

Artículo de investigación

<https://doi.org/10.47460/athenea.v7i24.146>

Plataforma multirrobot para la enseñanza remota de robótica en entornos virtuales

Javier Alexander Castro Haro
<https://orcid.org/0000-0003-3297-7812>
jacastroh@uce.edu.ec / jach1404@hotmail.com
Universidad Central del Ecuador, Facultad de
Ingeniería y Ciencias Aplicadas
Quito, Ecuador

Jorge Mauricio Fuentes Fuentes
<https://orcid.org/0000-0003-0342-643X>
mfuentes@uce.edu.ec
Universidad Central del Ecuador, Facultad de
Ingeniería y Ciencias Aplicadas
Quito, Ecuador

*Autor de correspondencia: benjamin.polo@unrm.edu.pe

Recibido: (03/03/2026), Aceptado: (18/06/2026)

Resumen. Este trabajo evalúa el desempeño técnico y el impacto pedagógico de una plataforma multirrobot remota basada en una arquitectura centralizada para la enseñanza de IoT y visión artificial. La viabilidad técnica de la plataforma se validó mediante un análisis de calidad de servicio (QoS) en diferentes entornos de conectividad residencial, evidenciando un funcionamiento estable con niveles adecuados de latencia, *jitter* y pérdida de paquetes. Se implementó un diseño cuasi-experimental con 56 estudiantes distribuidos en dos grupos: ESPE, que utilizó la plataforma multirrobot, e ISUCT, que empleó simuladores basados en *software*. Los resultados mostraron diferencias significativas a favor de la ESPE en el rendimiento académico global, así como mayores niveles de satisfacción estudiantil. Adicionalmente, IoT presentó mejores resultados que visión artificial en ambas instituciones debido a su menor complejidad cognitiva. Los hallazgos respaldan el uso de laboratorios remotos basados en sistemas ciber-físicos como una alternativa efectiva para fortalecer la formación práctica.

Palabras clave: sistemas ciber-físicos, robótica colaborativa, internet de las cosas, educación.

Multi-Robot Platform for Remote Robotics Teaching in Virtual Environments

Abstract. This study evaluates the technical performance and pedagogical impact of a remote multi-robot platform based on a centralized architecture for teaching IoT and artificial vision. The technical feasibility of the platform was validated through a quality of service (QoS) analysis in different residential connectivity environments, showing stable operation with adequate levels of latency, *jitter*, and packet loss. A quasi-experimental design was implemented with 56 students distributed into two groups: ESPE, which used the multi-robot platform, and ISUCT, which used *software*-based simulators. The results showed significant differences in favor of ESPE in overall academic performance, as well as higher levels of student satisfaction. Additionally, IoT showed better results than artificial vision in both institutions due to its lower cognitive complexity. The findings support the use of remote laboratories based on cyber-physical systems as an effective alternative to strengthen practical training.

Keywords: cyber-physical systems, collaborative robotics, internet of things, education.

I. INTRODUCCIÓN

La educación 4.0 y los sistemas ciber-físicos (CPS) integran procesos computacionales y físicos para mejorar la formación técnica [1], [2]. En este contexto, los sistemas multirrobot (MRS) permiten resolver tareas mediante trabajo colaborativo, ofreciendo mayor robustez, redundancia y eficiencia que los agentes individuales [3], [4]. Asimismo, los laboratorios virtuales y remotos se han consolidado como herramientas esenciales, al facilitar la experimentación práctica desde cualquier ubicación y superar las barreras de tiempo y espacio físico [5], [6].

Sin embargo, la enseñanza de la robótica enfrenta limitaciones significativas debido a su elevado costo y a la falta de flexibilidad del *hardware* y *software* propietarios [7]. Aunque el uso de simuladores es común, persiste una brecha crítica entre la teoría y la práctica en entornos de trabajo colaborativo real ejecutados a distancia [7]. Por tanto, existe la necesidad de evaluar plataformas centralizadas de enseñanza remota que validen, de manera simultánea, tanto su viabilidad técnica como su impacto pedagógico real en estudiantes con diversos perfiles de formación [4].

A diferencia de trabajos previos como [8], orientado exclusivamente al diseño e implementación de la plataforma multirrobot, y [9], enfocado en la descripción de sus características CPS y su aplicación educativa general, esta investigación no propone una nueva plataforma. La contribución fundamental de este artículo consiste en evaluar cuantitativa y cualitativamente el desempeño técnico y el impacto pedagógico de la plataforma desarrollada por [8], al ser utilizada como un entorno de enseñanza remota de robótica en la educación superior.

Para cumplir con este propósito, se realizó un análisis cuantitativo comparativo con 56 estudiantes en Ecuador, distribuidos equitativamente entre la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y el Instituto Superior Tecnológico Central Técnico (ISUCT). La evaluación se organizó en tres frentes: 1) calidad del servicio (QoS), enfocada en evaluar el trayecto desde la interfaz del estudiante, pasando por los canales de comunicación, hasta llegar al bróker MQTT y los agentes robóticos implementados por [9]; 2) rendimiento pedagógico, orientado a cuantificar el desarrollo de competencias técnicas y la asimilación de conceptos complejos [8]; y 3) calidad de la experiencia (QoE) y percepción del estudiante, con el fin de evaluar la interacción del alumno desde el hogar a través de cinco dimensiones: QoE frente a retardos de la red, usabilidad del sistema, carga cognitiva percibida, autoeficacia y transferencia de competencias en IoT y visión artificial, y motivación-compromiso pedagógico del estudiante.

Este estudio se justifica en la validación de una plataforma que integra el aprendizaje basado en proyectos y el enfoque constructivista, donde el estudiante construye su conocimiento mediante la interacción remota con agentes robóticos reales. Al contrastar los resultados entre dos instituciones de educación superior, el artículo aporta datos valiosos sobre la adaptabilidad de los sistemas CPS para fortalecer las capacidades académicas en el marco de la cuarta revolución industrial [5].

II. MARCO TEÓRICO

A. Educación 4.0 y sistemas ciber-físicos

La educación 4.0 integra procesos computacionales y físicos para mejorar la interacción en la formación técnica, en sintonía con los principios de la cuarta revolución industrial [9]. Un sistema ciber-físico (CPS) se define como una integración sinérgica de algoritmos computacionales y componentes físicos, donde el mundo digital interactúa directamente con el mundo físico mediante una red de sensores y actuadores [4]. A diferencia de los sistemas mecatrónicos tradicionales, los CPS representan una evolución orientada a la simbiosis entre las partes físicas y cibernéticas del sistema, y se estructuran sobre tres pilares: inteligencia computacional, sensores y control, y comunicación/conectividad con la nube [4].

En el contexto de la robótica, estos sistemas se dividen en subsistemas de sensores y actuadores con gestión de datos en tiempo real, control de red para la gestión de robots múltiples (MRS) y una interfaz hombre-máquina (HMI), que puede incluir realidad virtual o aumentada [4].

B. Sistemas multirrobot (MRS)

El sistema multirrobot (MRS) corresponde a un grupo de robots que trabajan en el mismo entorno persiguiendo un objetivo bien definido, donde la verdadera capacidad del sistema reside en la cooperación

entre los agentes [4]. Frente a un sistema de un solo robot, un MRS ofrece menor costo por unidad y mayor redundancia gracias a mecanismos de tolerancia a fallos. No obstante, también introduce limitaciones propias: la calidad de la comunicación puede verse afectada por restricciones de ancho de banda, retardos elevados y conflictos entre algoritmos de coordinación, mientras que la escalabilidad puede comprometerse conforme aumenta el número de agentes conectados [4].

Desde el punto de vista de la arquitectura de decisión, los MRS se clasifican en centralizados, jerárquicos, descentralizados e híbridos. En una arquitectura centralizada, un único nodo recolecta la información de estado de los demás robots y emite las órdenes de control correspondientes. Esta arquitectura simplifica la coordinación y resulta especialmente pertinente para fines didácticos, ya que concentra la lógica del sistema en un punto observable y modificable por el estudiante. Sin embargo, introduce un punto único de fallo y puede limitar la escalabilidad por restricciones de ancho de banda y capacidad de cómputo del nodo central [4].

El diseño de plataformas de este tipo se enmarca, además, en la metodología VDI 2206, que establece un macrociclo de tipo modelo en V para el desarrollo de sistemas mecatrónicos, dividiendo el proceso en diseño del sistema a nivel general, diseño en dominios específicos, como mecánica, electricidad y tecnologías de la información, e integración final, con ciclos continuos de modelado, verificación y validación [10]. La misma lógica de diseño modular se encuentra en otras plataformas robóticas educativas, como el dimensionamiento mecánico de una plataforma móvil con brazo manipulable orientada a la docencia [10], el desarrollo de un manipulador didáctico de cinco grados de libertad operable de forma local y remota [11], y el robot antropomórfico de seis grados de libertad de *hardware* y *software* abiertos integrados con ROS [7]. En conjunto, estos antecedentes evidencian una línea consolidada de plataformas CPS de bajo costo para la enseñanza de la robótica en universidades de países en desarrollo.

C. Comunicación, protocolo MQTT y latencia

La conectividad de los sistemas multirrobot modernos se sustenta en arquitecturas de IoT, que permiten la interconexión de dispositivos y el intercambio de información a escala global [9]. El protocolo predilecto para estas aplicaciones es MQTT, basado en una arquitectura de publicación/suscripción en la que un bróker central coordina el flujo de mensajes entre los robots, que actúan como publicadores, y la estación de control, que actúa como suscriptora. Este protocolo destaca por su bajo costo computacional, su eficiencia energética y la posibilidad de implementar capas de seguridad mediante autenticación y puertos cifrados [9].

Desde la clasificación general de la comunicación en MRS, esta corresponde a un esquema de comunicación explícita, en el que los robots intercambian directamente mensajes de datos a través de dispositivos de comunicación, combinado con una arquitectura centralizada de tipo cliente-servidor mediada por el bróker MQTT [4]. La literatura advierte que la comunicación exige un marco de control para garantizar la conectividad de la red y seleccionar un protocolo adecuado, y que su desempeño se degrada conforme aumenta el número de robots y la distancia de comunicación. Esto resulta especialmente relevante cuando el enlace no se limita a un laboratorio local, sino que se extiende a las redes domésticas de los estudiantes [4].

La pertinencia de evaluar la latencia radica en que, en aplicaciones de teleoperación, el retardo de comunicación condiciona directamente la calidad de la experiencia. Retardos elevados generan un desfase perceptible entre la orden enviada y la acción del robot, incrementando la carga cognitiva del usuario y la probabilidad de frustración operativa. Por ello, la literatura sobre comunicación en MRS identifica la baja calidad de comunicación, el ancho de banda limitado, la alta latencia y los conflictos de coordinación como algunas de las limitaciones estructurales más relevantes de estos sistemas [4]. El umbral de 300 ms para el control de teleoperación en tiempo real se enmarca en la calidad de la comunicación como condición habilitante del aprendizaje en plataformas robóticas remotas [4].

D. Laboratorios virtuales y remotos como entornos de enseñanza de robótica

Los laboratorios virtuales y remotos se han consolidado como herramientas esenciales para facilitar la experiencia práctica en ingeniería desde cualquier ubicación, superando las barreras de tiempo y espacio físico que tradicionalmente han limitado el acceso a equipos de robótica costosos o de *hardware* y *software* propietarios [9]. La enseñanza de la robótica enfrenta, en efecto, limitaciones significativas derivadas del costo elevado de los manipuladores y plataformas móviles comerciales, así como de la

rigidez de sus arquitecturas cerradas, lo que ha motivado el desarrollo de alternativas de bajo costo, código abierto y fácilmente replicables [9].

Esta línea de trabajo se observa de manera consistente en los antecedentes revisados. La estación de trabajo didáctica con un manipulador de cinco grados de libertad, operable tanto de forma local, mediante potenciómetros, como remota, mediante una aplicación móvil con Bluetooth [12], constituye un primer acercamiento a la operación remota de un robot educativo. Por su parte, el robot antropomórfico de seis grados de libertad, basado en *hardware* y *software* abiertos y concebido para recibir y enviar información mediante estándares como MQTT o CoAP [7], avanza hacia una arquitectura integrada con IoT.

Sin embargo, la disponibilidad de una plataforma tecnológica adecuada no garantiza por sí sola su impacto pedagógico [13]. La revisión sistemática sobre la formación docente en tecnologías emergentes en educación superior identifica que las barreras más recurrentes para la integración efectiva de este tipo de herramientas no son únicamente técnicas, sino que incluyen la ausencia de estrategias didácticas específicas en el proceso de enseñanza-aprendizaje y la limitada formación académica del docente para impartir la práctica de laboratorio [13]. En consecuencia, no basta con validar la viabilidad técnica del sistema multirrobot, en términos de conectividad, precisión y latencia [4], [9]; también resulta indispensable evaluar su impacto pedagógico real, el rendimiento académico y la satisfacción en estudiantes con perfiles de formación y condiciones de acceso distintas, así como el papel que juega la disponibilidad temporal del estudiante como variable que media la apropiación efectiva de la tecnología [13].

Desde la dimensión pedagógica, el aprendizaje basado en proyectos y el constructivismo sostienen que el conocimiento se construye de manera activa a partir de la experiencia del estudiante con el objeto de aprendizaje, en contraposición a modelos de transmisión exclusivamente teóricos [13]. Bajo esta lógica, la investigación del robot antropomórfico de seis grados de libertad reportó mejoras entre el 40,74% y el 186,96% en competencias técnicas asociadas a parámetros Denavit-Hartenberg, cinemática, dimensionamiento de actuadores y programación en ROS [7].

III. METODOLOGÍA

La investigación adoptó un enfoque de métodos mixtos, con diseño cuasi-experimental, para evaluar la calidad del servicio en la plataforma multirrobot, el impacto académico y la percepción tecnológica asociada al uso de una plataforma robótica remota.

A. Calidad de servicio (QoS) en el sistema CPS remoto

El sistema fue desarrollado por [8] y consta de tres robots móviles omnidireccionales con ruedas Mecanum. El *hardware* integra un Arduino para el control de bajo nivel, correspondiente a motores y sensores, y una Raspberry Pi como nodo maestro con ROS, con una autonomía de 85 minutos. La comunicación con la estación base emplea el protocolo MQTT bajo una arquitectura centralizada tipo *Learning Factory*. La Fig. 1 muestra un esquema del sistema multirrobot utilizado en este estudio.

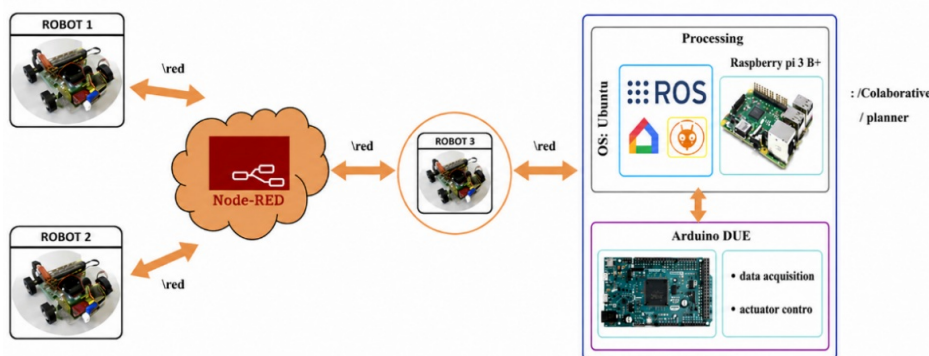


Fig. 1. Esquema del sistema multirrobot. Adaptado de [8].

Para evaluar la viabilidad de la plataforma distribuida de tres robots omnidireccionales, operados

como un sistema ciber-físico (CPS) educativo para los módulos de IoT y visión artificial, se estructuró un protocolo de caracterización experimental de la calidad de servicio (QoS) en la red de transporte.

Al trasladar la experiencia desde el laboratorio de la universidad hasta los hogares de una muestra de 28 estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, el canal de comunicación se convierte en una variable estocástica no ideal. El sistema fue evaluado bajo tres tecnologías de acceso: red móvil 4G/LTE, red privada doméstica de cobre ADSL/HFC y red doméstica de fibra FTTH. En cada una de ellas se analizaron el tiempo de ida y vuelta (RTT), el *jitter* y el *throughput*.

B. Análisis cuantitativo

Se trabajó con una muestra de 56 estudiantes que recibieron un curso de robótica, enfocado en visión artificial e IoT. De ellos, 28 estudiantes pertenecieron al Instituto Superior Tecnológico Central Técnico (ISUCT), quienes emplearon simuladores de *software*, específicamente Python + OpenCV para visión artificial y Node-RED + ESP32 para IoT. Los otros 28 estudiantes pertenecieron a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, quienes operaron el sistema multirrobot ciber-físico remoto. Ambos grupos recibieron 20 horas de clases sincrónicas y 10 horas de práctica en sus respectivos entornos de aprendizaje.

En ambos grupos se empleó el mismo equipo docente para la impartición de las asignaturas, asegurando la aplicación de una estrategia pedagógica equivalente. Asimismo, se mantuvieron similares el cronograma de actividades prácticas, los contenidos curriculares y los criterios de evaluación. El procesamiento de las variables dependientes, correspondientes al rendimiento académico y la satisfacción, se ejecutó en Minitab mediante tres etapas secuenciales.

En primer lugar, se midió la línea base mediante un pretest y se validó la homogeneidad inicial intergrupo e intragrupo a través de las pruebas de Shapiro-Wilk y t de Student, tanto para muestras independientes como pareadas. En segundo lugar, tras registrar las notas finales del curso, se verificaron los supuestos matemáticos de normalidad y homocedasticidad mediante las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene. Finalmente, se analizaron los efectos globales e internos mediante pruebas t de Student, determinando además el tamaño del efecto mediante la d de Cohen. Complementariamente, se modeló un ANOVA de dos vías para examinar los efectos principales y de interacción de segundo orden entre los factores "Entorno de aprendizaje" y "Materia" sobre el éxito académico.

C. Análisis cualitativo

Se aplicó una encuesta Likert de 5 puntos, compuesta por 12 reactivos y basada en el modelo TAM, con el propósito de evaluar cinco dimensiones: calidad de experiencia (QoE), facilidad de uso del sistema, carga cognitiva percibida, autoeficacia y transferencia de competencias, y motivación y compromiso. La confiabilidad del instrumento se validó mediante el alfa de Cronbach. Posteriormente, se realizó estadística descriptiva por dimensiones y se aplicó la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney para comparar las medianas de satisfacción entre grupos.

D. Consideraciones éticas

Todos los estudiantes participantes en este estudio técnico-pedagógico otorgaron su consentimiento informado por escrito antes del inicio del experimento, autorizando el uso académico de sus calificaciones y respuestas. La información fue tratada de manera confidencial y utilizada exclusivamente con fines investigativos.

IV. RESULTADOS

A. Análisis de la calidad de servicio (QoS) residencial

La viabilidad operativa de la plataforma ciber-física (CPS) de tres robots para la enseñanza de IoT y visión artificial se validó midiendo la calidad de servicio (QoS) en la capa de aplicación, específicamente en el puerto TCP 1883, tras 250 iteraciones residenciales. Los resultados se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados consolidados de las métricas de QoS por tecnología de acceso residencial.

Entorno de conectividad	Ancho de banda	Latencia (RTT)	Desviación estándar (SD)	Jitter promedio (σ_J)	Throughput real medido	Tasa de pérdida de paquetes
Red móvil celular (4G/LTE)	1,0 Mbps	124,4 ms	$\pm 12,1$ ms	4,3 ms	42,5 kbps	1,20%
Red privada doméstica de cobre (ADSL/HFC)	6,0 Mbps	234,2 ms	$\pm 28,5$ ms	9,1 ms	48,1 kbps	4,85%
Fibra óptica de hogar (FTTH)	50,0 Mbps	45,8 ms	$\pm 3,2$ ms	1,1 ms	31,2 kbps	0,05%

La Tabla 1 muestra que la red móvil 4G/LTE registró una latencia eficiente de 124,4 ms y un bajo jitter de 4,3 ms, debido a su enrutamiento directo, que evita colisiones locales. Esto permitió que MQTT mitigara el bajo ancho de banda y que la escasa pérdida de paquetes, equivalente al 1,20%, previniera la saturación del bróker. Por el contrario, la red de cobre exhibió una latencia elevada de 234,2 ms y un jitter de 9,1 ms, debido a la atenuación y congestión doméstica, que causaron un 4,85% de pérdida de paquetes e indujeron el fenómeno de bloqueo de cabecera en la capa TCP, sin colapsar el bróker.

Finalmente, la fibra óptica ofreció un escenario ideal, con 45,8 ms de latencia e inmunidad a ruidos. De este modo, se demuestra que incluso en el peor escenario, correspondiente a la red de cobre, el retardo no supera el umbral psicofisiológico humano de los 300 ms. El protocolo ligero MQTT permitió la viabilidad de las prácticas en la plataforma multirrobot utilizada, sin degradar la experiencia por retardos perceptibles.

B. Análisis cuantitativo

La prueba de Shapiro-Wilk confirmó la distribución normal de las calificaciones del pretest, tanto en la ESPE ($p > 0,100$) como en el ISUCT ($p > 0,100$). Posteriormente, el contraste de hipótesis mediante una prueba t de Student para muestras independientes, con corrección de Welch, determinó que no existieron diferencias estadísticamente significativas entre los conocimientos previos de ambas instituciones ($t_{53} = 0,66$; $p = 0,513$) en IoT y visión artificial. Por tanto, los promedios del pretest para los estudiantes de la ESPE ($\bar{X} = 26,07$) y del ISUCT ($\bar{X} = 24,64$) representan un punto de partida cognitivo equivalente antes del experimento.

Adicionalmente, se evaluó mediante una prueba t pareada la existencia de brechas cognitivas entre las disciplinas antes del curso. Los análisis intragrupo determinaron que el nivel de conocimiento diagnóstico entre IoT y visión artificial fue estadísticamente equivalente tanto en los estudiantes de la ESPE ($\bar{X}_{IoT} = 27,86$; $\bar{X}_{Visión\ Artificial} = 24,29$; $t_{27} = 1,22$; $p = 0,232$) como en los estudiantes del ISUCT ($\bar{X}_{IoT} = 25,71$; $\bar{X}_{Visión\ Artificial} = 23,57$; $t_{27} = 0,68$; $p = 0,501$).

Luego de impartir el curso de robótica, se evaluó la normalidad de las calificaciones de los estudiantes del ISUCT y de la ESPE mediante la prueba de Shapiro-Wilk. Con un nivel de significancia del 95% y un valor de $p > 0,100$ para ambos grupos, se confirmó que los datos de las notas en ambas instituciones siguen una distribución normal.

La prueba de Levene confirmó la homogeneidad de varianzas en las calificaciones ($Levene(3, 108) = 0,30$; $p = 0,587$). Desde una perspectiva didáctica, esta igualdad de varianzas evidencia que la variabilidad del rendimiento académico se mantuvo uniforme y controlada. Esto confirma que ni la naturaleza abstracta de los simuladores basados en software, como Python/OpenCV y Node-RED, utilizados en el ISUCT, ni la complejidad de la teleoperación y la latencia de red de la plataforma ciber-física (CPS) utilizada en la ESPE introdujeron dispersiones anómalas o descontroladas en el proceso de evaluación.

La prueba t de Student para muestras independientes confirmó una diferencia estadísticamente significativa en el rendimiento global ($t_{53} = -8,42$; $p < 0,001$; $d = -2,25$). Los estudiantes de la ESPE, potenciados por la plataforma ciber-física, alcanzaron un promedio final superior ($\bar{X} = 86,45$; $SD = 6,75$; 60,38% de mejora respecto al pretest), frente a los estudiantes del ISUCT, limitados al uso de simuladores ($\bar{X} = 71,61$; $SD = 6,44$; 46,97% de mejora). Esto representa un rendimiento académico neto 14,84% mayor a favor de los estudiantes de la ESPE, como se muestra en la Fig. 2.

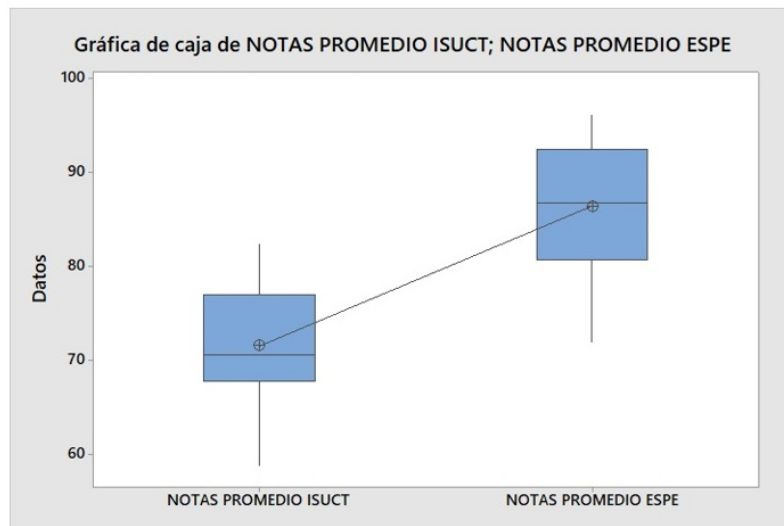


Fig. 2. Gráfica de cajas de las notas promedio de ESPE e ISUCT.

Dado que los estudiantes de ambas instituciones recibieron la misma formación, impartida por el mismo equipo docente, con idénticos contenidos curriculares, carga horaria y criterios de evaluación, la diferencia observada en el rendimiento puede atribuirse con alto grado de confianza al entorno de aprendizaje empleado. Aunque ambos grupos mejoraron su desempeño, lo que confirma la efectividad del módulo teórico común, los estudiantes de la ESPE alcanzaron resultados significativamente superiores, evidenciando los beneficios pedagógicos de la plataforma multirrobot ciber-física.

A diferencia de los simuladores, que permiten validar algoritmos en entornos controlados y reproducibles, la plataforma proporcionó experiencias de aprendizaje sobre sistemas físicos reales, enfrentando a los estudiantes a desafíos característicos de aplicaciones de IoT y visión artificial, como variaciones en la iluminación, procesamiento de imágenes en tiempo real, latencias de comunicación y comportamiento dinámico de sensores y actuadores. Estas condiciones enriquecieron la experiencia formativa, fortalecieron las competencias prácticas y favorecieron una comprensión más profunda de la integración entre *hardware* y *software*, respaldando la plataforma como una estrategia pedagógica más efectiva para el aprendizaje de la robótica.

El análisis intragrupo realizado mediante la prueba t de Student para muestras pareadas evidenció diferencias significativas entre los módulos de IoT y visión artificial en ambas instituciones. En el ISUCT, los estudiantes obtuvieron un mejor desempeño en IoT ($\bar{X} = 77,01$; $SD = 6,03$) que en visión artificial ($\bar{X} = 66,21$; $SD = 9,82$), con una diferencia estadísticamente significativa ($t_{27} = -5,73$; $p < 0,001$; $d = 1,08$). De manera similar, en la ESPE se observaron diferencias significativas a favor de IoT ($\bar{X} = 92,77$; $SD = 5,26$) frente a visión artificial ($\bar{X} = 80,13$; $SD = 12,36$), con $t_{27} = -5,00$, $p < 0,001$ y $d = -0,94$.

Estos resultados sugieren que la asignatura de visión artificial implicó mayores exigencias cognitivas, asociadas al procesamiento digital de imágenes, la selección y configuración de dispositivos de captura, la extracción de características y la interpretación de resultados visuales. Adicionalmente, el uso exclusivo de simuladores pudo haber limitado la comprensión práctica de algunos fenómenos visuales. Por otro lado, la mejora observada en la ESPE indica que el uso de laboratorios remotos basados en sistemas ciber-físicos puede mitigar parcialmente estas dificultades y favorecer una mayor transferencia entre teoría y práctica. En conjunto, los resultados sugieren que las diferencias de rendimiento estuvieron determinadas principalmente por la complejidad inherente de la disciplina y por las características del entorno de aprendizaje, más que por diferencias en los conocimientos previos de los estudiantes.

El análisis ANOVA de dos factores evidenció un efecto altamente significativo del entorno de aprendizaje sobre el rendimiento académico ($F(1, 108) = 78,81$; $p < 0,001$). Los estudiantes que realizaron las prácticas mediante la plataforma multirrobot centralizada, correspondiente a la ESPE, obtuvieron calificaciones superiores a aquellos que trabajaron exclusivamente con simuladores, correspondientes al ISUCT, lo que indica que la interacción con sistemas ciber-físicos reales favorece la comprensión y

aplicación de los contenidos abordados.

Asimismo, el factor asignatura presentó un efecto significativo ($F(1, 108) = 49,12; p < 0,001$), observándose un mejor desempeño en loT que en visión artificial, independientemente del entorno de aprendizaje práctico utilizado. Este comportamiento puede atribuirse a la mayor complejidad cognitiva asociada al procesamiento de imágenes, la calibración de parámetros y la interpretación de información visual en tiempo real. Por otra parte, la interacción entre el entorno de aprendizaje y la asignatura no fue significativa ($F(1, 108) = 0,30; p = 0,585$), indicando que ambos factores actuaron de manera independiente. En consecuencia, la ventaja proporcionada por la plataforma multirrobot se mantuvo de forma consistente tanto para loT como para visión artificial, evidenciando que los beneficios del laboratorio remoto basado en sistemas ciber-físicos son aplicables a distintas áreas de formación en robótica.

C. Análisis cualitativo

La consistencia interna del instrumento de satisfacción fue evaluada mediante el coeficiente alfa de Cronbach, obteniendo un valor de $\alpha = 0,8059$, lo que demuestra una alta confiabilidad y validez de la encuesta para el análisis de percepción del curso de robótica, cuyos módulos fueron visión artificial e loT.

Se realizó el cálculo de medias y desviaciones estándar indexadas por institución educativa y dimensión académica. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Análisis descriptivo de la percepción de satisfacción estudiantil por dimensiones.

Dimensión Académica	Institución	Entorno de Aprendizaje Práctico	Muestra (n)	Media (\bar{X})	Desviación Estándar (SD)
Calidad de Experiencia	ESPE	Plataforma multirrobot	28	4,1667	0,5092
	ISUCT	Simulador	28	4,8810	0,2600
Facilidad de uso del sistema	ESPE	Plataforma multirrobot	28	4,6310	0,4567
	ISUCT	Simulador	28	4,6905	0,4344
Carga cognitiva percibida	ESPE	Plataforma multirrobot	28	4,464	0,543
	ISUCT	Simulador	28	3,268	0,700
Autoeficacia y Transferencia de competencias	ESPE	Plataforma multirrobot	28	4,8929	0,2842
	ISUCT	Simulador	28	3,036	0,607
Motivación y Compromiso	ESPE	Plataforma multirrobot	28	4,7857	0,3951
	ISUCT	Simulador	28	4,071	0,703

El análisis descriptivo de la encuesta, presentado en la Tabla 2, reveló la mejora pedagógica en la enseñanza de la robótica mediante la plataforma multirrobot centralizada aplicada en la ESPE, en comparación con el uso de simuladores en el ISUCT. En la dimensión calidad de la experiencia (QoE), el ISUCT obtuvo una puntuación superior frente a la ESPE. Este comportamiento se debe a que los programas de simulación carecen de la latencia y las fluctuaciones de red intrínsecas en la teleoperación de la arquitectura real, aunque la plataforma se mantuvo con éxito dentro del umbral de aceptación.

Por el contrario, la dimensión facilidad de uso del sistema demostró una homogeneidad estadística

entre el entorno multirrobot utilizado en la ESPE y el manejo de programas de simulación empleados en el ISUCT, lo que confirma que el panel de control de la plataforma multirrobot es tan intuitivo y ergonómico como los programas comerciales consolidados.

En el análisis de carga cognitiva percibida, la ESPE superó al ISUCT, indicando una mayor capacidad de los estudiantes para mitigar el estrés y facilitar la depuración de errores. Asimismo, la autoeficacia y transferencia de competencias fue superior en la ESPE con relación al ISUCT, demostrando que interactuar con restricciones físicas reales prepara mejor para la industria que el uso exclusivo de un programa comercial.

La última dimensión analizada fue la motivación y compromiso, la cual validó la preferencia por el uso de la plataforma multirrobot sobre el enfoque tradicional de simulación en pantalla, demostrando que el uso de agentes físicos incrementa el interés de los estudiantes por la investigación en el área de la robótica y la automatización.

El análisis inferencial de la percepción estudiantil global, ejecutado mediante la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney, demostró una diferencia estadísticamente significativa entre instituciones que utilizaron diferente entorno de aprendizaje práctico ($W = 1043,00$; $p < 0,001$). Los estudiantes de la ESPE que operaron la plataforma multirrobot ciber-física registraron una mediana de satisfacción global superior ($Me = 4,5000$), en comparación con aquellos que utilizaron entornos de simulación en el ISUCT ($Me = 4,20833$).

Este hallazgo cualitativo se alinea de manera simétrica con los resultados cuantitativos de rendimiento académico obtenidos en el ANOVA de dos vías ($p < 0,001$). La convergencia de ambos análisis demuestra que el modelo de despliegue tecnológico no solo afecta la capacidad del estudiante para obtener mejores calificaciones, sino que transforma de manera integral su experiencia y aceptación de la plataforma multirrobot.

CONCLUSIONES

La presente investigación permitió desarrollar un modelo predictivo para la prevención dinámica de accidentes laborales mediante la integración de sensores inteligentes, inteligencia artificial explicable y técnicas de simulación avanzada. Los resultados demostraron que la combinación de variables ambientales, operacionales y fisiológicas proporciona una representación más completa del riesgo ocupacional que los enfoques tradicionales basados en inspecciones periódicas o análisis retrospectivos. Asimismo, el Índice Inteligente de Riesgo Laboral (IIRL) evidenció capacidad para reflejar la evolución temporal de las condiciones de seguridad durante la jornada operativa, permitiendo identificar oportunamente escenarios de riesgo creciente.

La evaluación comparativa de los algoritmos de aprendizaje automático mostró que los modelos basados en técnicas de ensamblaje, particularmente *XGBoost*, alcanzaron elevados niveles de desempeño predictivo, con una adecuada capacidad de discriminación entre condiciones seguras y potencialmente peligrosas. Adicionalmente, la incorporación de métodos de inteligencia artificial explicable permitió identificar que la fatiga operacional, las vibraciones anormales y la temperatura ambiental constituyen los factores con mayor influencia sobre la probabilidad de ocurrencia de eventos críticos, aportando transparencia y soporte técnico para la toma de decisiones preventivas.

La simulación Monte Carlo confirmó la sensibilidad del sistema ante la interacción simultánea de múltiples factores de riesgo, evidenciando que pequeños incrementos en la carga operativa, la exposición ambiental y la fatiga de los trabajadores pueden generar aumentos significativos en la probabilidad de accidentes. Estos hallazgos demuestran la utilidad de los enfoques probabilísticos para anticipar escenarios complejos de riesgo y fortalecer la gestión preventiva en entornos industriales caracterizados por elevados niveles de incertidumbre.

Por otra parte, el desarrollo del gemelo digital industrial permitió reproducir virtualmente diferentes condiciones operativas y evaluar estrategias de intervención antes de su implementación en campo. Esta capacidad de simulación constituye una herramienta de alto valor para la gestión moderna de la seguridad ocupacional, al facilitar la identificación de zonas críticas, la optimización de protocolos preventivos y la reducción de riesgos sin afectar la continuidad de los procesos productivos.

Los resultados obtenidos evidencian que la convergencia entre tecnologías IIoT, inteligencia artificial, simulación probabilística y gemelos digitales representa una evolución significativa hacia sistemas

de seguridad industrial predictivos, adaptativos y orientados a la toma de decisiones en tiempo real. Como línea futura de investigación, se recomienda incorporar técnicas de aprendizaje continuo, análisis multimodal del comportamiento humano y arquitecturas de Industria 5.0 que permitan desarrollar sistemas capaces de aprender dinámicamente de nuevos eventos y adaptar sus estrategias preventivas de manera autónoma.

REFERENCIAS

- [1] O. Peña Cáceres, H. Silva-Marchan, R. Espinoza-Nima, and M. More-More, "Sistemas ciber-físicos en la educación del siglo XXI," *European Public & Social Innovation Review*, vol. 10, pp. 1–19, 2024.
- [2] E. Jiménez López, L. A. García Velásquez, L. O. Amavizca Valdez, D. Y. Wong Pacheco, S. Valdez Tribolet, and M. d. R. Mafara Duarte, "Educación en ingeniería 4.0 y la mecatrónica," in *Kaizen Mecatrónica*, 2023, ch. 30, pp. 387–396.
- [3] D. E. Gonzalez Bonifaz, A. D. C. Verdugo Cabrera, L. F. Escobar Carvajal, and D. C. Loza Matovelle, "Implementation of an IoT architecture based on MQTT for a multi-robot system," in *2018 IEEE Third Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*. Cuenca, Ecuador: IEEE, 2018, pp. 1–6.
- [4] X. An, C. Wu, Y. Lin, M. Lin, T. Yoshinaga, and Y. Ji, "Multi-robot systems and cooperative object transport: Communications, platforms, and challenges," *IEEE Open Journal of the Computer Society*, vol. 4, pp. 23–36, 2023.
- [5] C. A. Jara, F. A. Candelas, S. T. Puente, and F. Torres, "Hands-on experiences of undergraduate students in automatics and robotics using a virtual and remote laboratory," *Computers & Education*, vol. 57, no. 4, pp. 2451–2461, 2011.
- [6] V. Potkonjak *et al.*, "Virtual laboratories for education in science, technology, and engineering: A review," *Computers & Education*, vol. 95, pp. 309–327, 2016.
- [7] J. Galarza, L. Escobar, and D. Loza, "6 DOF anthropomorphic robot as a platform for teaching robotics," in *2020 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, 2020, pp. 631–636.
- [8] L. Allauca and G. Aguirre, "Diseño e implementación de un sistema multirobot para trabajos colaborativos dotado de planificación de trayectoria con arquitectura IoT," Trabajo de grado, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Quito, Ecuador, 2020.
- [9] L. Escobar, C. Moyano, G. Aguirre, G. Guerra, L. Allauca, and D. Loza, "Multi-robot platform with features of cyber-physical systems for education applications," in *2020 IEEE ANDESCON*. Quito, Ecuador: IEEE, 2020, pp. 1–6.
- [10] O. Flor, M. Fuentes, and C. Toapanta, "Criteria for the design of an educational robotics platform," *Athenea Engineering Sciences Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 29–40, 2020.
- [11] J. Ortiz-Mata and A. León-Batalla, "Diseño e implementación de un robot manipulador de cinco grados de libertad para una estación de trabajo didáctica," *Universidad, Ciencia y Tecnología*, vol. 22, no. 87, pp. 6–6, 2018.
- [12] —, "Diseño e implementación de un robot manipulador de cinco grados de libertad para una estación de trabajo didáctica," *Universidad, Ciencia y Tecnología*, vol. 22, no. 87, pp. 6–6, 2018.
- [13] E. J. Colonia Villarreal, "A systematic review of barriers and solutions in teacher training in artificial intelligence," *Minerva*, vol. 7, no. 20, pp. 13–24, 2026.