

## Prototipo de gemelo digital de un robot manipulador con fines docentes

Martínez-Navarro, Antonio<sup>a</sup>, Cañadas-Aránega, Fernando<sup>b,\*</sup>, Pataro, Igor M. L.<sup>b</sup>, Hoyo, Ángeles<sup>c</sup>, Moreno-Úbeda, José Carlos<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Savian Robotics, Asistente del Director de Tecnología (CTO), C/ Progreso 35, 41013, Sevilla, España. [antoniomartinez112001@gmail.com](mailto:antoniomartinez112001@gmail.com)

<sup>b</sup>Universidad de Almería, Departamento de Informática, CIESOL, ceia3, Ctra. Sacramento s/n, 04120, Almería, Spain. ([fernando.ca](mailto:fernando.ca), [igorpataro,jcmoreno](mailto:igorpataro,jcmoreno))@ual.es

<sup>c</sup>Universidad de Málaga, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, 29071, Málaga, España. [angeles.hoyo@uma.es](mailto:angeles.hoyo@uma.es)

### Resumen

El presente trabajo presenta el diseño y desarrollo de un prototipo de gemelo digital basado en realidad virtual (RV), orientado a la enseñanza de robótica industrial en titulaciones de ingeniería. Este prototipo combina hardware de bajo coste y software de código abierto para ofrecer una plataforma inmersiva que permite a los estudiantes interactuar con un robot manipulador virtual en tiempo real, sin necesidad de utilizar robots físicos. A diferencia de otras propuestas existentes, el sistema desarrollado integra funcionalidades avanzadas que facilitan la visualización de movimientos y la simulación de tareas de manipulación. La arquitectura del prototipo incluye componentes físicos simples, una interfaz de realidad aumentada (RA) accesible y un sistema de control adaptable, proporcionando así una herramienta segura y asequible para la formación práctica en robótica. Se detallan la metodología empleada, el diseño técnico y la propuesta de implementación inicial del sistema en un entorno educativo. Este estudio demuestra el potencial de los gemelos digitales inmersivos como recursos pedagógicos eficaces para mejorar la enseñanza de la ingeniería, especialmente en contextos con recursos limitados.

*Palabras clave:* Realidad virtual, Realidad aumentada, Brazo robot

### Prototype of a digital twin of a manipulator robot for educational purposes

#### Abstract

This work presents the design and development of a digital twin prototype based on virtual reality (VR), aimed at teaching industrial robotics in engineering programs. The prototype combines low-cost hardware and open-source software to provide an immersive platform that allows students to interact with a virtual robotic manipulator in real time, without the need for physical robots. Unlike other existing proposals, the developed system integrates advanced features that enhance the visualization of movements and the simulation of manipulation tasks. The prototype's architecture includes simple physical components, an accessible augmented reality (AR) interface, and an adaptable control system, thus providing a safe and affordable tool for hands-on robotics training. The methodology used, technical design, and initial implementation proposal in an educational setting are described in detail. This study demonstrates the potential of immersive digital twins as effective pedagogical tools to improve engineering education, especially in resource-limited contexts.

*Keywords:* Virtual Reality, Augmented Reality, Robotic Manipulator

## 1. Introducción

La integración de tecnologías inmersivas en el ámbito de la ingeniería ha revolucionado las metodologías de enseñanza, ofreciendo nuevas oportunidades para mejorar la comprensión de conceptos complejos y el entrenamiento en sistemas robóticos (Cañadas-Aránega et al., 2024). En este contexto, la *Realidad Virtual* (RV) se perfila como una herramienta de gran

valor didáctico, al permitir superponer modelos virtuales sobre el entorno real, facilitando una interacción intuitiva y enriquecida con los sistemas físicos (Verner and Reitman, 2021; Montenegro-Rueda and Fernández-Cerero, 2022; Lampropoulos et al., 2022; Vidak et al., 2023).

La robótica industrial, disciplina fundamental en las ingenierías industriales, se enfrenta a retos crecientes en la forma-

\*Autor para correspondencia: [fernando.ca@ual.es](mailto:fernando.ca@ual.es)

ción académica, como la necesidad de entornos seguros, interactivos y de bajo coste para la programación y operación de robots manipuladores. Tradicionalmente, la programación de robots se ha realizado mediante simuladores cerrados o interacción directa con el hardware, lo que implica altos costos y riesgos asociados a errores de manipulación (Blanco-Claraco et al., 2023; Aránega et al., 2024; Dimosthenopoulos et al., 2024).

El concepto de gemelo digital, entendido como una representación virtual de un sistema físico en tiempo real, ofrece una solución innovadora para estas limitaciones (Dihan et al., 2024). Al integrar gemelos digitales en entornos de realidad aumentada (RA) y/o virtual, se puede proporcionar a los estudiantes un sistema de aprendizaje interactivo, seguro y accesible, permitiendo la programación y supervisión de robots manipuladores sin necesidad de intervención directa sobre el equipo real (Kaarlela et al., 2023).

Diversos estudios recientes han explorado la integración de gemelos digitales y tecnologías de RA en la educación en robótica. Por ejemplo, Lampropoulos et al. (2022) realizan una revisión sistemática sobre la gamificación y RA en la educación, evidenciando mejoras en la motivación y el rendimiento académico. Montenegro-Rueda and Fernández-Cerero (2022) analizaron las posibilidades y desafíos de la RA en la educación superior, resaltando su potencial para enriquecer la experiencia de aprendizaje. Hernández-Ordoñez et al. (2018) presentan una plataforma educativa innovadora que integra un brazo robótico casero, un sistema de control y una aplicación de RA. Esta herramienta permite a los estudiantes visualizar en tiempo real los valores de las articulaciones del brazo robótico mediante la detección de marcadores, facilitando así la comprensión de algoritmos de manipulación robótica.

Recientemente, Makhataeva and Varol (2020) presentaron una revisión exhaustiva de las aplicaciones de la RA en el ámbito de la robótica durante el período de 2015 a 2019. Los autores clasifican más de 100 estudios. Además, en ese trabajo los autores discuten los avances recientes en tecnologías de RA, y los desafíos técnicos persistentes. Bogue (2020) examina diversas aplicaciones de la RA, incluyendo su uso en la programación de robots, la teleoperación y la implementación de *virtual fixtures* (dispositivos virtuales) que mejoran la precisión y la velocidad en tareas de manipulación y control posicional, subrayando el creciente papel de la RA en la robótica en una variedad de aplicaciones. Además, en Chen et al. (2020) los autores evaluaron el impacto de la RA de las actividades competitivas en la educación en robótica, considerando variables como el desempeño en tareas con robots, los procesos de colaboración grupal, las competencias del siglo XXI y la motivación para el aprendizaje. Los resultados indicaron que la incorporación de RA mejoró significativamente la motivación de los estudiantes, los procesos de equipo y las competencias del siglo XXI. Además, estos efectos fueron más pronunciados en los grupos que participaron en actividades competitivas. Dicho estudio proporciona directrices para la implementación efectiva de RA y con enfoques competitivos en entornos educativos de robótica.

Dado el reciente impacto del uso de la RA en la enseñanza universitaria, este artículo presenta el diseño y desarrollo de un prototipo de gemelo digital de un robot manipulador ABB IRB 140 utilizando tecnologías de RA, con el objetivo de facilitar la enseñanza de asignaturas de robótica en grados de ingeniería

industrial. Para ello, se ha diseñado un puente de conexión TCP/IP entre el motor gráfico Unity Engine y Robot Studio, uniendo ambas simulaciones, controladas por el usuario, mediante RA. A diferencia de estudios previos que han explorado la aplicación de la RA en la educación en robótica, como el trabajo Hernández-Ordoñez et al. (2018), la presente propuesta integra un entorno inmersivo que permite la interacción directa con el modelo virtual del robot. Además, mientras que investigaciones anteriores (Chen et al., 2020) han destacado los beneficios de la RA en la motivación y competencias del siglo XXI en contextos educativos generales, el enfoque propuesto se orienta específicamente a la formación en robótica industrial, ofreciendo una solución accesible que combina hardware de bajo costo y software de código abierto. Esta integración busca no solo mejorar la experiencia de aprendizaje y fomentar la experimentación, sino también reducir los costos asociados a la formación práctica en robótica industrial, proporcionando una alternativa viable para instituciones con recursos limitados.

Este trabajo se presenta de la siguiente manera: la Sección 2 describe detalladamente el enfoque metodológico adoptado para el desarrollo del gemelo digital basado en realidad aumentada, incluyendo la selección de herramientas tecnológicas. En la Sección 3, se profundiza en la arquitectura del prototipo, especificando los componentes de hardware y software empleados, así como las funcionalidades implementadas para facilitar la interacción del usuario con el entorno virtual. En la Sección 4, se presentan los resultados y una propuesta preliminar para el uso en docencia. Finalmente, la Sección 5 ofrece una síntesis de las principales aportaciones del estudio, discutiendo las implicaciones educativas del uso de gemelos digitales en la enseñanza de la robótica industrial y proponiendo líneas futuras de investigación para optimizar su aplicación en contextos académicos.

## 2. Materiales y métodos

En esta sección se describen las herramientas tecnológicas, los materiales utilizados y el enfoque metodológico adoptado para el desarrollo del prototipo de gemelo digital basado en realidad aumentada.

### 2.1. Materiales

A continuación, se enumeran los materiales utilizados para la simulación.

#### 2.1.1. Oculus Rift S

Las Oculus Rift S son un dispositivo de RV diseñado para ofrecer una experiencia inmersiva y envolvente en entornos digitales, las cuales representan una evolución significativa en la tecnología de RV, orientada tanto a aplicaciones lúdicas como formativas. El sistema de seguimiento inside-out, basado en cámaras integradas en el visor, elimina la necesidad de sensores externos y simplifica la instalación. Su diseño ergonómico incluye una diadema ajustable y un acolchado facial transpirable, lo que favorece la comodidad en sesiones prolongadas. Además, requiere conexión a un ordenador, lo que permite acceder a plataformas como Oculus Store y otras tiendas de contenido compatibles.

Por un lado, para el funcionamiento de las Oculus Rift S es necesario tener en cuenta una serie de características mínimas para garantizar el correcto funcionamiento. El sistema debe contar con una CPU Intel Core i3-6100 o AMD Ryzen 3 1200 (o superior), al menos 8 GB de memoria RAM, y una tarjeta gráfica compatible con DirectX 12 que disponga de un mínimo de 6 GB de VRAM, como la NVIDIA GTX 1050 Ti o la AMD Radeon RX 470. Además, se requiere un puerto DisplayPort 1.2 compatible, un puerto USB 3.0 y el sistema operativo Windows.

Por otro lado, para verificar la compatibilidad del sistema, Oculus proporciona la herramienta “Oculus Compatibility Check”, que permite comprobar si el ordenador cumple los requisitos para operar adecuadamente con las Oculus Rift S. Además, se recomienda mantener los controladores de la tarjeta gráfica y otros componentes actualizados para asegurar la estabilidad y el rendimiento del sistema.

### 2.1.2. ABB IRB 140

En los experimentos se empleó el robot industrial ABB IRB 140, un manipulador de seis grados de libertad (6-DOF) ampliamente utilizado en aplicaciones de precisión debido a su compacidad, repetibilidad y velocidad. Este modelo cuenta con una capacidad de carga de hasta 6 kg y un alcance máximo de 810 mm, lo que lo convierte en una opción adecuada para tareas de manipulación en espacios reducidos o donde se requiera una alta densidad de integración. El IRB 140 dispone de una repetibilidad de  $\pm 0.03$  mm, lo cual resulta crucial para aplicaciones que requieren gran exactitud en la posición del efector final, como escaneos 3D, ensamblado fino o manipulación de objetos delicados. Su diseño compacto, con una estructura rígida y articulaciones selladas, permite su instalación tanto en orientación vertical como invertida, y su resistencia lo hace apto para entornos industriales exigentes. En este estudio, el robot fue controlado mediante el controlador IRC5, que permite una programación avanzada basada en el lenguaje RAPID dentro del entorno de simulación RobotStudio.

## 2.2. Métodos

En esta sección, se describen los métodos llevados a cabo para la realización de este estudio.

### 2.2.1. Robot Studio

Para el desarrollo del entorno real se utilizó el entorno de simulación ABB RobotStudio, una herramienta oficial proporcionada por ABB para la programación offline y simulación de robots industriales. Esta plataforma permite replicar con precisión el comportamiento cinemático y dinámico del robot ABB IRB 140, facilitando pruebas previas a la implementación física. RobotStudio ofrece una representación virtual completa del robot, su controlador (IRC5), y el entorno de trabajo, incluyendo objetos 3D, sensores simulados y trayectorias programables.

### 2.2.2. Unity y Unreal Engine

Para el entorno de interacción con el usuario, se utilizó el motor de simulación Unity 3D, ampliamente empleado en entornos de robótica y visión por computador debido a su flexibilidad, capacidad gráfica y compatibilidad con múltiples lenguajes de programación. El entorno fue diseñado para emular

tanto la geometría como la interacción visual del robot con su entorno docente. Se integraron modelos de sensores del robot ABB 140, como el enjaulado donde se aloja el modelo real.

La comunicación entre la aplicación y las plataformas externas se lleva a cabo mediante el protocolo TCP/IP, lo que permite establecer conexiones específicas y bidireccionales con diversas plataformas. En primer lugar, se configura una conexión con RobotStudio, que facilita la simulación de tiempo real de los movimientos de los robots ABB. Esta integración permite que los usuarios visualicen y programen el comportamiento de los robots en un entorno virtual, lo que asegura que las interacciones dentro del software se reflejen con precisión en la simulación. A través de esta plataforma, se pueden enviar comandos al robot físico, recibir retroalimentación sobre su estado y monitorear en tiempo real el desempeño del sistema. El uso combinado de ambas plataformas, junto con el protocolo TCP/IP, permite la sincronización efectiva de la información de movimiento y programación, garantizando que las acciones realizadas en el entorno virtual se traduzcan de manera exacta y sincrónica en los robots simulados y en los robots reales.

## 3. Diseño del Prototipo

### 3.1. Desarrollo de la Aplicación

El objetivo principal del prototipo es desarrollar una aplicación inmersiva de RV que integre el modelo 3D robótico ABB IRB 140. La aplicación busca proporcionar una experiencia interactiva intuitiva para el usuario, permitiendo tanto la visualización como la programación básica del manipulador, incluyendo la generación de puntos, trayectorias, simulación de entradas y salidas digitales, y la creación de programas básicos.

Para lograr estos objetivos, se incorporaron sistemas de visionado, mecanismos de navegación en la escena y métodos de interacción natural con los elementos virtuales. Además, se estableció un protocolo de comunicación TCP/IP que permite transmitir los datos generados en la aplicación a las plataformas de control RobotStudio y Unity 3D.



Figura 1: Visión general de la nave industrial.

### 3.2. Capacidades del Avatar Virtual

Uno de los requisitos fundamentales del prototipo consiste en dotar a la aplicación de unas capacidades de interacción y movilidad agradables para el usuario, facilitando una experiencia inmersiva y natural. La tecnología de las gafas Oculus Rift S, junto con su integración en Unity, permite capturar de forma precisa los movimientos del usuario en el espacio físico, trasladando tanto los desplazamientos como los giros de la

cabeza al entorno virtual. Además, el sistema realiza un seguimiento de los controladores manuales, visualizándolos dentro de la escena. Inicialmente, las representaciones de los controladores eran genéricas; no obstante, para favorecer una mayor sensación de realismo, se sustituyeron por representaciones virtuales de manos humanas. Estas manos proyectan un rayo visible, permitiendo realizar acciones a distancia de manera intuitiva. Si bien los movimientos básicos de Oculus garantizan la representación corporal del usuario, resultaban insuficientes para una aplicación orientada a la manipulación robótica. Por ello, fue necesario extender las capacidades estándar mediante la programación de nuevas funciones en Unity. En cuanto a la movilidad del propio avatar, se habilitaron dos métodos principales de desplazamiento dentro del entorno virtual:

- **Desplazamiento continuo:** El sistema reconoce la interacción con el joystick izquierdo, permitiendo avanzar a una velocidad constante de 0.6 m/s en la dirección deseada. Este modo simula una caminata natural sin necesidad de realizar desplazamientos físicos en el mundo real.
- **Teletransporte:** Utilizando el rayo proyectado desde la mano izquierda, el usuario puede seleccionar un punto en el suelo, representado visualmente por un disco. Al presionar el botón Drop del controlador izquierdo, el avatar se teletransporta de manera inmediata al punto seleccionado. Este método proporciona un desplazamiento rápido y cómodo, reduciendo el riesgo de mareos (*motion sickness*) durante la navegación en RV.

Finalmente, el entorno virtual recrea la nave industrial real en la Universidad de Almería (España) equipada para la interacción de un robot industrial con el usuario (Fig. 1). Este entorno cuenta con una estación de reposo que define el área inicial de la escena, equipada con un atril que contiene el panel principal de selección de robot y un tutorial interactivo (Fig. 2a).

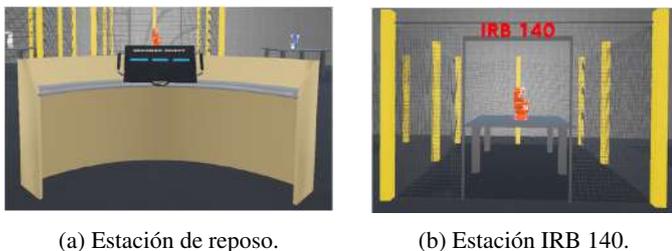


Figura 2: Visualización de las estaciones en la nave industrial del entorno virtual.

### 3.2.1. Interacción con Objetos

Ambas manos virtuales (Fig. 3) están equipadas con un mecanismo de agarre, activado mediante el botón Trigger de cada controlador. Esta acción se representa como el cierre de un puño virtual, permitiendo al usuario manipular objetos predefinidos del entorno, como:

- **Pantallas interactivas:** Cada pantalla dispone de asas laterales que pueden ser agarradas para reubicarlas en un lugar más cómodo.
- **Elementos robóticos:** Algunos componentes de los brazos robóticos disponen de asas específicas que permiten su manipulación directa, dependiendo del modo de movimiento seleccionado.

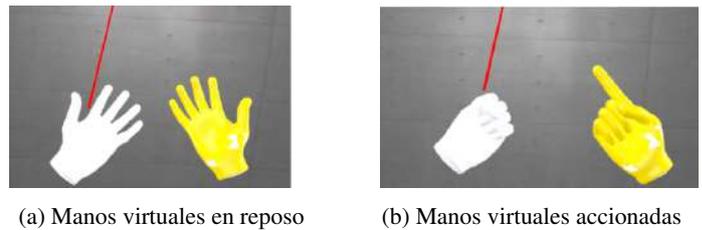


Figura 3: Interacción de objetos a través de manos virtuales.

### 3.2.2. Interacción con el panel de control

La interacción con el panel virtual (Fig. 4) se realizó con dos posibles opciones:

- **Selección a distancia:** El rayo proyectado desde la mano derecha cambia a color verde al apuntar a un botón interactivo. Pulsando el botón A del controlador derecho, se activa el botón seleccionado.
- **Interacción táctil:** Al presionar el botón A, la mano virtual adopta una posición de "índice extendido". Acercando este dedo a un botón sobre la pantalla y presionándolo, se activa el comando correspondiente, simulando una interacción táctil real.

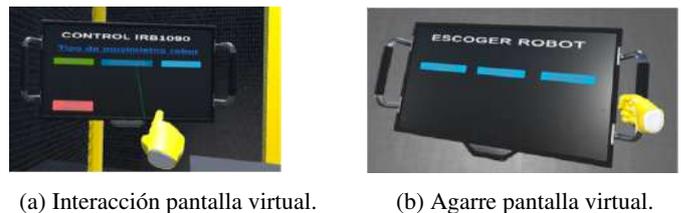


Figura 4: Interacción del avatar virtual.

Estas extensiones de movilidad e interacción permiten al usuario explorar el entorno, manipular elementos y operar los robots virtuales de una manera natural e intuitiva, mejorando notablemente la experiencia de aprendizaje en el contexto de formación en robótica industrial.

## 3.3. Interfaces de Control

### 3.3.1. Panel Principal

Ubicado en la estación de reposo, el panel principal actúa como punto de inicio para la interacción con el entorno virtual. Desde aquí, el usuario puede seleccionar el robot que desea manipular y acceder a un tutorial introductorio. Al seleccionar un robot, el entorno reacciona de forma contextual, iluminando la estación correspondiente y facilitando la orientación del usuario dentro de la nave virtual. Este mecanismo forma parte del sistema de gemelo digital, al permitir una vinculación directa entre el avatar del usuario y las réplicas virtuales de los robots disponibles.

### 3.3.2. Panel de Movimiento del Robot

Este panel constituye una de las interfaces clave del gemelo digital, al permitir el control directo e intuitivo del robot virtual replicando el comportamiento esperado del sistema físico. Se han habilitado tres modos de interacción: (i) el movimiento manual, que permite agarrar el extremo del robot y desplazarlo libremente, activando automáticamente los algoritmos de

cinemática inversa; (ii) el movimiento individual, en el que se manipulan los eslabones de manera separada para un control más detallado; y (iii) el movimiento por ejes, mediante la selección de un eje específico y su control con el joystick derecho. Además, se incluye una opción de retorno a la posición “Home”, permitiendo al usuario reiniciar el estado del robot con un solo comando. Estas funcionalidades no solo facilitan el aprendizaje, sino que también reflejan fielmente las capacidades del robot físico, consolidando así el gemelo digital como herramienta de validación y entrenamiento.

### 3.3.3. Panel de Programación y Simulación

El Panel de Programación y Simulación representa el núcleo funcional del gemelo digital, ya que permite almacenar puntos de referencia, definir trayectorias y generar programas básicos que pueden ser ejecutados tanto en el entorno virtual como en el robot físico. Gracias a la integración con plataformas como RobotStudio, es posible sincronizar el comportamiento del robot digital, lo que permite realizar simulaciones seguras antes de la ejecución física. Esta bidireccionalidad entre entorno virtual y mundo real convierte al entorno desarrollado en un auténtico gemelo digital, que no solo permite planificar tareas, sino también evaluar su viabilidad práctica. Toda la información generada puede ser almacenada y reutilizada, facilitando la continuidad de las prácticas formativas y la trazabilidad de los procesos de programación. Sin embargo, este trabajo preliminar se enfoca únicamente en el desarrollo de la simulación.

## 4. Implementación y Resultados

El desarrollo de la aplicación de realidad virtual y la integración de un modelo realista del brazo robótico representa uno de los principales logros de este trabajo. El esfuerzo principal se concentró en asegurar que la herramienta resultante fuera intuitiva, eficiente y capaz de cumplir con los objetivos planteados, logrando una solución robusta que transformara la manera de programar y controlar robots en entornos virtuales. Realizada la validación del gemelo digital, se propone su uso para docencia en robótica industrial.

### 4.1. Visualización de la Aplicación

En la sección anterior se han descrito los distintos componentes y funcionalidades de la aplicación. Como complemento, en los vídeos disponibles online se presenta una demostración práctica del entorno de realidad virtual desarrollado en Unity y su utilización en la programación con RobotStudio. En la Fig. 5a se muestra el entorno final diseñado, observando el atril junto a la jaula iluminada donde se encuentra el robot ABB. La Fig. 5b muestra el aspecto del robot ABB final, donde se observa un asa en el elemento terminal para los movimientos manuales.

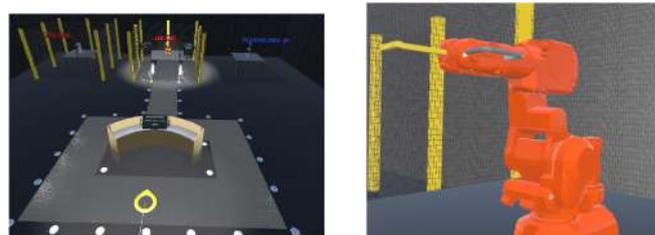
### 4.2. Comunicación en tiempo real entre Unity y RobotStudio

La conexión entre Unity y RobotStudio, mediante un controlador virtual programado en RAPID, demostró ser efectiva.

Se validaron los movimientos a puntos, las trayectorias programadas y la ejecución de programas básicos. En la Fig. 6 se observa el entorno de simulación Unity junto a RobotStudio, donde se demuestra una comunicación efectiva con 0.1 s de retardo en los movimientos.

Aunque la ausencia del módulo PC-Interface impidió realizar pruebas físicas directas, los resultados en simulación fueron satisfactorios, ofreciendo confianza en la capacidad del sistema para su implementación futura. La demostración de estas funcionalidades se presenta en el vídeo en este *link*<sup>1</sup>, donde se observa la conexión establecida, la programación de trayectorias y la ejecución de programas básicos.

Los ensayos realizados permiten concluir que la aplicación desarrollada es capaz de gestionar eficazmente la programación y el control de manipuladores robóticos tanto en entornos simulados como en aplicaciones reales. Esta solución ofrece una alternativa educativa moderna, inmersiva y accesible, que abre nuevas posibilidades en la enseñanza de la robótica industrial.



(a) Visión general del entorno. (b) Visión del robot simulado.

Figura 5: Visión general del entorno y del robot.

### 4.3. Propuesta de implementación en la docencia de Robótica Industrial

Una vez validado el correcto funcionamiento del gemelo digital, se propone su futura incorporación como recurso didáctico central en la asignatura de Robótica Industrial, del Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática de la Universidad de Almería. Esta herramienta permitirá a los estudiantes interactuar con un entorno inmersivo que simula con alta fidelidad el comportamiento de un sistema robótico real, facilitando la comprensión de conceptos fundamentales como la programación, la cinemática directa e inversa, la planificación de trayectorias, la coordinación de movimientos y los aspectos de seguridad en celdas robotizadas.

Desde el punto de vista pedagógico, el uso del gemelo digital permitirá aplicar principios del aprendizaje activo (Steele, 2023), fomentando una participación más profunda del estudiante mediante la exploración directa del entorno y la toma de decisiones en tiempo real. El entorno virtual funcionará como un laboratorio accesible y seguro, donde los errores no implicarán riesgos físicos ni daños a los equipos, reduciendo así la ansiedad asociada al aprendizaje inicial de la robótica y favoreciendo una actitud más activa y autónoma (Prince, 2004). Asimismo, se prevé su integración en metodologías basadas en proyectos, donde los estudiantes podrán desarrollar simulaciones completas que resuelvan retos industriales contextualizados, integrando conocimientos técnicos y habilidades transver-

<sup>1</sup>[https://www.youtube.com/watch?v=9c-xEMNNrB4&ab\\_channel=ARMUAL](https://www.youtube.com/watch?v=9c-xEMNNrB4&ab_channel=ARMUAL)

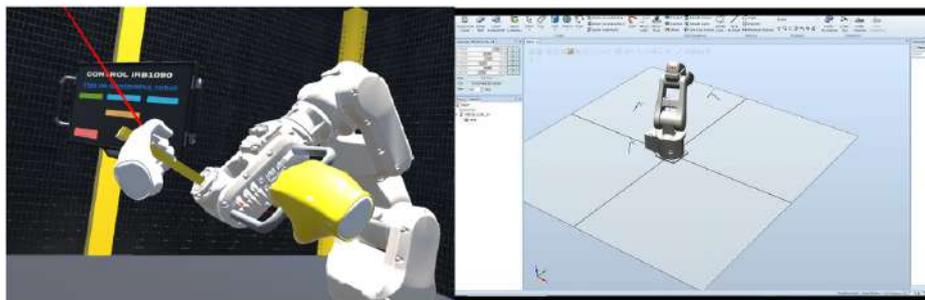


Figura 6: Visión general del entorno simulado.

sales como el trabajo en equipo, la comunicación y la toma de decisiones (Mills et al., 2003).

En cuanto a los aspectos prácticos, el gemelo digital permitirá ampliar significativamente la disponibilidad de recursos formativos, eliminando las restricciones asociadas al uso de robots físicos (limitación de tiempos, mantenimiento, riesgos operativos y coste). Esta mayor accesibilidad facilitará la adaptación del contenido práctico al nivel de cada estudiante, fomentando una enseñanza más personalizada.

## 5. Conclusiones

En el presente artículo se ha desarrollado una solución innovadora de realidad virtual integrada con sistemas de control y programación de robots industriales, utilizando tecnología como las gafas Oculus Rift S y la plataforma Unity. A través de la creación de un entorno inmersivo y la implementación de gemelos digitales de robots industriales, se ha conseguido una experiencia interactiva que permite a los alumnos manipular y programar manipuladores robóticos de manera natural y precisa, tanto en entornos simulados como reales. La integración con herramientas como RobotStudio ha sido clave para la sincronización efectiva entre distintos mundos virtuales, permitiendo la ejecución de programas y trayectorias en tiempo real. Los resultados obtenidos en las pruebas con el robot ABB IRB 140 validan la eficacia del sistema, demostrando su capacidad para mejorar la enseñanza y el aprendizaje en el campo de la robótica industrial. Esta herramienta no solo ofrece una alternativa educativa moderna y accesible, sino que también abre nuevas posibilidades en la programación y control de robots, sentando las bases para futuras implementaciones en entornos educativos.

## Agradecimientos

Este trabajo se ha desarrollado en el marco del proyecto AGRITECH EU (DIGITAL-2022-SKILLS-03-101123258), co-financiado por el DIGITAL Programme de la Unión Europea. Además, el autor Fernando Cañadas-Aránega cuenta con una beca FPI (PRE2022-102415) del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

## Referencias

- Aránega, F. C., Claraco, J. L. B., Álvarez, F. J. M., Úbeda, J. C. M., 2024. Navegación de un robot Ackermann para tareas de transporte en invernaderos mediterráneos con Multivehicle Simulator (MVSIM). *Jornadas de Automática* (45).
- Blanco-Claraco, J.-L., Tymchenko, B., Mañas-Alvarez, F. J., Cañadas-Aránega, F., López-Gázquez, Á., Moreno, J. C., 2023. Multivehicle simulator (mv-sim): Lightweight dynamics simulator for multiagents and mobile robotics research. *SoftwareX* 23, 101443.
- Bogue, R., 2020. The role of augmented reality in robotics. *Industrial Robot: The international journal of robotics research and application* 47 (6), 789–794.
- Cañadas-Aránega, F., Moreno, J. C., Blanco-Claraco, J. L., 2024. A PID-based control architecture for mobile robot path planning in greenhouses. *IFAC-PapersOnLine* 58 (7), 503–508.
- Chen, C.-H., Yang, C.-K., Huang, K., Yao, K.-C., 2020. Augmented reality and competition in robotics education: Effects on 21st century competencies, group collaboration and learning motivation. *Journal of Computer Assisted Learning* 36 (6), 1052–1062.
- Dihan, M. S., Akash, A. I., Tasneem, Z., Das, P., Das, S. K., Islam, M. R., Islam, M. M., Badal, F. R., Ali, M. F., Ahamed, M. H., et al., 2024. Digital twin: Data exploration, architecture, implementation and future. *Heliyon* 10 (5).
- Dimosthenopoulos, D., Basamaklis, F. P., Glykos, C., Bavelos, A. C., Mountzouridis, G., and S. M., 2024. A Digital Twin-based paradigm for programming and control of cooperating robots in reconfigurable production systems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 0 (0), 1–21.
- Hernández-Ordóñez, M., Nuño-Maganda, M. A., Calles-Arriaga, C. A., Montaña-Rivas, O., Bautista Hernández, K. E., 2018. An education application for teaching robot arm manipulator concepts using augmented reality. *Mobile Information Systems* 2018, 1–8.
- Kaarlela, T., Padrao, P., Pitkäaho, T., Pieskä, S., Bobadilla, L., 2023. Digital twins utilizing xr-technology as robotic training tools. *Machines* 11 (1).
- Lampropoulos, G., Keramopoulos, E., Diamantaras, K., Evangelidis, G., 2022. Augmented reality and gamification in education: A systematic literature review of research, applications, and empirical studies. *Applied Sciences* 12 (1), 1–27.
- Makhataeva, Z., Varol, H. A., 2020. Augmented reality for robotics: A review. *Robotics* 9 (2), 21.
- Mills, J. E., Treagust, D. F., et al., 2003. Engineering education—is problem-based or project-based learning the answer. *Australasian journal of engineering education* 3 (2), 2–16.
- Montenegro-Rueda, M., Fernández-Cerero, J., 2022. Realidad aumentada en la educación superior: posibilidades y desafíos. *Tecnología, Ciencia y Educación* 2022 (23), 1–15.
- Prince, M., 2004. Does active learning work? a review of the research. *Journal of engineering education* 93 (3), 223–231.
- Steele, A. L., 2023. *Experiential learning in engineering education*. CRC Press.
- Verner, I. M., Reitman, R., 2021. Exposing robot learning to students in augmented reality. *International Journal of Engineering Pedagogy (iJEP)* 11 (1), 4–20.
- Vidak, A., Movre Šapić, I., Mešić, V., Gomzi, V., 2023. Augmented reality technology in teaching about physics: A systematic review of opportunities and challenges. *arXiv preprint arXiv:2311.18392*.