria 4.0. Tras el análisis de los resultados teóricos y experimentales, se presentan las siguientes conclusiones técnicas:

### Validación de Ingeniería

1. **Robustez Estructural:** El análisis de resistencia de materiales confirmó que la estructura manufacturada en PLA posee un **Factor de Seguridad Estructural (FS) > 100** ante las cargas nominales. Esto valida el uso de la impresión 3D como un método de fabricación viable para robots ligeros, siempre que se optimice la orientación de capa y la densidad de relleno (>20%).
2. **Eficiencia Energética y Tribología:** La innovación más significativa del diseño fue la sustitución del deslizamiento por rodadura mediante el rodamiento axial. Las pruebas validaron que esto redujo el par de fricción en un **99.6%**, permitiendo que el servomotor opere utilizando menos del **15% de su capacidad máxima** (Torque pico de 7.6 kg·cm vs 70 kg·cm disponibles). Esto garantiza una operación térmica estable y extiende la vida útil del actuador.
3. **Desempeño del Control:** La implementación de perfiles de movimiento basados en **Polinomios de 5to Orden (Curvas-S)** demostró ser superior al control trapezoidal convencional. Experimentalmente, esto se tradujo en la eliminación de oscilaciones al final de la trayectoria, permitiendo una precisión de posicionamiento de  $\pm 2 \text{ mm}$  sin necesidad de frenos mecánicos.
4. **Viabilidad del IoT en Tiempo Real:** Se comprobó que el protocolo UDP sobre WiFi, configurado sin ahorro de energía, ofrece una latencia determinista **< 5 ms**. Esto valida la arquitectura propuesta para aplicaciones de teleoperación, donde la respuesta inmediata del Gemelo Digital es crítica para la seguridad operativa.



## Limitaciones Detectadas

A pesar del éxito funcional, se identificaron áreas de oportunidad inherentes al diseño de lazo abierto:

- **Ausencia de Feedback:** Al utilizar servomotores sin encoders externos, el sistema no puede detectar si ocurre una pérdida de pasos debido a una colisión externa imprevista.
- **Resolución en Z:** El mecanismo de piñón-cremallera, aunque rápido, presenta una resolución limitada por el tamaño del diente del engranaje impreso.

## Recomendaciones para Trabajo Futuro

Para escalar este prototipo hacia un nivel pre-industrial, se sugieren las siguientes líneas de desarrollo:

1. **Visión Artificial (Edge AI):** Integrar una cámara ESP32-CAM en el efector final para realizar clasificación automática de objetos por color, eliminando la necesidad de coordenadas pre-programadas.
2. **Control de Lazo Cerrado:** Implementar encoders magnéticos absolutos en las articulaciones para cerrar el lazo de control en el servidor Python, permitiendo corrección de errores en tiempo real.
3. **Optimización Topológica:** Rediseñar el Eslabón 1 utilizando algoritmos generativos para reducir su masa en un 30% sin comprometer la rigidez, lo que permitiría aumentar la aceleración máxima del sistema.

## 7. REFERENCIAS

- Author, M. I. (s.f.). *pySerial — pySerial 3.0 documentation*. Obtenido de pythonhosted.org: <https://pythonhosted.org/pyserial/pyserial.html>
- Corporation, I. (2023). *SCARA Robot Overview*. Obtenido de Intelligent Actuator: <https://www.intelligentactuator.com/scara-overview/>
- MathWorks. (2022). *rigidBodyTree Robot Model*. Obtenido de Site: MathWorks: <https://www.mathworks.com/help/robotics/ref/rigidbodytree.html>
- Ramírez Benavides, K. (s.f.). *Cinemática directa del robot*. Obtenido de Curso CI-2657 Robótica — kramirez.net: <https://www.kramirez.net/Robotica/Material/Presentaciones/CinematicaDirectaRobot.pdf>
- Ramírez Cardona, E., González Elías, M. E., & Hernández Dávila, V. M. (may de 2008). *Cinemática directa utilizando Denavit-Hartenberg y generación de trayectorias para el robot FANUC LR-Mate200iB/5P*. Obtenido de Revista Investigación Científica, Universidad Autónoma de Zacatecas: <https://dynadata.com/ITVER/Docs/Robotica/UNIDAD%203%20CINEMATICA/Cinematica%20DenavithHartenberg.pdf>