Simposio CEA de Robótica, Bioingeniería, Visión Artificial y Automática Marina 2025

RBVM
Simposio CEA de Robótica, Bioingeniería, Visión por Computador y Automática Marina

DiTwin: un laboratorio remoto de robótica para la docencia en centros de FP

Rollón, Marcos., Galán-Cuenca, Álvaro., Carcía-Morales, Isabel., Muñoz, Victor F.*

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Málaga, C/ Severo Ochoa, 34, Parque tecnológico de Andalucía (PTA), 29071 Málaga, España.

Resumen

La integración de laboratorios remotos y tecnología de Gemelos Digitales tiene un potencial significativo para enriquecer la experiencia educativa de los estudiantes de educación y formación profesional (EFP) especializados en robótica. Este artículo examina el desarrollo y despliegue de un laboratorio remoto de robótica que utiliza la tecnología de gemelos digitales para crear un entorno de aprendizaje inmersivo e interactivo para los estudiantes de FP en el contexto del proyecto DiTwin - Digital Twin for VET schools, un proyecto de la Asociación de Cooperación Erasmus+ KA2. Al proporcionar acceso remoto a un sistema robótico físico, los estudiantes pueden participar en actividades prácticas de experimentación, resolución de problemas y programación sin las limitaciones impuestas por el tiempo y la ubicación. El componente del gemelo digital facilita la simulación y visualización del comportamiento del sistema robótico, lo que permite a los estudiantes probar y perfeccionar sus soluciones en un entorno virtual antes de implementarlas en el sistema físico. Se ha comprobado el correcto funcionamiento del gemelo digital a la hora de imitar los movimientos de robot, así como para comandar movimientos al robot; y se ha probado y verificado la comunicación remota del gemelo con el entorno físico.

Palabras clave: Laboratorios remotos, Industria 4.0, Gemelos Digitales, Educación y Formación Profesional, Simulación y Visualización, Robotica.

DiTwin: a remote robotics laboratory for teaching in VET institutions

Abstract

The integration of remote laboratories and Digital Twin technology has significant potential to enrich the educational experience of vocational education and training (VET) students specializing in robotics. This paper examines the development and deployment of a remote robotics laboratory that utilizes Digital Twin technology to create an immersive and interactive learning environment for VET students in the context of the project DiTwin – Digital Twin for VET schools, an Erasmus+ KA2 Cooperation Partnership project. By providing remote access to a physical robotic system, students are able to engage in practical experimentation, troubleshooting, and programming activities without the limitations imposed by time and location. The Digital Twin component facilitates the simulation and visualization of the robotic system's behavior, allowing students to test and refine their solutions in a virtual setting prior to their implementation on the physical system. The correct functioning of the digital twin to mimic robot movements, as well as to command movements to the robot, has been verified; and the remote communication of the twin with the physical environment has been tested and verified.

Keywords: Remote Laboratories, Industry 4.0, Digital Twin, Vocational Education and Training, Simulation and Visualization, Robotic.

1. Introducción

En el panorama educativo actual, la Educación y Formación Profesionales (EFP) constituye un pilar fundamental para preparar a las personas con las capacidades prácticas y los conocimientos necesarios para satisfacer las demandas de la industria 4.0. Tradicionalmente, la EFP se ha basado en gran medida en la formación práctica y el acceso a equipos especializados, a menudo en laboratorios bien equipados. Sin embargo, va-

*Autor para correspondencia: vfmm@uma.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

rios aspectos, como la limitación de recursos, las restricciones geográficas y el reciente cambio mundial hacia el aprendizaje a distancia debido a la pandemia de COVID-19 dificultan o imposibilitan el aprendizaje práctico y basado en el trabajo. Esta reducción de las oportunidades de aprendizaje práctico y basado en la experiencia puede aumentar el riesgo de desempleo y pobreza entre los jóvenes y ha desencadenado la necesidad de explorar e innovar enfoques para garantizar la continuidad y la calidad de la formación profesional.

Una de estas soluciones innovadoras es la implantación de laboratorios remotos para responder a las acuciantes necesidades de los estudiantes de EFP mediante una formación profesional en línea/virtual actualizada y eficaz según el *International Lobour Organitation*. Sin embargo, la escasa eficacia de las soluciones digitales actuales en el sector de la EFP, que tienden a centrarse en los conocimientos teóricos más que en el aprendizaje basado en el trabajo, ha provocado una falta de motivación de los estudiantes y puede repercutir negativamente en su rendimiento escolar. De este modo, es necesario actualizar el concepto de Digital Factory Concept Lanz et al. (2018) o Learning Factory Lanz et al. (2019), que combina una enseñanza presencial con un laboratorio ciber-físico para abordar la resolución de problemas industriales. Este método ha demostrado su eficacia a la hora de dotar a los estudiantes de FP de competencias requeridas por la Industria 4.0, como el trabajo con robots manipuladores industriales, la digitalización de herramientas o la colaboración humano-robot Lanz et al. (2019), Li et al. (2019) y Sievers et al. (2020). Como en Falah et al. (2020); Vijayan and Mork (2020) donde implementan laboratorios remotos que utilizan tecnologías avanzadas para proporcionar a los estudiantes acceso virtual a experiencias de trabajar en el laboratorio desde cualquier lugar con acceso a internet. Para desarrollar estos laboratorios remotos se han utilizado los gemelos digitales (Digital Twin), que es una representación digital del mundo físico que modela el entorno y es un fiel reflejo del mundo real Negri et al. (2017); VanDerHorn and Mahadevan (2021) Malik and Brem (2021).

En este campo, este artículo propone la creación de un laboratorio remoto utilizando un gemelo digital del laboratorio físico en el contexto de una plataforma europea de educación para estudiantes de FP en los países socios (Italia, España, Irlanda, Grecia y Polonia) titulado DiTwin - Digital Twin for VET schools DITWIN (2024). Las ventajas de este laboratorio remoto es que es de codigo abierto, documentado en la pagina web del proyecto y con la posibilidad de ampiarse.

El resto de este artículo se organiza como exponemos a continuación. En el punto dos se hablarán de las competencias que se espera que logren los alumnos de FP. En el punto 3 se explica la arquitectura de este laboratorio remoto así como la interfaz gráfica que el usuario tiene a su disposición para comandar al robot. Después en el punto cuatro se explica la metodología docente usada en la industria 4.0, usando como ejemplo una práctica en el laboratorio remoto, y se termina con las conclusiones y trabajos futuros.

2. Competencias

Este trabajo se enmarca dentro de del proyecto DiTwin - Digital Twin for VET schools, un proyecto de la Asociación de Cooperación Erasmus+ KA2 en Educación y Formación Profesional, cuyo objetivo es desarrollar y ofrecer módulos educativos basados en gemelos digitales, alineados con las competencias requeridas por la Industria 4.0, y proporcionar herramientas, formación y acceso online para docentes y centros educativos en toda Europa.

El proyecto pretende cubrir el vacío existente en las instalaciones y maquinaria de los centros de FP aprovechando el potencial de los gemelos digitales desarrollando un laboratorio remoto que se adapte a los planes de estudio estándar de FP de los países socios, de forma que pueda integrarse fácilmente en las prácticas de los centros de FP y un entorno online listo para usar. En el proyecto DiTwin se han analizado los planes de estudio, y los programas de formación de diferentes centros educativos de los países socios, con el fin de seleccionar los temas, competencias y habilidades más relevantes necesarios para la Industria 4.0, identificando los más relevantes y alineando el desarrollo del laboratorio remoto con los resultados obtenidos. Los resultados derivados de dicho análisis, y la información recabada mediante encuestas a empresas, se resumen en la tabla 1.

Tabla 1: Conocimientos y habilidades que necesitan los estudiantes para alcanzar las competencias en robótica de la Industria 4.0.

Competencias	**Conocimientos**
	1. Describir los componentes, características y aplicaciones de los robots.
	2. Presentar los avances en robótica y su funcionamiento.
	3. Presentar las diferencias entre robots colaborativos y robots industriales.
	4. Describir los indicadores de mantenimiento y las técnicas de diagnóstico.
	Habilidades
	1. Ser capaz de programar un brazo robótico.
	2. Configurar y supervisar un brazo robótico industrial.
	3. Ser capaz de detectar riesgos y problemas de seguridad durante el funcionamiento de un robot.

3. Implementación del Laboratorio Remoto

3.1. Arquitectura del Laboratorio Remoto

El Gemelo digital del Laboratorio remoto ha sido implementado con *Unity* Unity (2025), pero el resultado es un ejecutable que puede ser utilizado en Windows, MacOS o Linux, sin la necesidad de instalar Unity o cualquier otra dependencia. En la figura 1 se muestra la arquitectura del Laboratorio remoto.

El Gemelo Digital asegura la sincronización en tiempo real con el laboratorio físico, permitiendo actualizaciones precisas e inmediatas en ambos entornos. De esta manera, los estudiantes podrán programar una tarea en el Gemelo Digital y, tras probarla y asegurar su correcto funcionamiento, tendrán la posibilidad de enviarla al laboratorio de forma remota y supervisar su ejecución.

Como puede verse en la figura 1, hay tres niveles principales en el Gemelo Digital. En el medio de la arquitectura, el Gemelo Digital actúa como un entorno de simulación cuando se utiliza offline, y como una capa de interacción en el laboratorio remoto, sirviendo como la capa que conecta el usuario

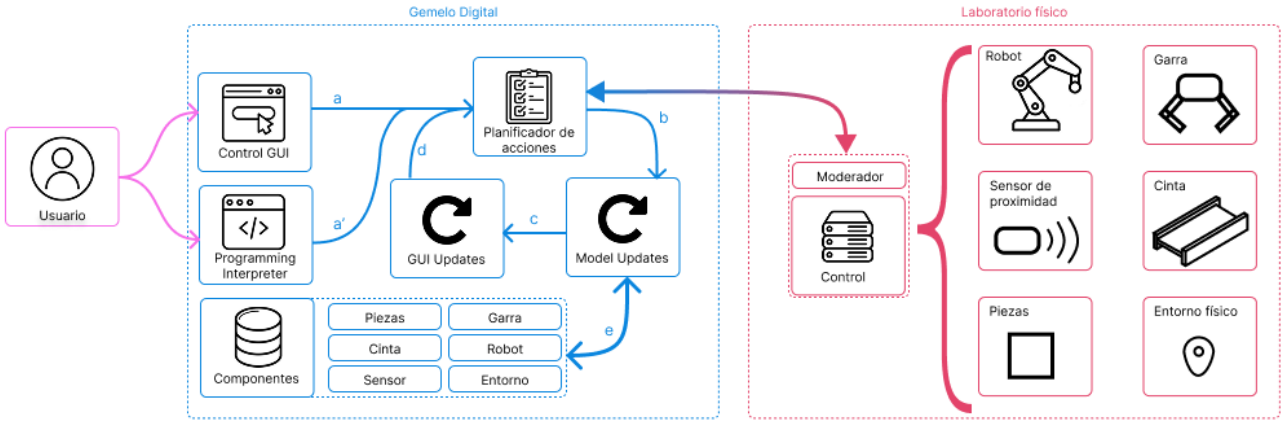

Figura 1: Arquitectura laboratorio remoto

humano y las unidades físicas. En este nivel tienen lugar la simulación, la modelización, la supervisión y el control del sistema. El usuario puede interactuar con el Gemelo Digital a través del Servidor de Comunicación o del *interfaz gráfica de control*. El primero permite el control mediante aplicaciones externas utilizando código, y el segundo presenta una GUI (Graphical User Interface) para controlar el robot, similar a la que tiene el robot real. La entrada de estas interfaces de control, marcadas con las flechas a y a', es utilizada por el Planificador de acciones, que actualiza los modelos de cada componente, marcado con b, (sensor, robot, cinta, etc) y, en el caso de que se esté utilizando el sistema online, manda las acciones al mundo real, marcado en el diagrama con la flecha multicolor entre los dos grandes bloques. Cuando los modelos cambian, indicado por la flecha c, el modulo de GUI Updates actualiza la visualización en 3D del entorno, como se indica con la flecha d. Los modelos estan en una base de datos ampliable para cada componente (flecha e), lo que le da al sistema fácil posibilidad de expansión.

Para implementar la representación 3D de un Gemelos Digital se introducen primero los modelos 3D de entrada de los elementos del laboratorio y se implementan sus funcionalidades. Se han usado robot manipulador de la marca Universal Robot (UR) cuya cinemática ha sido estudiada Hawkins (2013) Abdelaziz et al. (2019). Además, estos robots son más económicos que otros en el mercado y son robots colaborativos. Esto es importante porque el objetivo de este proyecto es que los estudiantes de FP adquieran las habilidades necesarias para trabajar con estos robots en un entorno virtual, pero que luego puedan aplicar estos conocimientos en un entorno real. Para el robot UR, se ha implementado el modelo genérico de UR, desde el UR3 al UR16. De esta forma, introduciendo la matriz DH del robot que se quiera utilizar, se asegura que el gemelo digital trabaje correctamente. Del mismo modo, se ha implementado el modelo de pinza en el efector final del robot y el de la cinta transportadora.

El nivel de Usuario es donde se lleva a cabo la toma de decisiones, el análisis y el aprendizaje. Aquí se puede interactuar tanto online como offline, lo que permite que varios usuarios accedan simultáneamente al entorno de simulación. Para permitir múltiples usuarios al mismo tiempo en laboratorio remoto, el *Moderador* actúa como un sistema de colas para ejecutar el código enviado por los estudiantes uno a uno. El resultado estará disponible a través de una webcam en el laboratorio físico.

Por último, la capa de Laboratorio Físico, indicada en tono rojo a la derecha de la figura 1 está formada por los sensores y el hardware utilizados en el entorno del laboratorio remoto. Comprende los siguientes elementos: un manipulador robótico, una cinta transportadora y sensores de proximidad como componentes de entrada/salida. Además, el entorno del Gemelo Digital incorpora las distintas piezas de trabajo, obstáculos y superficies, por lo que el usuario puede cambiar el *entorno*, que es uno de los *Componentes* del Gemelo Digital, modificando un archivo de configuración.

3.2. *Interfaz gráfica del Gemelo Digital*

En esta sección se explica la representación virtual del laboratorio (la GUI en la arquitectura de la figura 1). Esta representación virtual se puede ver en la figura 2, donde el usuario puede interactuar con el gemelo digital y el laboratorio remoto haciendo uso de ella.

Figura 2: Interface gráfica de usuario

La figura 2 muestra el entorno virtual que el usuario puede utilizar. En el menú superior, marcado como *Selected Screen*, el usuario puede cambiar entre las distintas pantallas del gemelo digital; Debajo, marcado como *Contextual Menu*, el usuario puede seleccionar el modo de control del sistema, utilizando los submenus *Joints, Linear o I/O*. Estos controlan el robot de manera articular, lineal o las entradas/salidas digitales, respectivamente. En la figura 2 el menú actual es el *JOINTS*

En la esquina superior derecha, marcado en la figura 2 como *Current Pose*, el indicador de la posición actual del TCP del

robot. El usuario puede alternar la visualización entre transformada y posición articular, así como copiar con un solo botón dicha posición.

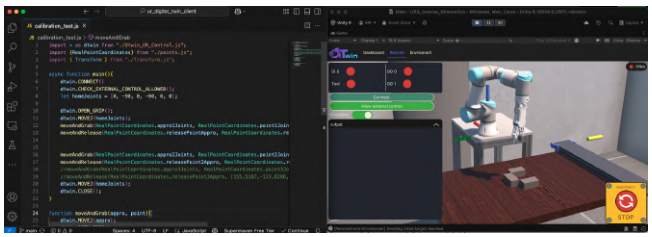

Figura 3: Entorno de programación y sistema Ditwin

En la figura 3 se observa a la derecha, la pantalla *Remote*, que sirve para gestionar la conexión con aplicaciones externas del robot, como se menciona en la arquitectura. Aquí se observa un panel indicador del estado actual de las señales de entrada y salida, además de un botón de parada de emergencia, que funciona tanto en simulación como con el robot real. A la izquierda se muestra un IDE de programación con el código que se está ejecutando en el sistema.

4. Método pedagógico basado en la resolución de problemas en el laboratorio virtual

En este módulo se utiliza la metodología de resolución de problemas, una competencia clave en la Industria 4.0 de la Tabla 1. La práctica propuesta busca que el alumno adquiera habilidades de programación y control de robots mediante la simulación de un escenario de *pick and place*. El entorno de trabajo es el que se muestra en la figura 4, que es el escenario físico donde se realiza la práctica junto al entorno virtual que vería el alumno en su ordenador. El objetivo es construir una torre con tres piezas idénticas, posicionándolas correctamente en el espacio de trabajo.

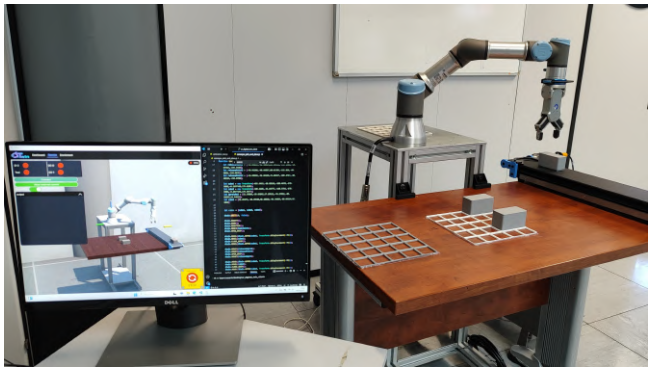

Figura 4: Entorno físico donde se realiza la práctica

El alumno deberá programar un robot para mover tres piezas desde posiciones iniciales hasta una posición final, formando una torre, cuya altura es tres veces la de una sola pieza. En la figura 5 se puede ver cómo se dispone el espacio de trabajo para el alumno. La torre se construye en la posición P_D, la pieza P_C llega por una cinta transportadora y se detiene cuando activa un sensor, por último, las piezas P_A y P_B se disponen sobre la mesa. A continuación está la descripción del entorno:

- P_A: posicionada libremente por el alumno, con el eje Z apuntando hacia abajo y la orientación como se ve en la figura 5.
- P_B: desplazada respecto a P_A una distancia $d1$ en dirección -X.
- P_D: la base de la torre, está a una distancia $d2$ en -Y desde P_A y a $d1/2$ en -X, además tiene una rotación de -90º en Z respecto a P_A.
- P_C: pieza que llega por la cinta. Tiene la misma orientación que P_D y se recoge en el punto donde toca el sensor.

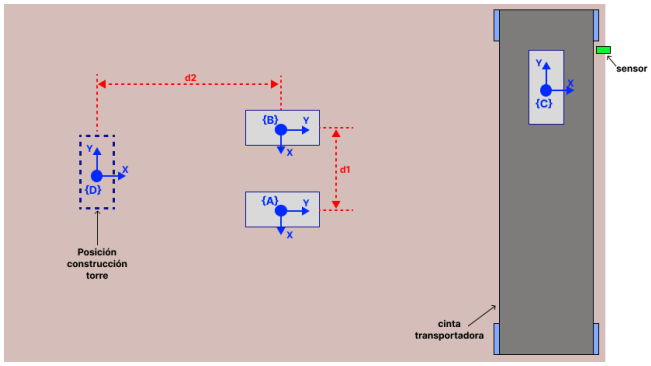

Figura 5: Esquemático de la práctica

Con esta práctica se pretende formar al alumno o alumna en el uso de entornos robóticos con la capacidad de interaccionar con el entorno usando señales de entrada y salida. En una primera fase de la práctica, el alumno deberá tomar la pieza ubicada en P_A y colocarla en la posición P_D, que servirá como base de la torre. A continuación, deberá recoger la pieza situada en P_B y colocarla sobre la anterior, a una altura 'h'. Una vez colocada esta segunda pieza, se procederá a activar la cinta transportadora mediante una entrada digital en el pin 0, permitiendo que la pieza P_C avance hasta que entre en contacto con el sensor. El sistema espera hasta que la salida digital del pin 0 indique que el sensor ha leído que la pieza ya está en posición, en ese momento se para la cinta mediante otra entrada digital, tras lo cual el robot debe moverse para recoger la pieza y completar la torre. En la figura 6 se encuentra el pseudocódigo de la práctica.

5. Conclusiones y lineas futuras

En este trabajo se ha presentado e implementado una arquitectura funcional para un laboratorio de robótica remota utilizando gemelos digitales para potenciar las habilidades de los estudiantes de FP en la industria 4.0. La arquitectura está diseñada para facilitar el proceso de aprendizaje en los alumnos y la adquisición de competencias curriculares en el campo de la robótica, utilizando la metodología de aprendizaje de resolución de problemas. El gemelo digital permite a los estudiantes interactuar con entornos robóticos reales, incluso si sus centros educativos no cuentan con las instalaciones necesarias. Posteriormente, pueden aplicar los conocimientos adquiridos en laboratorios remotos. Se llevaron a cabo experimentos de comunicación en los que un alumno, ubicado en Cracovia, utilizaba

el gemelo digital para controlar un entorno físico situado en Málaga, logrando así realizar la práctica de forma remota. El módulo propuesto tiene las ventajas de ser de código abierto, ampliable y capaz de comunicarse con diversos robots. En la página web del proyecto DITWIN (2024) se puede consultar como descargar e instalar el laboratorio remoto, así como una explicación del proyecto.

Como parte del trabajo futuro, y en línea con el proyecto DiTwin, se tiene previsto probar la arquitectura y el software propuestos con un grupo reducido de estudiantes, con el objetivo de evaluar su funcionamiento y recoger sus opiniones. Estos comentarios serán fundamentales para perfeccionar las versiones posteriores del sistema. Asimismo, se contempla la aplicación de esta arquitectura en otros ámbitos de la robótica más allá del entorno educativo, como la robótica médica, donde el uso de un gemelo digital y un laboratorio remoto conectado puede aportar un valor significativo.

```
async function main(){
    dtwin.CONNECT()
    dtwin.CHECK_EXTERNAL_CONTROL_ALLOWED();
    let homeJoints = [0, -90, 0, -90, 0, 0];

    dtwin.OPEN_GRIP();
    dtwin.MOVEJ(homeJoints);
    moveAndGrab(point1Joints);
    moveAndRelease(releasePointJoints);
    moveAndGrab(point2Joints);
    moveAndRelease(releasePoint2Joints);
    dtwin.WRITE(0,1);
    dtwin.WAIT(0, 1);
    dtwin.WRITE(0,0);
    moveAndGrab(point3Joints);
    moveAndRelease(releasePoint3Joints);
    dtwin.MOVEJ(homeJoints);
    dtwin.CLOSE();
}

function moveAndGrab(appro, point){
    dtwin.MOVEJ(appro);
    dtwin.OPEN_GRIP();
    dtwin.MOVEJ(point);
    dtwin.CLOSE_GRIP();
    dtwin.MOVEJ(appro);
}

function moveAndRelease(appro, point){
    dtwin.MOVEJ(appro);
    dtwin.MOVEJ(point);
    dtwin.OPEN_GRIP();
    dtwin.MOVEJ(appro);
}
```

Figura 6: Pseudocódigo de la practica

Agradecimientos

Este proyecto ha recibido financiación del proyecto 'DiTwin; Digital Twin for VET schools',con identificador: 2023-1-IT01-KA220-VET-000154611.

Referencias

Abdelaziz, O., Luo, M., Jiang, G., Chen, S., 2019. Multiple configurations for puncturing robot positioning. CoRR abs/1903.02281.
URL: http://arxiv.org/abs/1903.02281

DITWIN, 2024. Digital twin for vocational education and training. Recuperado el 6 de mayo de 2025.
URL: https://www.ditwin.eu/

Falah, M. F., Sukaridhoto, S., Al Rasyid, M. U. H., Wicaksono, H., 2020. Design of virtual engineering and digital twin platform as implementation of cyber-physical systems. Procedia Manufacturing 52, 331–336, system-Integrated Intelligence – Intelligent, Flexible and Connected Systems in Products and ProductionProceedings of the 5th International Conference on System-Integrated Intelligence (SysInt 2020), Bremen, Germany.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.11.055

Hawkins, K. P., 2013. Analytic inverse kinematics for the universal robots ur-5/ur-10 arms. Georgia Institute of Technology.
DOI: http://hdl.handle.net/1853/50782

Lanz, M., Lobov, A., Katajisto, K., Mäkelä, P., 2018. A concept and local implementation for industry-academy collaboration and life-long learning. Procedia Manufacturing 23, 189–194, "Advanced Engineering Education & Training for Manufacturing Innovation"8th CIRP Sponsored Conference on Learning Factories (CLF 2018).
DOI: https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.04.015

Lanz, M., Pieters, R., Ghabcheloo, R., 2019. Learning environment for robotics education and industry-academia collaboration. Procedia Manufacturing 31, 79–84, research. Experience. Education. 9th Conference on Learning Factories 2019 (CLF 2019), Braunschweig, Germany.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.013

Li, F., Yang, J., Wang, J., Li, S., Zheng, L., 2019. Integration of digitization trends in learning factories. Procedia Manufacturing 31, 343–348, research. Experience. Education. 9th Conference on Learning Factories 2019 (CLF 2019), Braunschweig, Germany.
URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919304184
DOI: https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.054

Malik, A. A., Brem, A., 2021. Digital twins for collaborative robots: A case study in human-robot interaction. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 68.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.102092

Negri, E., Fumagalli, L., Macchi, M., 2017. A review of the roles of digital twin in cps-based production systems. Procedia Manufacturing 11, 939–948, 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM2017, 27-30 June 2017, Modena, Italy.
URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978917304067
DOI: https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198

Sievers, T. S., Schmitt, B., Rückert, P., Petersen, M., Tracht, K., 2020. Concept of a mixed-reality learning environment for collaborative robotics. Procedia Manufacturing 45, 19–24, learning Factories across the value chain – from innovation to service – The 10th Conference on Learning Factories 2020.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.034

Unity, 2025. Game engine. Recuperado el 6 de mayo de 2025.
URL: https://www.unity.com/

VanDerHorn, E., Mahadevan, S., 2021. Digital twin: Generalization, characterization and implementation. Decision Support Systems 145, 113524.
URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923621000348
DOI: https://doi.org/10.1016/j.dss.2021.113524

Vijayan, K. K., Mork, O. J., 2020. Idealab: A learning factory concept for norwegian manufacturing sme. Procedia Manufacturing 45, 411–416, learning Factories across the value chain – from innovation to service – The 10th Conference on Learning Factories 2020.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.045