

Diseño de una Plataforma Didáctica IoT de Bajo Costo con Gemelo Digital para la Formación Técnica en Industria 4.0

Jaime Loreto Neria Mendoza^{1,2} , Carlos Arturo Espinoza Galicia¹ y Luis Díaz Gomez^{1,*}

¹ Afiliación 1; TecNM/Campus ITS Huichapan, División de Maestría en Ingeniería Mecatrónica, México

² Afiliación 2; Centro de Estudios Tecnológicos Industrial y de Servicios No. 26, Carrera Técnica de Mecatrónica, México

* Correspondencia: jaimeloreto.neria.ce26@dgeti.sems.gob.mx, am24021544@iteshu.edu.mx.

Resumen: La transición hacia la industria 4.0 demanda que la formación técnica incorpore arquitecturas de automatización interoperables y recursos de laboratorio alineados con tecnologías digitales emergentes. Este trabajo presenta el diseño y la prueba de concepto de la arquitectura de una Plataforma Didáctica de Automatización que integra tecnologías propias de la Industria 4.0. La metodología se basa en la simulación de un PLC mediante Modbus Slave (Modbus/TCP), gestionada por Node-RED, encargado de adquirir registros y de publicar estados en MQTT, posteriormente almacenados en InfluxDB mediante n8n. El aporte principal consiste en el desarrollo de un Gemelo Digital de datos implementado en Grafana, operativo en tiempo casi real, que permite la visualización y el control bidireccional de entradas y salidas simuladas del PLC. De manera complementaria, se incorporó un sistema automatizado de reportes diarios mediante un agente de IA de Groq, orientado al análisis del estado operativo. Los resultados confirman la viabilidad de la arquitectura como entorno de aprendizaje avanzado e interoperable.

Keywords: *Industry 4.0; digital twin; IoT.*

Citar este trabajo: Neria Mendoza, J. Loreto.; Espinoza G., Carlos A.; Díaz G., Luis. Diseño de una Plataforma Didáctica IoT de Bajo Costo con Gemelo Digital para la Formación Técnica en Industria 4.0.

REIA 2025, 9, 1.

Recibido: 01/12/2025

Aceptado: 16/12/2025

Publicado: 27/02/2026

1. Introducción

La constante evolución de la Industria 4.0 ha transformado los requerimientos de las competencias técnicas, haciendo indispensable el dominio de sistemas ciberfísicos, Internet de las Cosas (IoT) y automatización industrial [1], [2]. Específicamente, en instituciones de formación técnica como el CETis 026, existe la necesidad de implementar entornos de aprendizaje que simulen fielmente procesos industriales reales, pero que sean accesibles y de bajo costo. Los sistemas de automatización tradicionales a menudo carecen de la flexibilidad y la interoperabilidad necesarias para exponer datos en formatos modernos, limitando la enseñanza de conceptos avanzados como el Gemelo Digital [3], [4].

El concepto de Gemelo Digital ha demostrado ser una herramienta poderosa no solo en la industria para la monitorización y optimización [5], sino también en el sector educativo para la simulación avanzada de procesos [1]. El uso de plataformas de código abierto como Node-RED y protocolos estándar de la industria como Modbus/TCP y MQTT permite construir arquitecturas ligeras pero robustas [6], [7]. Estas tecnologías, implementadas en plataformas base IoT [8], facilitan la creación de entornos de aprendizaje activos donde los estudiantes pueden interactuar con simulaciones en tiempo real y comprender la compleja cadena de datos desde el sensor hasta la capa de visualización [9].

La interoperabilidad entre software y hardware simulado es un desafío metodológico que se aborda mediante un bus de datos estandarizado [4], [6]. La integración de herramientas de orquestación y bases de datos de series de tiempo son fundamentales para procesar grandes volúmenes de datos generados en sistemas de automatización [7]. Recientemente, la incorporación de agentes de Inteligencia Artificial (IA), como modelos

grandes de lenguaje (LLMs) o agentes basados en Groq, añade una capa de valor al automatizar el análisis y la generación de reportes técnicos a partir de los datos registrados [10].

En respuesta a lo anterior y considerando el desarrollo actual del proyecto, el objetivo de este trabajo es presentar la arquitectura, la implementación y la validación de la interoperabilidad de una plataforma didáctica de automatización que incorpora un Gemelo Digital en tiempo real y un sistema de análisis de datos automatizado, demostrando su viabilidad técnica para la formación en el CETis 026.

La implementación de la arquitectura permitió la creación de un Gemelo Digital operativo en Grafana. La Figura 1 ilustra el flujo de datos que demuestra la interoperabilidad del sistema. La latencia del ciclo Modbus -> MQTT -> Influx ->DBGrafana fue analizada, observándose una actualización del dashboard en tiempo casi real (La medición precisa de la latencia y la evaluación cuantitativa del desempeño están pendientes de la fase de validación final del proyecto, sin embargo, cualitativamente el desempeño es adecuado para la función didáctica y operativa). Esto valida la capacidad del sistema para operar en tiempo casi real.

2. Materiales y Métodos

2.1 Metodología de Diseño y Desarrollo

El diseño y la implementación de la Plataforma de automatización se planeo bajo un enfoque de ingeniería de sistemas con el fin de asegurar la trazabilidad entre las necesidades formativas de los estudiantes y la arquitectura final. Para lograrlo se empleó un modelo en V, adaptado a los sistemas ciberfísicos (CPS-IoT), en el cual se incorporan ciclos ágiles orientados a la mejora continua. Este modelo fue elegido con el propósito de garantizar, de manera rigurosa, la adecuada implementación de cada componente de software, previo a la validación funcional de la plataforma completa, tal como se muestra en la Figura 1, garantizando que el sistema sea confiable y útil en el contexto educativo. Los ciclos de mejora facilitaron la incorporación progresiva de funcionalidades iniciando con la conexión del PLC y el flujo de datos con Node-RED hasta la integración de la capa de análisis de Inteligencia Artificial.

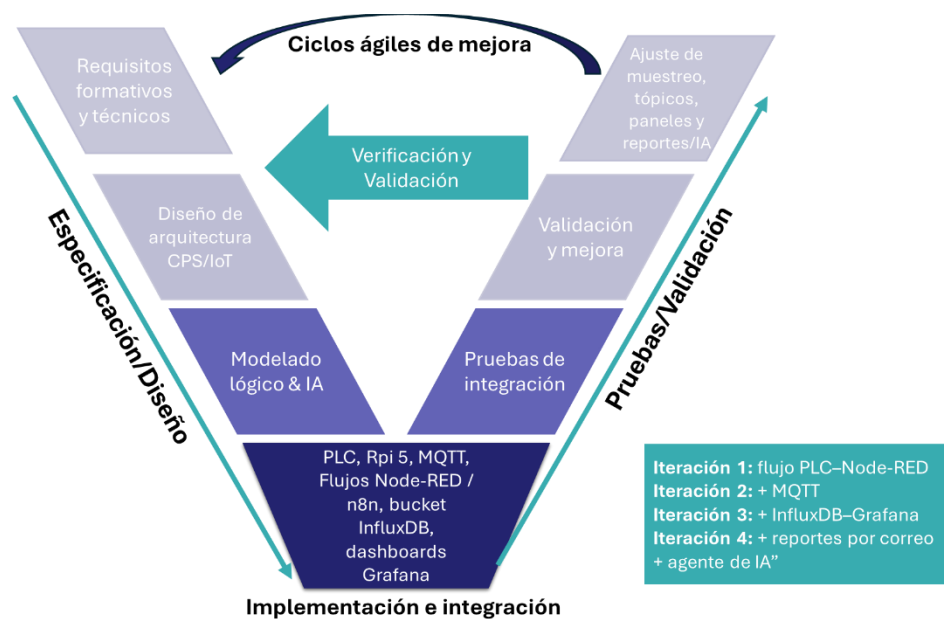


Figura 1. Metodología basada en el modelo en V con iteraciones ágiles para el desarrollo de la plataforma CPS-IoT.

2.2 Arquitectura de Interoperabilidad y Componentes de Software Libre

La plataforma se fundamenta en una arquitectura de cuatro niveles funcionales que garantizan la interoperabilidad. En el nivel de campo, la lógica de control fue simulada mediante el software Modbus Slave que emula el comportamiento de PLCs exponiendo los datos de estado como registros Modbus/TCP. Este protocolo es un estándar clásico de la industria que permite la conexión abierta con la capa de IoT. El nivel de borde IoT y orquestación opera mediante un servidor montado en una Raspberry Pi 5 con Ubuntu Server, empleando un despliegue de contenedores Docker para encapsular los servicios, lo que garantiza su reproducibilidad y favorece a la escalabilidad de la arquitectura. El orquestador principal es Node-RED, configurado para realizar las operaciones de lectura y escritura en los registros Modbus/TCP del PLC simulado además de desempeñarse como traductor entre el protocolo industrial y el bus de datos IoT. Este bus se implementa mediante un broker MQTT (EMQX), encargado de gestionar el intercambio de mensajes de manera asíncrona entre los distintos componentes del sistema.

2.3. Flujo de Control, Gemelo Digital y Analítica

El gemelo digital de datos y la capa de persistencia se implementan mediante InfluxDB y Grafana. El software de automatización de flujos n8n se encarga de suscribirse a los tópicos MQTT generados por Node-RED y persiste los datos en InfluxDB, aprovechando su naturaleza orientada a series temporales. El control bidireccional es indispensable para la funcionalidad del Gemelo digital en Grafana, se desarrolla de la siguiente manera: la interacción del usuario en el dashboard de Grafana genera un evento HTTP (webhook), capturado por n8n, el cual publica el comando de control en un tópico MQTT específico. Dicho tópico es gestionado por Node-RED, que ejecuta la escritura fina; sobre los registros binarios de tipo Coil del PLC simulado. La interoperabilidad alcanzada entre estas tecnologías de código abierto valida la arquitectura como una solución didáctica robusta y de bajo costo. Finalmente, la plataforma incorpora un nivel de analítica mediante un agente de inteligencia artificial basado en Groq que consulta los datos almacenados en InfluxDB y genera automáticamente un informe técnico diario del estado del sistema, el cual es distribuido mediante canales de comunicación convencionales como Gmail y Telegram.

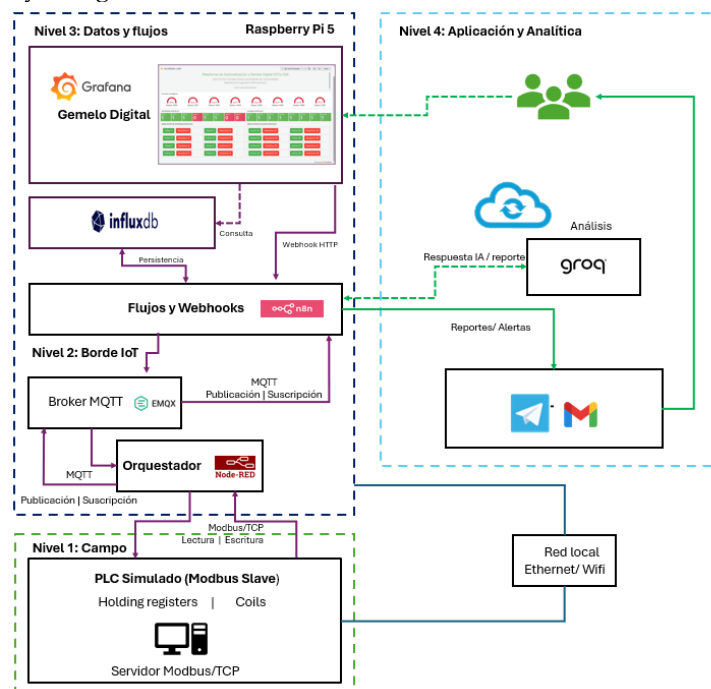


Figura 2. Arquitectura de la plataforma de gemelo digital operativo basada en Modbus/TCP, MQTT, n8n, InfluxDB y Grafana.

2.4. Disponibilidad de Materiales y Consideraciones Éticas

La plataforma propuesta se construyó priorizando el uso de herramientas de software de código abierto y protocolos estándar de la industria. El servidor principal es una Raspberry Pi 5 con Ubuntu Server, mientras que el PLC se emula mediante Modbus Slave en una computadora convencional. Sobre la Raspberry Pi se desplegaron Node-RED, un broker MQTT, InfluxDB, Grafana y n8n. La arquitectura basada en contenedores Docker y los flujos de orquestación en Node-RED y automatización en n8n permiten que el entorno experimental sea aplicado en cualquier hardware compatible con Linux sin costos de licenciamientos facilitando que otros centros educativos puedan reproducir la arquitectura.

De conformidad con las políticas de ciencia abierta, los datos de series de tiempo generadas durante las pruebas de interoperabilidad se encuentran almacenadas en la base de datos de InfluxDB del proyecto. Si bien el acceso directo en tiempo real está restringido por seguridad de red, los datasets utilizados para generar las gráficas de resultados del gemelo digital están disponibles para cualquier lector bajo solicitud al autor de correspondencia. Además, los esquemas de configuración de los bloques de Node-RED y los dashboard de Grafana pueden ser compartidos para fines académicos.

En esta fase del proyecto el trabajo se limita a la validación técnica con un PLC simulado: no se involucró a estudiantes ni se recopiló datos personales. Únicamente se manejan variables técnicas del sistema por lo que no se procesan datos sensibles ni identificadores de personas.

3. Resultados

La fase experimental permitió corroborar la viabilidad técnica de la arquitectura propuesta, demostrando que la integración de herramientas Open Source es suficiente para sostener un entorno de automatización confiable y reactivo. A continuación, se describen los hallazgos que validan la fluidez del Gemelo Digital de datos como la eficacia de los servicios de inteligencia.

3.1 Interoperabilidad Modbus/TCP-MQTT-InfluxDB

El despliegue de la arquitectura de cuatro capas logró establecer una comunicación estable y bidireccional entre el simulador de campo y la interfaz de usuario. Más allá de la conectividad básica, las pruebas realizadas evidenciaron que el sistema responde adecuadamente a las exigencias dinámicas de una práctica de laboratorio.

El comportamiento de sistema se evaluó bajo los siguientes criterios:

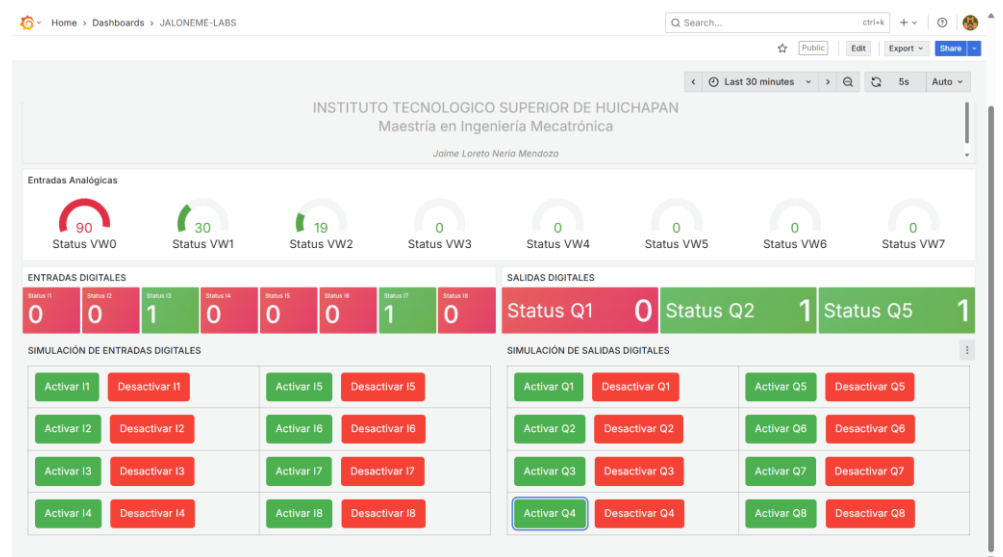
- Sincronización de lectura: Se modificaron los valores en los Holding Registers del PLC simulado que representan entradas y salidas del PLC. Los indicadores en el dashboard confirman la integridad de la cadena de datos.
- Efectividad del lazo de control: La interacción con los botones en la interfaz web disparó los webhooks hacia n8n sin pérdida de eventos, ejecutando la escritura en las salidas del PLC de forma efectiva.
- Latencia operativa percibida: Desde la perspectiva del usuario, la respuesta es prácticamente inmediata, lo cual valida su idoneidad para entornos educativos donde la retroalimentación inmediata es esencial para el aprendizaje.

La Tabla 1 muestra los parámetros técnicos que se lograron consolidar tras las pruebas realizadas, demostrando la estabilidad de los protocolos elegidos.

Tabla 1. Resumen de parámetros de interoperabilidad validados.

Componente del Sistema	Función Validada	Resultado Observado
Modbus/TCP	Interfaz de Campo	Lectura y escritura correcta del 100% de los registros mapeados
MQTT (EMQX)	Transporte de Datos	Transmisión asíncrona estable en red local (LAN)
InfluxDB	Historización	Escritura continua de series de tiempo sin corrupción de datos
Grafana	Interfaz HMI	Actualización dinámica de widgets y respuesta a eventos de usuario

En la Figura 3 se observan los indicadores de estado (*widgets*) sincronizados con los registros del PLC y los botones de mando para el control manual, validando la visualización en tiempo casi real.

**Figura 3.** Interfaz del Gemelo Digital en Grafana.

3.2 Sistema de reportes automáticos y notificaciones

Después de asegurar que el gemelo digital funcionaba de forma estable, se activó el sistema de reportes diarios implementado en n8n. La incorporación del agente de Groq represento un salto cualitativo en la funcionalidad de la plataforma. A diferencia de los sistemas SCADA tradicionales que suelen limitarse a mostrar eventos, la inteligencia artificial permite transformar los datos obtenidos en un reporte técnico comprensible por el usuario.

- El flujo de trabajo automatizado operó exitosamente siguiendo la siguiente secuencia lógica de procesamiento:
- Ingesta de contexto: El sistema accede al histórico reciente almacenado en la base de datos de serie de tiempo para identificar el estado operativo.
- Interpretación semántica: El modelo de lenguaje procesa las variables numéricas y booleanas, convirtiéndolas en un resumen textual coherente y detallado.
- Difusión proactiva: Sin necesidad de intervención humana, los reportes fueron generados y distribuidos automáticamente a través de Telegram y correo electrónico a los destinatarios configurados.

Como se ilustra en la Figura 4, esta funcionalidad permite que el usuario reciba un diagnóstico claro del sistema directamente en su dispositivo móvil, complementando la supervisión visual en tiempo real.



Figura 4. Ejemplo de reporte técnico por correo generado automáticamente por el agente de IA.

Además, se probaron reglas simples de alerta en tiempo real, cuando una variable excedía un umbral predefinido, n8n enviaba un mensaje de aviso a un canal de Telegram como se observa en la Figura 5. Aunque la extensión de estas alertas a WhatsApp y el diseño de reglas más sofisticadas se encuentra aun en desarrollo, los ensayos iniciales muestran que la arquitectura soporta este tipo de funcionalidad sin pérdida de estabilidad.



Figura 5. Ejemplo de reporte técnico por correo generado automáticamente por el agente de IA.

En conjunto, estos resultados indican que la plataforma no solo registra y muestra datos, sino que también es capaz de brindar acompañamiento al usuario con resúmenes y avisos oportunos, acercándose a un escenario de supervisión similar a l de una planta industrial, pero adaptado al contexto educativo.

3.3 Análisis de costos y viabilidad

Para validar la viabilidad de la arquitectura propuesta, se realizó un análisis comparativo de costos frente a una solución comercial estándar equivalente en prestaciones de E/S y conectividad como lo es el PLC Siemens S7-1200 CPU 1214c con panel físico KTP400.

Como se detalla en la Tabla 2, la implementación del prototipo basado en Raspberry Pi 5 represento un costo total de \$4067 MXN. En Contraste, adquirir la infraestructura equivalente comercial implicaría una inversión de \$25 500 considerando el hardware y licenciamiento de software, lo que representa un ahorro neto del 84% para la institución.

Tabla 2. Comparativa de costos de implementación (Pesos Mexicanos).

Rubro	Solución Comercial (Estándar Industrial)	Plataforma Propuesta (Prototipo Didáctico)
Controlador	\$9,500 (CPU 1214C DC/DC/DC)	\$4,067 (Kit Raspberry Pi 5 8GB + Accesorios)
Interfaz HMI	\$9,000 (Panel KTP400 Basic 4")	\$0 (Dashboard Web en Grafana)
Licencia Software	\$7,000 (TIA Portal STEP 7 Basic)	\$0 (Node-RED / Docker / Linux)
Costo Total Estimado	~\$25,500 MXN	\$4,067 MXN
Ahorro Relativo	—	84.0 %

Nota: Los costos comerciales se basan en precios promedio de mercado para equipos nuevos en distribuidores autorizados en México (2025). El costo del prototipo corresponde a la inversión real realizada en placa de desarrollo, fuente de alimentación y sistema de enfriamiento.

4. Discusión

Los resultados obtenidos validan la hipótesis que es posible construir una plataforma de automatización robusta y funcional utilizando únicamente herramientas de software libre y hardware de bajo costo. Al comparar esta arquitectura con las soluciones didácticas convencionales se evidencia que la propuesta presentada supera las barreras económicas asociadas al licenciamiento, sin comprometer el acceso a tecnologías de vanguardia como el gemelo digital y la inteligencia artificial.

Una diferencia sustancial respecto a los kits de entrenamiento comerciales radica en la transparencia del flujo de datos. Mientras que los equipos industriales suelen operar como cajas negras donde los protocolos de comunicación están encapsulados, la arquitectura implementada obliga al estudiante a interactuar directamente con cada capa del modelo IoT. Esto tiene una implicación pedagógica directa: transforma al estudiante de un operador de software a un arquitecto de sistemas, capaz de comprender la interoperabilidad entre protocolos heterogéneos como lo es Modbus/TCP, MQTT y HTTP, sin duda una competencia técnica cada vez más requerida en el contexto de la industria 4.0.

La integración exitosa del agente de Groq para la generación de reportes posiciona esta plataforma en la frontera de la industria 5.0, donde la colaboración entre el humano y las tecnologías inteligentes constituye el eje central del desarrollo tecnológico. A diferencia de los ecosistemas SCADA convencionales utilizados en la educación técnica, que requieren una interpretación manual detallada de las tendencias, la capacidad de la plataforma para narrar el estado del sistema facilita el acceso a herramientas de analítica avanzada, posibilitando diagnósticos más ágiles y precisos.

No obstante, el estudio presenta limitaciones inherentes a su naturaleza de prototipo simulado. Al utilizar un PLC simulado, no se evalúan fenómenos físicos críticos presentes en una planta real, como el ruido electromagnético, la latencia de red bajo carga o las fallas de instrumentación. Por tanto, los resultados de interoperabilidad deben interpretarse como una validación funcional de la arquitectura de software, y no necesariamente como una acreditación de robustez industrial en ambientes de operación exigentes.

Con base en las evidencias y las limitaciones identificadas, las siguientes etapas de investigación se centrarán en dos ejes principales. mediante la implementación de la plataforma en un entorno controlado con estudiantes del CETis 026, con el objetivo de medir de manera cuantitativa el impacto de la herramienta en la adquisición de competencias de programación y redes industriales. Por otro lado, se desarrollará el módulo pendiente para la gestión de alertas críticas, enfocado en la detección de estados de alarma en tiempo real y su notificación inmediata a través de mensajería instantánea (WhatsApp Business API). Este componente complementará el sistema actual de reportes por correo electrónico, cerrando así el ciclo de respuesta ante incidentes.

5. Conclusiones

El desarrollo de la plataforma ha cumplido con el objetivo de validar una arquitectura de interoperabilidad robusta y de bajo costo para la formación técnica. Se confirma que la orquestación de contenedores sobre una Raspberry Pi 5 ofrece la capacidad necesaria para sostener servicios de automatización y Gemelo Digital en tiempo casi real, reduciendo la dependencia de infraestructura basada en servidores de alto costo.

La incorporación de la Inteligencia Artificial para la generación de reportes técnicos demostró ser funcional, ya que transforma datos crudos en narrativas comprensibles y útiles para la toma de decisiones. En conjunto, esta propuesta provee al CETis 026 de una herramienta tecnológica alineada con los principios de la Industria 4.0, viable técnica y económicamente adecuada para su implementación en el ámbito educativo.

Al mismo tiempo, el estudio reconoce que el sistema se encuentra en una fase inicial de madurez: aun se trabaja con un PLC simulado, no se han incorporado modelos dinámicos avanzados del proceso físico y tampoco se ha realizado una evaluación sistemática del impacto pedagógico. Estos aspectos delimitan con claridad las líneas de investigación futura, que incluye la migración hacia un PLC físico y una célula de automatización real, el enriquecimiento del gemelo digital con modelos de comportamiento y marcos formales como AAS/RAMI 4.0, así como el diseño de experiencias de aula que permitan medir cómo esta plataforma contribuye al desarrollo de competencias en los estudiantes de Mecatrónica.

En síntesis, la propuesta representa un primer avance tangible hacia una plataforma de gemelo digital para la formación técnica en el CETis 026: suficientemente madura para ser aplicada en prácticas de laboratorio, y al mismo tiempo, lo bastante flexible para evolucionar conforme a las necesidades de la propia institución.

Contribución: Conceptualización, J.L.N.M.; metodología, J.L.N.M.; software, J.L.N.M.; validación, J.L.N.M. y C.A.E.G.; análisis formal, C.A.E.G.; investigación, J.L.N.M.; redacción—borrador original, J.L.N.M.; redacción—revisión y edición, C.A.E.G. y L.D.G. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Agradecimientos: Se agradece al Centro de Estudios Tecnológicos Industrial y de Servicios No. 026 (CETis 026) por las facilidades otorgadas para la implementación del caso de estudio, y al Instituto Tecnológico Superior de Huichapan (ITESHU) por el respaldo académico y los recursos institucionales brindados para la realización de este proyecto. Asimismo, expresamos nuestro agradecimiento a la empresa Suministros de Ferretería y Electricidad (SUMIFEL) por la donación de componentes electrónicos esenciales para el desarrollo y validación del prototipo experimental.

Conflicto de interés: Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Referencias

- [1] G. M. L. F., et al. "Evaluación del uso de gemelos digitales en los sistemas de producción." *Aibi revista de investigación, administración e ingeniería*, vol. 12, no. 3, 2024.
- [2] IADB Publications. "Reporte de tecnología: Gemelos Digitales." 2024.
- [3] W. D. Chicaiza, et al. "El Gemelo Digital y su aplicación en la Automática." *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 2024.
- [4] Zucchetti Spain. "¿Qué es la interoperabilidad de sistemas en la industria?." *ZucchettiBlog ERP-CRM*, 2025.
- [5] I. P. Regueiro. "La revolución de los gemelos digitales: Transforma la industria con IoT e IA." *UNIR*, 2025.
- [6] R. V. Castro, et al. "Arquitectura IoT basada en Node-RED y MQTT para el monitoreo ambiental en entornos agrícolas." *ResearchGate*, 2025.
- [7] B. M. Olvera Morán & M. Y. Olvera Morán. "Tecnologías Open Source para la implementación del IoT en la industria 4.0." *E-IDEA 4.0 Revista Multidisciplinaria*, vol. 2, no. 3, 2020.
- [8] J. I. Berrocal. "Plataforma base IoT de código abierto para el despliegue de aplicaciones." *O2 Repositori UOC*, 2021.
- [9] E. J. I. Valiente, et al. "Interoperabilidad digital en software educativo para la didáctica en la docencia universitaria." *EPISTEME KOINONIA*, vol. 4, no. 8, 2021.

- [10] J. A. G. Macías, et al. "Inteligencia Artificial: transformación, retos y prospectiva social." Astra Ediciones, 2024.
- [11] L. A. Cruz Salazar, H. S. Tovar, E. A. Prada Salamanca, J. C. Márquez Juárez, y E. Monroy Cruz, "Aprendizaje adaptativo e interoperabilidad en I4.0: estudio de ACase basado en agentes. Gemelo digital con shell de administración de activos," presentación académica, Univ. Antonio Nariño, Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica, Colombia, 2025.