

PROYECTO INTEGRADOR DE COMPETENCIAS I, II, III:

TÍTULO:

Autor 1:	Autor 2:	Autor 3:
Firma:	Firma:	Firma:
Docentes encargados:		Fecha de Entrega:
Hippa R., Eguia L., Campero C., Díaz M.,		

1. Introducción

1.1. Planteamiento del problema

La enseñanza de la robótica manipuladora en contextos educativos (escuelas, UTU, liceos y cursos introductorios universitarios) enfrenta importantes limitaciones debido al alto costo de los equipos comerciales, los riesgos de seguridad que presentan y la escasa facilidad de modificación o reparación. Estas restricciones reducen la práctica real de manipulación, dificultan la integración de contenidos de mecánica, electrónica y control, y limitan la posibilidad de trasladar equipos a actividades extracurriculares o giras didácticas.

En este escenario surge la necesidad de un modelo de manipulador robótico accesible, adaptable y con un diseño pensado para fines didácticos. Si bien existen alternativas de código abierto, gran parte de ellas dependen de la impresión 3D, un método de fabricación que resulta lento y poco accesible para muchas instituciones educativas. Como alternativa, se propone el uso de MDF como material principal, aprovechando sus ventajas de bajo costo, disponibilidad y rapidez en la manufactura mediante corte láser o fresado CNC, lo que permite una producción más eficiente y replicable.

De este modo, se busca ofrecer un manipulador capaz de adaptarse a diversas aplicaciones y demostraciones, fomentando el aprendizaje en robótica y automatización desde etapas tempranas de formación. El objetivo final es inspirar a los estudiantes, acercándolos a los procesos industriales actuales y motivándolos a explorar el potencial de la tecnología en su desarrollo académico y profesional.

1.2. Diagrama de Ishikawa

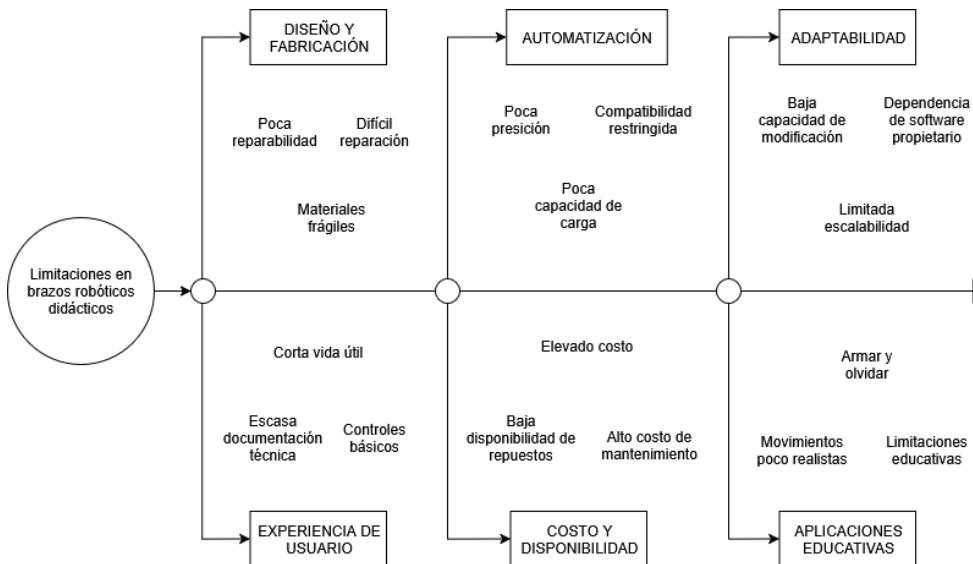


Figura 1: Diagrama de Ishikawa (Fuente: elaboración propia)

En el diagrama se identifican seis ramas principales que agrupan las limitaciones más comunes de los brazos robóticos didácticos disponibles en el mercado. Cada una de ellas aborda un conjunto de problemáticas específicas:

- Diseño y fabricación: engloba aspectos relacionados con la construcción del brazo, los materiales empleados y la facilidad de reparación o mantenimiento.

- Automatización: considera las limitaciones en la precisión, capacidad de carga, compatibilidad y posibilidades de integración con otros sistemas de control.
- Adaptabilidad: se refiere a la capacidad de modificar, escalar o personalizar el brazo, así como a la dependencia de software propietario que restringe su flexibilidad.
- Experiencia de usuario: abarca las dificultades que enfrentan los usuarios en el manejo del brazo, tales como controles limitados, documentación insuficiente y vida útil reducida.
- Costo y disponibilidad: contempla el precio de adquisición, el costo de mantenimiento y la dificultad para conseguir repuestos o componentes compatibles.
- Aplicaciones educativas: analiza las limitaciones de los kits en contextos formativos, como la escasa realismo de los movimientos y el alcance reducido de sus usos pedagógicos.

1.3. Solución propuesta

Un brazo robótico didáctico a escala de 4 GDL con efecto intercambiable: electroimán (para piezas ferromagnéticas) y garra (para piezas no magnéticas). Estructura paramétrica cortada en MDF (3.2–10 mm), tornillería estándar y electrónica de fácil reposición. Control con ESP32/ATmega328P, modos manual/automático, GUI en Python (Tkinter/PyQt), y documentación abierta para replicación.

1.4. Objetivo General

Diseñar, construir y validar un brazo robótico didáctico de 4 GDL, seguro, portable y de bajo costo, con efectores electroimán/garra intercambiables, capaz de ejecutar tareas básicas de pick & place en un volumen de trabajo de hasta $50 \times 50 \times 50$ cm.

1.5. Objetivos específicos

1. **Repetibilidad:** $\leq 3\text{--}5$ mm en el volumen útil (validado con 10 repeticiones por punto).
2. **Carga y alcance:** manipular ≤ 100 g a un alcance de 40 cm con tasa de éxito $\geq 90\%$ (10 intentos).
3. **Tiempo de ciclo:** $pick \rightarrow place \rightarrow$ retorno ≤ 3 s a 10–15 cm entre posiciones.
4. **Efecto intercambiable:** cambio imán/garra en ≤ 60 s sin herramientas especiales.
5. **Seguridad:** paro de emergencia, cableado protegido, tensión segura en zona de usuario; checklist previo a operación.
6. **Software:** GUI con lectura de posición, control ON/OFF del imán, modos manual y automático y cinemática inversa planar.

1.6. Obstáculos

A partir del alcance y de las decisiones técnicas, se identifican los siguientes obstáculos que pueden afectar cronograma, costo y calidad del prototipo:

- Mantener un costo *razonable y no excesivo* considerando servos, fuente, electrónica y materiales. *Mitigación:* priorizar compras esenciales, consolidar pedidos, alternativas locales y revisión de la BOM por etapas.

- Ajustes paramétricos para distintos espesores, transmisión por eslabones y tolerancias de corte. *Mitigación*: plantillas de agujeros unificadas, librería de piezas parametrizadas y pruebas de “cupón” antes del corte final.
- Variación de espesores de MDF (3.2–10 mm), alternativas en acrílico/metal y stock de tornillería. *Mitigación*: diseño con holguras controladas, insertos/espaciadores y piezas “shim” para compensar espesores.
- Acceso a componentes para reemplazo, desgaste en articulaciones y cableado. *Mitigación*: modularidad por subconjuntos, tornillería estándar M3, bujes/arandelas en puntos de fricción y canalización de cables.
- Alineación de ejes, juego mecánico y centrado previo de servos. *Mitigación*: guías paso a paso, marcas de referencia, útiles simples de alineación y checklist de calibración inicial.

2. Fundamento técnico-conceptual

2.1. Análisis de mercado

Se realiza un periodo de investigación donde se recopilan modelos ya existentes en el mercado actual para solventar la problemática proporcionada.

2.1.1. GrabCAD

GrabCAD es una plataforma comunitaria donde ingenieros y diseñadores comparten modelos 3D, ensamblajes y recursos CAD. Permite subir, buscar, previsualizar y descargar modelos en formatos comunes (p. ej. STEP/IGES, STL, SLDPR), organizar colecciones y discutir mejoras en comentarios. Suele incluir descripciones, imágenes renderizadas y, en algunos casos, archivos auxiliares (planos o BOM).

2.2. Inspiraciones

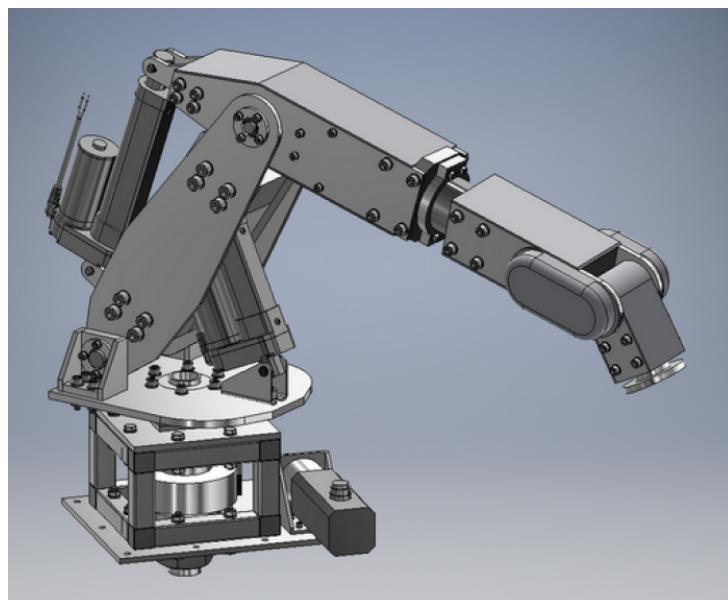


Figura 2: Modelo con actuadores lineales [1].

Inspiración inicial tomada de GrabCAD para un modelo con actuadores actuadores lineales. Se observa como se posicionarían los actuadores dentro del modelo para lograr una mejor distribución de masa.

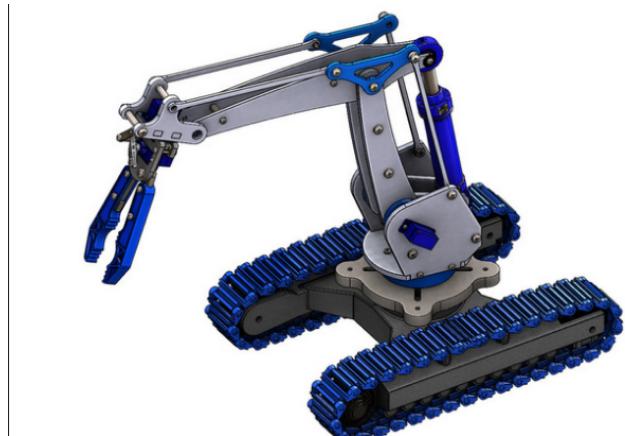


Figura 3: Modelo híbrido/hidráulico [2].

Modelo mixto con servomotores y actuadores lineales encontrado en GrabCAD, primera consideración para el uso de eslabones y articulaciones. En este modelo se aprecia la restricción del movimiento de la articulación final del manipulador.

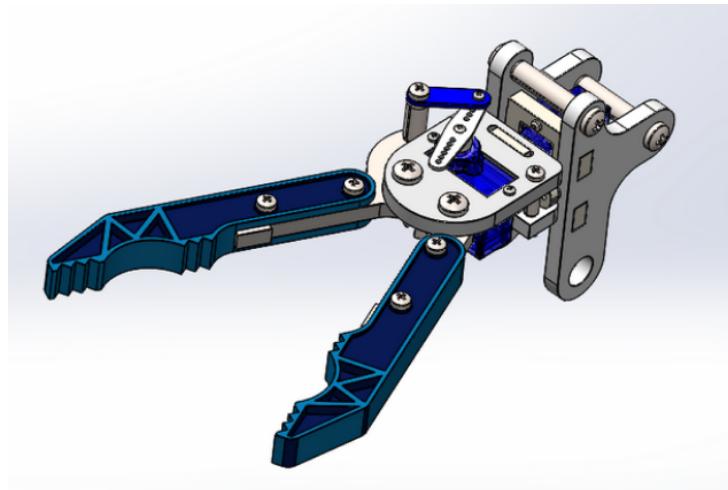


Figura 4: Manipulador por garra y servomotor [3].

Modelo aparte del manipulador con el servomotor sg90 y la garra. A partir de este modelo se considera el uso de un servomotor más pequeño para aprovechar que el manipulador no requiere tanta fuerza de agarre y delegar los servomotores más potentes mg996r a realizar el movimiento de las articulaciones.

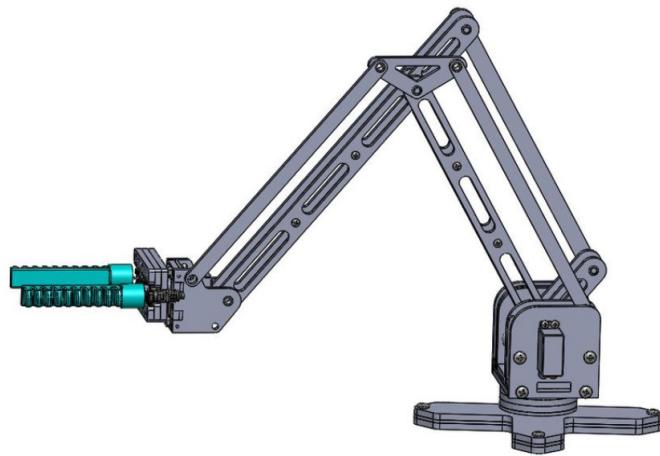


Figura 5: Sistema de eslabones [4].

Otra inspiración para implementar el uso de eslabones en el brazo robótico ya con el uso de servomotores mg996r (encontrado en GrabCAD)

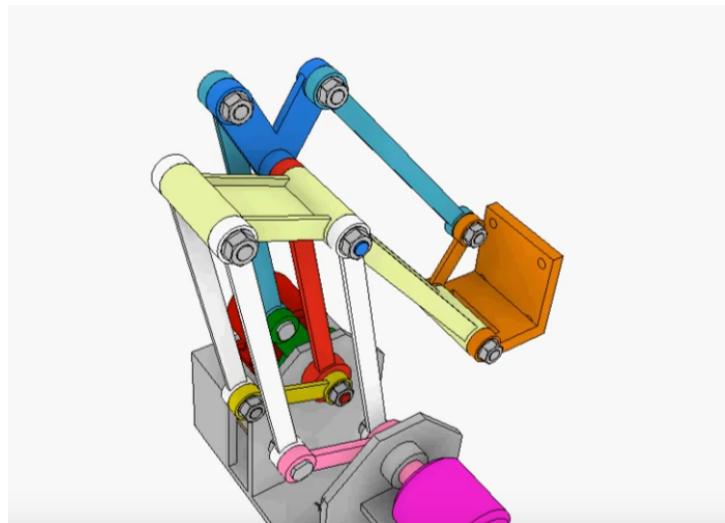


Figura 6: Sistema de eslabones con mayor libertad [5].

Una idea más general del posicionamiento de los eslabones proporcionado por el creador de contenido ‘thang010146’ en YouTube. Este modelo cuenta con el grado de libertad faltante en modelos anteriores

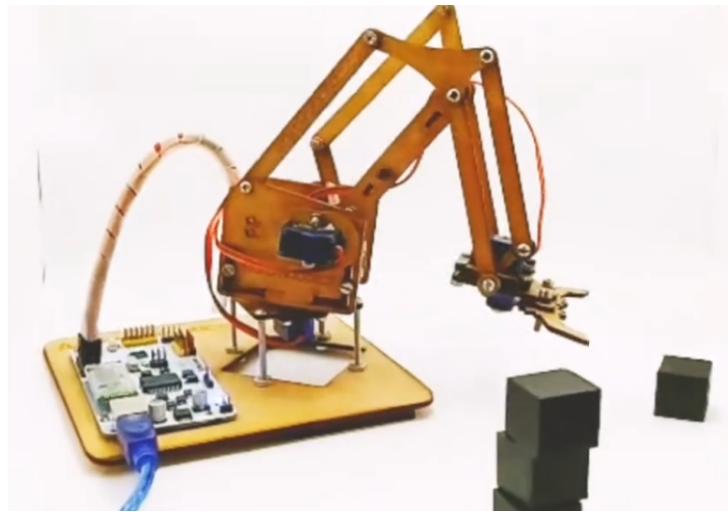


Figura 7: Modelo en MDF [6].

Implementación de un brazo robótico con especificaciones similares a las buscadas y haciendo uso de materiales como MDF y tornillos. Se descubre que el modelo pertenece a una empresa Mexicana llamada Robodacta, y que distribuyen este brazo como un kit de aprendizaje ensamblable.



Figura 8: Modelo similar en plástico [7].

Modelo muy similar al anterior, haciendo uso de materiales plásticos y tornillos, comercializado en Uruguay por Mercado Libre.



Figura 9: Controlador espejo con potenciómetros

Inspiración dedicada a la realización de un control ‘espejo’ para comandar el brazo articulado, haciendo uso de potenciómetros los cuales controlan el ángulo de cada articulación.

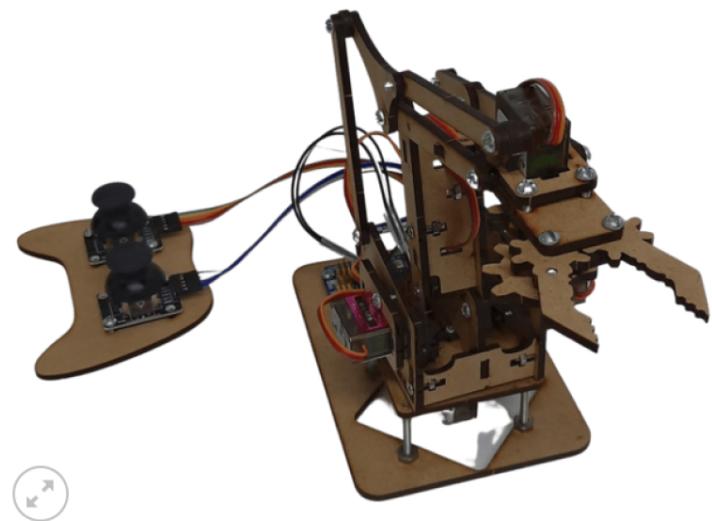


Figura 10: Control por joystick

Modelo original de Robodacta, el cual se encuentra publicado en su sitio web. Este cuenta con un control de joystick para comandar el brazo articulado.



Figura 11: Modelo impreso con control espejo

Modelo impreso de código libre por el creador de contenido ‘Build Some Stuff’ con un sistema de control espejo similar al mostrado anteriormente. Dispone de una serie de videos mostrando materiales, ensamblaje, software y uso del brazo articulado con su controlador. Muestra funcionalidades similares a las que se pretende implementar en el proyecto.

2.3. Soluciones consideradas

A partir del planteamiento del problema, se evaluaron tres alternativas tecnológicas para el accionamiento del brazo. A continuación se presentan de forma breve sus características, ventajas y limitaciones principales.

- **Servomotores (MG996R).** Proporcionan control directo por PWM, integración sencilla con microcontroladores y velocidad adecuada para demostraciones didácticas. En comparación con MG90 (insuficientes en par), los MG996R cubren el requerimiento de carga (hasta 100 g a 40 cm) con una repetibilidad aceptable. *Detractor principal:* es la alternativa más cara dentro de las consideradas; se estimó un costo de **4 servos por \$U 2600** (disponibles en línea), aunque mantiene baja la complejidad de diseño y puesta en marcha.
- **Actuadores lineales tornillo—tuerca (motor DC con reductora).** Ofrecen alta fuerza y buen costo por actuador, y a niveles educativos más avanzados pueden resultar más *didácticos* por la necesidad de instrumentación. Sin embargo, el mecanismo es más lento y menos preciso sin realimentación; requiere encoders o potenciómetros y finales de carrera para conocer el ángulo articular. Además, el diseño de eslabones y articulaciones se complica para alojar el husillo, y los mecanismos de codificación de posición son más propensos a *interferencias/ruido* y se convierten en otro posible punto de fallo. El juego mecánico (backlash) y la fricción pueden degradar la repetibilidad.
- **Actuadores lineales con asistencia hidráulica (jeringas).** Es la alternativa más compleja: añade una capa de transmisión hidráulica sobre el actuador lineal. A cambio, ofrece una *relación fuerza—peso* muy favorable (bajo peso en el extremo móvil frente a la fuerza aplicable). No obstante, introduce menor velocidad, histéresis, necesidad de purgado/cebado, riesgo de fugas y mayor mantenimiento; el control (válvulas, amortiguación) eleva la complejidad de ingeniería. Al igual que en la opción de tornillo—tuerca, la posición debe codificarse (p.ej., potenciómetros/encoders lineales), añadiendo sensores y puntos de fallo adicionales.

Criterio	Peso	Servo	Actuador	Hidráulico
Peso	0.10	4	3	3
Velocidad	0.20	4	2	1
Simplicidad	0.30	5	2	1
Precio	0.20	4	4	4
Fuerza	0.15	3	4	5
Libertad	0.05	5	3	3
Total ponderado		4.20	2.85	2.50

Cuadro 1: Matriz de selección de actuadores (1 = peor, 5 = mejor). Totales calculados con los pesos indicados.

Decisión técnica

Se implementa la solución con **servomotores MG996R** por simplicidad de control, velocidad adecuada y disponibilidad, manteniendo el costo dentro del objetivo y una fuerza suficiente para las tareas de *pick & place*. No obstante, se adopta la filosofía de diseño observada en las alternativas de actuadores lineales e hidráulicos: *concentrar masa cerca de los ejes de rotación* y *transmitir el movimiento mediante eslabones* hasta las articulaciones distales. Con ello se reduce el brazo de palanca efectivo sobre cada servo, disminuye el par exigido y se baja la inercia en el extremo móvil, conservando parte de los beneficios de aquellas soluciones sin incorporar su complejidad de sensado y control.

Lineamientos de diseño adoptados

- Ubicar los actuadores lo más cerca posible de los ejes principales o de la base para minimizar el par requerido.
- Emplear eslabones/bielas para accionar articulaciones alejadas, manteniendo baja la masa en el efecto.
- Limitar configuraciones que generen grandes brazos de palanca y añadir topes/curvas de velocidad para proteger a los servos.
- Mantener la *modularidad* e *intercambiabilidad* del efecto (electroimán/garra) y el diseño paramétrico para distintos espesores de MDF.

En síntesis, el resultado es un diseño híbrido control directo con servos potentes y una arquitectura mecánica inspirada en sistemas lineales/hidráulicos que traslada masa hacia la estructura fija. Esto simplifica la implementación y el mantenimiento, a la vez que mejora la eficiencia mecánica y la repetibilidad del prototipo.

3. Alcance

3.1. Alcance del proyecto

El proyecto comprende el diseño, construcción y validación de un brazo robótico didáctico a escala. La arquitectura mecánica contempla cuatro grados de libertad (sin contar el efecto), con una estructura paramétrica diseñada para corte láser en MDF de espesores entre 3.2 y 10 mm, pero adaptable también a materiales como acrílico o metal. La base será fija y deberá estar contenida dentro de un volumen de $50 \times 50 \times 50$ cm.

El sistema contará con efectores intercambiables, entre ellos un electroimán para la manipulación de piezas ferromagnéticas y una garra mecánica para piezas no magnéticas. Ambos estarán diseñados con un mecanismo de cambio rápido que permita alternar entre uno y otro sin dificultad.

La actuación del brazo se logrará mediante servomotores MG996R, con uno por cada articulación principal. Para optimizar el rendimiento, se implementará una transmisión por eslabones que mantenga la mayor parte de la masa cercana a los ejes de giro.

En cuanto al control y la electrónica, se utilizará un microcontrolador (ESP32 o ATmega328P), un driver MOSFET como el IRFZ44N (o equivalente) para gobernar el electroimán, así como finales de carrera para homing y elementos de señalización visual y sonora mediante LEDs y un buzzer de estado.

El software incluirá un firmware desarrollado en C/C++ y una interfaz gráfica en Python, implementada en Tkinter o PyQt. Esta ofrecerá un modo manual y un modo automático, además de control ON/OFF del electroimán y una cinemática inversa planar básica para la manipulación de piezas.

La alimentación del sistema se resolverá con una fuente capaz de abastecer tanto la lógica como la potencia, incorporando convertidores adecuados para los servos y el electroimán.

Finalmente, en el componente de documentación y docencia, se elaborará un manual de armado, una guía docente y un conjunto mínimo de cinco prácticas de laboratorio orientadas a la enseñanza y experimentación con el brazo robótico.

3.2. Fuera de alcance

Se considera fuera de alcance una versión implementada con actuadores lineales o hidráulicos (solo se documentan como alternativas). Además, incorporar algún tipo de visión artificial o seguimiento por cámara con planificación avanzada de trayectorias en 3D. Finalmente, se considera fuera de alcance la calibración metrológica de alta precisión o certificaciones industriales.

3.3. Criterios de aceptación

El dispositivo debe ser capaz de ejecutar trayectorias punto a punto tanto en modo manual como en modo automático. Asimismo, deberá alcanzar una tasa de éxito superior al 90 % en las tareas de agarre y manipulación de objetos, garantizando un desempeño confiable durante su operación.

De igual forma, contará con una rutina de referencia operativa que asegure la correcta inicialización del sistema, un mecanismo de paro de emergencia y límites mecánicos verificados para preservar la seguridad del equipo y del entorno.

Finalmente, el proyecto se entregará con un prototipo completamente ensamblado, acompañado del firmware correspondiente, la interfaz gráfica de usuario, un manual de usuario detallado y una guía docente que incluya cinco prácticas evaluables para su aplicación en el ámbito académico.

4. Metodología

4.1. Materiales

5. Resultados

6. Conclusiones

Referencias

- [1] GrabCAD, “6dof robot arm,” 2021. [Online]. Available: <https://grabcad.com/library/6dof-robot-arm-1>
- [2] ——, “Robotic arm 216,” 2021. [Online]. Available: <https://grabcad.com/library/robotic-arm-216>
- [3] ——, “Robotic gripper 17,” 2021. [Online]. Available: <https://grabcad.com/library/robotic-gripper-17>
- [4] ——, “Sea reach: A scalable deep sea robotic arm,” 2021. [Online]. Available: <https://grabcad.com/library/sea-reach-a-scalable-deep-sea-robotic-arm-1>
- [5] Thang010146, “Robot arm link,” 2021. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=EnAk36jC7bw>
- [6] Robodacta, “Robot arm mdf model,” 2021. [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=4o_VI7fw6D8
- [7] M. Libre, “Kit robot brazo arduino,” 2021. [Online]. Available: <https://www.mercadolibre.com.uy/kit-robot-brazo--arduino-con-garra-electronica-manual-x-pc/>

7. Apéndice