

Jornadas de Automática

Implementación de gemelos digitales en Automática. Experiencia docente.

Raúl González-Herbón^{a,*}, Juan J. Fuertes^a, Miguel A. Prada^a, Jose R. Rodríguez-Ossorio^a, Daniel Pérez^a, Manuel Domínguez^a

^aGrupo de investigación SUPPRESS, <https://suppress.unileon.es>,
Escuela de Ingenierías, Universidad de León, Campus de Vegazana s/n, 24007, León, España.

To cite this article: González-Herbón, R., Fuertes, J. J., Prada, M. A., Rodríguez-Ossorio, J. R., Pérez, D., Domínguez, M. 2026. Implementation of digital twins in automatic control. Educational experience. Jornadas de Automática, 47. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2026.47.13745>

Resumen

La creciente digitalización industrial asociada al paradigma de la Industria 4.0 ha impulsado la aparición de nuevas tecnologías orientadas a la integración entre sistemas físicos y virtuales, destacando entre ellas los gemelos digitales. En este contexto, surge la necesidad de adaptar la formación en automática e ingeniería industrial a los nuevos requerimientos tecnológicos. En este trabajo, se presenta una experiencia docente práctica orientada al desarrollo de un gemelo digital industrial mediante la plataforma de simulación y visualización 3D Unity sobre una infraestructura industrial perteneciente al Aula IoT Schneider Electric - Universidad de León. La práctica se estructura en diferentes bloques funcionales que permiten desarrollar progresivamente las capacidades necesarias para la construcción de un gemelo digital industrial funcional. Asimismo, la arquitectura desarrollada permite trabajar, de forma integrada, con conceptos relacionados con la automatización industrial, la digitalización y el modelado basado en datos dentro de un entorno con equipamiento industrial real.

Palabras clave: Gemelo digital, equipamiento industrial real, digitalización, Industria 4.0, formación en automática, sistema ciberfísico

Implementation of digital twins in automatic control. Educational experience.

Abstract

The increasing industrial digitalization associated with the Industry 4.0 paradigm has promoted the emergence of new technologies focused on the integration of physical and virtual systems, with digital twins standing out among them. In this context, there is a growing need to adapt engineering and automation education to new technological requirements. This work presents a practical teaching experience focused on the development of an industrial digital twin using Unity over an industrial infrastructure belonging to the IoT ULE-Schneider Electric Classroom at the University of León. The hands-on task is structured into different functional blocks that progressively develop the capabilities required for building a functional industrial digital twin. Furthermore, the developed architecture allows an integrated approach to concepts related to industrial automation, digitalization, and data-driven modeling within an environment close to real industrial applications.

Keywords: Digital twin, real industrial equipment, digitalization, Industry 4.0, control education, cyber-physical system.

1. Introducción

La evolución de la Industria 4.0 ha impulsado una transformación significativa en los sistemas industriales modernos, promoviendo entornos cada vez más interconectados, automatizados y digitalizados (Xu et al., 2018; Fuertes et al., 2021).

En este contexto, los gemelos digitales han emergido como una de las tecnologías habilitadoras con mayor potencial debido a su capacidad para representar virtualmente sistemas físicos mediante modelos dinámicos sincronizados en tiempo real con el proceso real (González-Herbón et al., 2024; Chi-caiza et al., 2024). Un gemelo digital puede definirse como

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

una representación virtual de un sistema físico capaz de intercambiar información con el proceso real mediante comunicaciones bidireccionales, integrando datos en tiempo real, modelos de simulación y herramientas de análisis (Jones et al., 2020). Gracias a estas capacidades, su aplicación se ha extendido progresivamente a diferentes ámbitos industriales como la fabricación avanzada, la supervisión de plantas, el mantenimiento predictivo, la optimización energética o la asistencia remota (Fuentes et al., 2023; de Prada et al., 2022).

Paralelamente al crecimiento industrial de estas tecnologías, ha surgido la necesidad de adaptar la formación en automática a los nuevos requerimientos de la digitalización industrial (Coşkun et al., 2019). Sin embargo, la enseñanza y desarrollo de aplicaciones basadas en gemelos digitales presenta importantes dificultades debido a la elevada multidisciplinariedad que requieren este tipo de sistemas (Benešová and Tupa, 2017; Hernandez-de Menendez et al., 2020). Los estudiantes debe combinar conocimientos de automatización industrial, adquisición de datos, comunicaciones industriales, programación, modelado virtual, supervisión y análisis de información, aspectos que habitualmente se abordan de forma aislada dentro de los planes formativos tradicionales (Fuller et al., 2020). Esta situación genera una separación entre los conceptos teóricos y su aplicación práctica en entornos industriales reales, lo que dificulta que los estudiantes comprendan con claridad la necesidad de integrar las diferentes tecnologías que intervienen en el desarrollo de un gemelo digital industrial (Fuentes et al., 2023).

Con el objetivo de reducir esta brecha formativa, en este trabajo se presenta una experiencia docente práctica centrada en el desarrollo de un gemelo digital industrial aplicado a un armario de control, que implementa un sistema de automatización real, en el Aula IoT Schneider Electric - Universidad de León¹. La propuesta se desarrolla y se valida en el contexto del módulo formativo en “Automatización y digitalización de la industria”, ofertado por el Grupo de investigación SUPPRESS² de la Universidad de León dentro del proyecto europeo DIGIS3³ para la formación tecnológica en el ámbito empresarial. La experiencia incorpora diferentes bloques tecnológicos asociados a la formación para el desarrollo de gemelos digitales industriales, incluyendo comunicaciones industriales, adquisición y almacenamiento de datos, visualización 3D, interfaces de supervisión y modelos basados en datos. A través de una secuencia progresiva de actividades prácticas, los estudiantes implementan, de manera incremental, las distintas funcionalidades del gemelo digital, trabajando simultáneamente competencias relacionadas con la automatización industrial, la supervisión de procesos y la integración de sistemas digitales. De esta forma, se proporciona un entorno práctico e intuitivo que facilita la comprensión de la arquitectura y funcionamiento de un gemelo digital industrial, acercando a los estudiantes a tecnologías y metodologías cada vez más presentes en el sector industrial actual.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera. La Sección 2 describe el entorno de prácticas empleado en la

experiencia docente, incluyendo el Aula IoT Schneider Electric - ULE y el armario de control utilizado para el desarrollo del gemelo digital. La Sección 3 presenta el diseño de la experiencia docente y los diferentes bloques funcionales que la componen. Posteriormente, la Sección 4 describe el desarrollo de las actividades docentes realizadas. Finalmente, la Sección 5 recoge las principales conclusiones y líneas futuras derivadas del trabajo.

2. Aula IoT Schneider Electric - ULE

La experiencia docente presentada en este trabajo se desarrolló en el Aula IoT Schneider Electric - ULE, una infraestructura orientada a la formación práctica en automatización industrial, ciberseguridad industrial, digitalización y tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0. El aula, desarrollada por el grupo de investigación SUPPRESS de la Universidad de León en colaboración con Schneider Electric, está concebida como un entorno de experimentación y formación tecnológica basado en equipamiento industrial real (Domínguez et al., 2019).

La Figura 1 muestra una vista general del aula. Esta dispone de 10 armarios de control junto con la infraestructura informática y de comunicaciones para la realización de actividades formativas relativas a redes industriales y ciberseguridad industrial. Asimismo, el aula incorpora diferentes servicios de virtualización y acceso remoto que permiten complementar la formación presencial con actividades de formación remota.



Figura 1: Aula IoT Schneider Electric - ULE

2.1. Armario de control

La actividad docente descrita en este trabajo para el desarrollo de gemelos digitales se realizó utilizando los armarios disponibles en el aula (ver Figura 2). Cada armario integra diferentes dispositivos correspondientes a los distintos niveles de la pirámide de automatización industrial, incluyendo nivel de campo, control y supervisión (Domínguez et al., 2022).

A nivel de campo, el sistema dispone de un variador de frecuencia Altivar ATV630 y un motor, así como de protecciones eléctricas gestionables en remoto y un medidor energético

¹<https://aulaschneider.unileon.es/>

²<https://suppress.unileon.es>

³<https://digis3.eu>

PM3255 empleado para la adquisición de variables eléctricas del sistema. El nivel de control se basa en un autómata programable Modicon M340 para la lógica de control y adquisición de señales de campo. Finalmente, el nivel de supervisión incorpora un interfaz HMI y un sistema SCADA para la supervisión y operación del sistema. Todos los dispositivos se encuentran interconectados mediante comunicaciones industriales basadas principalmente en Modbus TCP, permitiendo el acceso en tiempo real a las variables del proceso desde aplicaciones externas.

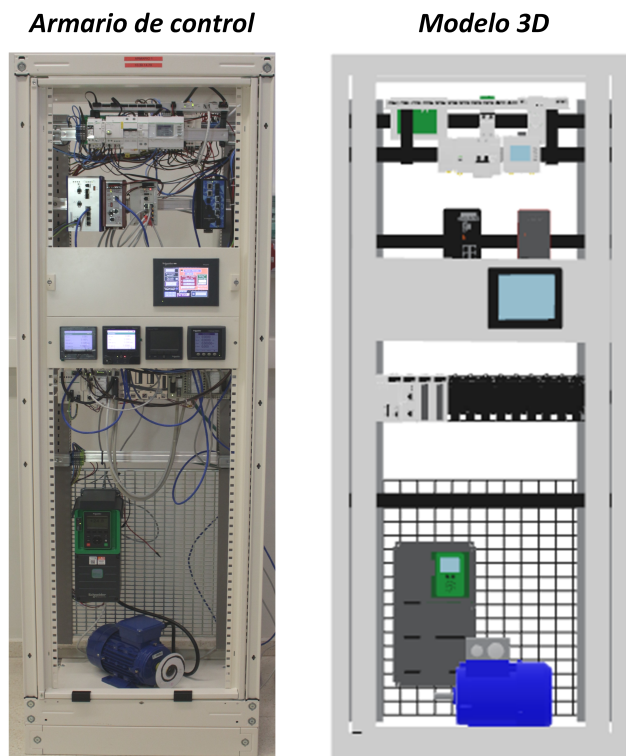


Figura 2: Armario de prácticas y su modelo tridimensional

3. Diseño de la experiencia docente

La experiencia docente se diseña siguiendo una metodología práctica guiada, orientada al desarrollo progresivo de un gemelo digital industrial funcional para el armario de control. Para ello, se emplea la plataforma Unity⁴ como entorno principal de desarrollo ya que permite integrar en una única aplicación funcionalidades de adquisición de datos, visualización 3D, comunicaciones industriales, y supervisión del sistema.

La práctica se estructura en diferentes bloques funcionales en los que se desarrollan progresivamente las competencias necesarias para la construcción del gemelo digital. Cada bloque amplía la arquitectura previamente desarrollada, integrando aspectos de automatización industrial, comunicaciones industriales, adquisición y almacenamiento de datos, supervisión industrial y modelado basado en datos.

3.1. Bloque I: Modelo virtual

En el primer bloque de la práctica se realiza la incorporación del modelo virtual del sistema industrial dentro del entorno Unity. Para ello, se parte de un modelo tridimensional previamente desarrollado del armario industrial utilizado en el aula, el cual se importa y configura dentro de la aplicación. Esta primera etapa define la representación virtual inicial del sistema físico sobre la que posteriormente se integran el resto de funcionalidades del gemelo digital.

En este bloque se introducen conceptos básicos relacionados con la representación virtual de sistemas industriales y la sincronización entre elementos físicos y virtuales dentro de la arquitectura general del gemelo digital. Asimismo, se trabajan aspectos relacionados con la estructuración jerárquica de los diferentes elementos del modelo, la organización de objetos dentro de la escena virtual y la identificación de los principales dispositivos físicos del sistema.

3.2. Bloque II: Comunicaciones industriales y adquisición de datos

Una vez definido el modelo virtual, la siguiente etapa se centra en el desarrollo del sistema de comunicaciones y la adquisición de datos en tiempo real. Para ello, se implementa un cliente Modbus TCP dentro de Unity para establecer la comunicación con los diferentes dispositivos industriales presentes en el armario control, incluyendo el PLC Modicon M340 y el medidor energético PM3255.

En esta etapa, los estudiantes realizan la configuración de las comunicaciones industriales, la identificación de registros Modbus y la lectura de variables procedentes del nivel de campo. Entre las variables adquiridas se incluyen magnitudes eléctricas, variables de estado y señales relacionadas con la operación del sistema industrial. La integración de estas comunicaciones permite sincronizar el comportamiento del entorno virtual con el estado real de la instalación, constituyendo uno de los elementos fundamentales del gemelo digital.

3.3. Bloque III: Almacenamiento y gestión de información

El tercer bloque de la práctica está orientado a la implementación de mecanismos de almacenamiento y gestión de la información adquirida desde el sistema industrial. Para ello, se desarrolla un sistema de registro de datos que permite almacenar variables procedentes del proceso en archivos externos para su posterior análisis y utilización dentro de la aplicación.

Durante esta etapa se trabajan conceptos relacionados con adquisición de datos históricos, trazabilidad de información industrial y gestión básica de registros temporales. Además de facilitar la supervisión del sistema, esta funcionalidad permite disponer de conjuntos de datos reales obtenidos directamente de la instalación industrial, que pueden utilizarse posteriormente para implementar funcionalidades de modelado basado en datos dentro del gemelo digital.

3.4. Bloque IV: Funcionalidades del gemelo digital

El último bloque de la práctica se centra en la incorporación de funcionalidades avanzadas de supervisión, interacción y análisis dentro del gemelo digital. Para ello, se implementan

⁴<https://unity.com/es>

diferentes elementos gráficos e interactivos que permiten representar en tiempo real el estado del sistema industrial, incluyendo variables de operación, animaciones asociadas al funcionamiento del motor y distintos mecanismos de navegación e interacción dentro del entorno virtual.

Adicionalmente, se introducen conceptos básicos de modelado a partir de los datos adquiridos del sistema físico. Utilizando los datos almacenados en las etapas anteriores, se desarrolla un modelo básico de predicción basado en regresión polinómica para estimar determinadas variables de operación del sistema. Aunque en esta experiencia se emplea un método de modelado relativamente simple, la arquitectura propuesta permite incorporar técnicas más avanzadas para el modelado basado en datos de sistemas dinámicos, incluyendo aproximaciones relacionadas con el aprendizaje automático.

Además, en este bloque se integran en una única aplicación las capacidades de supervisión industrial, representación virtual y análisis de datos, completando así el desarrollo del gemelo digital industrial.

4. Experiencia docente

La Figura 3 muestra la arquitectura general del gemelo digital desarrollada durante la experiencia docente. La experiencia fue llevada a cabo con un grupo de diez estudiantes dentro del módulo formativo de Automatización y Digitalización de la Industria impartido en el marco del proyecto europeo DIGIS3. Sobre esta arquitectura, la práctica plantea diferentes actividades guiadas orientadas a implementar progresivamente las distintas funcionalidades necesarias para la construcción del gemelo digital industrial.

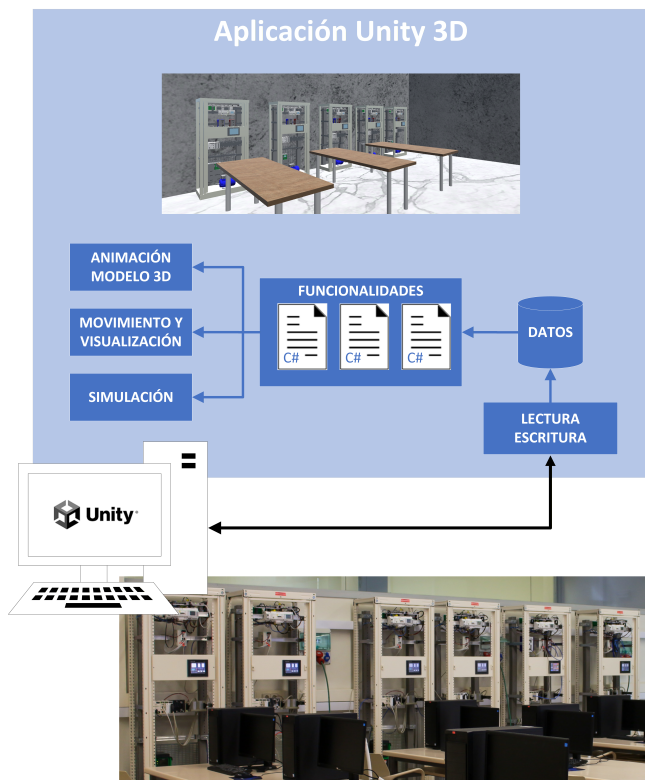


Figura 3: Arquitectura del Gemelo Digital

4.1. Actividades relacionadas con el bloque I

Las primeras actividades de la práctica están orientadas a la familiarización con el entorno software y la integración del modelo virtual del sistema industrial dentro del entorno Unity. Dado que el objetivo de la experiencia docente no se centra en el modelado geométrico del sistema, se parte de un modelo tridimensional previamente diseñado del armario industrial utilizado en el aula.

A partir de este modelo, se realizan dos actividades. Por un lado, el estudiante tiene que importar y estructurar los diferentes elementos que componen el modelo 3D. Por otro lado, también se incorporan los diferentes materiales y texturas de los elementos, así como la configuración de la escena virtual de trabajo. Estas actividades permiten establecer la representación virtual inicial del sistema físico sobre la que posteriormente se integran el resto de funcionalidades del gemelo digital.

4.2. Actividades relacionadas con el bloque II

Una vez integrado el modelo virtual, las siguientes actividades se centran en la configuración del sistema de comunicaciones industriales y adquisición de datos en tiempo real. Todas las comunicaciones utilizadas dentro del entorno industrial se basan en el protocolo Modbus TCP, empleándose tanto en el PLC Modicon M340 como en el medidor de energía PM3255.

Para el desarrollo de estas actividades, se parte de una comunicación Modbus TCP previamente implementada para el PLC Modicon M340, la cual se utiliza como referencia para implementar posteriormente la comunicación con el medidor energético PM3255. A partir de esta arquitectura inicial, se realizan actividades relacionadas con la creación y configuración de clientes Modbus TCP, el establecimiento de conexiones con dispositivos industriales y las peticiones de lectura de variables procedentes del sistema físico.

Con el objetivo de implementar la comunicación con el medidor energético, el estudiante debe trabajar con el mapa de registros Modbus del dispositivo, analizando qué variables son necesarias para el funcionamiento y supervisión del sistema, así como la dirección y tipología de los registros asociados a cada una de ellas. Otra de las actividades planteadas consiste en la lectura e interpretación de variables codificadas mediante registros de 32 bits, introduciendo conceptos relacionados con las funciones de lectura del estándar Modbus, la representación de datos industriales y ordenación de palabras (*big-endian* y *little-endian*). Estas actividades permiten aproximar al alumnado en la integración de dispositivos industriales reales y en el desarrollo de sistemas de adquisición de datos en entornos industriales.

4.3. Actividades relacionadas con el bloque III

Una vez establecidas las comunicaciones con el sistema físico, la práctica incorpora otro bloque de actividades relacionadas con la adquisición y almacenamiento de datos históricos procedentes del sistema. Para ello, se implementa un sistema de registro basado en archivos CSV que permite almacenar variables adquiridas desde los dispositivos industriales.

Las actividades propuestas se centran principalmente en incorporar dentro del sistema de adquisición las variables procedentes del medidor energético PM3255 previamente configuradas durante las actividades del bloque anterior. Para facilitar el desarrollo de esta funcionalidad, también se parte de una implementación previamente desarrollada para las variables adquiridas desde el PLC, la cual sirve como referencia para extender posteriormente el sistema de almacenamiento al resto de dispositivos.

Entre las actividades planteadas se incluyen la incorporación de nuevas variables dentro de la estructura de adquisición, la generación de registros históricos sincronizados con un tiempo de adquisición configurable y la gestión del almacenamiento de información en archivos CSV para su posterior análisis. Estas actividades permiten trabajar conceptos relacionados con adquisición histórica de datos industriales y preparación de conjuntos de datos reales orientados a supervisión y modelado basado en datos dentro del gemelo digital.

4.4. Actividades relacionadas con el bloque IV

El último conjunto de actividades se centra en la incorporación de funcionalidades de supervisión, interacción y modelado basado en datos dentro del gemelo digital. Para ello, se desarrollan diferentes elementos gráficos orientados a representar en tiempo real el estado del sistema, incluyendo paneles de supervisión, visualización de variables eléctricas, animaciones asociadas al funcionamiento del sistema, mecanismos de navegación dentro del entorno virtual y funcionalidades básicas de modelado a partir de datos reales adquiridos desde la instalación industrial.

Una de las actividades propuestas consiste en la configuración del panel de supervisión del sistema, denominado Información, donde se representan diferentes variables relevantes procedentes del proceso industrial y magnitudes calculadas a partir de las variables adquiridas. Asimismo, se desarrollan actividades relacionadas con animación y representación dinámica del estado del sistema mediante modificación de propiedades gráficas en función de variables adquiridas en tiempo real, incluyendo movimiento, color y visibilidad de distintos elementos del entorno virtual. Entre estas actividades destaca la configuración por parte del estudiante de la animación del rotor del motor en función de la velocidad adquirida desde el sistema físico.

Por otro lado, se incorporan actividades relacionadas con navegación y visualización del entorno industrial mediante la configuración de puntos fijos de observación asociados a diferentes armarios de prácticas. Estas actividades permiten trabajar aspectos relacionados con organización de entornos virtuales y representación visual de infraestructuras industriales dentro del gemelo digital.

Finalmente, la práctica introduce conceptos básicos de modelado basado en datos utilizando información previamente adquirida y almacenada desde el sistema físico. Para ello, se emplean variables eléctricas medidas durante el funcionamiento del sistema para desarrollar un modelo sencillo orientado a estimar la velocidad del motor mediante regresión lineal a partir de datos exportados y procesados desde una hoja de cálculo Excel. Aunque el modelo implementado presenta un carácter introductorio, esta actividad permite mostrar el proceso general de utilización de datos reales procedentes de una

instalación industrial para el desarrollo de modelos dentro de un gemelo digital, sirviendo como base para la incorporación futura de técnicas más avanzadas de modelado y análisis de datos.

La Figura 4 muestra el resultado final del gemelo digital desarrollado durante la experiencia docente, integrando las diferentes funcionalidades de supervisión, adquisición de datos, interacción y representación visual implementadas a lo largo de la práctica.

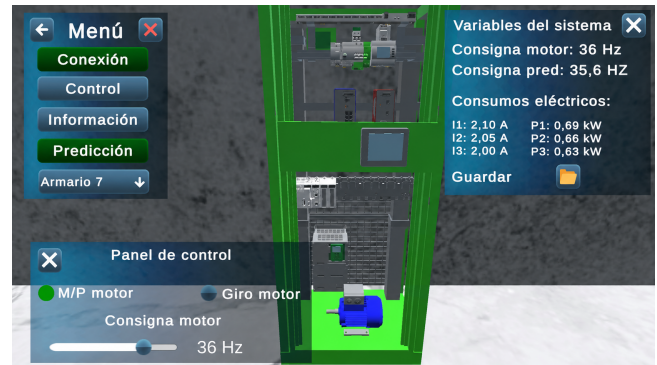


Figura 4: Gemelo digital desarrollado con la experiencia docente

5. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado una experiencia docente práctica orientada al desarrollo de un gemelo digital industrial mediante Unity sobre una infraestructura industrial real perteneciente al Aula IoT Schneider Electric - ULE. La propuesta fue implementada y utilizada durante el módulo formativo de Automatización y Digitalización de la Industria impartido en el marco del proyecto europeo DIGIS3, integrando dentro de una única aplicación funcionalidades relacionadas con representación virtual, comunicaciones industriales, adquisición y almacenamiento de datos, supervisión de procesos y modelado básico basado en datos.

La experiencia desarrollada permite trabajar de forma conjunta competencias relacionadas con automatización industrial, supervisión, digitalización y comunicaciones industriales mediante una aproximación práctica basada en sistemas reales. Asimismo, el carácter progresivo de la práctica facilita introducir de forma estructurada las diferentes tecnologías involucradas en el desarrollo de un gemelo digital industrial, favoreciendo una comprensión global de la arquitectura y funcionamiento de este tipo de sistemas. Aunque la experiencia se desarrolló de forma presencial, la infraestructura del Aula IoT Schneider Electric - ULE permite extender este tipo de actividades hacia escenarios de laboratorio remoto en futuras ediciones, gracias al acceso remoto seguro mediante VPN.

Uno de los aspectos más destacables de la propuesta es la integración dentro de una misma aplicación de diferentes tecnologías que habitualmente se abordan de forma independiente dentro de la formación tradicional en automática. La utilización de comunicaciones industriales reales y datos procedentes de una instalación física permite además aproximar al estudiantado a problemáticas y arquitecturas similares a las presentes en entornos industriales reales, proporcionando un entorno representativo para el desarrollo de actividades relacionadas con digitalización industrial y sistemas ciberfísicos.

Aunque la experiencia se ha desarrollado sobre la infraestructura específica del grupo SUPPRESS, la metodología propuesta se estructura en bloques funcionales transferibles a otros sistemas industriales basados en arquitecturas de control y supervisión similares, favoreciendo su adaptación a distintos contextos docentes.

Como líneas futuras, se plantea ampliar las capacidades de modelado basado en datos incorporadas dentro del gemelo digital mediante técnicas más avanzadas de identificación de sistemas y aprendizaje automático, incluyendo metodologías *sparse* como *Sparse Identification of Nonlinear Dynamics* (SINDy). Asimismo, se propone la incorporación progresiva de esta experiencia docente dentro de asignaturas relacionadas con automatización industrial y digitalización del Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática, permitiendo integrar este tipo de tecnologías dentro de la formación reglada en automática.

Agradecimientos

Este trabajo es fruto de la colaboración entre el grupo de investigación SUPPRESS y Schneider Electric, establecida en virtud del acuerdo marco entre Schneider Electric y la Universidad de León. Además, ha contado con el apoyo del Plan de Apoyo a la Innovación Docente (PAID) de la Universidad de León.

Referencias

- Benešová, A., Tupa, J., 2017. Requirements for education and qualification of people in industry 4.0. *Procedia manufacturing* 11, 2195–2202.
DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.366
- Chicaiza, W. D., Gómez, J., Sánchez, A. J., Escaño, J. M., 2024. El gemelo digital y su aplicación en la automática. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 21, 91–115.
URL: <https://polipapers.upv.es/index.php/RIAI/article/view/20175>
DOI: 10.4995/RIAI.2024.20175
- Coşkun, S., Kayıkçı, Y., Gençay, E., 2019. Adapting engineering education to industry 4.0 vision. *Technologies* 7 (1), 10.
- de Prada, C., Galán-Casado, S., Pitarch, J. L., Sarabia, D., Galán, A., Gutiérrez, G., 2022. Gemelos digitales en la industria de procesos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 19, 285–296.
URL: <https://polipapers.upv.es/index.php/RIAI/article/view/16901>
DOI: 10.4995/RIAI.2022.16901
- Domínguez, M., Morán, A., Alonso, S., Prada, M. A., Pérez, D., Fuertes, J. J., 2019. Experimentation environment for industrial control systems cybersecurity: On-site and remote training. *IFAC-PapersOnLine* 52 (9), 248–253.
DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.08.209
- Domínguez, M., Pérez, D., Morán, A., Alonso, S., Prada, M. A., Fuertes, J. J., 2022. Remote training in cybersecurity for industrial control systems. *IFAC-PapersOnLine* 55 (17), 320–325.
DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.09.299
- Fuertes, J. J., González-Herbón, R., Rodríguez-Ossorio, J. R., González-Mateos, G., Alonso, S., Morán, A., 2023. Guidelines to develop demonstration models on industry 4.0 for engineering training. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 36, 1465–1481.
URL: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/0951192X.2023.2189308>
DOI: 10.1080/0951192X.2023.2189308
- Fuertes, J. J., Ángel Prada, M., Rodríguez-Ossorio, J. R., González-Herbón, R., Pérez, D., Domínguez, M., 2021. Environment for education on industry 4.0. *IEEE Access* 9, 144395–144405.
URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9576059>
DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3120517
- Fuller, A., Fan, Z., Day, C., Barlow, C., 2020. Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research. *IEEE Access* 8, 108952–108971.
DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998358
- González-Herbón, R., González-Mateos, G., Rodríguez-Ossorio, J. R., Domínguez, M., Alonso, S., Fuertes, J. J., 2024. An approach to develop digital twins in industry. *Sensors* 24 (3).
URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/3/998>
DOI: 10.3390/s24030998
- Hernandez-de Menendez, M., Escobar Díaz, C. A., Morales-Menendez, R., 2020. Engineering education for smart 4.0 technology: a review. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJDeM)* 14 (3), 789–803.
DOI: 10.1007/s12008-020-00672-x
- Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., Hicks, B., 2020. Characterising the digital twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 29, 36–52.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>
DOI: 10.1016/j.cirpj.2020.02.002
- Xu, L. D., Xu, E. L., Li, L., 2018. Industry 4.0: state of the art and future trends. *International Journal of Production Research* 56, 2941–2962.
URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207543.2018.1444806>
DOI: 10.1080/00207543.2018.1444806