








CyberTwinNet - Colombia: A collaborative network of Remote and Online Labs for Industry 4.0 Education for Latin America

Luis Alberto Cruz Salazar , PhD¹, David Santiago Delgadillo Leguizamón , MSc¹, Adriana López-Vargas , MSc¹, Ernesto Monroy Cruz , PhD², and Libis Valdez-Cervantes , PhD^{3,4}, Juan Sebastián Sánchez-Gómez , MSc⁵, María Mercedes Larrondo-Petrie , PhD⁶

¹ *Universidad Antonio Nariño*, Colombia; e-mail: luicruz@uan.edu.co

² *Tecnológico Nacional de México/IT de Atitalaquia*, México

³ *Fundación Universitaria Antonio de Arévalo*, Colombia; e-mail: libis.valdez@unitecnar.edu.co

⁴ *LACCEI*, Estados Unidos de América








⁵ *Universidad ECCI*, Colombia

⁶ *Florida Atlantic University*, Estados Unidos de América

Abstract– *The Fourth Industrial Revolution has driven digitization and automation in engineering education, highlighting the need to update training programs to prepare students for modern industrial environments. However, the implementation of remote and online laboratories remains limited in Latin America due to barriers such as poor technological infrastructure and a lack of standardized methodologies. CyberTwinNet-Colombia emerges as a solution to this problem, establishing a collaborative network of laboratories in three Colombian universities to improve teaching in Industry 4.0 by integrating specialized hardware and software. The platform allows remote interaction with industrial equipment and experimentation in real and simulated environments. Through a pilot with students from Colombia and Mexico, the positive impact on learning competencies in CPPS and DTs was evidenced. However, there are still technical and pedagogical challenges, such as connectivity and adapting teachers and students to these technologies. This study highlights the importance of strengthening inter-university collaboration and developing innovative methodologies to ensure the success of similar initiatives in the region.*

Keywords– *Industry 4.0, Remote labs, Cyber-Physical Systems, Digital Twins, Engineering education.*

CyberTwinNet – Colombia: Una red colaborativa de Laboratorios Remotos y en línea para la Educación en Industria 4.0 para América Latina

Luis Alberto Cruz Salazar , PhD¹, David Santiago Delgadillo Leguizamón , MSc¹, Adriana López-Vargas , MSc¹, Ernesto Monroy Cruz , PhD², and Libis Valdez-Cervantes , PhD^{3,4}
Juan Sebastián Sánchez-Gómez , MSc⁵, Maria Mercedes Larrondo-Petrie , PhD⁶

¹ Universidad Antonio Nariño, Colombia; e-mail: luicruz@uan.edu.co

² Tecnológico Nacional de México/IT de Atitalaquia, México

³ Fundación Universitaria Antonio de Arévalo, Colombia; e-mail: libis.valdez@unitecnar.edu.co

⁴ LACCEI, Estados Unidos de América

⁵ Universidad ECCI, Colombia

⁶ Florida Atlantic University, Estados Unidos de América

Resumen– *La Cuarta Revolución Industrial ha impulsado la digitalización y automatización en la educación en ingeniería, resaltando la necesidad de actualizar los programas de formación para preparar a los estudiantes para los entornos industriales modernos. Sin embargo, la implementación de laboratorios remotos y en línea sigue siendo limitada en América Latina debido a barreras como la infraestructura tecnológica deficiente y la falta de metodologías estandarizadas. CyberTwinNet-Colombia surge como una solución a esta problemática, estableciendo una red colaborativa de laboratorios en tres universidades colombianas para mejorar la enseñanza en Industria 4.0 mediante la integración de hardware y software especializado. La plataforma permite la interacción remota con equipos industriales y la experimentación en entornos reales y simulados. A través de un piloto con estudiantes de Colombia y México, se evidenció el impacto positivo en el aprendizaje de competencias en CPPS y DTs. Sin embargo, aún existen desafíos técnicos y pedagógicos, como la conectividad y la adaptación de docentes y estudiantes a estas tecnologías. Este estudio resalta la importancia de fortalecer la colaboración interuniversitaria y desarrollar metodologías innovadoras para asegurar el éxito de iniciativas similares en la región.*

Keywords— *Industria 4.0, Laboratorios remotos, Sistemas Ciberfísicos, Gemelos Digitales, Educación en ingeniería.*

I. INTRODUCCIÓN

La *Cuarta Revolución Industrial* o frecuentemente llamada *Industria 4.0 (I4.0)* ha transformado la manufactura y la ingeniería mediante la integración de tecnologías avanzadas como los Sistemas Ciberfísicos de Producción (CPPS), los Gemelos Digitales (DTs), la Inteligencia Artificial (IA) y el Internet de las Cosas Industrial (IIoT) [1], [2], [3], [4]. Estas tecnologías permiten la automatización inteligente, el monitoreo en tiempo real y la toma de decisiones basadas en datos, lo que ha impulsado la necesidad de actualizar los

programas educativos en ingeniería para formar profesionales que comprendan y apliquen estas herramientas en entornos industriales reales. Sin embargo, la adopción de estas innovaciones en la educación superior presenta múltiples desafíos, entre los que se incluyen la falta de acceso a laboratorios especializados, infraestructura tecnológica limitada y la necesidad de metodologías de enseñanza más flexibles y accesibles para una comunidad estudiantil diversa [5], [6]. En América Latina, estos problemas se ven amplificados por desigualdades en la distribución de recursos tecnológicos y por la fragmentación de los esfuerzos académicos entre universidades que trabajan de manera aislada en el desarrollo de competencias en I4.0 [7], incluso para la nueva visión de la Industria 5.0 [8].

Si bien con el aumento de la IA en evaluación de competencias y los laboratorios remotos y en línea han surgido como una alternativa viable para mejorar el acceso a infraestructuras avanzadas [9], [10], su implementación en la enseñanza de conceptos relacionados con CPPS y DTs sigue siendo limitada [11], [12]. A pesar de la existencia de iniciativas en otras regiones del mundo, en América Latina no se ha consolidado una red colaborativa de laboratorios que permita a los estudiantes interactuar con equipos industriales de última generación y desarrollar habilidades en entornos reales y simulados. La falta de plataformas compartidas que integren hardware y software específicos para la enseñanza de la I4.0 ha limitado la formación práctica de los estudiantes, afectando su preparación para el mercado laboral. Además, los estudios existentes sobre laboratorios remotos en ingeniería se han centrado en disciplinas tradicionales como la electrónica y la automatización básica [9], sin abordar de manera integral los desafíos de la educación en CPPS y DTs, lo que genera una

brecha en la literatura sobre la evaluación del impacto de estas tecnologías en la enseñanza de la ingeniería moderna.

Para abordar esta problemática, en este estudio se presenta *CyberTwinNet-Colombia*, una plataforma colaborativa interuniversitaria proyectada para conectar laboratorios físicos y virtuales entre al menos tres universidades colombianas: la Universidad Antonio Nariño (UAN), la Pontificia Universidad Javeriana y la Universidad de los Andes. A través de la integración de laboratorios de automatización, robótica e IA con acceso remoto, este proyecto busca proporcionar a los estudiantes una infraestructura compartida para la enseñanza y evaluación de habilidades para I4.0. La plataforma permitirá la interacción con hardware industrial de empresas como Festo, Siemens y Universal Robots, entre otras marcas industriales, promoviendo una experiencia de aprendizaje basada en experimentación real y simulaciones avanzadas. Además, se establecerán mecanismos de evaluación del aprendizaje que permitan medir el impacto de los laboratorios remotos en el desarrollo de competencias técnicas y cognitivas de los estudiantes.

El presente artículo tiene como objetivo analizar el diseño y la implementación de *CyberTwinNet-Colombia* como un modelo replicable de enseñanza en I4.0, contribuyendo a la creación de una red de colaboración académica que beneficie a múltiples instituciones en la región. Se plantea como pregunta de investigación:

¿De qué manera la integración de laboratorios remotos y en línea puede mejorar la enseñanza y evaluación de habilidades de Industria 4.0 en programas de ingeniería en Colombia y Latinoamérica?

Este documento está estructurado de la siguiente manera. En la siguiente sección se presenta una revisión de la literatura sobre laboratorios remotos en educación en ingeniería y su aplicación en la I4.0, identificando las principales tendencias y desafíos en el campo. Posteriormente, se describe la metodología utilizada en el diseño y desarrollo de *CyberTwinNet-Colombia*, explicando la infraestructura tecnológica y el enfoque pedagógico adoptado. A continuación, se exponen los resultados preliminares de la implementación de la plataforma y se analiza su impacto en la formación de estudiantes de ingeniería. Finalmente, se presentan las conclusiones del estudio y se discuten posibles líneas de trabajo futuro para la expansión del proyecto.

II. REVISIÓN DE LA LITERATURA

A. Contexto

El avance de la I4.0 ha impulsado la digitalización y automatización de los procesos de enseñanza en la educación en ingeniería, particularmente en el desarrollo de laboratorios remotos y en línea. Estos laboratorios permiten el acceso a infraestructura avanzada desde cualquier ubicación, mejorando la formación en áreas como son los CPPS y los DTs [11]. En

este contexto, diversas iniciativas han explorado el impacto de estas herramientas en la educación en ingeniería, abordando sus beneficios, desafíos y mejores prácticas.

Este apartado presenta una revisión de las tendencias actuales en la implementación de laboratorios remotos para la enseñanza de la I4.0, con énfasis en la integración de CPPS y DTs, el desarrollo de plataformas colaborativas, los desafíos en la experimentación remota y la evaluación del impacto en América Latina

B. Labs Remotos y en Línea en la Educación en Ingeniería

Los laboratorios remotos y en línea han sido adoptados en la educación en ingeniería para superar las limitaciones de infraestructura y acceso a equipos especializados. Estudios previos destacan que estos laboratorios proporcionan entornos interactivos que mantienen la atención de los estudiantes y fomentan la adquisición de competencias en cursos de ingeniería [9], [13]. Además, el uso de tecnologías de la I4.0, como CPPS y DTs, ha demostrado mejorar la motivación estudiantil, los resultados académicos y la adquisición de competencias relevantes para la industria moderna [14], [15], [16].

Un factor clave en la efectividad de los laboratorios remotos es su flexibilidad, ya que permiten la educación a distancia, el aprendizaje continuo y la capacitación en entornos de teletrabajo [11], [17]. Sin embargo, su implementación también enfrenta retos, como la necesidad de metodologías pedagógicas innovadoras y el acceso equitativo a estas herramientas tecnológicas.

C. Plataformas Colaborativas para la Formación Industrial

Existen iniciativas internacionales que buscan mejorar la enseñanza de la ingeniería a través de plataformas colaborativas que permiten compartir laboratorios y recursos. Un ejemplo destacado es el Joint European Master Program in Remote Engineering (MARE), que ha implementado laboratorios en línea en cursos de "Prototipado Rápido de Sistemas Digitales", logrando mejores resultados de aprendizaje [6].

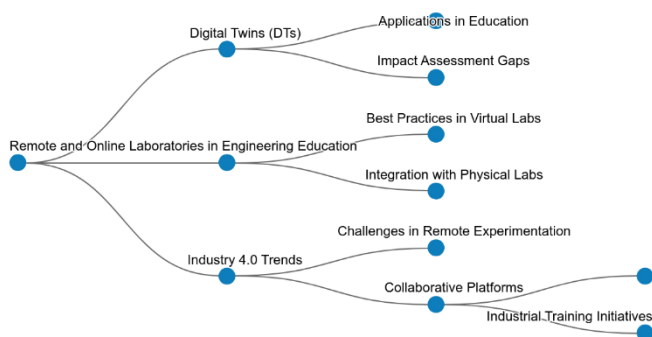
En América Latina, se han desarrollado redes internacionales para el acceso e intercambio de infraestructura de laboratorio a bajo costo, fomentando la cooperación académica y la implementación de laboratorios en línea para la formación en ingeniería [18]. Sin embargo, aún existen barreras en la interoperabilidad de estas plataformas y en la estandarización de sus metodologías de evaluación [16].

D. Desafíos en la Implementación de Laboratorios Remotos

A pesar de sus ventajas, los laboratorios remotos enfrentan múltiples desafíos. Uno de los principales es la sincronización en tiempo real de datos entre los sistemas físicos y sus DTs, lo que requiere redes de comunicación robustas y confiables [6], [19]. Además, la falta de infraestructura adecuada y soporte técnico dificulta la adopción generalizada de estos entornos de aprendizaje.

Desde un punto de vista pedagógico, la educación en CPPS y DTs requiere enfoques interdisciplinarios que combinen ingeniería, ciencias de la computación y análisis de datos. Sin embargo, los planes de estudio actuales a menudo carecen de la integración necesaria para fomentar estas competencias de manera efectiva [5], [11]. Además, la motivación y el compromiso de los estudiantes en entornos virtuales pueden verse afectados, lo que ha llevado al desarrollo de estrategias como la gamificación para mejorar la experiencia de aprendizaje [6].

Si bien se han documentado mejoras en el rendimiento y compromiso de los estudiantes que utilizan laboratorios remotos [20], existe una brecha en los estudios que analicen de manera integral su impacto en América Latina. La desigualdad digital y el acceso limitado a infraestructura tecnológica siguen siendo desafíos significativos en la región [8]. A continuación, se presenta un mapa conceptual que resume los temas clave identificados en la literatura sobre laboratorios remotos en la educación en ingeniería (ver Fig. 1).



Powered by Scopus AI, Sat Feb 22 2025

Fig. 1 Mapa Conceptual de Scopus AI sobre Laboratorios Remotos en la Educación en Ingeniería

E. Algunos ejemplos de laboratorios I4.0 internacionales

Existen diversas iniciativas en Europa que promueven la colaboración entre expertos y el uso de laboratorios remotos para evaluar y desarrollar habilidades en I4.0. A continuación, se presentan algunos ejemplos destacados:

INTEROP-VLab (Laboratorio Virtual Europeo para la Interoperabilidad Empresarial) [21]: Creado en 2007, INTEROP-VLab es una red que integra universidades, centros de investigación, socios industriales y pymes de diferentes países principalmente europeos. Su objetivo principal es facilitar la investigación colaborativa en interoperabilidad empresarial, permitiendo la interconexión de laboratorios de investigación en estrecha relación con la industria. Esta plataforma ofrece servicios como el I-V KMap, un sistema de gestión de competencias en el dominio de la interoperabilidad empresarial, y una plataforma de e-learning con más de 50 cursos web y tutoriales especializados.

EfeuCampus [22]: Ubicado en Bruchsal, Alemania, EfeuCampus es el primer espacio de investigación del país dedicado a la logística urbana autónoma y sostenible en la última milla. Este laboratorio viviente, financiado por la Unión Europea y el estado de Baden-Württemberg, desarrolla soluciones para la movilidad inteligente en zonas urbanas, incluyendo el uso de robots de reparto autónomos y drones de carga sin emisiones. El proyecto cuenta con la colaboración de instituciones académicas y empresas tecnológicas, fomentando un ecosistema de innovación en logística urbana.

Colaboración entre Festo y Universal Robots [23]: Festo Didactic y Universal Robots han unido esfuerzos para desarrollar estaciones de robótica colaborativa destinadas a la formación en entornos educativos. Un ejemplo es la "Festo MPS Universal Robot Station", que proporciona a estudiantes de secundaria, colegios y universidades una plataforma para aprender aplicaciones de robots industriales y colaborativos. Esta iniciativa busca equipar a la próxima generación de trabajadores con las habilidades necesarias en automatización y robótica, alineándose con los principios de la I4.0.

Laboratorios Remotos en la UNED [24]: La Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED) en España ha implementado laboratorios remotos para la experimentación en I4.0. Este proyecto tiene como objetivo acelerar la transición digital en la educación en ingeniería y en la industria, facilitando el acceso a entornos de aprendizaje prácticos y escalables a través de plataformas de software especializadas.

En la Tabla 1 se resumen los principales desafíos identificados en la implementación de laboratorios remotos para la enseñanza de la I4.0, junto con una descripción y referencias relevantes.

TABLA I
DESAFÍOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE LABORATORIOS REMOTOS

Desafío	Descripción	Referencias
Infraestructura y escalabilidad	Falta de recursos tecnológicos adecuados para laboratorios remotos y dificultades en la integración con CPPS y DTs.	[20], [25]
Sincronización de datos en tiempo real	Necesidad de redes de comunicación robustas para garantizar la precisión en simulaciones de gemelos digitales.	[5], [17]
Accesibilidad y brecha digital	Desigualdad en el acceso a laboratorios remotos, especialmente en regiones con conectividad limitada.	[13], [20]
Motivación y compromiso estudiantil	Estrategias como gamificación y aprendizaje basado en proyectos pueden mejorar la participación de los estudiantes.	[20]
Interoperabilidad y colaboración	Falta de estándares en plataformas colaborativas y dificultad en compartir laboratorios entre instituciones.	[6], [18], [19]

El estado del arte en laboratorios remotos para la educación en ingeniería resalta tanto sus beneficios como sus desafíos. Las iniciativas actuales han demostrado mejoras en la enseñanza de

competencias en CPPS y DTs, pero aún existen barreras en términos de infraestructura, accesibilidad y metodologías de evaluación. La colaboración entre universidades y la industria, junto con la adopción de estándares internacionales, será clave para maximizar el impacto de estos laboratorios en la formación de ingenieros en América Latina.

III. METODOLOGÍA

De acuerdo con la literatura revisada en el estado del arte y las experiencias de los laboratorios mencionados, se sugiere la siguiente metodología:

A. *Diseño e implementación de un piloto*

Con la finalidad de hacer una red de colaboración académica para la enseñanza en I4.0 en varias regiones de Colombia, se propone iniciar en una escala menor aplicando herramientas de hardware y software que tendrá la plataforma CyberTwinNet-Colombia, aplicando diferentes investigaciones realizadas de los autores en materia de arquitectura para CPPS [23], manejo de estándares de programación IEC para controlar variables de los sistemas automatizados, intercambio de datos, comprensión de las capacidades avanzadas de control descentralizado[26], entre otros, para así permitir que el estudiante entienda la integración entre CPPS y los DTs.

B. *Análisis de la implementación del piloto*

Una vez realizada el desarrollo e implementación, se hacen reajustes al modelo necesarios para lograr el manejo de los laboratorios de manera remota y así continuar con la validación, mediante la aplicación de la metodología entre IES de Colombia y México.

C. *Extrapolación del modelo entre colaboración de IES en Colombia y México.*

Entre las universidades participantes, se desarrolla entonces un plan de trabajo que abarque la participación de estudiantes de ingeniería para el control de la estación de llenado de tanque de los laboratorios de producción modular de la UAN. Con esto, se puede refinar los resultados obtenidos en la realización del modelo y generar un paso a paso tanto para el manejo de la plataforma como para la metodología de enseñanza de las herramientas tecnológicas para los CPPS y DTs.

D. *Análisis de la experimentación de la colaboración y solución de problemas.*

De acuerdo con los resultados obtenidos, se procede a revisar los problemas tecnológicos que hayan impactado en el manejo de la plataforma, como temas de conectividad, equipos disponibles para la interacción, entre otros. Otro foco de revisión de problemas es el pedagógico, donde se debe encontrar los retos de la metodología de enseñanza-aprendizaje en todos los actores involucrados.

E. *Revisión del impacto*

Finalmente, es pertinente comparar las metodologías de uso de laboratorios colaborativos como la plataforma CyberTwinNet-Colombia con respecto a la enseñanza tradicional en espacios físicos sin interconectividad, tanto para fortalecer los conocimientos transversales que exige la IIoT 4.0 como para encontrar los puntos débiles de la plataforma y así tener una retroalimentación que permita su mejora continua.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se abordan los resultados de aprendizaje y la discusión sobre el impacto en la efectividad de la plataforma propuesta CyberTwinNet-Colombia, visto como laboratorio remoto en su configuración antes descrita y aplicado como metodología de enseñanza-aprendizaje.

A. *Hallazgos iniciales de la implementación piloto*

La integración de herramientas de hardware y software que presenta la plataforma CyberTwinNet-Colombia refleja ser útil para la capacitación remota y desarrollo de habilidades de estudiantes de ingeniería en los principales desafíos de los sistemas de automatización de la I4.0.

El uso de OPC UA/Node-RED en la adaptación de MARIANNE en [4] como arquitectura RAMI4.0 de referencia para CPPS, permite comprender la comunicación de datos segura e interoperable y los entornos modulares y escalables en la integración de datos industriales [4]. La implementación piloto también abarca el manejo de diferente hardware y estándares de programación de PLC, tales como SIEMENS y 4DIAC en los estándares IEC 61131-3 e IEC 61499 respectivamente, que permiten la interoperabilidad para controlar variables de sistemas automatizados. Por un lado, IEC 61131-3 siendo el primer paso en la estandarización de los PLC y sus periféricos, incluidos los lenguajes de programación a utilizar, permitió el desarrollo de lógica de control centralizada. Por otro lado, IEC 61499 se utiliza para abordar la necesidad de software modular útil para distribuir el control de procesos industriales y comprender capacidades avanzadas de control descentralizado [27]. El concepto DT se logra comprender mediante la herramienta Factory IO, donde una escena tridimensional simula el sistema de tanque que se va a controlar. De esta manera, el desarrollo de algoritmos de control en equipos físicos de la planta como SIEMENS mediante IEC 61131-3 y en entornos de simulación como 4DIAC con el estándar IEC 61499, Node-RED y Factory IO se logra el intercambio de datos entre aplicaciones permitiendo así la operación remota del sistema. Con lo anterior, el estudiante en un punto remoto puede comprender la manera en que se integran y operan los CPPS y los DTs, así como desarrollar habilidades en el manejo de software y hardware que demanda la I4.0.

B. *Experimentación entre Colombia - México*

Como primera experiencia en el manejo de la plataforma CyberTwinNet-Colombia de forma remota y en línea desde

México, se fijó el objetivo de controlar la estación de llenado de tanque que forma parte de un sistema de producción modular disponible en la UAN. En este primer acercamiento, para controlar la plataforma a distancia, se decidió experimentar con un grupo de estudiantes de Ingeniería. Para lograr el objetivo se llevaron a cabo diversas reuniones de forma virtual entre estudiantes y profesores de Colombia y México. Inicialmente las sesiones fueron para presentarse y generar un plan de trabajo, posteriormente, para conocer la planta a controlar y su operación, seguido de sesiones de enseñanza-aprendizaje en términos de manejo de software necesario para la manipulación de la plataforma y desarrollo del control. A la par, estudiantes y docentes en Colombia experimentaban en el manejo y configuración física del equipo. De acuerdo con las actividades realizadas durante diversas sesiones in situ y de forma virtual, se puede plantear una serie de pasos clave, ver Fig. 2, para lograr de forma exitosa el manejo de la plataforma a distancia como metodología de enseñanza-aprendizaje en herramientas tecnológicas para los CPPS y DTs.

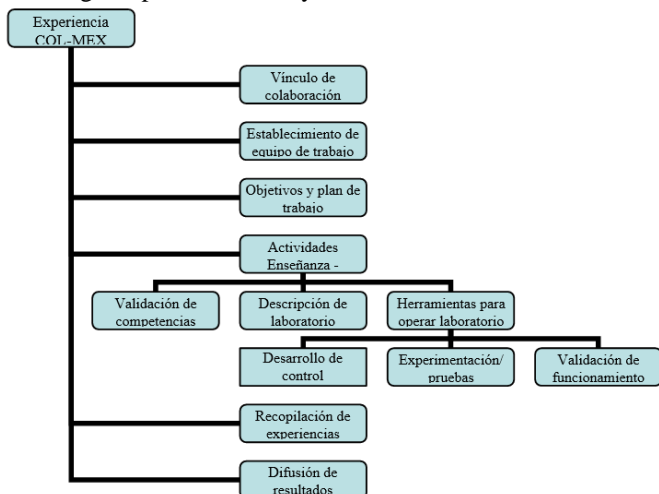


Fig. 2 Puntos clave en el manejo remoto de la plataforma CyberTwinNet-Colombia desde México

Los aprendizajes de esta experiencia demuestran que es posible utilizar la plataforma CyberTwinNet-Colombia como laboratorio remoto de CPPS y DTs a nivel de ingeniería, teniendo como puntos esenciales la definición de un equipo de trabajo con objetivos claros y un plan para lograrlos, sin dejar de lado las herramientas de enseñanza-aprendizaje que docentes y estudiantes deben aplicar en el desarrollo de controles en sistemas de automatización industrial.

C. Barreras técnicas y pedagógicas en el control remoto

En este punto se describen las posibles barreras que impedirían el uso de laboratorio remoto, desde el punto de vista técnico y pedagógico. Infraestructura para comunicación en tiempo real de datos: La plataforma Factory IO que actúa como DT es un cliente OPC UA, por lo que accede a los datos publicados en el servidor Node-RED y replica dinámicamente las condiciones del proceso. Esta interacción permitió

sincronizar los estados de las variables del proceso en tiempo real, permitiendo validar estrategias de control antes de su implementación en el ambiente físico. Sin embargo, estas herramientas dependen de que las instituciones cuenten con una buena infraestructura en términos de conectividad a internet estable y seguro, de lo contrario el acceso y comunicación con el laboratorio físico sería imposible desde un punto remoto, así como las sesiones virtuales de enseñanza-aprendizaje.

Adaptación de profesores y estudiantes a metodologías de laboratorio remoto: Debido al avance que presentan las tecnologías de la I4.0, su uso implica el manejo de diversas herramientas digitales para administración de información y para la comunicación a distancia. De esta forma se vuelve requisito indispensable que los actores en el proceso de enseñanza-aprendizaje manejen ambientes digitales para la transferencia de conocimientos en este tipo de metodologías. Además, al tener tiempo reducido para conexión síncrona requiere que en actividades asíncronas los estudiantes muestren compromiso, dedicación y disponibilidad, al igual que un alto grado de autonomía y buenas capacidades en la búsqueda de información. Lo anterior, implica trabajar de la mano con este tipo de habilidades blandas en los estudiantes.

D. Comparación con el aprendizaje tradicional basado en laboratorio

Los laboratorios como CyberTwinNet-Colombia permiten el acceso a infraestructura avanzada desde cualquier ubicación, mejorando la formación en áreas como son los CPPS y los DTs. Siendo estos temas de vital importancia en la formación de ingenieros con perfil en automatización industrial que requiere el avance de la I4.0. La Tabla II presenta las capacidades relevantes que mostró la plataforma remota abordada en este artículo, en comparación con los laboratorios físicos tradicionales.

TABLA II
CARACTERÍSTICAS DE LABORATORIOS REMOTOS Y TRADICIONALES

Desafío	Descripción	Lab. Rem.	Lab. Trad.
Integración	Facilidad de integración con más equipos I4.0 (ej. de Festo, Siemens, UR, entre otros)	+	++
Accesibilidad remota	Posibilidad de controlar el laboratorio desde punto remoto y en línea	++	+
Enfoque I4.0	Equipo enfocado a tecnologías de la I4.0, como CPPS y DTs	++	-
Interoperabilidad	Posibilidad de colaborar con otros laboratorios a distancia	++	+
Cobertura estudiantil	Posibilidad de involucrar la participación de estudiantes internacionales	++	+
Costo	Inversión para adquirir equipo	++	+
Plataformas digitales	Manejo de herramientas digitales para comunicación en sesiones virtuales	++	+
Personal especializado	Formación especializada de docentes para el manejo de tecnologías de la I4.0	++	+

+ Bajo; ++ Alto

Como principales fortalezas de la plataforma CyberTwinNet-Colombia se observa la posibilidad de integrar diversas tecnologías de hardware y software, tales como estándares IEC 61131-3 e IEC 61499 para la programación de PLCs en diferentes entornos tanto industriales como académicos; TIA PORTAL y 4DIAC respectivamente. De igual forma, obtener entornos virtuales como DTs al integrar servidores desde Factory IO y Python a través de OPC-UA en NodeRED para la manipulación de la planta física desde un punto remoto, lo que hace referencia al manejo y accesibilidad a distancia de sistemas primordiales en la I4.0 como los CPPS, brindando la posibilidad de vincularse o interoperar con otros laboratorios en línea desde un punto remoto. Lo anterior permite involucrar un mayor número de estudiantes y docentes que podrían estar en diversos países.

Respecto a las desventajas que se distinguen es importante mencionar que debido al gran nivel tecnológico con el que cuentan estos equipos resultan con un costo elevado para la institución que adquiere y adecua el espacio para su instalación, no así para los que se conectan a distancia. También, estos laboratorios requieren de infraestructura de conectividad adecuada para su operación a distancia, sin dejar de mencionar el requisito de alta especialización de los docentes para el adecuado manejo de las herramientas digitales y tecnológicas de este tipo de laboratorios.

E. Escalamiento de CyberTwinNet-Colombia

El crecimiento de CyberTwinNet-Colombia representa una estrategia clave para fortalecer la enseñanza de la I4.0 en instituciones de educación superior con infraestructura tecnológica limitada. La expansión de esta plataforma colaborativa interuniversitaria facilitaría la integración de más universidades, permitiendo el acceso remoto a laboratorios físicos y virtuales especializados en automatización, robótica e IA. El establecimiento de redes interuniversitarias puede reducir las brechas tecnológicas en países en desarrollo al fomentar la compartición de recursos y la capacitación docente en herramientas digitales avanzadas [26]. En este contexto, CyberTwinNet-Colombia podría consolidarse como una solución innovadora para mejorar la formación práctica de los estudiantes y su preparación para el mercado laboral, integrando hardware y software de última generación en un entorno de aprendizaje colaborativo.

Para lograr un escalamiento efectivo, resulta esencial establecer estrategias de financiamiento y colaboración con organismos gubernamentales y empresas del sector industrial. Asociaciones con entidades como Siemens, Festo y Universal Robots permitirían la adquisición de equipos y licencias de software especializados, asegurando que los estudiantes accedan a tecnologías alineadas con las necesidades del sector productivo [17]. Asimismo, la implementación de programas de formación para docentes y estudiantes en el uso de plataformas de aprendizaje remoto y simulaciones garantizaría una integración efectiva en diversas universidades. La combinación

de entornos virtuales con experiencias prácticas es fundamental para la capacitación en CPPS y DTs [28].

Además, la internacionalización de CyberTwinNet-Colombia podría fomentar la colaboración entre universidades latinoamericanas, impulsando proyectos conjuntos en digitalización industrial y manufactura inteligente. La estandarización de plataformas de aprendizaje y la interoperabilidad entre laboratorios remotos fortalecerían el ecosistema académico y su relación con la industria. Según Zuelke et al. (2019), la implementación de infraestructuras educativas basadas en I4.0 requiere modelos de acceso flexibles y estrategias de integración escalables para garantizar su sostenibilidad a largo plazo [29]. De esta manera, la expansión de CyberTwinNet-Colombia beneficiaría tanto a las instituciones participantes como a la transformación digital de la educación en ingeniería a nivel regional.

F. Expansión a universidades latinoamericanas

Uno de los principales retos en la enseñanza de la I4.0 en América Latina es la brecha de infraestructura tecnológica entre universidades. Muchas instituciones carecen de laboratorios especializados en automatización, robótica e IA, lo que limita la formación práctica de los estudiantes y reduce sus oportunidades en el mercado laboral [25]. En este escenario, la expansión de CyberTwinNet-Colombia a nivel regional representa una oportunidad crucial para fortalecer la enseñanza de la I4.0 en instituciones con recursos limitados.

El establecimiento de una red interuniversitaria que permita el acceso remoto a laboratorios físicos y virtuales beneficiaría especialmente a aquellas universidades ubicadas en regiones con menor inversión en infraestructura tecnológica. Esto posibilitaría que estudiantes de distintas instituciones interactúen con sistemas avanzados sin la necesidad de contar con equipos propios en sus campus. Además, la implementación de esta plataforma fomentaría la colaboración académica entre universidades, promoviendo el intercambio de conocimientos y el desarrollo de proyectos conjuntos en el ámbito de la digitalización industrial.

Para asegurar el éxito de esta expansión, es necesario diseñar estrategias de integración adaptadas a las condiciones de cada institución. Esto implica la creación de modelos de acceso flexibles, donde universidades con mayor infraestructura tecnológica compartan sus recursos con aquellas que aún no cuentan con laboratorios propios. Asimismo, es esencial desarrollar programas de capacitación para docentes y estudiantes, asegurando el máximo aprovechamiento de las herramientas disponibles en la plataforma. La inclusión de modelos de aprendizaje híbridos, que combinen simulaciones y acceso a equipos reales, permitirá una implementación más accesible y escalable en contextos con limitaciones de conectividad o disponibilidad de hardware [17].

Un aspecto fundamental en la expansión de CyberTwinNet-Colombia es el establecimiento de convenios con organismos gubernamentales y agencias de financiamiento, con el objetivo de obtener recursos para la implementación de la plataforma en

universidades con menor capacidad tecnológica. Asimismo, la colaboración con redes académicas y asociaciones de educación en ingeniería en América Latina puede facilitar la adopción de estándares comunes y la consolidación de una red de laboratorios remotos interconectados a nivel regional.

G. Colaboración Universidad – Empresa

Para que la formación en I4.0 sea verdaderamente efectiva, es fundamental que los estudiantes tengan acceso a entornos de aprendizaje que reflejen las condiciones reales del sector industrial. En este sentido, las asociaciones con empresas tecnológicas e industriales desempeñan un papel clave en la implementación de CyberTwinNet-Colombia, asegurando que la plataforma proporcione experiencias de aprendizaje alineadas con las demandas del mercado [5].

La vinculación con empresas líderes en automatización, robótica y manufactura inteligente, como Siemens, Festo y Universal Robots, facilitará la integración de equipos de última generación en los laboratorios remotos, brindando a los estudiantes la oportunidad de desarrollar habilidades en tecnologías utilizadas en la industria. Además, la colaboración con estas empresas permitirá el acceso a software especializado, herramientas de simulación y certificaciones reconocidas en el sector, mejorando la empleabilidad de los egresados.

Otro aspecto clave de estas asociaciones es el desarrollo de proyectos conjuntos de investigación y desarrollo, en los que los estudiantes puedan aplicar sus conocimientos a la solución de problemas industriales reales. A través de desafíos prácticos, pasantías virtuales y la participación en proyectos patrocinados por empresas, los estudiantes podrán fortalecer sus competencias técnicas y su capacidad de innovación. Asimismo, la interacción con profesionales del sector mediante seminarios, conferencias y mentorías contribuirá a su formación integral y a la creación de redes de contacto con la industria [30].

Para garantizar la sostenibilidad de estas colaboraciones, es necesario establecer mecanismos claros de cooperación entre universidades y empresas, asegurando beneficios mutuos. En este sentido, CyberTwinNet-Colombia puede servir como un espacio de experimentación para la industria, permitiendo a las empresas probar nuevas tecnologías y metodologías en un entorno académico antes de implementarlas a gran escala. A su vez, las universidades accederán a equipos y conocimientos avanzados que, de otro modo, serían inaccesibles, fortaleciendo su capacidad para formar profesionales preparados para la transformación digital.

H. Integración de Hard – Skills en deep learning para el fortalecimiento de habilidades en IA

El rol de la IA es importante en la educación de habilidades [12] en STEM e I4.0. Por ejemplo, la integración con arquitecturas de IA, en especial de Redes Neuronales Recurrentes (RNN), junto con la simulación de DTs, permite mejorar la capacidad de predicción y optimización en la gestión de recursos y procesos industriales. Asimismo, los sistemas de aprendizaje

adaptativo y evaluación impulsados por IA representan un avance en la personalización del proceso educativo, asegurando una formación más efectiva y alineada con las necesidades del sector productivo [13], [20].

Además, la implementación de DTs para el monitoreo de sistemas en tiempo real, la gestión inteligente de activos y la medición de indicadores clave de desempeño (KPIs) como el OEE (Overall Equipment Effectiveness) permite una toma de decisiones más ágil y eficiente. Esta integración de tecnologías emergentes en la educación y la práctica profesional de la ingeniería garantizará una mayor competitividad y sostenibilidad en el contexto de la I4.0 [13].

Por esta misma línea, la integración de DTs en la industria moderna ha revolucionado la manera en que se monitorean los sistemas en tiempo real, permitiendo una gestión de activos más inteligente y la optimización del OEE [9]. Para lograr esta integración de manera efectiva, el aprendizaje profundo (deep learning) se ha convertido en una herramienta esencial, ya que permite el análisis avanzado de datos en tiempo real, la identificación de patrones complejos y la generación de modelos predictivos altamente precisos [20].

El deep learning, a través de arquitecturas como Redes Neuronales Convolucionales (CNN) y RNN, facilita la interpretación de datos generados por sensores IoT y otros sistemas embebidos en procesos industriales. Estos modelos permiten detectar anomalías en el rendimiento de los equipos, predecir fallos antes de que ocurran y optimizar los tiempos de mantenimiento preventivo, lo que contribuye a la reducción de costos operativos y a una mayor eficiencia en la gestión de activos [20]. En este contexto, el aprendizaje profundo no solo mejora la capacidad de análisis del gemelo digital, sino que también potencia su capacidad de toma de decisiones en tiempo real.

Uno de los principales beneficios del deep learning aplicado a los DTs es su capacidad de mejorar el monitoreo y la predicción del OEE, un indicador crítico que mide la disponibilidad, el rendimiento y la calidad de los procesos de manufactura. Mediante modelos de IA, es posible correlacionar grandes volúmenes de datos históricos con las condiciones actuales del sistema, proporcionando recomendaciones en tiempo real para maximizar la productividad y minimizar el tiempo de inactividad. Esta optimización basada en aprendizaje profundo es clave en la I4.0, donde la eficiencia y la capacidad de respuesta inmediata son fundamentales para mantener la competitividad [10].

Además, el uso de técnicas de aprendizaje profundo en la integración de DTs permite desarrollar sistemas de mantenimiento autónomos y adaptativos [9]. Los modelos de reinforcement learning [31], por ejemplo, pueden aprender continuamente de los datos operativos, ajustando estrategias de mantenimiento y operación sin intervención humana. Esto no solo mejora la resiliencia de los sistemas industriales, sino que también permite una mayor personalización en la gestión de activos, asegurando que cada equipo opere en su punto óptimo de desempeño [13].

Dado el creciente papel de los DTs en la transformación digital de la industria, es esencial que los ingenieros adquieran conocimientos sólidos en deep learning y su aplicación en el análisis de datos industriales. La educación en IA debe enfocarse en el desarrollo de habilidades para diseñar, entrenar e implementar modelos de deep learning en entornos industriales, garantizando así una integración efectiva con los CPPS y una toma de decisiones basada en datos de alta precisión.

VI. CONCLUSIÓN

Los principales hallazgos de este estudio muestran que CyberTwinNet-Colombia representa una solución viable para la enseñanza de I4.0 en ingeniería, permitiendo la interacción con hardware y software especializados a través de una red colaborativa de laboratorios remotos. La plataforma ha demostrado ser efectiva para mejorar la formación en CPPS y DTs, fortaleciendo el aprendizaje basado en la experimentación y la resolución de problemas en entornos industriales reales.

A través de una implementación piloto entre estudiantes de Colombia y México, se evidenció el potencial de esta metodología para desarrollar competencias técnicas y cognitivas. No obstante, el éxito de esta iniciativa depende de la infraestructura tecnológica, el acceso equitativo a estos recursos y la capacitación docente en nuevas estrategias pedagógicas.

Las limitaciones del estudio incluyen la dependencia de la infraestructura tecnológica y la conectividad a internet, lo que puede afectar la operatividad de los laboratorios remotos. La brecha digital en algunas regiones de América Latina representa un obstáculo para la implementación masiva de esta tecnología, ya que no todas las universidades cuentan con la infraestructura necesaria para soportar plataformas como CyberTwinNet-Colombia. Además, la adopción de estas herramientas requiere un cambio en la metodología de enseñanza, demandando mayor autonomía y habilidades digitales por parte de los estudiantes y docentes. Otra limitación es la interoperabilidad con otras plataformas, ya que la falta de estandarización dificulta la integración con otros laboratorios remotos. A pesar de estos desafíos, la plataforma ha mostrado ser una solución efectiva para mejorar la educación en CPPS y DTs, y se requieren estudios adicionales para optimizar su funcionamiento y garantizar su sostenibilidad a largo plazo.

Para el trabajo futuro, se plantea la expansión de CyberTwinNet-Colombia a otras universidades en América Latina, promoviendo una mayor colaboración interinstitucional y permitiendo que más estudiantes accedan a infraestructura avanzada para la formación en I4.0. Además, se recomienda el desarrollo de nuevas estrategias pedagógicas que integren tecnologías emergentes, como la IA y la realidad aumentada, para mejorar la interacción con los laboratorios remotos. Otra línea de investigación será la evaluación del impacto de la plataforma en el desempeño académico y la inserción laboral de los estudiantes, a fin de validar su efectividad en la formación de profesionales en CPPS y DTs. Finalmente, se recomienda

establecer alianzas con la industria para asegurar la actualización de la infraestructura y garantizar que los laboratorios continúen alineados con las tendencias tecnológicas del sector industrial.

AGRADECIMIENTO

Los autores recibieron apoyo financiero del Consorcio Latinoamericano y del Caribe de Instituciones de Ingeniería (LACCEI) para la investigación y publicación de este artículo. El Sr. Cruz agradece la convocatoria “MinCiencias 756 Doctorados en el Exterior” y a la Universidad Antonio Nariño por la beca del Programa de Formación de Alto Nivel “PFAN”.

REFERENCIAS

- [1] B. Vogel-Heuser *et al.*, “Automation Software Architecture in CPPS - Definition, Challenges and Research Potentials,” in *2022 IEEE 5th International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, IEEE, May 2022, pp. 01–08. doi: 10.1109/ICPS51978.2022.9816893.
- [2] P. Leitão, A. W. Colombo, and S. Karnouskos, “Industrial automation based on cyber-physical systems technologies: Prototype implementations and challenges,” *Comput Ind*, vol. 81, pp. 11–25, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.compind.2015.08.004.
- [3] L. Ribeiro and M. Hochwallner, “On the Design Complexity of Cyberphysical Production Systems,” *Complexity*, vol. 2018, pp. 1–13, Jun. 2018, doi: 10.1155/2018/4632195.
- [4] L. A. Cruz S. and B. Vogel-Heuser, “A CPPS-architecture and workflow for bringing agent-based technologies as a form of artificial intelligence into practice,” *at - Automatisierungstechnik*, vol. 70, no. 6, pp. 580–598, Jun. 2022, doi: 10.1515/auto-2022-0008.
- [5] L. F. Zapata-Rivera, C. Aranzazu-Suescun, and M. M. Larrondo-Petrie, “Teacher training plan for engineering online laboratories composition,” in *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, 2020. doi: 10.18687/LACCEI2020.1.1.672.
- [6] M. E. Auer, D. V. Pop, and D. G. Zutin, “Outcome of an online laboratory to support a master program in remote engineering,” *Computers in Education Journal*, vol. 22, no. 4, pp. 82 – 89, 2012, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84877968497&partnerID=40&md5=67090e3641add8d7a2ed8979bf0ae7d3>
- [7] L. S. Algarra López, L. A. Cruz Salazar, and A. Arbeláez-Soto, “Competencias Blandas para la mejora de la Educación y el Desarrollo Social Sostenible,” in *Proceedings of the 19th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Prospective and trends in technology and skills for sustainable social development” “Leveraging emerging technologies to construct the future,”* Bogotá, Colombia, 2021, pp. 1–8. doi: 10.18687/LACCEI2021.1.1.659.
- [8] L. A. Cruz S., S. Gil, G. D. Rueda C., G. J. Sánchez-Zuluaga, and G. D. Zapata-Madrigal, “AI in assessing Industry 4.0 adoption in Colombia: a case study approach,” *IFAC-PapersOnLine*, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.ifacol.2024.08.067.

- [9] C. Rejón, S. Martín, and A. Robles-Gómez, “Easy Development of Industry 4.0 Remote Labs,” *Electronics (Basel)*, vol. 13, no. 8, p. 1508, Apr. 2024, doi: 10.3390/electronics13081508.
- [10] J. S. Sánchez-Gómez, A. Lopez, L. Cruz, C. Zafra, and Libis Valdez, “Enhancing STEM Education with AI: Fostering Soft Skills and Inclusion,” in *Industrial Engineering and Operations Management*, vol. 2557, Communications in Computer and Information Science, Ed., Springer, 2025.
- [11] R. S. Peres and J. Barata, “Remote E-Learning for Cyber-Physical Production Systems in Higher Education,” in *IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 2021. doi: 10.1109/INDIN45523.2021.9557429.
- [12] A. López-Vargas, L. del C. Valdez, C. A. Zafra-Rodríguez, and L. A. Cruz Salazar, “El rol de la IA en el desarrollo de habilidades blandas para mujeres en STEM desde las escuelas,” in *Proceedings of the 4th LACCEI International Multiconference on Entrepreneurship, Innovation and Regional Development (LEIRD 2024): “Creating solutions for a sustainable future: technology-based entrepreneurship,”* 2024. doi: 10.18687/LEIRD2024.1.1.889.
- [13] C. Viegas *et al.*, “Impact of a remote lab on teaching practices and student learning,” *Comput Educ*, vol. 126, pp. 201 – 216, 2018, doi: 10.1016/j.compedu.2018.07.012.
- [14] R. Al-Nsour, R. Alkhasawneh, and S. Alqudah, “Online Engineering Education: Laboratories During the Pandemic - A Case Study,” in *2022 Intermountain Engineering, Technology and Computing, IETC 2022*, 2022. doi: 10.1109/IETC54973.2022.9796691.
- [15] C. Terkowsky, S. Frye, and D. May, “Using Constructive Alignment to Evaluate Industry 4.0 Competencies in Remote Laboratories for Manufacturing Technology,” *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 1231 AISC, pp. 603 – 613, 2021, doi: 10.1007/978-3-030-52575-0_50.
- [16] L. Cruz, H. Tovar, Edwin. Prada, J. Márquez, and E. Cruz, “Adaptive Learning and Interoperability in I4.0: A Case Study of Agent-based Digital Twin with Asset Administration Shell,” *IFAC - ALCOS*, 2025.
- [17] B. Bordel, R. Alcarria, and T. Robles, “Industry 4.0 paradigm on teaching and learning engineering,” *International Journal of Engineering Education*, vol. 35, no. 4, pp. 1018 – 1036, 2019, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85073659264&partnerID=40&md5=eeda33b6b734d13ba012ade08aafa892>
- [18] T. Wanyama, “Using industry 4.0 technologies to support teaching and learning,” *International Journal of Engineering Education*, vol. 33, no. 2, pp. 693 – 702, 2017, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85019748668&partnerID=40&md5=574036c4008199b1e1f488f0046b79a4>
- [19] M. E. Auer, D. V. Pop, and D. G. Zutin, “Outcome of an online laboratory to support a master program in remote engineering,” in *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings*, 2012. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85029047617&partnerID=40&md5=829224d2652fa43443e42db71d936fc9>
- [20] M. J. I. Moran, A. Paul, D. May, and R. Hussein, “RHLab: Digital Inequalities and Equitable Access in Remote Laboratories,” in *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings*, 2023. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85172098616&partnerID=40&md5=6029a272d5e2fe4173469290212a7366>
- [21] EU and University Bordeaux, “INTEROP-VLab.” Accessed: Feb. 27, 2025. [Online]. Available: <https://interop-vlab.eu>
- [22] efeuCampus GmbH, “EfeuCampus.” Accessed: Feb. 27, 2025. [Online]. Available: <https://efeucampus-bruchsal.de>
- [23] Festo press, “Empowering Tomorrow’s Workforce: Universal Robots and Festo Didactic Unveil MPS Universal Robot Station with Safety Training at IMTS 2024.” Accessed: Feb. 27, 2025. [Online]. Available: <https://press.festo.com/en-US/education-1/empowering-tomorrow-s-workforce-universal-robots-and-festo-didactic-unveil-mps-universal-robot-station-with-safety-training-at-imts-2024>
- [24] UNED Spain, “Experimentación en Industria 4.0 con laboratorios remotos (1ed. 2025).” Accessed: Feb. 27, 2025. [Online]. Available: https://iedra.uned.es/courses/course-v1:UNED+ExperimentacionIndustria_001+2024/about
- [25] Y. Fan, A. Evangelista, and V. Indumathi, “Evaluation of remote or virtual laboratories in E-learning engineering courses,” in *IEEE Global Engineering Education Conference, EDUCON*, 2021, pp. 136 – 143. doi: 10.1109/EDUCON46332.2021.9454067.
- [26] E. Monroy Cruz, L. R. García Carrillo, and L. A. Cruz Salazar, “Structuring Cyber-Physical Systems for Distributed Control with IEC 61499 Standard,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 21, no. 2, pp. 251–259, Feb. 2023, doi: 10.1109/TLA.2023.10015217.
- [27] E. Monroy Cruz, L. R. García Carrillo, L. A. Cruz Salazar, and B. D. Hernández Rojo, “Comparación de estándares IEC 61131-3 e IEC 61499 para implementar sistemas de control distribuido,” in *Memorias del XXVIII Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, Bogotá, Colombia., Sep. 2022, pp. 207–216.
- [28] D. Dornfeld, *Green manufacturing: Fundamentals and applications*. Springer, 2014.
- [29] D. Zuelke, W.-G. Drossel, and S. Ihlenfeldt, “Remote labs in engineering education: Challenges and future trends,” *International Journal of Online Engineering*, vol. 15, no. 10, pp. 55–72, 2019.
- [30] T. Wanyama, “Using industry 4.0 technologies to support teaching and learning,” *International Journal of Engineering Education*, vol. 33, no. 2, pp. 693 – 702, 2017, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85019748668&partnerID=40&md5=574036c4008199b1e1f488f0046b79a4>
- [31] J. Zinn, B. Vogel-Heuser, F. Schuhmann, and L. A. Cruz S., “Hierarchical Reinforcement Learning for Waypoint-based Exploration in Robotic Devices,” in *19th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, Palma de Mallorca, Spain: IEEE, Jul. 2021, pp. 1–7. doi: 10.1109/INDIN45523.2021.9557406.