



Formación industrial con Realidad Mixta

A. García-Turiel¹, A. Martínez-Gutiérrez¹, R. Ferrero-Guillén¹, I. Sánchez-Calleja¹,
H. Pérez¹, J. Díez-González¹

¹ Dpto. de Ingeniería Mecánica, Informática y Aeroespacial. Universidad de León

En el marco de la Industria 4.0 y su evolución hacia la Industria 5.0, la digitalización de la formación industrial es fundamental para garantizar la adquisición eficiente de habilidades en entornos innovadores y dinámicos. Sin embargo, los métodos tradicionales de entrenamiento digital presentan limitaciones en cuanto a realismo e integración con el entorno de trabajo. En este contexto, la Realidad Mixta (RM) surge como una alternativa prometedora al combinar la inmersión de la Realidad Virtual con la interacción del mundo real propia de la Realidad Aumentada, ofreciendo una experiencia de aprendizaje más efectiva y adaptada a la industria. Este estudio desarrolla y evalúa una aplicación de entrenamiento basada en RM, aplicada a la formación en la operación de un Robot Móvil Autónomo. A través de un caso de experimentación, se ha analizado el desempeño de los participantes antes, durante y después del entrenamiento, registrando tanto métricas cuantitativas como percepciones cualitativas sobre la efectividad del sistema. Los resultados muestran una mejora significativa en la eficiencia de ejecución, con una reducción media del tiempo de finalización de la tarea de un 27% y una disminución del número de errores en 1,4 fallos. Además, el análisis de la curva de aprendizaje evidencia una progresión positiva en el rendimiento de los participantes, con tiempos de ejecución optimizados y una reducción constante de fallos. La percepción de los sujetos de experimentación también refleja una alta satisfacción en términos de ergonomía y realismo gráfico, consolidando la Realidad Mixta como una metodología de formación inmersiva y eficaz. Asimismo, se destacan sus ventajas en la deslocalización de los procesos de entrenamiento, permitiendo la optimización de recursos, la reducción de costes y la minimización de riesgos en entornos industriales. En conclusión, los hallazgos de este estudio demuestran el potencial de la Realidad Mixta como una herramienta en la transformación de los sistemas de entrenamiento digital, contribuyendo a la evolución de metodologías más eficientes y seguras en los procesos productivos.

1. Introducción

El paradigma actual de la Industria 4.0 se basa en el desarrollo de tecnologías digitales avanzadas, redes de comunicación y sistemas de automatización y computación [1-3], orientados a maximizar el valor en los procesos de fabricación. No obstante, enfrenta importantes desafíos, como la falta de habilidades digitales y una cultura organizacional insuficiente, priorizando la digitalización sobre los aspectos sociales, lo que también repercute en la salud y seguridad laboral [4, 5]. En respuesta, surge la transición hacia la Industria 5.0, un enfoque centrado en el ser humano que busca una simbiosis entre personas y máquinas. Este nuevo paradigma aprovecha la creatividad humana y las capacidades tecnológicas para desarrollar soluciones personalizadas, sostenibles e integradas con las interacciones humanas y el entorno [6, 7].

Por otra parte, en cualquier proceso industrial, las habilidades y los conocimientos de los operarios que intervienen resultan fundamentales para mejorar la eficiencia y calidad. La Industria 4.0, exige que estas capacidades humanas sean también digitalizadas e integradas, de igual manera que el resto de los activos industriales. En este sentido, se han desarrollado novedosas plataformas y estrategias para la formación de operarios, siendo el entrenamiento digital una de ellas. El entrenamiento digital reduce las necesidades de material, disminuyendo los costes y extendiendo la formación a un mayor número de personas [8]. Además, permite la deslocalización de los procesos de aprendizaje, lo cual resulta muy beneficioso en entornos donde el riesgo es elevado [9], como ocurre en las actividades industriales. Una de las metodologías más tradicionales de entrenamiento digital son las basadas en laboratorios remotos y laboratorios virtuales. Sin embargo, la literatura demuestra que no pueden reemplazar al

entrenamiento realizado en un laboratorio tradicional, ya que la percepción del entorno no es lo suficientemente realista, debido a que solo existe interacción entre el operario y el sistema ciberfísico [10–12].

Para resolver este gran inconveniente, se ha comenzado a estudiar el uso de plataformas que utilizan tecnologías de Realidad Extendida (RE) para proporcionar experiencias de entrenamiento digital con una interacción mucho más realista con el entorno del proceso [13]. El uso de Realidad Aumentada (RA) tiene un gran potencial en la enseñanza al facilitar la visualización eficiente de la información [13, 14]. Sin embargo, la RA no logra un entorno tan realista como la Realidad Virtual (RV), que permite una inmersión completa, pero sin interacción con el entorno real. Por ello, se propone la Realidad Mixta (RM) como un híbrido que combina lo mejor de ambos mundos [15,16], integrando al usuario, el entorno real y el virtual. Aunque los resultados son favorables, las limitaciones tecnológicas actuales afectan el realismo, obligando a simplificar acciones y gestos [17]. Por tanto, es necesario seguir investigando para desarrollar hardware y software que amplíen el uso de RM.

Por ello, se plantea el desarrollo y análisis de una aplicación de entrenamiento digital basada en RM, con el objetivo de demostrar su viabilidad y efectividad como herramienta de aprendizaje en el contexto de la Industria 4.0. Esta solución busca facilitar la integración de los procesos de formación con los sistemas ciberfísicos de fabricación, promoviendo la digitalización completa de la cadena de valor. Para evaluar su impacto y extraer conclusiones significativas, se ha diseñado un caso de estudio que permitirá analizar la transferencia de habilidades de un grupo de participantes utilizando la aplicación de entrenamiento de RM desarrollada.

2. Trabajos relacionados

Se han estudiado diversas plataformas de entrenamiento digital basadas en tecnologías de RE que buscan replicar escenarios altamente realistas, destacándose como herramientas efectivas para mejorar el aprendizaje y facilitar la visualización tridimensional, esencial en el diseño de nuevos productos [18-23]. Estos estudios destacan su potencial para transformar la formación en la industria, aunque su implementación aún requiere superar barreras tecnológicas para alcanzar un desarrollo más efectivo.

En el ámbito de la RA, existen soluciones como una plataforma de asistencia durante el entrenamiento para procesos de montaje en la industria naval, que utiliza Microsoft HoloLens para visualizar modelos 3D, guiar pasos de ensamblaje e integrar documentación asociada [18]. Basada en redes colaborativas maestro-esclavo y comunicación TCP/UDP, esta herramienta mejora la comprensión de puntos de fricción entre piezas y permite un aprendizaje más rápido y seguro al evitar la necesidad de planos complejos, aunque enfrenta desafíos tecnológicos por la inmadurez de las tecnologías empleadas. De forma similar, Bologna *et al.* [19] propone una plataforma de RA para formar técnicos en la industria del petróleo y gas, utilizando unas gafas Meta Quest 2 y tecnologías como Unity y Visual Studio. Esta solución ofrece modos de entrenamiento y evaluación interactivos, reduciendo riesgos y tiempos de preparación al eliminar la dependencia de equipos físicos.

En el campo de la RV, se puede hallar un sistema inmersivo diseñado para entrenar en entornos mineros subterráneos, utilizando dispositivos visuales con Leap Motion para su interacción por medio de gestos [20]. Este sistema, se compara, a su vez, con una plataforma 2D, la cual utiliza un joystick. En esta comparación se obtuvo mejores resultados en inmersión, aunque se encontraron ciertas limitaciones tecnológicas relacionadas con la calidad del contenido y funcionalidades avanzadas. A pesar de estos retos, la RV muestra un gran potencial como herramienta de entrenamiento industrial.

Avanzando hacia la Industria 5.0, Martínez-Gutiérrez *et al.* [21] propone un marco tecnológico para el metaverso industrial, que integra tecnologías como Gemelos Digitales (GD), RV e Internet Industrial de las Cosas (IIoC) en un entorno colaborativo y centrado en el ser humano. Mediante un demostrador que replica interacciones humano-humano y humano-máquina en entornos reales y virtuales, se validó su capacidad para mejorar el entrenamiento, la colaboración y la transferencia de habilidades, aunque aún enfrenta desafíos de interoperabilidad y madurez tecnológica.

En el ámbito de la RM, González-Franco *et al.* [22] evaluó su aplicación en la fabricación de puertas de aeronaves utilizando gafas Oculus Rift modificadas y marcadores reflectantes. El sistema mostró ventajas en la reducción de costes y riesgos, aunque no pudo sustituir completamente el entrenamiento tradicional debido a limitaciones tecnológicas. Por otro lado, también se encuentra un sistema basado en RM para el entrenamiento en infraestructura eléctrica [17]. Desarrollado con Microsoft HoloLens 1 y Unity 3D, demostró aceptación positiva, aunque sus limitaciones técnicas obligaron a simplificar interacciones clave. La combinación de RM con entrenamiento tradicional resultó ser la metodología más eficiente para tareas complejas, subrayando la necesidad de mayor investigación para optimizar su aplicación en la formación industrial [17].

3. Definición del caso de estudio

El objetivo principal de este estudio consiste en evaluar la implementación de un sistema de entrenamiento digital basado en RM dentro del contexto de la Industria 4.0. La investigación tiene como propósito determinar la

efectividad de esta tecnología como una herramienta facilitadora para la transferencia personalizada, segura y eficiente de habilidades y conocimientos. Además, se busca evaluar la aplicación de RM en el entrenamiento digital, enfatizando la reducción de dependencia de equipos físicos, lo cual conlleva ahorros económicos significativos y una disminución de accidentes y riesgos asociados a la formación en entornos industriales.

Para llevar a cabo este estudio, se desarrollará un sistema de RM específicamente diseñado para el entrenamiento en el manejo y operación de un Robot Móvil Autónomo (RMA). Este sistema replicará el experimento previamente realizado por Martínez-Gutiérrez *et al.* [23], comparando tres metodologías de entrenamiento: tradicional, mediante una aplicación informática y utilizando gafas de RV. El entorno de RM incluirá un GD que simula el comportamiento del RMA, permitiendo la interacción en tiempo real. Además, se desarrollará una aplicación informática con una interfaz de usuario donde se introducirán las métricas relacionadas con la experimentación.

Por lo tanto, se pretende continuar esta línea de investigación, explorando el uso de RM en lugar de RV, con el objetivo de determinar si esta nueva metodología puede mejorar aún más el rendimiento del entrenamiento digital, así como de la percepción de los humanos. El sistema de RM propuesto permitirá la interacción tanto con un circuito virtual como con un RMA virtual integrados en el entorno físico real. Este enfoque se implementará en un caso de experimentación para comparar y analizar la transferencia de conocimientos y habilidades en los usuarios, así como su experiencia. Para ello, los participantes deberán completar el recorrido en el menor tiempo posible y con la mínima cantidad de errores, proporcionando una medida precisa de su desempeño. La aplicación de RM facilitará la adquisición y perfeccionamiento de habilidades necesarias, mientras que la recopilación de datos durante el experimento permitirá analizar la eficacia de la tecnología para mejorar las competencias operativas, evaluando tanto la efectividad de la metodología de entrenamiento como la calidad de las habilidades adquiridas a través de esta.

4. Propuesta tecnológica

La plataforma de entrenamiento de RM propuesta llevada a cabo este caso de estudio se basará a nivel tecnológico bajo el sistema de entrenamiento de RV de Martínez-Gutiérrez *et al.* [18]. Cabe mencionar la integración de 4 tecnologías que han resultado fundamentales para la creación de la aplicación de formación: un servidor sobre el cual se centraliza todo el sistema, un gemelo digital del RMA, la aplicación de RM desarrollada en Unity y unas gafas de RV como sistema de visualización e interacción con el usuario. La Figura 1 ilustra gráficamente el marco de integración entre las diferentes tecnologías.

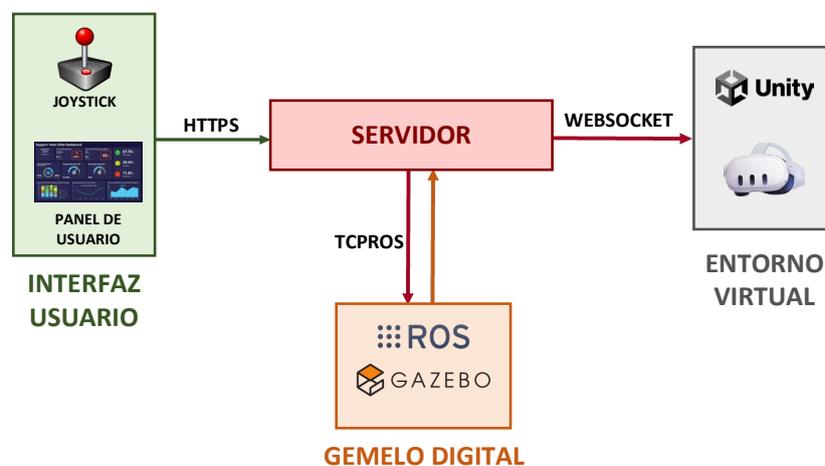


Figura 1: Marco de integración de las tecnologías utilizadas para el desarrollo de la plataforma de entrenamiento basada en Realidad Mixta.

4.1. Servidor

El servidor es la base de la plataforma de entrenamiento de RM debido a que integra los distintos componentes de la plataforma de entrenamiento, actuando como un puente entre los diversos protocolos de comunicación. Su función principal es adaptar y gestionar la información para coordinar las acciones. Además, habilita el acceso remoto y permite la adaptación de interfaces gráficas para cualquier dispositivo con conexión a internet. También almacena métricas de aprendizaje para su análisis posterior, contribuyendo a la mejora continua del proceso de formación.

Para este caso de estudio, el sujeto de experimentación controla el RMA mediante un joystick, especificando velocidades lineales y angulares que se transmiten al servidor a través del protocolo HTTPS. El servidor, a su vez, se comunica con el GD, que opera sobre el protocolo TCP ROS, y coordina y optimiza la comunicación del sistema

conectándose con Gazebo para simular la navegación del RMA. Al mismo tiempo, Gazebo devuelve en tiempo real la posición y rotación del vehículo al servidor, lo que permite mantener una actualización constante y precisa del entorno.

La posición del RMA en el entorno virtual se actualiza mediante un WebSocket, mientras que un script en C# en Unity lee cíclicamente los datos en formato JSON proporcionados por el servidor. Las gafas de RM se conectan directamente al servidor, actualizando en tiempo real la pose del vehículo en el entorno virtual, la cual es generada por el GD.

4.2. Gemelo Digital

El Gemelo Digital del RMA desarrollado Martínez-Gutiérrez *et al.* [24] utiliza la plataforma ROS (Robot Operating System) para replicar con precisión su comportamiento y navegación en un entorno simulado. Este robot holonómico de tracción diferencial utiliza la odometría como método principal para estimar la posición y orientación del vehículo, basándose en datos obtenidos de los sensores de movimiento. Estos sensores registran las revoluciones de las ruedas, lo que permite calcular la distancia recorrida y los cambios de orientación del vehículo, proporcionando una representación precisa de su desplazamiento. Además, dentro del GD se simula el funcionamiento de los LiDAR, que también ayudan a la posición del robot en un entorno virtual dado mejorando la exactitud ante deslizamientos en el sistema de odometría. La Figura 2 muestra el esquema de funcionamiento del GD para la obtención y envío de la posición del RMA.

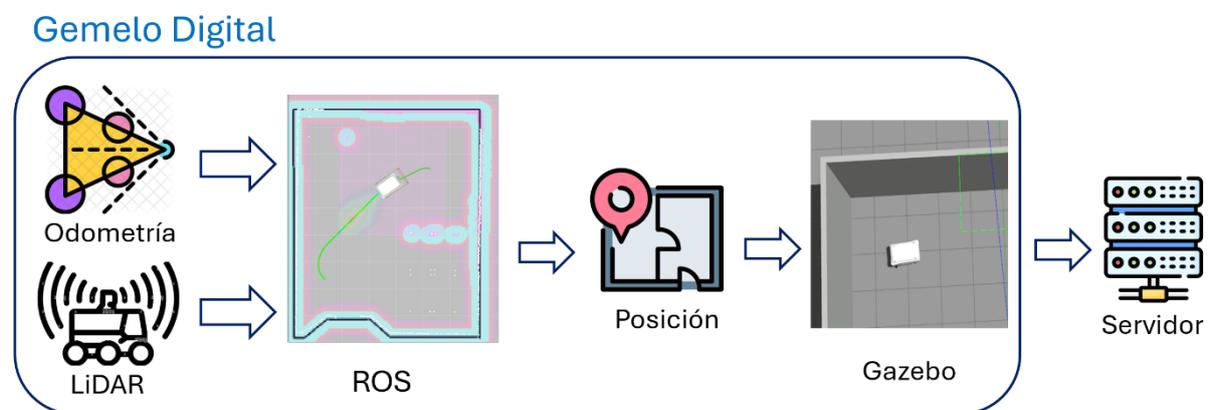


Figura 2: Esquema de funcionamiento del Gemelo Digital para la obtención y envío de la posición del RMA.

La virtualización del entorno se ejecuta en la aplicación Gazebo, una herramienta que recrea propiedades físicas realistas como colisiones, fricción, gravedad y dinámicas de cuerpos rígidos. Esta plataforma posibilita pruebas detalladas de navegación y control en un entorno dinámico y realista. Además, Gazebo permite controlar el modelo en tiempo real a través de ROS y admite la simulación simultánea de múltiples robots, optimizando el desarrollo y la evaluación de algoritmos en escenarios complejos [25].

4.3. Entorno virtual

Para recrear el entorno virtual se ha utilizado el motor gráfico de Unity como plataforma para implementar la RM debido a su compatibilidad con diversos dispositivos y capacidad para integrar librerías personalizadas. Se creó un escenario virtual que replica el entorno del laboratorio, incluyendo los elementos necesarios como los ortopedros del circuito (i.e., los obstáculos) y el modelo tridimensional del RMA.

Para implementar las propiedades físicas y realistas, se han usado librerías y herramientas específicas (e.g., *RE Interaction Toolkit* y *Meta RE All-in-One SDK*). Además, para integrar esta aplicación de RM con la plataforma, se han programado scripts en C# integrados en el entorno de Unity. El script principal se encarga de sincronizar en tiempo real la posición y rotación del modelo virtual del RMA en Unity con los datos recibidos del servidor externo.

Sin embargo, los datos provenientes inicialmente del GD se referencian en una base que no es la misma que en el mundo virtual del motor gráfico, por este motivo es necesario realizar un cambio de base para adaptar la pose (i.e., ubicación y orientación) del RMA. Además, la orientación dada por el GD está representada en cuaterniones, motivo por el cual se requiere la transformación a ángulos de Euler. Una vez realizada estas modificaciones en el script, obtenemos las variables de posición (e.g., x_{pos} , y_{pos} y z_{pos}) y rotación (e.g., x_{rot} , y_{rot} y z_{rot}) del modelo virtual en la escena.

De esta manera, el usuario con el joystick comanda la velocidad lineal y angular del RMA virtual al GD. Éste establece cuál es la pose, enviándola a las gafas de RM donde se ejecuta la aplicación desarrollada por el motor gráfico de Unity. Posteriormente, las gafas realizan el cambio de base, así como la conversión de cuaterniones a

ángulos de Euler para posicionar el RMA en tiempo real. La Figura 3 establece el esquema de funcionamiento de la plataforma de formación industrial.

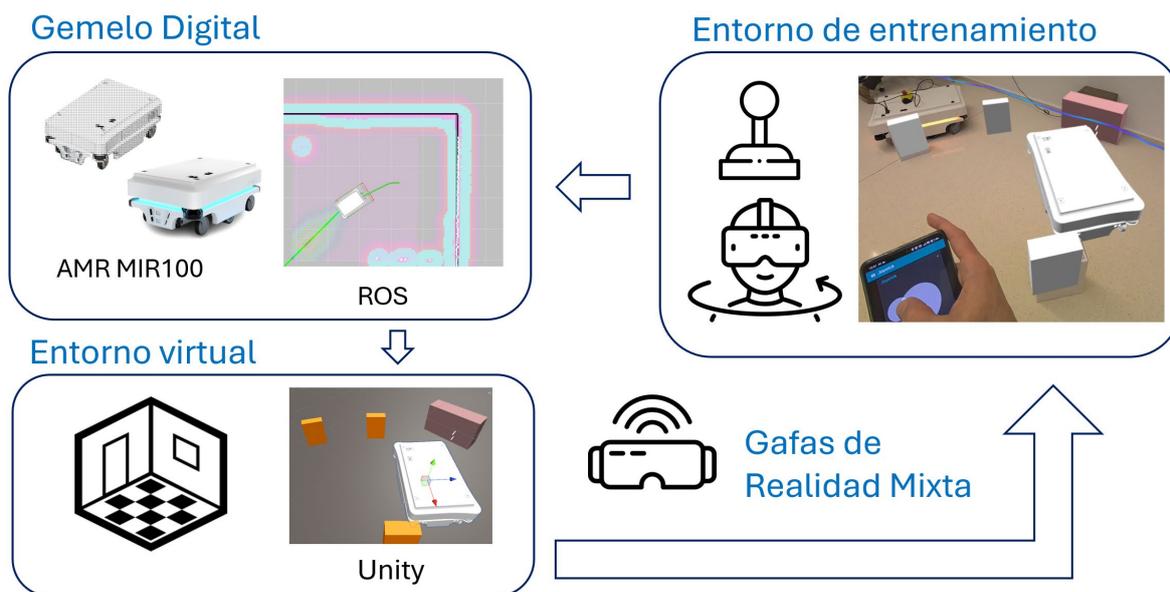


Figura 3: Esquema de funcionamiento de la plataforma de formación industrial mediante Realidad Mixta.

4.4. Gafas de Realidad Mixta

Se ha seleccionado para esta experimentación las gafas de RM Meta Quest 3. Este equipo ofrece una experiencia de RM más inmersiva y realista gracias a sus cámaras de alta calidad, las cuales permiten una integración más fluida entre el mundo real y el virtual. Además, para garantizar la movilidad de los usuarios, las gafas incorporan comunicación inalámbrica de baja latencia con el fin de mejorar la experiencia.

5. Metodología de experimentación

El objetivo de la metodología es el analizar la transferencia de habilidades de los usuarios empleando las gafas de realidad mixta. Para ello se ha seleccionado una población aleatoria de 20 individuos cuyas habilidades iniciales difieren. Por este motivo se ha creado una fase de evaluación inicial con el robot móvil real donde los fallos y los tiempos han sido evaluados. Posteriormente, los usuarios han entrenado con las gafas de realidad mixta durante 5 intentos recopilando también los tiempos y los fallos. Una vez concluido el entrenamiento se realiza el intento final en el entorno real recopilando los mismos datos con el fin de compararlos con el intento inicial. De esta manera se puede eliminar el sesgo de las habilidades iniciales de cada individuo.

Una vez concluida la evaluación del rendimiento de los individuos, se desea conocer la percepción personal de cada uno de ellos mediante una encuesta de igual forma que se ha realizado en estudios previos como el de Martínez-Gutiérrez *et. al* [23]. En esta encuesta se pregunta por la ergonomía de las gafas de realidad mixta, así como el grado de realismo percibo usando la escala de Likert. Con esta metodología analizamos el rendimiento operacional junto a la percepción de los usuarios de forma conjunta.

6. Resultados

De acuerdo con la metodología propuesta, los datos derivados de las acciones han sido: el tiempo de finalización del recorrido y el número de fallos cometidos, tanto al inicio como al final del experimento. Para evaluar la mejora en el tiempo medio de finalización, se empleó un análisis porcentual relativo calculando la Mejora Relativa de Tiempos (MRT) (i.e., diferencia entre los tiempos inicial y final y dividiéndola por el tiempo inicial). Este método permite una valoración más precisa y representativa del progreso.

Por otro lado, la reducción en el número de fallos se determinó restando el valor final al inicial. Según los gráficos de cuartiles de la Figura 4, se observa una mejora tanto en los tiempos, lo que indica un aumento en el rendimiento como en la reducción de fallos, lo que se traduce en una mayor precisión en las operaciones.

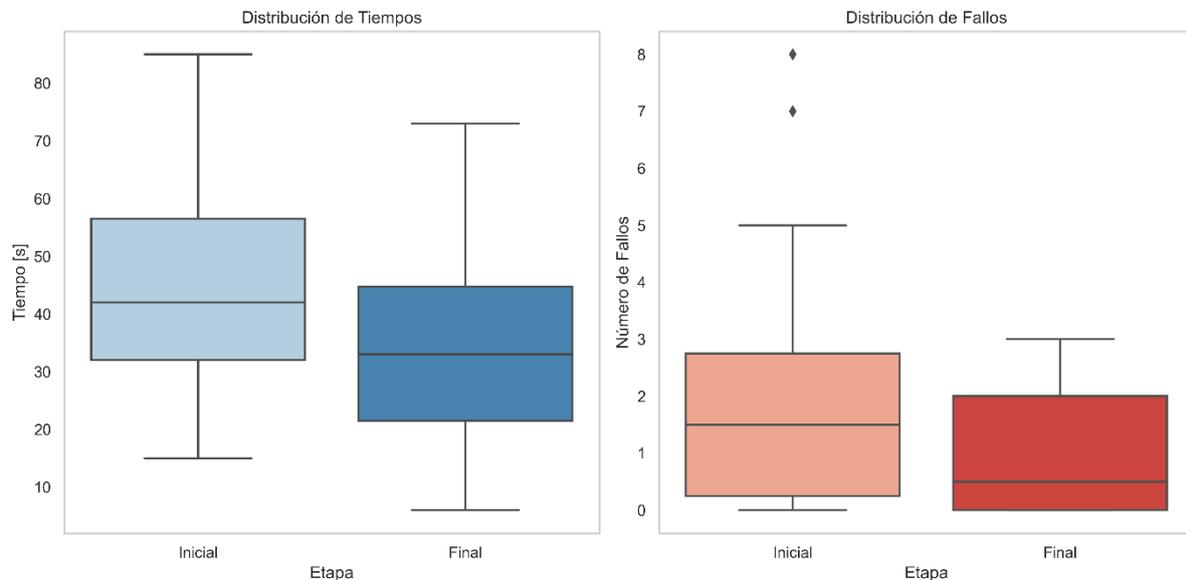


Figura 4: Distribución de tiempos de ejecución y distribución de fallos inicial (izquierda) y final (derecha).

Los resultados mostraron una disminución media de 12,1 segundos en el tiempo de ejecución, lo que equivale a una mejora del 27% en el tiempo destinado a completar la tarea. Asimismo, el número medio de fallos se redujo de 2,25 a 0,85, lo que refleja una reducción media de 1,4 fallos en la precisión de ejecución según se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Resultados estadísticos sobre el rendimiento de la formación empleada.

Métricas	Media	Mediana	Desviación estándar
Tiempo inicial	46,1	42	18,61
Tiempo final	34	33	16,82
MRT [%]	27,43	29,91	19,46
Fallos iniciales	1,4	2,0	2,32
Fallos finales	0,85	0,5	0,99

Durante la fase de entrenamiento, se registraron también los tiempos de ejecución y el número de fallos cometidos en cada uno de los cinco intentos realizados por cada individuo. Los resultados mostrados en la Figura 5 evidenciaron una mejora progresiva, con una reducción en los tiempos de ejecución y una disminución en el número de errores a medida que avanzaba el entrenamiento. Esta tendencia sugiere una adaptación efectiva de los usuarios al entorno y una optimización de sus habilidades.

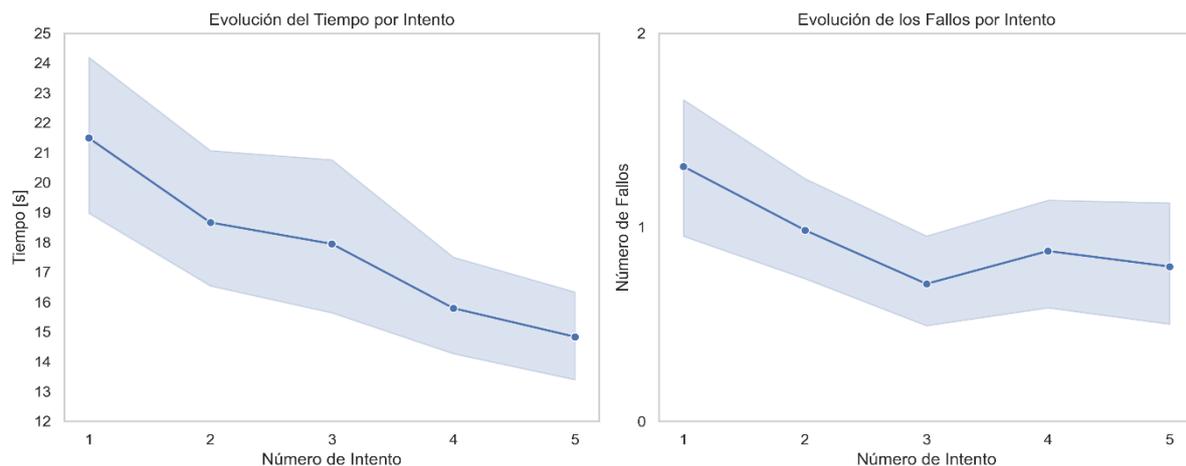


Figura 5: Evolución del tiempo y el número de fallos durante la fase entrenamiento con Realidad Mixta.

Según los datos obtenidos en investigaciones previas [23] que emplearon aplicaciones basadas en pantalla y en realidad virtual, la diferencia en la mejora del rendimiento temporal entre la aplicación en 2D (28 %) y la realidad mixta (27.4 %) no resulta significativa. No obstante, la reducción en la tasa de errores, indicativa de una mayor precisión adquirida, es considerablemente más relevante. En particular, mientras que la aplicación en 2D registra

un incremento medio de 0.18 errores, la técnica basada en realidad mixta evidencia una disminución promedio de 1.4 errores.

En cuanto a la percepción de los participantes sobre el sistema de entrenamiento, se evaluaron aspectos clave como la ergonomía y el realismo gráfico. Para medir el nivel de satisfacción en estos criterios, se empleó una escala de Likert, permitiendo una valoración estructurada de la experiencia. Los resultados revelaron una percepción altamente positiva por parte de la mayoría de los participantes, destacando tanto la comodidad del sistema como la fidelidad del entorno visual. Estos hallazgos reflejan la calidad y efectividad del entrenamiento desarrollado, consolidándolo como un método de aprendizaje inmersivo y satisfactorio para el usuario como se observa en los gráficos de la Figura 6.

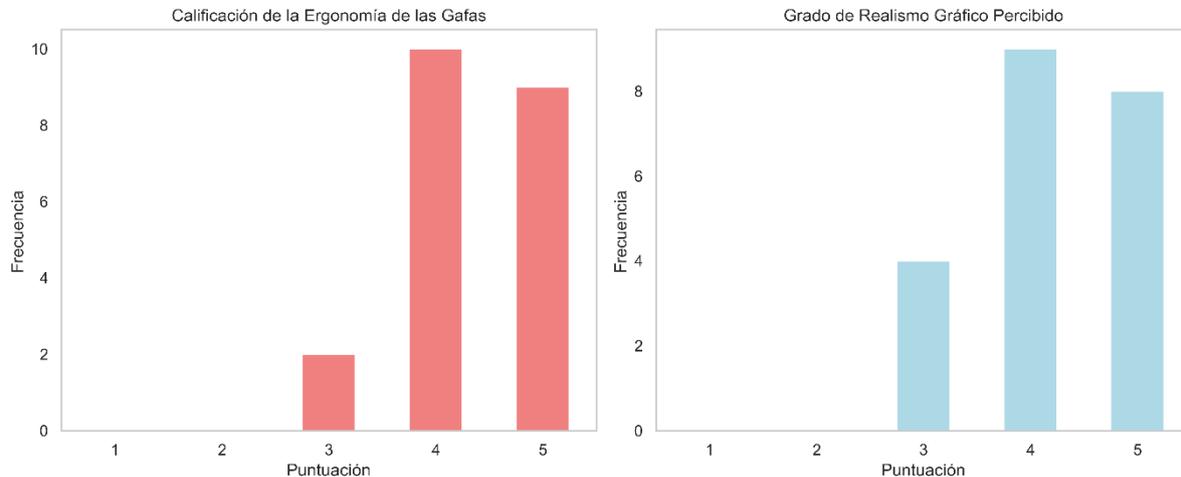


Figura 6: Evaluación de la ergonomía de las gafas y el realismo gráfico percibido por los sujetos de experimentación.

7. Conclusiones

En el contexto actual de la Industria 4.0 y su evolución hacia la Industria 5.0, se ha vuelto imprescindible desarrollar metodologías de formación avanzadas que permitan alcanzar el nivel de habilidades requerido en un entorno altamente tecnológico. En respuesta a esta necesidad, los sistemas de entrenamiento digital permiten reducir los recursos utilizados, así como deslocalizar el proceso de formación. No obstante, los enfoques más tradicionales de formación digital han mostrado limitaciones en términos de realismo y transferencia efectiva de habilidades. En este sentido, la Realidad Extendida ha emergido como una alternativa prometedora para superar estas barreras, al proporcionar una interacción más inmersiva y precisa con el entorno de trabajo.

El problema central abordado en esta investigación radica en la falta de metodologías de entrenamiento digital que logren un equilibrio entre la fidelidad de la experiencia, la accesibilidad y la escalabilidad del aprendizaje. La literatura ha explorado soluciones basadas en Realidad Aumentada y Realidad Virtual, pero ninguna ha conseguido una integración óptima entre los entornos físico y digital. Ante esta problemática, la Realidad Mixta se posiciona como una solución innovadora, al combinar la fidelidad sensorial de la RV con la integración del entorno real propia de la RA, permitiendo experiencias de aprendizaje más efectivas y adaptadas a los entornos industriales. Sin embargo, persisten desafíos tecnológicos, como la mejora del hardware y software para incrementar la fidelidad de las interacciones y optimizar la transferencia de habilidades en entornos virtuales. Por ello, este estudio ha abordado el diseño y evaluación de una aplicación de entrenamiento basada en RM, con el objetivo de evaluar la transferencia de habilidades en el contexto de la formación industrial.

A través de un caso de experimentación centrado en la operación de un RMA se ha analizado la evolución del desempeño de los participantes antes, durante y después del entrenamiento, recopilando tanto métricas cuantitativas como las percepciones cualitativas de los sujetos de experimentación sobre la efectividad del sistema. Los resultados obtenidos confirman una mejora significativa en la eficiencia de ejecución, con una reducción media del tiempo de finalización de la tarea en un 27% y una disminución del número de errores en 1,4 fallos. Además, el análisis de la progresión en los cinco intentos de la fase de entrenamiento evidenció una curva de aprendizaje positiva, con una mejora constante en los tiempos de ejecución y una reducción progresiva de fallos. La evaluación subjetiva de los participantes destacó, además, la comodidad y el realismo gráfico del sistema, consolidando la RM como una metodología de entrenamiento inmersiva y altamente satisfactoria.

Estos hallazgos refuerzan la RM como una herramienta de formación efectiva, capaz de mejorar el aprendizaje en entornos industriales al integrar de manera equilibrada los beneficios de la RA y la RV. Asimismo, mantiene las

ventajas de los sistemas de entrenamiento deslocalizados, como la reducción de costes, la minimización de riesgos y la optimización de recursos, al tiempo que ofrece experiencias de aprendizaje adaptadas a los usuarios.

En definitiva, este estudio reafirma el papel de la RM como un pilar clave en la evolución del entrenamiento digital industrial. Su implementación no solo optimiza la adquisición de competencias en los entornos automatizados del paradigma industrial actual, sino que también representa un avance hacia la creación de espacios de trabajo más inteligentes, seguros y eficientes, contribuyendo al desarrollo de un entorno productivo centrado en el ser humano en el futuro marco de la Industria 5.0.

Agradecimientos

Este artículo ha podido ser desarrollado gracias a la financiación del Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España a través del proyecto de investigación con número de referencia PID2023-153047OB100, a la financiación de la Consejería de Educación de la Junta de Castilla y León y el autor Iván Sánchez Calleja agradece la financiación del programa de ayudas para la realización de estudios de doctorado en el marco del programa propio de investigación de la Universidad de León 2024.

Referencias

- [1] F. Rozo-García, “Revisión de las tecnologías presentes en la industria 4.0,” *Revista UIS Ingenierías*, vol. 19, no. 2, pp. 177–191, 2020.
- [2] M. Javaid, A. Haleem, R. P. Singh, R. Suman, and E. S. Gonzalez, “Understanding the adoption of industry 4.0 technologies in improving environmental sustainability,” *Sustainable Operations and Computers*, vol. 3, pp. 203–217, 2022.
- [3] T. Zheng, M. Ardolino, A. Bacchetti, and M. Perona, “The applications of industry 4.0 technologies in manufacturing context: a systematic literature review,” *International Journal of Production Research*, vol. 59, no. 6, pp. 1922–1954, 2021.
- [4] D. Paschek, C.-T. Luminosu, and E. Ocakci, “Industry 5.0 challenges and perspectives for manufacturing systems in the society 5.0,” *Sustainability and Innovation in Manufacturing Enterprises: Indicators, Models and Assessment for Industry 5.0*, pp. 17–63, 2022.
- [5] H. Mohelska and M. Sokolova, “Management approaches for industry 4.0—the organizational culture perspective,” *Technological and economic development of economy*, vol. 24, no. 6, pp. 2225–2240, 2018.
- [6] F. Longo, A. Padovano, and S. Umbrello, “Value-oriented and ethical technology engineering in industry 5.0: A human-centric perspective for the design of the factory of the future,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 12, p. 4182, 2020.
- [7] P. K. R. Maddikunta, Q.-V. Pham, B. Prabadevi, N. Deepa, K. Dev, T. R. Gadekallu, R. Ruby, and M. Liyanage, “Industry 5.0: A survey on enabling technologies and potential applications,” *Journal of industrial information integration*, vol. 26, p. 100257, 2022.
- [8] N. T. Hang, “Digital education to improve the quality of human resources implementing digital transformation in the context of industrial revolution 4.0,” *Revista Geintec-Gestao Inovacao E Tecnologias*, vol. 11, no. 3, pp. 311–323, 2021.
- [9] I. Beloglazov, P. Petrov, and V. Y. Bazhin, “The concept of digital twins for tech operator training simulator design for mining and processing industry,” *chemical industries*, vol. 18, p. 19, 2020.
- [10] Z. Nedic, J. Machotka, and A. Nafalski, *Remote laboratories versus virtual and real laboratories*, vol. 1. IEEE, 2003.
- [11] J. Ma and J. V. Nickerson, “Hands-on, simulated, and remote laboratories: A comparative literature review,” *ACM computing surveys (CSUR)*, vol. 38, no. 3, pp. 7–es, 2006.
- [12] X. Chen, G. Song, and Y. Zhang, “Virtual and remote laboratory development: A review,” *Earth and Space 2010: Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments*, pp. 3843–3852, 2010.
- [13] S. Webel, U. Bockholt, T. Engelke, N. Gavish, M. Olbrich, and C. Preusche, “An augmented reality training platform for assembly and maintenance skills,” *Robotics and autonomous systems*, vol. 61, no. 4, pp. 398–403, 2013.
- [14] K. Lee, “Augmented reality in education and training,” *TechTrends*, vol. 56, pp. 13–21, 2012.

- [15] F. A. Aziz, A. Alsaeed, S. Sulaiman, M. Ariffin, and M. F. Al-Hakim, "Mixed reality improves education and training in assembly processes," *Journal of Engineering and Technological Sciences*, vol. 52, no. 4, pp. 598–607, 2020.
- [16] A. Gallala, B. Hichri, and P. Plapper, "Human-robot interaction using mixed reality," in *2021 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)*, pp. 1–6, IEEE, 2021.
- [17] P. Bún, J. Gapsa, J. Husár, and J. Kascak, "Mixed reality training in electrical equipment operating procedures," in *International Scientific-Technical Conference MANUFACTURING*, pp. 306–316, Springer, 2022.
- [18] A. Vidal-Balea, O. Blanco-Novoa, P. Fraga-Lamas, M. Vilar-Montesinos, and T. M. Fernández-Caramés, "Creating collaborative augmented reality experiences for industry 4.0 training and assistance applications: Performance evaluation in the shipyard of the future," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 24, p. 9073, 2020.
- [19] J. K. Bologna, C. A. Garcia, A. Ortiz, P. X. Ayala, and M. V. Garcia, "An augmented reality platform for training in the industrial context," *IFAC PapersOnLine*, vol. 53, no. 3, pp. 197–202, 2020.
- [20] H. Zhang, "Head-mounted display-based intuitive virtual reality training system for the mining industry," *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 27, no. 4, pp. 717–722, 2017.
- [21] A. Martínez-Gutiérrez, J. Díez-González, H. Perez, and M. Araújo, "Towards industry 5.0 through metaverse," *Robotics and Computer-Integrated Manufactu-ring*, vol. 89, p. 102764, 2024.
- [22] M. González-Franco, R. Pizarro, J. Cermeron, K. Li, J. Thorn, W. Hutabarat, A. Tiwari, and P. Bermell-Garcia, "Immersive mixed reality for manufacturing training," *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 4, p. 3, 2017.
- [23] A. Martínez-Gutiérrez, J. Díez-González, P. Verde, and H. Perez, "Convergence of virtual reality and digital twin technologies to enhance digital operators' training in industry 4.0," *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 180, p. 103136, 2023.
- [24] A. Martínez-Gutiérrez, J. Díez-González, P. Verde, and H. Perez "Digital twin for automatic transportation in industry 4.0," *Sensors*, vol. 21, no. 10, pp. 3344, 2021.
- [25] Martínez-Gutiérrez, A., Díez-González, J., Verde, P., Ferrero-Guillén, R., Perez, H. (2023). Analysis of Navigation Algorithms for a Fleet of Mobile Robots by Means of Digital Twins. In: Vizán Idoipe, A., García Prada, J.C. (eds) *Proceedings of the XV Ibero-American Congress of Mechanical Engineering. IACME 2022*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-38563-6_60