

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 robótica está cada vez más involucrada en el mercado laboral, lo que hace que la educación, en muchos casos, se quede corta para cubrir esta demanda. Por ello, se busca fomentar la inclusión de la robótica en diferentes niveles educativos: inspirando a los más jóvenes, introduciendo a los estudiantes en educación secundaria, y permitiendo que los más avanzados puedan profundizar en el área.

En este contexto, surge la necesidad de un modelo de brazo robótico accesible, fácil de ensamblar, de bajo costo y con un diseño sencillo que sea adecuado para usuarios inexpertos o jóvenes. Este modelo debe ser, además, duradero, mantenible y fácil de reparar, para garantizar su uso a largo plazo. Adicionalmente, se plantea que el manipulador sea modular, con la posibilidad de modificación y expansión, permitiendo a los estudiantes más avanzados involucrarse en proyectos más complejos y adaptarlos a otros sistemas o tecnologías.

La propuesta de utilizar MDF como material principal, aprovechando sus ventajas de bajo costo y facilidad de fabricación mediante corte láser o fresado CNC, busca superar las limitaciones que presentan los métodos de fabricación más lentos y costosos como la impresión 3D. De esta forma, se logra una producción más eficiente y replicable, accesible para más instituciones educativas.

El objetivo final es ofrecer un manipulador robótico que pueda adaptarse a diversas aplicaciones y demostraciones, fomentando el aprendizaje en robótica y automatización desde etapas tempranas de formación, inspirando a los estudiantes y acercándolos a los procesos industriales actuales.

1.2. Diagrama de Ishikawa

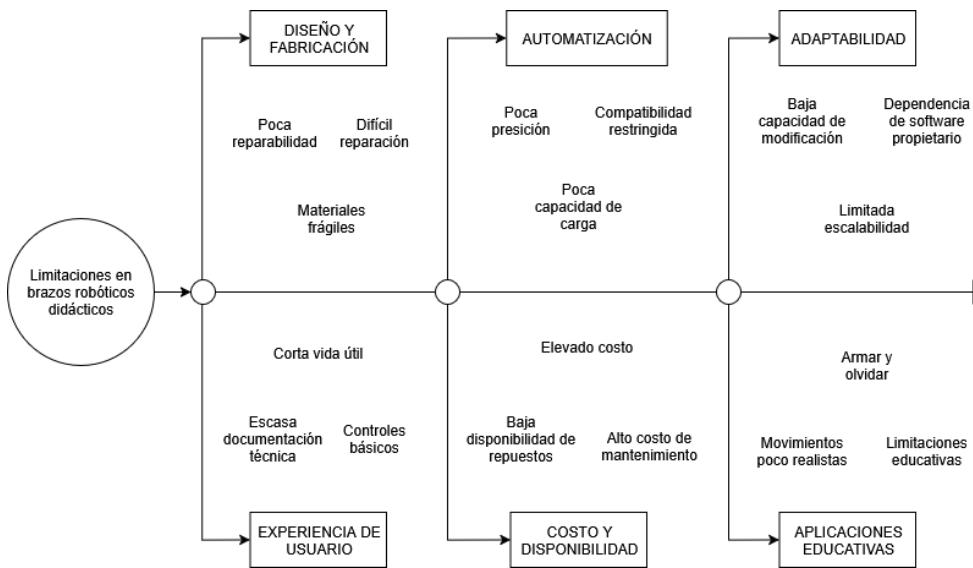


Figura 1: Diagrama de Ishikawa (Fuente: elaboración propia)

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 50×50×50 cm.

1.5. Objetivos específicos

1. **Repetibilidad:** $\leq 3\text{--}5 \text{ mm}$ en el volumen útil (validado con 10 repeticiones por punto).
2. **Carga y alcance:** manipular $\leq 100 \text{ g}$ a un alcance de 40 cm con tasa de éxito $\geq 90\%$ (10 intentos).
3. **Tiempo de ciclo:** $\text{pick} \rightarrow \text{place} \rightarrow \text{retorno} \leq 3 \text{ s}$ a 10–15 cm entre posiciones.
4. **Efecto intercambiable:** cambio imán/garra en $\leq 60 \text{ s}$ 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

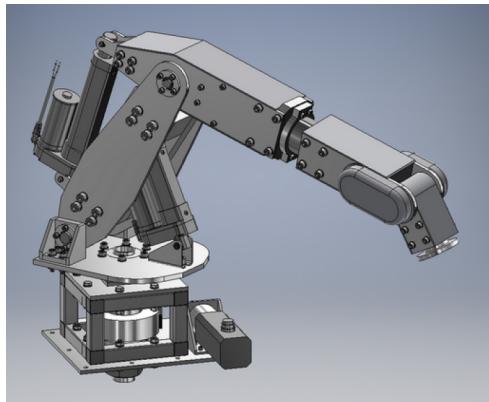


Figura 2: Modelo con actuadores lineales [1].

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.

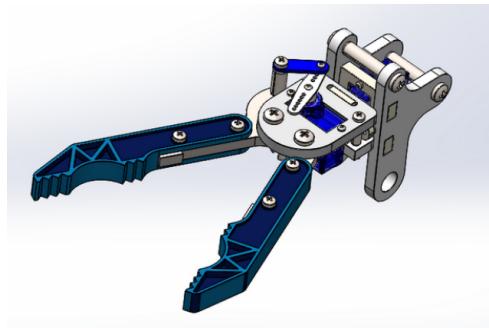


Figura 4: Manipulador por garra y servomotor [3].

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 3: Modelo híbrido/hidráulico [2].

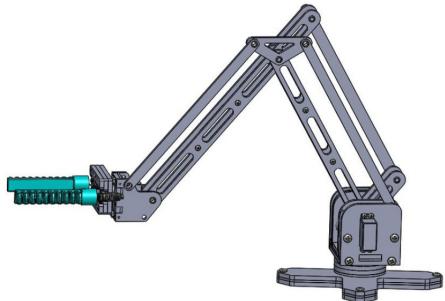


Figura 5: Sistema de eslabones [4].

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.

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

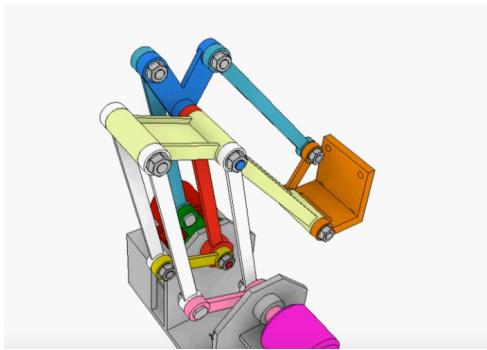


Figura 6: Sistema de eslabones con mayor libertad [5].



Figura 8: Modelo similar en plástico [7].

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

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

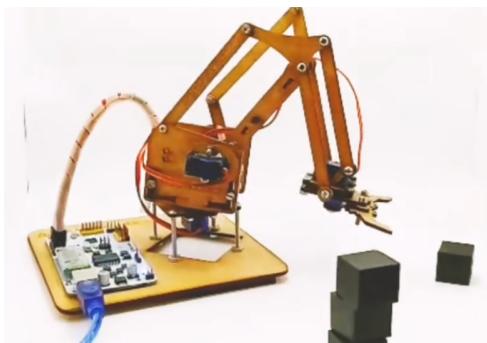


Figura 7: Modelo en MDF [6].

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 Mejicana llamada Robodacta, y que distribuyen este brazo como un kit de aprendizaje ensamblable.



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.

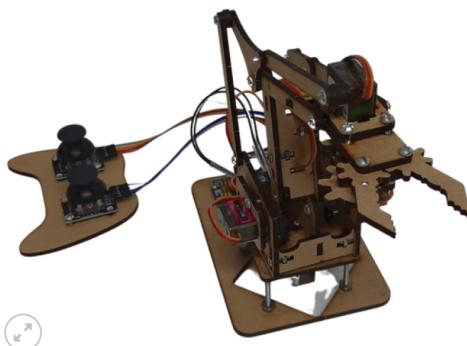


Figura 10: Control por joystick

Modelo original de Robodacta, el cual se encuentra publicado en su sitio web. Este cuen-

ta 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. Diseños considerados

Todas las soluciones involucran un brazo robótico de 4 articulaciones controladas por un Arduino. Las variaciones en los modelos se pueden clasificar en como se manejan las articulaciones y los actuadores utilizados. Las clasificaciones son:

- **Servomotores MG996R.** Un modelado directo y más convencional del brazo robótico, utilizando un servomotor por articulación y colocado directamente en la misma. Apuntando el diseño a la simplicidad, en fácil ensamblado y la reparabilidad, utilizando una combinación entre corte láser en de mdf (en mayor medida) e impresión 3d.
- **Servomotores MG996R con eslabones.** Modelo implementado con servomotores pero optimizando la distribución de peso alojando a los mismos lo más cerca del eje de rotación de cada articulación y transmitiendo el movimiento mediante eslabones y palancas, buscando mejorar la eficiencia mecánica. El diseño se vuelve más vistoso y potencialmente útil para instruir en el uso de eslabones y mecanismos simples, sin embargo aumenta la complejidad del diseño llevando mayor cantidad de partes móviles, y disminuyendo la facilidad de ensamble y reparación.
- **Actuadores lineales tornillo—tuerca (motor DC con reductora).** Ofrecen alta fuerza y buen costo por actuador, y pueden estar enfocados a niveles educativos superiores por la implementación de controles PID con sensado de ángulo y calibración manual, entre otras cosas. Sin embargo, el mecanismo es más lento y menos preciso; requiere encoders o potenciómetros y finales de carrera para conocer el ángulo articular. Además, el diseño de eslabones y articulaciones se torna más complejo, 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, además del desgaste de los potenciómetros pueden degradar la repetibilidad.
- **Actuadores lineales con asistencia hidráulica (jeringas).** Siendo la alternativa más atractiva, pero también la 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, necesidad de purgado/cebado, riesgo de fugas y mayor mantenimiento; el control (válvulas, amortiguación) eleva la complejidad significativamente. Al igual que en la opción de tornillo—tuerca, la posición debe codificarse (p. ej., potenciómetros/encoders lineales), añadiendo potenciales puntos de fallo.

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