

# Jornadas de Automática

## Plataforma educativa y de investigación con pinza paralela modular

Espinoza, G. , Fernandez, N. , Mora, A. , Prados, A. , Moreno, L. , Barber, R. 

Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Carlos III de Madrid, Av. de la Universidad 30, 28911 Leganés, España.

**To cite this article:** Espinoza, G., Fernandez, N., Mora, A., Prados, A., Moreno, L., Barber, R. 2024. Educational and research platform with a modular parallel jaw gripper. *Jornadas de Automática*, 45. <https://doi.org/>

### Resumen

En los últimos años, el desarrollo de nuevas tecnologías continúa motivando la integración de la robótica en la educación. Sin embargo, la complejidad y conocimientos requeridos para comprender los sistemas robóticos, llevan a los estudiantes a recurrir a kits de robótica educativos limitados. Este artículo presenta una plataforma de aprendizaje para que estudiantes de cualquier nivel educativo se familiaricen con la manipulación, la forma más habitual en la que los robots interactúan con su entorno. Esta se compone de una pinza paralela y una interfaz gráfica para facilitar su actuación y proporcionar información sobre el agarre. Esto permite a los estudiantes comprender cómo realizar agarres seguros mediante la integración de sensores. Además, la plataforma es integrable en ROS (Robot Operating System) con ADAM, un robot de investigación diseñado para asistir a personas mayores. El diseño de la pinza cuenta con un control simple, conectividad WiFi y sistema de alimentación propio que le permiten ser modular, replicable y económico.

**Palabras clave:** Pinza paralela, Interfaz gráfica de usuario, Robótica embebida, Integración de sensores y percepción, Agarre, Aplicación de principios de mecatrónica, Robots móviles, Robótica educativa

### Educational and research platform with a modular parallel jaw gripper

#### Abstract

In recent years, the development of new technologies continues to motivate the integration of robotics in education. However, the complexity and knowledge required to understand robotic systems leads students to resort to limited educational robotics kits. This article presents an educational platform for students from any age group to become familiar with manipulation, the most common way in which robots interact with their surroundings. It consists of a parallel gripper and a graphical user interface to facilitate its actuation and provide information about the grasp. This allows students to understand how to perform safe gripping by integrating sensors. Furthermore, the environment can be integrated using ROS (Robot Operating System) with ADAM, a research robot designed to assist elderly people. The gripper features simple control, WiFi connectivity and its own power supply system, allowing it to be modular, replicable and cost-effective.

**Keywords:** Parallel jaw gripper, Graphic user interface, Embedded robotics, Perception and sensing, Grasping, Application of mechatronic principles, Mobile robots, Education in robotics

## 1. Introducción

En la última década, los diversos beneficios que la formación en robótica brinda a jóvenes estudiantes han despertado el interés de los educadores e investigadores en integrar la

robótica en los programas educativos. Actualmente, a pesar de no recibir tanta atención como las nuevas herramientas de inteligencia artificial (IA) como ChatGPT, basadas en transformadores generativos pre-entrenados (GPT), que han generado opiniones divididas debido al posible uso indebido (Grassi-

ni, 2023), existe una opinión consensuada sobre los beneficios de incorporar la robótica a la educación. Diferentes artículos destacan cómo la robótica en la educación ayuda a mejorar múltiples habilidades cognitivas, la creatividad y el interés sobre disciplinas científicas, a la vez que propone actividades en las que los profesores pueden interactuar con los alumnos activamente (Jung and Won, 2018; López-Belmonte et al., 2021; Johal, 2020).

Sin embargo, hasta el momento la robótica no se ha asentado de forma clara como parte del currículum escolar. En muchos casos, el primer acercamiento que tienen los jóvenes estudiantes a la robótica ocurre a través de plataformas interactivas como el robot NAO (Younis et al., 2023), o experimentando con brazos robóticos fácilmente teleoperables como en el trabajo de Koenig et al. (2021). No obstante, en estos casos la robótica constituye un medio a través del cual se realiza el aprendizaje en otras materias, mientras que la educación en torno a la robótica en sí misma queda limitada principalmente a kits de robótica básicos, adaptados al conocimiento del estudiante para enseñar conceptos elementales (López-Belmonte et al., 2021). La herramienta basada en ROS (Robot Operating System) de Cañas et al. (2020) también demuestra la necesidad de tener especial cuidado al diseñar plataformas de aprendizaje, para evitar que una excesiva complejidad abrume a los estudiantes. Siguiendo la misma tendencia, otros investigadores también han sugerido un acercamiento virtual a través de simuladores, como Gazebo y V-REP (CoppeliaSim) entre otros, para afrontar el coste de adquisición de robots reales (Cañas et al., 2020; Tselegkaridis and Sapounidis, 2021).

Por otro lado, diferentes trabajos han diseñado e implementado plataformas de bajo coste, más accesibles que los robots comerciales, para hacer que aprender robótica resulte una actividad práctica. De este modo, el trabajo de Achilli et al. (2022) presenta una pinza blanda subactuada e impresa en 3D para agarrar objetos pequeños, que dio como resultado una respuesta positiva de los estudiantes hacia la experiencia de aprendizaje. Además, Cocota et al. (2012) y Telegenov et al. (2015) muestran otros ejemplos de manipuladores robóticos de bajo coste con pinzas personalizadas que han sido utilizadas para enseñar conocimientos elementales de cinemática, a la vez que sirven como plataformas de investigación.

El objetivo de este trabajo consiste en implementar una nueva plataforma de aprendizaje compuesta por el diseño de una pinza paralela, apodada (Duck Gripper) y una interfaz gráfica de usuario (GUI) para que estudiantes de cualquier nivel educativo puedan familiarizarse con la manipulación en robots, y comprender cómo los robots interactúan con su entorno. A nuestro mejor saber y parecer, este entorno presenta varias características que lo diferencian de los trabajos relacionados:

- **Modularidad.** El diseño de la pinza es completamente modular al ser físicamente independiente de cualquier brazo robótico gracias a un control inalámbrico mediante ROS a través de red WiFi y a una fuente de alimentación propia integrada en la pinza. Además, todos sus componentes son fácilmente reemplazables e intercambiables permitiendo al usuario adaptar el modelo a sus necesidades.
- **Sensorización.** En comparación con los diseños de bajo coste antes mencionados, el Duck Gripper integra sensores de fuerza resistivos para medir directamente la fuerza aplicada sobre los objetos, lo que permite a su vez que los estudiantes comprendan la importancia de la sensorización en la robótica.
- **Actuación sencilla.** La pinza se puede accionar fácilmente a través una interfaz gráfica, no requiriendo extensos conocimientos en programación para el accionamiento de la pinza.
- **Adecuación para la investigación en robótica asistencial.** La pinza es completamente compatible con el ADAM, un robot manipulador ambidiestro autónomo diseñado para aliviar las dificultades a las que las personas mayores se enfrentan al realizar tareas físicas, contribuyendo al cuidado doméstico de las personas mayores (Barber et al., 2022; Mora et al., 2024). De esta forma, esta propuesta permite a los estudiantes conocer de primera mano la importancia de la manipulación en una aplicación real de la robótica asistencial desarrollada actualmente en la Universidad Carlos III de Madrid.

Con respecto a la inicialmente presentada en (Espinoza et al., 2024), se amplía esta propuesta incluyendo un diseño de una placa de circuito impreso (PCB), que se invita a los estudiantes más avanzados a fabricar, se incorpora una segunda pinza, dotando así al robot de la capacidad de manipular con ambos brazos, y se integra dentro del sistema de comunicación en ROS y de la GUI.

## 2. Diseño de la pinza

En esta sección se proporciona una descripción detallada del diseño del hardware y software de la pinza Duck Gripper. Al igual que otras pinzas paralelas eléctricas, consta de un actuador que, a través de un mecanismo de transmisión, genera el movimiento lineal de las paletas para abrir y cerrar la pinza sobre un objeto. Este tipo de pinza también permite un diseño compacto, ligero y sencillo en comparación con otro tipo de pinzas y manos robóticas, logrando al mismo tiempo un rendimiento adecuado.

Por otra parte, tanto el hardware como el software deben satisfacer los requisitos particulares del usuario y las restricciones del entorno doméstico. Adicionalmente, la pinza está diseñada considerando las limitaciones del robot ADAM en cuanto al peso total que puede tener la pinza, la carga máxima que el manipulador es capaz de soportar, y las dimensiones máximas para evitar autocolisiones con el brazo UR3 de Universal Robots sobre el que va montado la Duck Gripper. Esto se consigue mediante un modelo que integra el actuador, la electrónica de control y la fuente de alimentación de forma compacta en el cuerpo de la pinza.

### 2.1. Diseño del hardware

El hardware de la pinza comprende de todos los componentes electrónicos que accionan y comunican la pinza, el mecanismo que transmite el movimiento a las paletas y el resto de componentes estructurales y complementos.

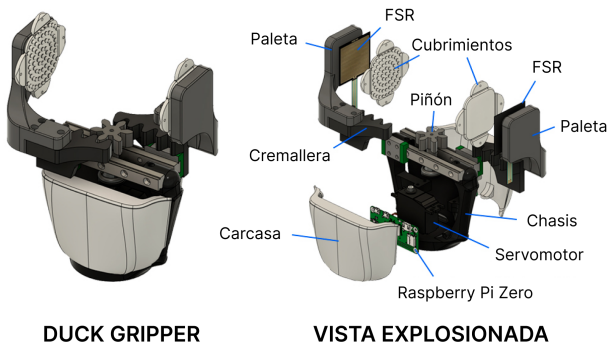


Figura 1: Modelo 3D de la pinza Duck Gripper y vista explosionada con los componentes principales.

La Figura 1 muestra una vista general del ensamblaje de la pinza, junto con una vista explosionada, con los componentes principales marcados. El cuerpo de la pinza está compuesto por un chasis sobre el que se montan los componentes electrónicos, el actuador y la batería (en la parte posterior), protegidos por un par de carcasas en las caras frontal y posterior. En la parte superior, sobre el cuerpo de la pinza, se encuentra el mecanismo de piñón y cremallera, que transforma el movimiento giratorio del eje del actuador en un movimiento lineal de las paletas. Estos se deslizan sobre rieles, montados sobre el chasis, que los guían su movimiento.

El actuador que acciona el mecanismo es un servomotor modelo FS5115M-FB con retroalimentación de FEETECH. Se trata de un servomotor convencional ligero de alto par controlado mediante una señal PWM (*Pulse Width Modulation*). Esta señal de control se envía desde una placa Raspberry Pi Zero 2W con módulo WiFi integrado que actúa a modo de cerebro en la pinza, leyendo y procesando la información obtenida por los sensores para actuando debidamente el servomotor, a la vez que comunica la pinza al robot ADAM. Además, es importante recibir información de la fuerza aplicada sobre los objetos que se manipulan, evitando así dañarlos o aumentando la fuerza para garantizar un agarre seguro. Por esta razón, se instala un sensor de fuerza resistivo (FSR, por sus siglas en inglés) de forma cuadrada de 4 cm en cada paleta, que permite leer la fuerza sobre el mismo a partir de la diferencia de voltaje entre sus terminales. Estos FSR están protegidos por cubrimientos para aumentar la fricción con la superficie del objeto. Todo el sistema electrónico, mostrado en el esquema de la Figura 2, está alimentado por una batería LiPo que, por medio de un regulador de voltaje, proporciona 5 V y 2,2 A de corriente máxima a la pinza, lo que se traduce en una duración de la batería mínimo de 2 horas en un uso intensivo, y una duración máxima de 9 horas en reposo.

El diseño final de la pinza tiene unas dimensiones de 180 mm de altura total y 118 mm medidos en el cuerpo. Cuando está abierta, la pinza tiene un ancho de 148 mm y el espacio libre mínimo entre las paletas es de 35 mm (una carrera por paleta de 41 mm). Estas dimensiones son suficientes para evitar autocolisiones con el propio brazo del robot durante la manipulación, incluso cuando la pinza está completamente abierta, y en cualquier ángulo del efector final. Por último, la fabricación de las piezas mediante impresión 3D permite reducir el peso total de la pinza a 0,49 kg.

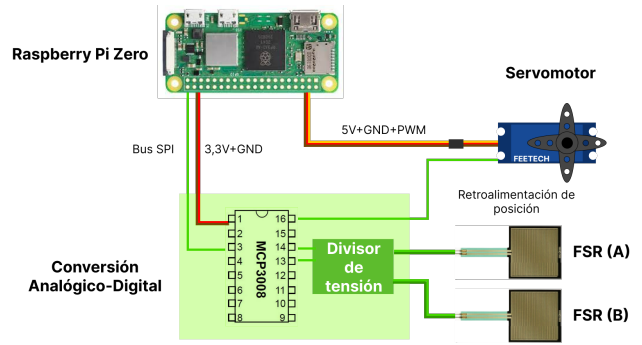


Figura 2: Esquema de la electrónica embebida en la pinza Duck Gripper, excluyendo la fuente de alimentación.

### 2.2. Diseño de PCB

Elaborado el diseño de la electrónica, es necesario asegurar la conectividad del cableado y la buena transmisión de las señales, al mismo tiempo que se implementa un circuito compacto que permita reducir el tamaño de la pinza. Por ello, se plantea el diseño de una PCB que agrupe los elementos que permiten adaptar las señales de los sensores mediante la conversión analógico-digital (ADC) de la Figura 2. Con ello, se invita a los estudiantes de Ingeniería a poner en práctica los conocimientos sobre instrumentación electrónica de adaptación de señales y sobre diseño y fabricación de PCBs mejorando el diseño detallado a continuación o fabricando la placa mostrada.

En primer lugar, se elabora un esquema del circuito, que es posteriormente exportado, haciendo uso de las herramientas OrCAD, al editor del *layout* de la PCB. La Figura 3 muestra un ejemplo de diseño final de la PCB con los siguientes elementos: un conector J1 para alimentación de 3,3 V y tierra (GND); un conector J2 para los sensores (terminales de FSR y retroalimentación de servo); un conector J3 para el bus SPI; resistencias R1 y R2 para los divisores de voltaje; condensador C1 para el desacople de la alimentación; y el microchip MCP3008 de ADC. Estos elementos se disponen de manera eficiente, permitiendo acortar la distancia de las pistas y el tamaño de la placa, y siguiendo las recomendaciones de los fabricantes y la buenas prácticas recogidas bajo la norma IPC-2221.

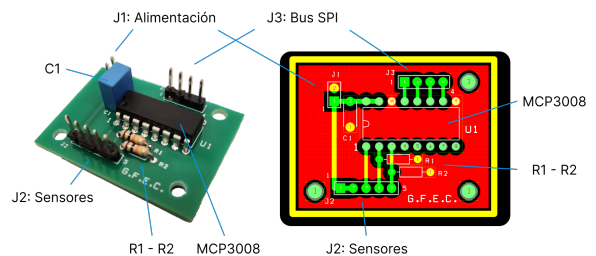


Figura 3: Diseño de PCB con los componentes electrónicos de adaptación de señal. Placa fabricada (izquierda) y diseño de layout (derecha).

Como se muestra en el diseño final de la Figura 3, la PCB está compuesta de una capa superior de enrutado sobre un plano de masa que conecta las tierras del circuito, dejando el espacio necesario con las perforaciones sobre las que se insertarán los pines de los componentes y fijaciones de la placa. Se añaden en ambas caras máscaras de soldadura y serigrafía.

### 2.3. Diseño del software con ROS

El robot ADAM cuenta diferentes subsistemas como la Base RB-1 (Robotnik) para el desplazamiento, un módulo de manipulación para el control de los brazos o el módulo de visión para la percepción del entorno. Estos subsistemas se comunican entre sí utilizando el entorno ROS, asignando nodos (*ROS nodes*) para cada subsistema, que envían mensajes sobre canales (*ROS topics*). Para integrar una pinza en el robot, se crea un nodo *GripperNode*, asignado a la misma y ejecutado en la Raspberry Pi, que se encarga de actuar sobre el servomotor, ajustando la señal PWM para cerrar las paletas, y publica mensajes indicando un cambio de estado entre ((objeto agarrado)) y ((objeto soltado)). Este cambio es definido por un umbral de fuerza medida por la caída de voltaje en los FSR, que aumenta con la presión del objeto sobre ellos. Así, el movimiento de cierre de las paletas se detiene cuando la fuerza medida por los sensores supera el umbral ( $\frac{V_{FSR_A} + V_{FSR_B}}{2} > V_{umb}$ ).

El proceso de agarre a través de ROS comienza con el comando de apertura y cierre enviado como mensaje booleano por el nodo correspondiente dentro del módulo de manipulación del robot (*RobotNode*), que es recibido por la pinza a través del *topic* al que está suscrito su nodo. Una vez que se agarra el objeto, la pinza devuelve otro mensaje booleano para indicar que se ha realizado un agarre seguro y el robot puede continuar con su tarea de manipulación. Adicionalmente, el movimiento de las paletas es bloqueado en caso de pérdida de comunicación con el robot, que se detecta solicitando un comando de apertura y cierre a una frecuencia de 1 Hz y comprobando el último mensaje recibido. De esta manera, se previene que la pinza aplique mayor fuerza al objeto a modo de medida de seguridad, permitiendo retirarlo sin riesgos.

Replicando la lógica de control en la segunda pinza se obtiene el esquema de comunicación entre el robot y las pinzas se muestra en la Figura 4. En el sistema propuesto, el ADAM se comunica de manera independiente con cada pinza derecha e izquierda. Finalmente, la interfaz gráfica debe ser integrado con el resto de módulos para controlar el cierre de las pinzas. Dado a que existen múltiples implementaciones posibles, el esquema de la Figura 4 muestra de forma general el ejemplo de comunicación desarrollado para la GUI presentada en la Sección 3. Esta GUI recibe directamente información de los sensores de ambas pinzas y comunica al robot las ordenes de apertura y cierre. Se invita a los alumnos a plantear grafos alternativos que puedan hacer la comunicación más eficiente.

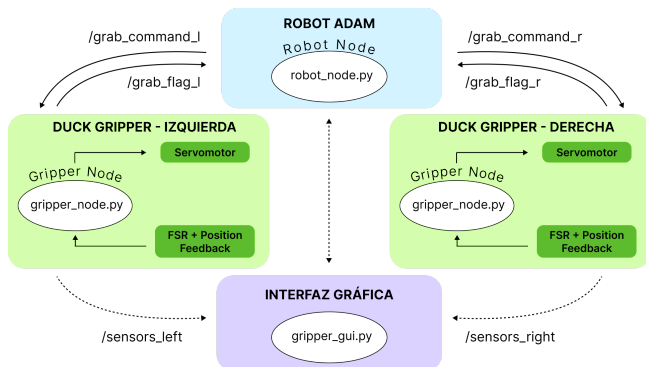


Figura 4: Esquema de comunicación entre el robot ADAM (Robot Node), las pinzas Duck Gripper (Gripper Node) y la GUI en ROS.

### 3. Interfaz gráfica de usuario

Durante todo el proceso de diseño e implementación de la pinza, la conexión al sistema operativo instalado en la placa Raspberry Pi se realiza a través de comunicaciones SSH, un procedimiento conveniente para probar y depurar el funcionamiento de la pinza y verificar que la comunicación establecida con el robot es correcta. Sin embargo, una vez la pinza está terminada y lista para usar, su actuación y la lectura de los sensores por medio de comandos a través de terminal dificulta el trabajo y requiere que el usuario tenga ciertos conocimientos técnicos. Para resolver estos inconvenientes se implementa la interfaz gráfica mostrada en la Figura 5, que reemplaza los comandos con botones e indicadores que permiten al usuario interactuar de forma fácil e intuitiva con la pinza.

La GUI se ejecuta como un nodo en ROS que se comunica con los nodos de la pinza y del robot, como se explicaba previamente en la sección anterior, y abre una ventana con distintos elementos. En la parte superior, junto al título, se encuentra el botón para iniciar y finalizar el nodo del robot que controla la pinza. Una vez inicializado, se habilita el control de las pinzas derecha e izquierda en la parte central. Para cada pinza, en la parte central existe un botón de encendido, un botón para la apertura y cierre, habilitado cuando la pinza está encendida, y un indicador del estado actual de la pinza (apagada, cerrando, abriendo u objeto agarrado). Finalmente, en la parte inferior de la ventana se los indicadores para visualizar fácilmente la fuerza que se aplica en cada paleta de cada pinza.

Por lo tanto, esta GUI permite a usuarios inexpertos operar la pinza de forma remota y familiarizarse rápidamente con las funciones del Duck Gripper. Los colores de la interfaz y la simplicidad de los indicadores facilitan que los estudiantes más jóvenes comprendan lo que ((siente)) el robot. Además, los investigadores pueden utilizar la interfaz gráfica para recuperar información en tiempo real de los sensores a la hora de probar algoritmos de manipulación en el robot y para facilitar el manejo de errores.



Figura 5: Interfaz gráfica de usuario para el uso de las pinzas Duck Gripper. Al cerrar la garra izquierda sobre un objeto la interfaz muestra la retroalimentación de los sensores.

### 4. Experimentos y resultados

A continuación se muestran una serie de pruebas experimentales que en conjunto tienen el objetivo de estudiar la viabilidad del entorno de aprendizaje.



#### 4.1. Desempeño de agarre

El rendimiento y la versatilidad del diseño de pinza se prueban en varios objetos cotidianos de diferentes tamaños, propiedades mecánicas y peso, como por ejemplo botellas de agua, pelotas antiestrés, cajas, frutas y huevos. En cada prueba, una pinza realiza sobre el objeto una secuencia de seis movimientos que imitan acciones en aplicaciones reales en las que se deben agarrar y desplazar objetos (Figura 6). Al mismo tiempo, se prueba un conjunto de distintos umbrales de fuerza, medidos como voltajes, que aumentan la fuerza de agarre.

Se realizan series de 10 pruebas de agarre para cada objeto y umbral, y se considera que una prueba es exitosa cuando el objeto se agarra correctamente sin dañarlo y la pinza envía la señal de agarre correspondiente al robot. Los resultados que se muestran en la Tabla 1 demuestran que, para el umbral de tasa de éxito de agarre más alto (2 V), la pinza es capaz de sujetar de forma segura todo tipo de objetos fabricados con diferentes materiales hasta 1,025 kg. Este umbral se establece como configuración principal de la pinza y se pone a prueba nuevamente con incrementos de peso, obteniendo una capacidad de agarre máxima de 1,2 kg sin dejar caer el objeto.

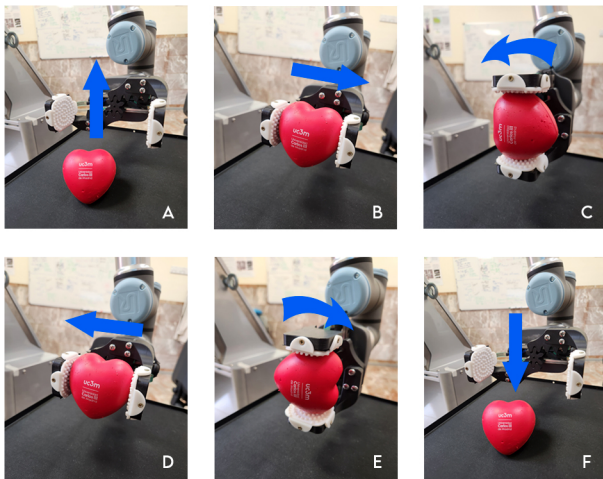


Figura 6: Movimientos en la prueba de desempeño de agarre. (A) La pinza levanta el objeto de la mesa. (B) La pinza se desplaza alejándose del robot. (C) La pinza rota 90° en sentido horario. (D) La pinza se desplaza hacia el robot. (E) La pinza rota 90° en sentido antihorario. (F) La pinza se abre para soltar el objeto.

Tabla 1: Resultados de pruebas de agarre para distintos objetos y umbrales.

Objeto	Peso(g)	Umbral (V)						
		0.25	0.5	1	1.5	2	2.5	3
Pelota antiestrés	20	10	8	8	10	10	10	8
Huevo sin cocinar	57	10	10	10	10	10	10	10
Botella impresa en 3D	100	10	10	10	9	10	10	10
Manzana	157	10	10	10	10	10	10	10
Botella de plástico con agua	500	2	4	10	10	10	10	2
Caja de cartón	815	1	3	10	10	10	2	0
Botella de plástico con agua llena	1025	0	0	0	4	10	10	10
Jarra de cristal con agua	1500	0	0	0	0	0	0	0

#### 4.2. Tarea de agarre con el robot

Una vez probadas de forma independiente, se selecciona una de las pinzas para realizar una tarea de manipulación más compleja en el robot. En esta tarea, el robot debe agarrar un

vaso y una botella de agua de 1 L inicialmente ubicados en la mesa A, llevarlos a una segunda mesa B y verter agua en la taza (Figura 7). Durante el experimento, la pinza agarra firmemente los objetos y puede comunicar al robot cuando se agarra o se deja caer un objeto. Esta prueba demostró la capacidad de la pinza para comunicarse y coordinarse con el robot para completar tareas domésticas más complejas y realistas (ver enlace al vídeo). En futuros trabajos, se buscará aprovechar ambas pinzas para realizar tareas de manipulación coordinadas con los dos brazos.

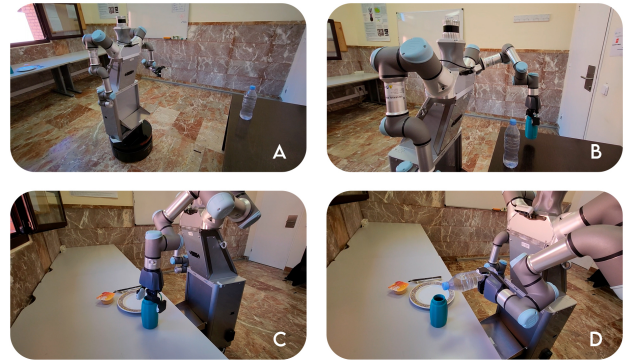


Figura 7: Robot ADAM realizando una tarea de manipulación doméstica. (A) Desplazamiento a la mesa A. (B) Agarre del vaso en la mesa A. (C) Colocación del vaso en la mesa B. (D) Vertido de agua en el vaso en la mesa B.

#### 4.3. Encuestas de satisfacción de usuarios

Finalmente, el Duck Gripper se ha presentado junto con el ADAM a estudiantes de diversos niveles educativos (primaria, secundaria, bachillerato y universidad) y adultos de diferentes grupos de edad. Estos sumaron un total de 100 participantes, incluyendo estudiantes de la Universidad Carlos III y centros externos (Figura 8). En cada una de las sesiones realizadas, los asistentes conocieron cómo se aplica la robótica a la asistencia doméstica a personas mayores con el robot ADAM y los principales módulos de un robot manipulador móvil. Estas sesiones tuvieron una duración de 1 hora en alumnos de estudios universitarios y de 10 minutos en otros usuarios, en las que por parejas guiaban al brazo y controlaban una única pinza mediante la GUI, como parte de una demostración de una tarea de manipulación con el robot ADAM. La actividad permitió evaluar el grado en que un usuario es capaz de comprender el funcionamiento de la pinza a través de la GUI.

Tras ello se elaboró una encuesta con el objetivo de evaluar el atractivo del dispositivo de agarre, el grado de complejidad de la GUI para controlar la información sobre el agarre y la experiencia de aprendizaje general sobre la manipulación del robot (Figura 9). Las sesiones educativas resultaron claramente satisfactorias entre todos los grupos. Se observa que, aunque el grupo más joven de estudiantes estaba menos conectado emocionalmente con la actividad y el robot, los grupos restantes mostraban interés por interactuar con la plataforma y los dispositivos, y que la aplicación era lo suficientemente simple para todos los grupos de edad. Los estudiantes más jóvenes también mostraron interés en tocar las paletas de la pinza y observar la retroalimentación en la GUI.

