

## LABORATORIOS HÍBRIDOS: INNOVACIÓN EN LA FORMACIÓN DE COMPETENCIAS PARA LA INDUSTRIA 4.0

Marco Vilches, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, marco.vilches@pucv.cl  
Héctor Vargas, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, hector.vargas@pucv.cl  
Jorge Huerta, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, jorge.huerta@pucv.cl

### RESUMEN

La formación de competencias profesionales en futuros ingenieros, habilitados para la Industria 4.0, presenta grandes desafíos. En este contexto, algunas de las competencias más críticas que los estudiantes de ingeniería deben adquirir requieren de la realización de laboratorios prácticos en condiciones cercanas a la realidad laboral. Sin embargo, los laboratorios de prácticas actuales presentan dificultades para recrear contextos industriales reales y escalables, dificultando la formación de competencias. Este artículo presenta el desarrollo e implementación de una propuesta de laboratorio híbrido para solventar estos desafíos. El prototipo, creado para la formación de ingenieros en automatización, integra dispositivos de control reales con réplicas digitales simuladas de procesos, permitiendo así la escalabilidad de los problemas tratados. Se detalla el diseño general, su implementación física y virtual, comunicación de sus componentes y el contexto de instalación y funcionamiento. Se concluye además sobre sus potenciales ventajas y beneficios, tanto desde el punto de vista de la enseñanza en un contexto académico, la capacitación de profesionales de la industria y la optimización técnica del problema de ingeniería tratado.

**PALABRAS CLAVES:** Laboratorio Híbrido, Simulación, Educación en Control, Competencias.

### INTRODUCCIÓN

La Industria 4.0 (Xu et al. 2021), también conocida como la *cuarta revolución industrial*, se refiere a la integración de tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial, la automatización, el internet de las cosas (IoT), la robótica y el análisis de big data en los procesos de producción y manufactura. Este concepto busca crear procesos inteligentes donde las máquinas y sistemas estén interconectados, permitiendo una toma de decisiones autónoma y una optimización continua.

El impacto de la Industria 4.0 en las universidades que imparten carreras de ingeniería es significativo (Li, 2022). Estas instituciones se ven obligadas a mejorar constantemente sus métodos y herramientas de enseñanza y adaptar sus programas educativos para preparar a los futuros ingenieros con los conocimientos y habilidades necesarias para enfrentar los desafíos y aprovechar las oportunidades que presenta esta nueva era industrial (Prieto et al. 2019). Esto incluye la incorporación de nuevas tecnologías en el aula, el fomento de competencias digitales y analíticas, y el desarrollo de proyectos interdisciplinarios que simulen entornos de trabajo reales. Además, las universidades deberían establecer colaboraciones con la industria para asegurar que su oferta educativa esté alineada con las necesidades del mercado laboral y fomentar la innovación y la transferencia de conocimiento.

En este contexto, el modelo educacional basado en competencias (EBC) juega un rol clave (Malhotra et al. 2023). Este enfoque se centra en el desarrollo de habilidades específicas y medibles

(Vargas et al. 2024), lo que permite a los estudiantes adquirir y demostrar las competencias necesarias para desempeñarse eficazmente en el entorno de la Industria. Al enfatizar el aprendizaje práctico y la aplicación de conocimientos en situaciones reales, este modelo educativo prepara a los ingenieros para resolver problemas complejos de manera innovadora y eficaz (Brauer, 2021).

Al hilo de lo anterior, los laboratorios de prácticas son un punto clave en la formación de estudiantes de ingeniería, ya que en ellos, deben demostrar sus habilidades procedimentales y actitudinales en la aplicación del conocimiento teórico previamente adquirido (Vargas et al. 2023). En el contexto de la educación basada en competencias en ingeniería, estos hitos formativos son de la mayor relevancia, ya que es el momento en que los estudiantes deben demostrar que son capaces de resolver problemas cercanos a la realidad de la industria.

Este artículo presenta el diseño y desarrollo de una propuesta de laboratorio práctico denominado, *Laboratorios Híbridos*, que integra componentes físicos reales con representaciones virtuales de sistemas, permitiendo a los estudiantes realizar actividades prácticas variadas en condiciones cercanas a la realidad. Específicamente, este trabajo presenta el estado actual del desarrollo de un laboratorio híbrido enmarcado en el contexto de la supervisión y control de sistemas de distribución de agua potable, proporcionando un espacio para la experimentación bajo distintas condiciones operativas. El desarrollo de este laboratorio se estructura en las siguientes etapas:

1. **Diseño del Laboratorio:** En esta fase inicial, se establecen los fundamentos conceptuales del laboratorio y se definen sus objetivos y requisitos de funcionamiento.
2. **Implementación Virtual:** Etapa dedicada al diseño y desarrollo de réplicas virtuales simuladas de un segmento de red de distribución de agua potable que estará sujeta a la supervisión y control desde la implementación física del sistema.
3. **Implementación Física:** Etapa dedicada al diseño, desarrollo e instalación de los componentes físicos reales del laboratorio los cuales, en este caso, incluye los dispositivos de adquisición de datos y control de la red de distribución de agua bajo análisis.
4. **Integración y Pruebas:** Etapa en que se integra la implementación virtual y física del laboratorio, validando su correcta operación ante diversos escenarios de funcionamiento.

El laboratorio híbrido propuesto presenta una variedad de beneficios. Primero, permite la creación de *evaluaciones auténticas* (Ajjawi et al., 2019), posibilitando que los estudiantes apliquen sus conocimientos y habilidades en contextos que reflejen el mundo real. Este tipo de evaluaciones son las recomendadas por el modelo de educación basada en competencias para una implementación efectiva. Por otra parte, permite la realización de pruebas de control y optimización de sistemas escalables en nivel de dificultad, en un entorno seguro y controlado. Esto es esencial en el marco de la ingeniería de control y automatización, disciplina en la que los problemas del mundo real presentan una cantidad elevada de variables que, en los laboratorios de prácticas tradicionales, es complejo de emular. Así mismo, la creación de este tipo de laboratorios permitiría a las empresas del rubro no solo capacitar a operarios e ingenieros, sino también, optimizar sus procesos productivos.

Este documento presenta las fases de implementación del laboratorio híbrido, siguiendo una metodología de trabajo que concreta los cuatro puntos de desarrollo previamente listados y, a continuación, se describen resultados logrados hasta la fecha. Finalmente, se entregan algunas conclusiones del trabajo realizado y futuras proyecciones del mismo.

## DESARROLLO

En las secciones siguientes se detallan cada una de las fases de desarrollo del laboratorio híbrido propuesto, correspondiente al control de una sección de una red de distribución de agua potable.

### Diseño del Laboratorio

La Fig. 1 muestra el esquema global de la propuesta de laboratorio híbrido. Como se puede observar, el diseño presenta 3 partes principales: 1) Parte Virtualizada, 2) Parte Física y 3) Comunicación. La parte 1 involucra la emulación virtual del proceso a ser controlado que incluye el modelado dinámico del sistema de distribución de agua potable y su posterior simulación. La parte 2 involucra el diseño y creación física del sistema de adquisición y control de variables. En este caso, se proyecta el desarrollo de un gabinete de control que incluye toda la instrumentación electrónica necesaria, emulando así la manera en que estos dispositivos se encuentran emplazados en entornos industriales reales. Finalmente, la parte 3 involucra la comunicación de las partes física y virtual mediante la puesta en marcha de servidores OPC.

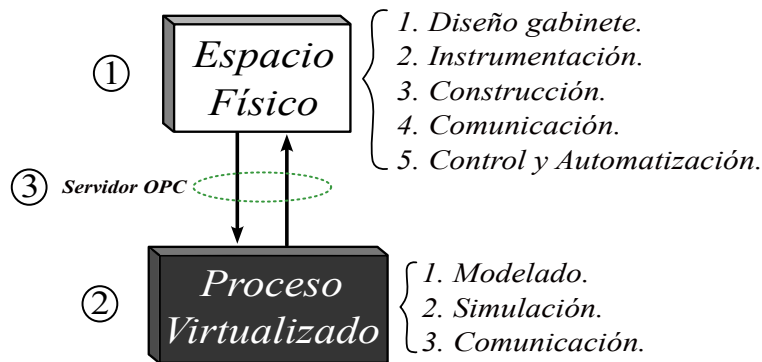


Figura N° 1. Esquema global de la propuesta de Laboratorio Híbrido.

El diagrama de control de la Fig. 2 es fundamental para entender la integración entre la parte física y la parte virtual del laboratorio. Este diagrama muestra cómo se comunican las variables manipuladas y controladas, y cómo interactúan los diferentes componentes del sistema desde la perspectiva del problema tratado, es decir, el monitoreo y control automático del sistema.

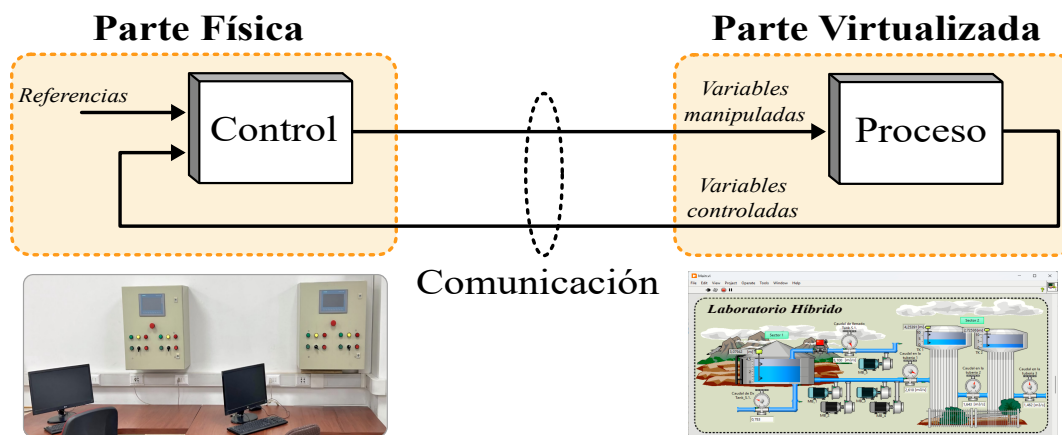


Figura N° 2. Diagrama de control.

La Fig. 3 muestra un layout del sistema de distribución de agua potable que es objeto de análisis. Este contempla un tanque de agua emplazado en un sector geográfico que llamaremos, sector 1, y dos tanques contiguos emplazados en un sector 2 alejado del primero. La instrumentación principal del proceso incluye sensores de caudal, sensores de nivel y cuatro moto-bombas de impulsión.

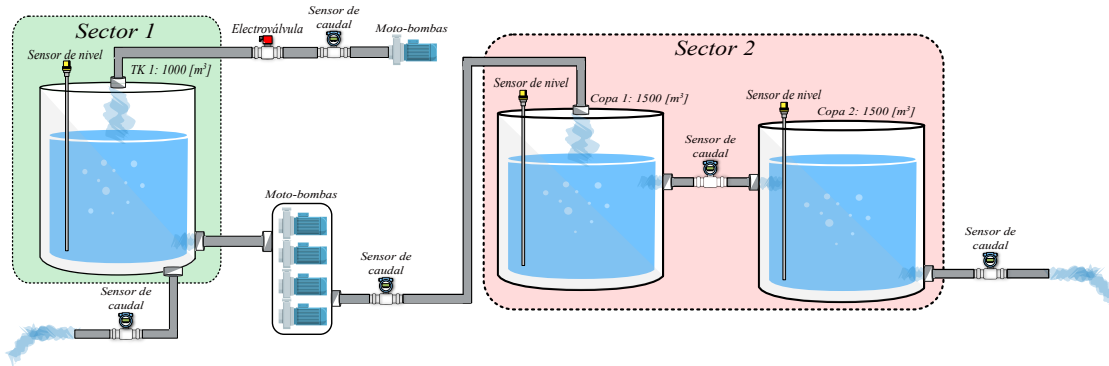


Figura N° 3. Sección de la red de distribución de agua potable.

## Implementación Virtual

Para la virtualización del proceso, se utilizó el software LabVIEW (NI, 2024). Esta herramienta de simulación permite crear aplicaciones dinámicas e interactivas con características de visualización gráfica avanzadas, facilitando el modelado, simulación y control en tiempo real de sistemas dinámicos. El primer elemento a modelar es el tanque semi-enterrado del sector 1, con una capacidad de 1000 metros cúbicos. Según los datos, este tanque está configurado con una entrada y dos salidas. Una salida está conectada directamente a las copas del sector 2, mientras que la otra abastece la distribución del sector 1. Las dimensiones exactas del tanque están documentadas en los planos proporcionados por el ente regulador correspondiente (SISS, 2024).

La dinámica del estanque del sector 1 se describe mediante la siguiente ecuación.

$$A \frac{dh}{dt} = q_{in} - q_{out1} - q_{out2} \quad (1)$$

Donde:

- $A$ : Área sección transversal tanque [m].
- $q_{in}$ : Caudal de entrada [ $m^3/s$ ].
- $q_{out1}$ : Caudal de salida a sector 2 [ $m^3/s$ ].
- $q_{out2}$ : Caudal de salida a sector 1 [ $m^3/s$ ].

El segundo elemento a simular es el conjunto de copas de agua del sector 2, cada una con una capacidad de 1500 metros cúbicos. La entrada a la primera copa de agua se alimenta desde la salida del tanque semi-enterrado del sector 1. La salida de esta primera copa se convierte en la entrada de la segunda copa de agua. Finalmente, la salida de la segunda copa de agua se distribuye hacia tres áreas distintas. Para una comprensión detallada de la configuración de estas copas de agua, se consultaron los planos disponibles en la página la autoridad reguladora pertinente (SISS, 2024).

Las ecuaciones diferenciales que describen la dinámica de las copas de agua son similares a las empleadas para el tanque semi-enterrado del sector 1. La principal diferencia es que cada copa de agua tiene una única salida. Las ecuaciones para esta simulación son las siguientes:

$$\frac{dh1}{dt} = \frac{1}{A1}(Q_{in} - Q_{out1}) \tag{2}$$

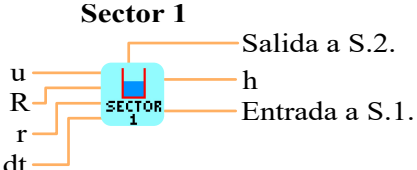
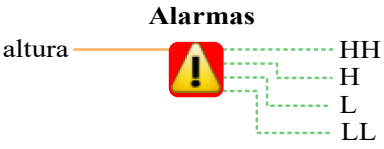
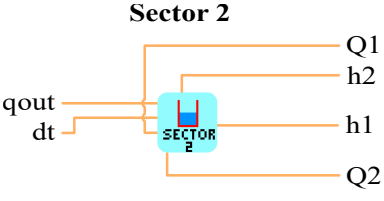
$$\frac{dh2}{dt} = \frac{1}{A2}(Q_{out1} - Q_{out2}) \tag{3}$$

Donde:

- $h1$  y  $h2$  son las alturas del agua en la primera y segunda copa, respectivamente [m].
- $A1$  y  $A2$  son las áreas de la base de la primera y segunda copa [ $m^2$ ].
- $Q_{in}$  es el caudal de entrada a la primera copa desde el tanque semi-enterrado [ $m^3/s$ ].
- $Q_{out1}$  es el caudal de salida de la primera copa hacia la segunda copa [ $m^3/s$ ].
- $Q_{out2}$  es el caudal de salida de la segunda copa hacia las tres áreas distintas [ $m^3/s$ ].

Esta configuración asegura que las copas de agua del sector 2 distribuyan el agua de manera eficiente y equilibrada a las distintas zonas de su periferia, manteniendo un suministro constante y adecuado. La Tabla 1 presenta el detalle de los principales bloques de LabVIEW creados para modelar el comportamiento dinámico del sistema. Estos bloques encapsulan la implementación del sistema y permiten emular el control y monitoreo eficiente de los diferentes componentes del sistema. La integración de estos en la simulación principal facilita la optimización y análisis del comportamiento del sistema en tiempo real.

Tabla N° 1. SubVIs del sistema.

SubVI	Descripción
 <p><b>Sector 1</b></p> <p>Inputs: u, R, r, dt</p> <p>Outputs: Salida a S.2, h, Entrada a S.1</p>	<p>Se disponen controles numéricos para la entrada de liquido dt (diferencia de tiempo), R (radio del estanque), r (radio tubería de salida), y u (voltaje aplicado al motor de la bomba), junto con indicadores numéricos para h (altura), Entrada a S.1., Salida de S.1. y Salida a S.2. Este SubVI se integra a la simulación principal, que incluye tuberías, indicadores de caudal, gráficas y un botón de parada.</p>
 <p><b>Alarmas</b></p> <p>Input: altura</p> <p>Outputs: HH, H, L, LL</p>	<p>Se implementa un panel de alarmas que se activan según el nivel del tanque semi-enterrado HH (Muy Alto), H (Alto), L (Bajo) y LL (Muy bajo).</p>
 <p><b>Sector 2</b></p> <p>Inputs: qout, dt</p> <p>Outputs: Q1, h2, h1, Q2</p>	<p>Se disponen controles numéricos para dt y qout, además de indicadores numéricos para h1 (altura copa 1), h2 (altura copa 2), Q1 (caudal copa 1-2) y Q2 (caudal de salida copa 2). Este diseño incluye elementos propios como tuberías, caudalímetros, indicadores gráficos y un botón de pausa.</p>

Finalmente, en la Fig. 4 se presenta el panel frontal del proceso virtualizado.

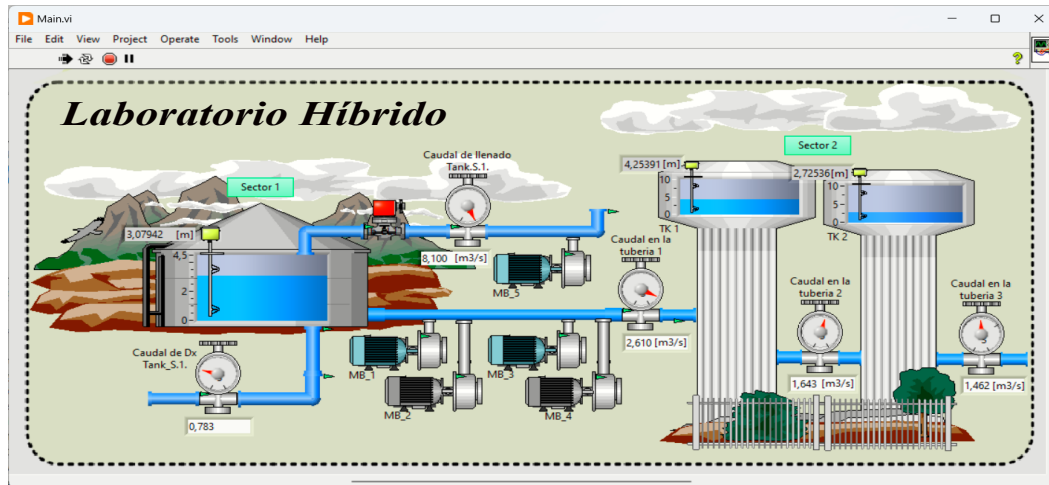


Figura N° 4. Panel Frontal del proceso virtualizado.

## Implementación Física

Con la idea de acercar al estudiante a los entornos de mantención y control industrial reales, se han desarrollado gabinetes de control universal. Estos gabinetes integran todos los componentes de control necesarios, tal como se ilustra en la Fig. 5. Están equipados con una placa de conexionado, permitiendo una fácil adaptación del sistema a diversos entornos industriales, asegurando su versatilidad y eficacia operativa en diversas condiciones de uso.



1. Protecciones.
2. Controlador Lógico Programable (PLC).
3. Módulo de Switch Ethernet.
4. Interfaz Humano-Máquina (HMI).
5. Fuente de Poder.
6. Variador de Frecuencia.
7. Borneras (2).
8. Placa de Conexionado.
9. Luces Piloto (2G, 2Y y 2R).
10. Selectores (2).
11. Parada de Emergencia.

Figura N° 5. Gabinete de Control.

Se utilizó el software TIA Portal (Siemens, 2024) para programar la lógica de control del sistema a través del dispositivo PLC (Controlador Lógico Programable) del gabinete. Este software recibe las variables desde el Servidor OPC, enfocándose en las variables de interés, que incluyen los niveles de líquido en los tanques, los flujos de entrada y salida, las alarmas de nivel y otros parámetros operativos clave. En el modo automático, el sistema controla el nivel ajustando la entrada de líquido de acuerdo con el estado de la alarma de nivel activa en ese momento. Esto asegura una respuesta dinámica y adecuada a las fluctuaciones del nivel de agua en el tanque. En el modo manual, el operador puede seleccionar el modo mediante un selector y establecer la referencia. Sin embargo, hay una excepción crítica: si se activa la alarma de nivel HH, el sistema ajusta automáticamente su entrada a un valor adecuado para evitar el desbordamiento del tanque. Esta medida de seguridad garantiza la protección del sistema.

Finalmente para la visualización y control de variables importantes del sistema, se ha instalado y programado una pantalla HMI (Human-Machine Interface) en la tapa del gabinete de control. Esta interfaz está diseñada para proporcionar una visión clara y detallada del sistema, así como para facilitar el control de sus componentes críticos, tal y como lo haría un operario de control. La estructura de la HMI se organiza en cuatro pantallas: 1) Inicio, 2) General, 3) Sector 1 y 4) Sector 2, cada una enfocada en diferentes aspectos del sistema como se observa en la Fig. 6.

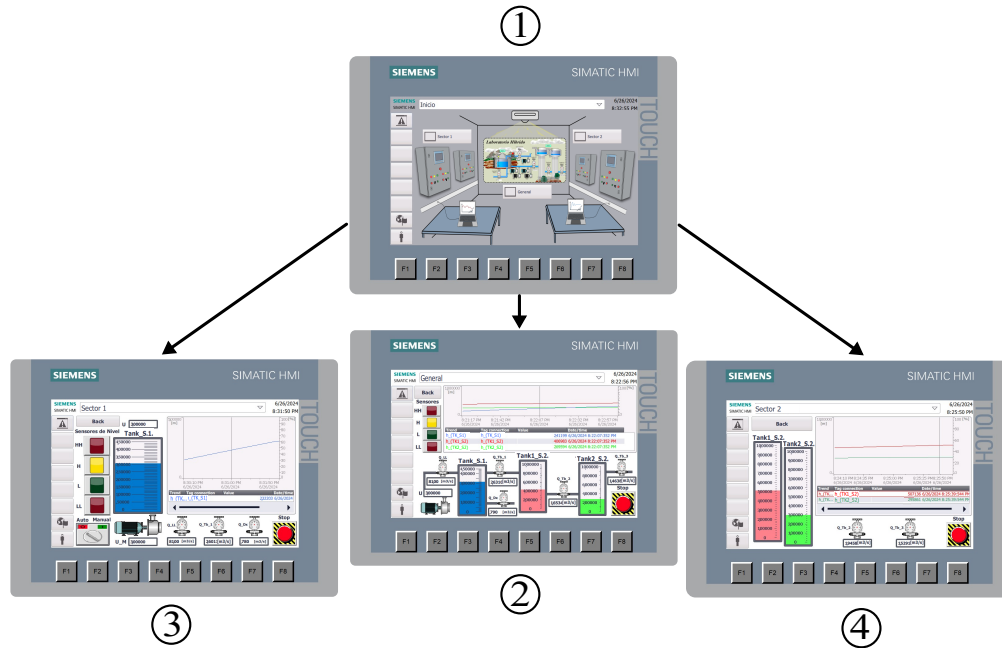


Figura N° 6. Pantallas HMIs.

## Integración y Pruebas

Una vez implementado el sistema virtualizado y físico, se procedió a establecer la comunicación de variables críticas con el servidor OPC, montado en la plataforma KeepServerEX6 (KEPWERE, 2024). Se programa una interacción bidireccional, permitiendo que el control a través de PLC y HMI se comunique de manera efectiva con el servidor. El servidor OPC se configura para facilitar la comunicación entre el entorno físico y virtualizado, siendo esencial para la adquisición de datos en tiempo real y el envío de comandos de control desde el sistema físico. Se implementó una comunicación estable y de baja latencia adecuadas para el control en tiempo real de las variables críticas del sistema. Así mismo, se diseñó e implementó un gabinete de control que muestra el nivel del tanque, el estado de la válvula de entrada y ajustar el nivel de agua, facilitando a los operadores la supervisión y control del sistema de manera eficiente, garantizando una gestión precisa y adaptable del sistema.

El diagrama de la Fig. 7 ilustra cómo todos los sistemas se comunican entre sí a través del servidor OPC. Este diagrama es fundamental para entender la interacción entre los diferentes componentes del laboratorio híbrido y cómo se facilita el desarrollo y operación del mismo. Para asegurar la fiabilidad del sistema, se llevaron a cabo pruebas exhaustivas de comunicación entre los componentes. Los resultados de estas pruebas mostraron una comunicación estable y de baja latencia, lo cual es esencial para el control en tiempo real.

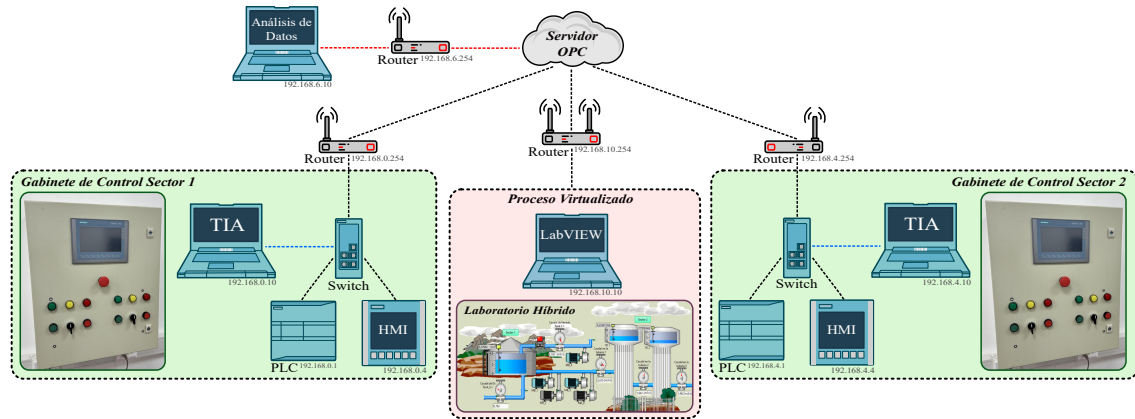


Figura N° 7. Diagrama de comunicación.

## RESULTADOS

La Fig. 8 ilustra el concepto de laboratorio propuesto, mientras que la Fig. 9 muestra el prototipo final instalado en el sala de clases de Automatización de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la PUCV. Esta configuración integró las fases de diseño, simulación, control y visualización, ofreciendo una representación completa del sistema físico y virtual propuesto.

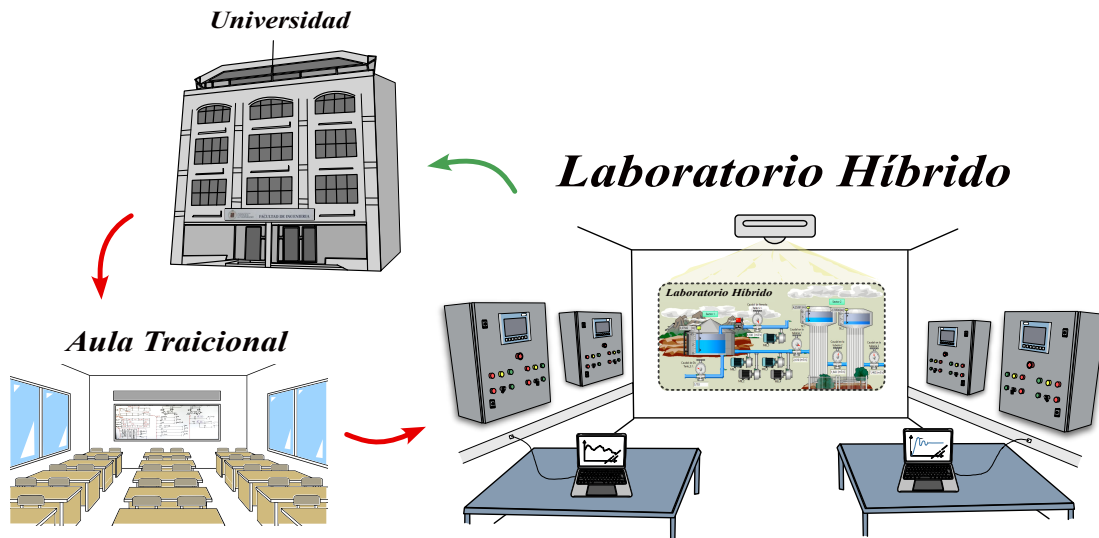


Figura N° 8. Ilustración conceptual del laboratorio híbrido en aula de aprendizaje.

La integración del laboratorio híbrido en entornos educativos y de formación ha demostrado ser altamente beneficiosa, basándose en los resultados obtenidos con un grupo reducido de estudiantes. Este enfoque permitió a los estudiantes experimentar de manera directa la interacción entre el entorno físico y su representación virtual, facilitando una comprensión más profunda y práctica de los sistemas de automatización. La capacidad de observar cómo las acciones en el entorno físico se reflejan en el modelo virtual ayudó a identificar puntos críticos de control, mejorando así la supervisión y el ajuste de los procesos según los objetivos establecidos. El laboratorio híbrido proporcionó una plataforma valiosa para aplicar teorías y conceptos en un entorno seguro, reforzando tanto el conocimiento teórico como las habilidades prácticas.

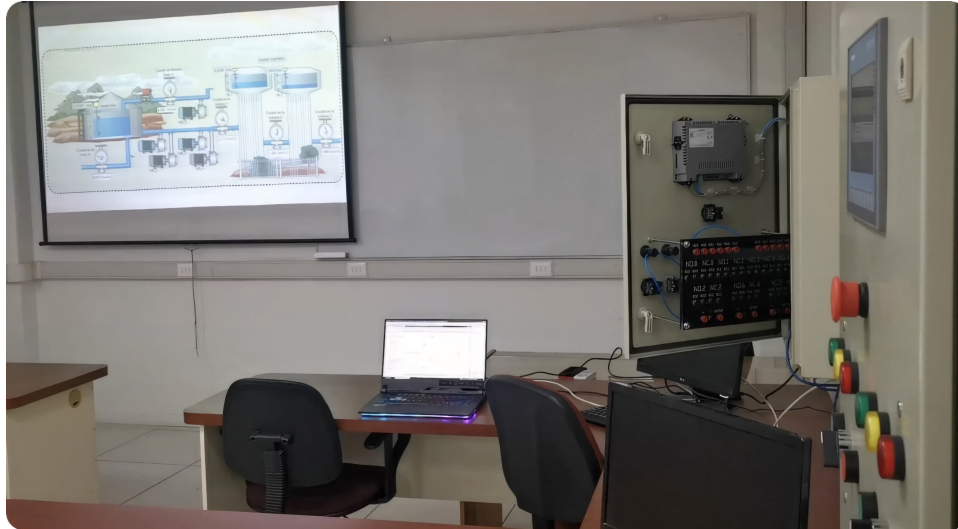


Figura N° 9. Laboratorio híbrido emplazado en las dependencias de la universidad.

Durante la implementación del laboratorio híbrido, se estableció una comunicación eficiente y estable entre los distintos componentes del sistema. La latencia de comunicación se mantuvo uniforme, con una rápida transferencia de datos esencial para el control en tiempo real de las variables críticas del sistema. Esta baja latencia aseguró que las acciones tomadas en el entorno físico se reflejaran casi instantáneamente en el sistema virtualizado, mejorando la percepción operativa por parte de los estudiantes. La red de comunicación que soporta la interacción de las partes garantizó que los datos transferidos entre el entorno físico y el virtualizado fueran precisos y confiables. Esta alta fiabilidad minimizó la posibilidad de errores y pérdidas de datos, manteniendo la integridad del sistema y asegurando un funcionamiento continuo y sin interrupciones.

Finalmente, es importante destacar que este laboratorio híbrido será integrado y utilizado en el curso de automatización industrial que está pronto a impartirse. Esta integración permitirá a los estudiantes aplicar los conocimientos teóricos adquiridos en un entorno práctico, facilitando un aprendizaje profundo y comprensivo de los conceptos de automatización y control industrial.

## CONCLUSIONES

La implementación del laboratorio híbrido para la formación de ingenieros en automatización ha demostrado ser una solución eficaz para recrear contextos industriales reales en un entorno académico. Este laboratorio, que combina componentes físicos y simulaciones virtuales, ha permitido a los estudiantes experimentar con sistemas escalables y complejos de manera segura y controlada. La integración de la simulación virtual con la práctica física han facilitado un aprendizaje más profundo y realista, al proporcionar una plataforma en la que los estudiantes pueden aplicar conocimientos teóricos en situaciones que simulan el entorno industrial real. Esta metodología no solo mejora la comprensión y la aplicación práctica de los conceptos, sino que también prepara a los estudiantes para enfrentar desafíos en el campo de la automatización y el control de sistemas. Las pruebas realizadas confirmaron la estabilidad y la eficacia del sistema, con una comunicación eficiente entre los componentes físicos y virtuales. La baja latencia y la alta fiabilidad de la comunicación han asegurado un funcionamiento continuo y preciso, lo cual es crucial para el control en tiempo real.

El laboratorio híbrido no solo ofrece una herramienta valiosa para la enseñanza en el ámbito académico, sino que también brinda una base sólida para la capacitación de profesionales en la industria 4.0. Su próxima implementación en un curso de automatización industrial permitirá a los futuros ingenieros adquirir habilidades prácticas esenciales, mejorando su preparación para los desafíos del entorno laboral moderno.

## REFERENCIAS

Ajjawi, R., et al. (2019). Aligning assessment with the needs of work-integrated learning: the challenges of authentic assessment in a complex context. *Assessment & Evaluation in Higher Education*, 45(2), 304–316. <https://doi.org/10.1080/02602938.2019.1639613>.

Brauer, S. (2021). Towards competence-oriented higher education: A systematic literature review of the different perspectives on successful exit profiles. *Education + Training*, 63(9), 1376–1390. <https://doi.org/10.1108/ET-07-2020-0216>.

Kepware, (2024). Disponible en: <https://www.kepserverexopc.com/kepware-kepserverex-features/>.

Li, L. (2022). Reskilling and upskilling the future-ready workforce for industry 4.0 and beyond. *Information Systems Frontiers*, 15, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s12008-020-00733-1>.

Malhotra, R., et al. (2023). Shifting from traditional engineering education towards competency-based approach: The most recommended approach-review. *Education and Information Technologies*, 28(7), 9081–9111. <https://doi.org/10.1007/s10639-022-11568-6>.

NI LabVIEW. (2024). Disponible en: <https://www.ni.com/es/shop/labview.html>.

Prieto, M. D., et al. (2019). Active Learning based Laboratory towards Engineering Education 4.0. In *24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 776-783, Zaragoza, Spain. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2019.8869509>.

SISS, (2024). Disponible en: <https://www.siss.gob.cl/appsiss/historico/w3-article-12171.html>.

Siemens, (2024). Software TIA Portal disponible en: <https://www.siemens.com/ar/es/productos/automatizacion/software-industrial/tia-portal.html>.

Vargas, H., et al. (2023). Teaching Automation with Factory I/O under a Competency-based Curriculum. *Multimedia Tools and Applications*, 82(13), 19221–19246. <https://doi.org/10.1007/s11042-022-14047-9>.

Vargas, H., et al. (2024). A Pragmatic Framework for Assessing Learning Outcomes in Competency-Based Courses. *IEEE Transactions on Education*, 67(2), 224-233. <https://doi.org/10.1109/TE.2023.3347273>.

Xu, X., et al. (2021). Industria 4.0 e Industria 5.0: Origen, Concepción y Percepción. *Journal of manufacturing systems*, 61, 530-535. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006>.