

# Jornadas de Automática

## Verificación dimensional de instalaciones industriales con Realidad Mixta

Pérez-García, U.<sup>a,\*</sup>, Riveiro, E.<sup>a</sup>, Silva-Muñoz, D.<sup>a</sup>, Garrido, J.<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Grupo en Ingeniería Eficiente y Digital (EN.EDI), Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidade de Vigo, C/ Maxwell, 9, 36310, Vigo, España.

**To cite this article:** Pérez-García, U., Riveiro, E., Silva-Muñoz, D., Garrido, J. 2026. Dimensional verification of industrial facilities using Mixed Reality. *Jornadas de Automática*, 47.  
<https://doi.org/10.17979/ja-cea.2026.47.13738>

### Resumen

Este trabajo presenta un sistema basado en Realidad Mixta (MR) para la verificación dimensional previa al montaje de instalaciones industriales complejas: grandes sistemas, celdas robotizadas, etc. La propuesta aplica alineación espacial mediante transformaciones geométricas para superponer modelos virtuales sobre el entorno físico real. El sistema permite a un operario seleccionar puntos de referencia tanto en el modelo CAD como en la instalación real, calculando la transformación necesaria para el posicionamiento del objeto virtual. Además, incorpora herramientas de ajuste para mejorar la precisión del alineamiento. La solución desarrollada se implementa y se valida mediante ensayos en entornos controlados y en instalaciones reales del sector de la automoción. Los resultados obtenidos muestran una desviación media milimétrica y demuestran la viabilidad del sistema para tareas de inspección y detección temprana de interferencias antes del montaje físico.

**Palabras clave:** Trabajo en entornos reales y virtuales, Automatización y diseño centrados en el ser humano, Percepción y sensorización, Aseguramiento de la calidad y mantenimiento, Sistemas de fabricación inteligentes

**Dimensional verification of industrial facilities using Mixed Reality**

### Abstract

This paper presents a Mixed Reality (MR)-based system for dimensional verification prior to the assembly of large-scale industrial installations. The proposal applies a spatial alignment methodology using geometric transformations to superimpose virtual models onto the real environment. The system allows the operator to select reference points in both the CAD model and the actual facility, calculating the transformation required to position the virtual object. Additionally, it incorporates adjustment tools to improve alignment accuracy. The developed solution is implemented and validated through testing in controlled environments and in real-world facilities in the automotive sector. The results obtained show an average millimetric deviation and demonstrate the system's viability for inspection tasks and early detection of interference prior to physical assembly.

**Keywords:** Work in real and virtual environments, Human-centered automation and design, Perception and sensing, Quality assurance and maintenance, Intelligent manufacturing systems

### 1. Introducción

La transformación digital del sector industrial impulsa la adopción de nuevas metodologías orientadas a la integración entre diseño, fabricación y montaje, entre ellas, el uso de sensores de captura espacial y herramientas inmersivas (Bhattacharya y Momaya, 2021). Esta transformación alcanza a todas las fases del ciclo de vida útil del activo, aunque actualmente gran parte de soluciones de esta tendencia en la industria está dedicada a la fases de planificación y montaje en su ubicación final (Menegon y da Silva Filho, 2023).

La verificación dimensional previa a la instalación final es una de las actividades del ciclo de vida que puede beneficiarse de esta digitalización. Esta, sobre todo cuando se trata de sistemas complejos (celdas robotizadas, sistemas de manutención de gran tamaño, etc.), constituye una tarea crítica para garantizar la correcta ejecución del montaje posterior. Tradicionalmente, este proceso se ha basado en la interpretación de planos 2D y en mediciones directas en campo mediante técnicas topográficas convencionales.

Aunque estos métodos siguen siendo ampliamente utilizados en la práctica (Figura 1), presentan limitaciones significativas en términos de eficiencia, trazabilidad y

capacidad para detectar interferencias geométricas en fases tempranas del proyecto (Alhady et al., 2024).

La detección tardía de desviaciones dimensionales puede traducirse en ajustes improvisados durante el montaje, retrasos en la secuencia de instalación, reprocesos y consumo adicional de recursos. Los gastos asociados a tareas de reconstrucción por falta de adecuación se estiman entre un 5 y un 20% (Gunduz et al., 2026). Además del impacto económico directo, estas incidencias afectan a la planificación, la seguridad operativa y la calidad final del activo.



Figura 1: Proceso manual de verificación dimensional previo al montaje (Park, E. et al., 2022).

Este trabajo propone una metodología de alineación espacial orientada a entornos de Realidad Mixta (MR) basada en transformaciones geométricas. El objetivo final es facilitar tareas de inspección previa al montaje, detección temprana de interferencias y proporcionar apoyo visual al usuario en escenarios industriales reales.

## 2. Verificación dimensional y Realidad Extendida en el sector AECO

La verificación dimensional previa al montaje es el proceso de realizar mediciones en el entorno de la construcción física real a partir de los modelos de diseño planificados (*as-planned*) para identificar referencias y asegurar la precisión y calidad a la hora de construir el proyecto. Por ejemplo, en instalaciones donde es preciso el montaje de anclajes o estructuras de soporte previo al montaje del sistema final-cintas transportadoras, almacenes automáticos, etc.-y siendo especialmente necesario en instalaciones de gran formato (Erdélyi, J et al., 2022).

La Cuarta Revolución Industrial ha impulsado el desarrollo digital en la industria AECO (Architecture, Engineering, Construction and Operations), favoreciendo el uso de tecnologías de información para el apoyo en distintas fases de la vida del activo. En este ámbito se encuentran las tecnologías inmersivas agrupadas bajo el concepto de Realidad Extendida (XR), que abarca la Realidad Virtual (VR), la Realidad Aumentada (AR) y la Realidad Mixta (MR). Mientras que la VR ofrece un entorno completamente digital y la AR superpone contenido sin una interacción profunda con el entorno, la Realidad Mixta (MR) se sitúa en un punto intermedio, facilitando una interacción real entre el contenido digital y el mundo físico (Milgram y Kishino, 1994).

Estas herramientas permiten visualizar el modelo digital directamente sobre una referencia manual y realizar mediciones en tiempo real, empleando para ello distintos mecanismos de alineación, como marcadores visuales, códigos QR o referencias geométricas predefinidas (GAMMA AR, 2025). Asimismo, trabajos recientes han explorado la

integración de XR con modelos BIM para mejorar el acceso a la información en obra y facilitar procesos de inspección. No obstante, estas soluciones presentan limitaciones en términos de precisión, escalabilidad y naturalidad de interacción, especialmente en entornos industriales complejos (Zhang et al., 2024).

En la literatura existen múltiples referencias de aplicaciones XR para alinear el mundo real mediante técnicas de registro espacial, incluyendo métodos basados en nubes de puntos obtenidas a partir de escaneado del entorno físico (Vermandere et al., 2022). De este modo, trabajos recientes proponen enfoques de registro 3D-3D basados en aprendizaje automático que permiten estimar la localización con alta precisión a partir de la correspondencia entre modelos digitales y reconstrucciones del entorno real (Radanovic et al., 2023).

Sin embargo, este tipo de aproximaciones se apoyan en la disponibilidad de información detallada del estado construido (*as-built*), generalmente en forma de nubes de puntos obtenidas mediante sensores de escaneado, lo que limita su aplicabilidad en fases previas al montaje, donde dicha información aún no existe. Además, estos métodos suelen implicar una elevada complejidad computacional y requerimientos técnicos que dificultan su uso directo y cotidiano en escenarios industriales operativos.

De forma complementaria, existen aproximaciones mediante el uso de puntos de referencia o correspondencias geométricas, utilizadas en ámbitos como la robótica o la medicina (Eggers, G. et al., 2006). Estas metodologías permiten estimar transformaciones espaciales a partir de la correspondencia entre puntos homólogos en distintos sistemas de referencia, proporcionando soluciones más simples y controlables desde el punto de vista del usuario. En el ámbito de la XR, algunos trabajos han explorado el uso de interacciones geométricas para facilitar la alineación de contenido virtual con el entorno físico (Andrews et al, 2023).

En el contexto concreto de la Realidad Mixta, diversos estudios han puesto de manifiesto su potencial para mejorar la interacción con datos digitales en entornos reales del sector AECO mediante el uso de dispositivos *head-mounted display* (HMD), que permiten una visualización más natural y una mayor libertad de movimiento (Zhang et al, 2024) en comparación con las soluciones existentes en AR. A pesar de estos avances, la literatura evidencia una carencia de soluciones que integren de forma efectiva metodologías de alineación espacial robustas, interacción intuitiva para el usuario y validación en condiciones reales de trabajo.

En este contexto, el presente trabajo propone una metodología de alineación espacial basada en transformaciones geométricas, implementada en una plataforma de realidad mixta orientada a la verificación dimensional en entornos industriales. La principal aportación reside en la combinación de un enfoque matemático explícito, basado en correspondencias entre puntos seleccionados por el usuario, con una arquitectura que permite la interacción entre el modelo virtual y el entorno real.

## 3. Arquitectura del sistema

El sistema se desarrolla en torno a dos módulos principales encargados de gestionar el proceso completo que va desde

diseño CAD hasta la visualización inmersiva en el entorno industrial. Esta arquitectura permite la carga, procesamiento, transmisión, alineación espacial y verificación dimensional posterior mediante el uso de protocolos de comunicación y Realidad Mixta (Figura 2).

El primer módulo corresponde a una aplicación desarrollada en Python destinada a la preparación y gestión de modelos tridimensionales. A partir del diseño CAD, el modelo se exporta a un formato compatible con entornos MR. Durante este proceso, el sistema incluye una herramienta de reducción del tamaño del archivo para la mejora del rendimiento del dispositivo HMD. Una vez procesado, el modelo se transmite al sistema de visualización mediante un protocolo de comunicación basado en sockets TCP/IP.

El segundo módulo está constituido por una aplicación implementada en Unity e integrada en el dispositivo de visualización XR, unas gafas Meta Quest Link 3. Este módulo se encarga de la recepción, carga y representación del modelo 3D en el entorno físico real. Sobre esta base se posibilita el posicionamiento espacial del modelo sobre referencias definidas, habilitando posteriormente procesos de verificación dimensional y la detección de interferencias geométricas.

Las gafas incorporan capacidades nativas de reconocimiento espacial (*spatial tracking*), lo que permite establecer la correcta correspondencia entre las unidades del modelo virtual y el espacio físico real sin necesidad de implementar ninguna lógica añadida en la aplicación. El software desarrollado permite la alineación mediante el uso de los controladores del HMD y la localización de puntos de referencia. Esta interacción permite ajustar con precisión la correspondencia entre el entorno virtual y el entorno real, facilitando las etapas de reubicación del objeto virtual, recentraje y ajuste fino dentro de la escena.

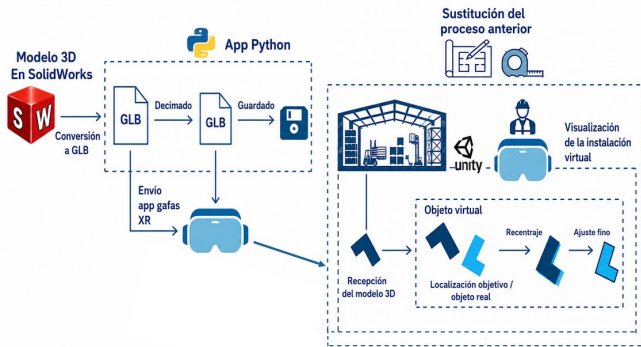


Figura 2: Arquitectura del sistema envío (izquierda) y recentrado (derecha) de un objeto.

#### 4. Principio de funcionamiento

El procedimiento constituye un proceso iterativo asistido por la aplicación y se estructura en tres fases principales. En primer lugar, el usuario selecciona puntos de referencia homólogos sobre el modelo virtual y sobre el entorno físico real. A partir de esta información, la aplicación calcula automáticamente la transformación espacial necesaria para alinear ambos sistemas de referencia, obteniendo un recentrado inicial del modelo virtual. Finalmente, el usuario dispone de herramientas de ajuste que permiten realizar

pequeñas correcciones de posición y orientación para compensar desviaciones y mejorar la superposición entre el entorno virtual y el entorno real.

El cálculo de dicha transformación comienza con la determinación de la rotación necesaria para alinear ambos sistemas de referencia. Para ello, es necesario establecer la correspondencia entre un vector definido a partir de los puntos seleccionados sobre las referencias físicas del mundo real y otro obtenido a partir de los puntos equivalentes sobre el modelo virtual. Para ello, la Figura 3 representa sendos modelos-izquierda virtual, derecha real- y los puntos marcados sobre estos (4,5,6,7). A partir de los mismos, se construyen los vectores virtual (1) y real (2).

$$\vec{V}_v = (x_6, y_6, z_6) - (x_4, y_4, z_4) \quad (1)$$

$$\vec{R}_v = (x_7, y_7, z_7) - (x_5, y_5, z_5) \quad (2)$$

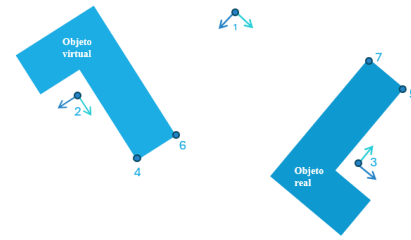
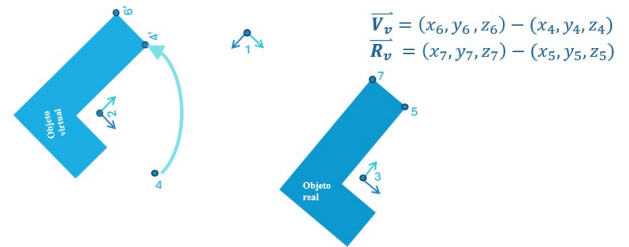


Figura 3: Representación de los puntos de interés en objeto virtual (izquierda) y real (derecha).

El ángulo de rotación buscado corresponde a la componente alrededor del eje Z del ángulo formado entre ambos vectores (3).

$$\beta = \text{atan}((\vec{V}_v \times \vec{R}_v) \cdot \vec{n}, \vec{V}_v \cdot \vec{R}_v) \quad (3)$$

donde  $\vec{n}$  es el vector normal al plano de rotación, definido como  $(0, 0, 1)$  en el sistema de referencia estándar. Una vez obtenido el ángulo  $\beta$ , se aplica la rotación al modelo virtual respecto al sistema de referencia global, logrando su alineación angular con el objeto real (Figura 4). Cabe destacar que, tras esta operación, los puntos transformados presentan coordenadas desconocidas, ya que dependen de la transformación aplicada, manteniéndose como referencia el punto inicial utilizado en la construcción del vector virtual.



$$\beta = \text{atan}([\vec{V}_v \times \vec{R}_v] \cdot \vec{n}, [\vec{V}_v \cdot \vec{R}_v])$$

Figura 4: Estrategia de rotación del objeto virtual.

Una vez realizada la alineación angular, se procede al cálculo de la traslación necesaria para superponer el modelo virtual y el objeto real. El objetivo es determinar el vector que conecta el centro del modelo virtual con el centro del objeto

real. La Figura 5 indica los vectores conocidos al inicio y los vectores que necesitamos conocer.

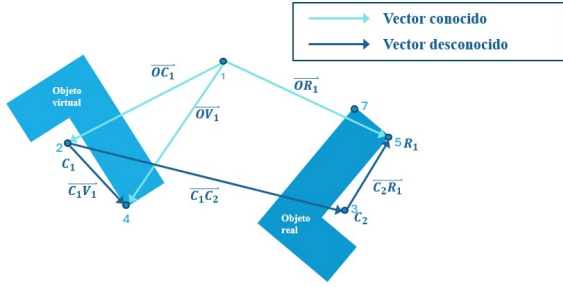


Figura 5: Vectores de interés para el cálculo de la traslación.

Para ello, se define el vector auxiliar  $\overrightarrow{C_1V_1}$  (4).

$$\overrightarrow{C_1V_1} = \overrightarrow{OV_1} - \overrightarrow{OC_1} \quad (4)$$

Este vector se transforma aplicando la rotación previamente calculada, utilizando la matriz de rotación respecto al eje Z (5).

$$R(z, \beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Obteniéndose (6).

$$\overrightarrow{C_2R_1} = R(z, \beta) \cdot \overrightarrow{C_1V_1} \quad (6)$$

Finalmente, el vector de traslación que permite alinear completamente ambos sistemas se calcula en (7).

$$\overrightarrow{C_1C_2} = \overrightarrow{OR_1} - \overrightarrow{C_2R_1} - \overrightarrow{OC_1} \quad (7)$$

Este vector se aplica al modelo virtual previamente rotado, permitiendo su correcta localización en el entorno físico y completando así el proceso de alineación espacial (Figura 6).

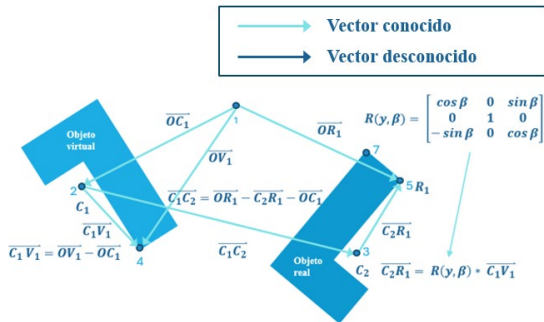


Figura 6: Cálculo de traslación.

Para el operario, el proceso de recentrado del modelo virtual se realiza mediante la selección de puntos de referencia tanto en la estructura virtual como en la estructura real. La gestión de este proceso se realiza a través de una interfaz virtual, y la interacción con la misma y con el marcado se hace mediante los mandos específicos del HMD. La Figura 7 muestra la secuencia completa del procedimiento, desde la carga inicial del modelo hasta su alineación sobre las referencias seleccionadas.

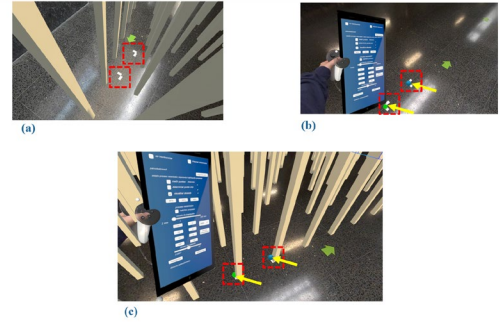


Figura 7: Secuencia de recentrado: (a) carga inicial sin alineación, (b) selección de puntos (indicados con flecha) y (c) resultado con alineación del modelo en los puntos de interés.

Además, con el fin de garantizar una alineación más precisa tras el proceso principal de recentrado, la plataforma incorpora un sistema de ajuste que permite correcciones del orden del milímetro. Para ello, la interfaz dispone de botones específicos de desplazamiento sobre los tres ejes, así como controles de rotación respecto al punto de referencia deseado. Esta funcionalidad permite compensar pequeñas desviaciones residuales derivadas del posicionamiento inicial o de las tolerancias propias del entorno industrial.

La traslación de ajuste  $T$  se realiza sobre los ejes locales del objeto particular que se desea desplazar. Para ello, es necesario aplicar previamente la rotación correspondiente al ángulo global del objeto  $\beta$  y, a continuación, ejecutar la traslación deseada. Para ello, se aplica la siguiente matriz de transformación homogénea (8).

$$T = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Estos resultados se implementan en el código y se asignan a los eventos asociados a los botones de control de la interfaz (Figura 8).

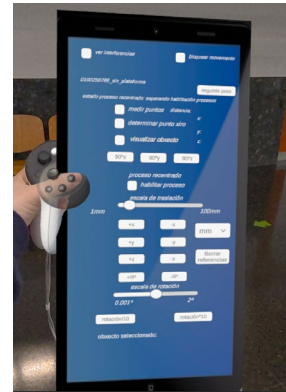


Figura 8: Vista de la interfaz.

Una vez el objeto está correctamente alineado, la interacción con la interfaz permite emplear otras herramientas de verificación dimensional, como la evaluación de interferencias (Figura 9). Esta funcionalidad se ha construido sobre un paquete propio de las gafas para permitir la oclusión de objetos virtuales por objetos reales situados en su misma localización (Meta Platforms, 2025).

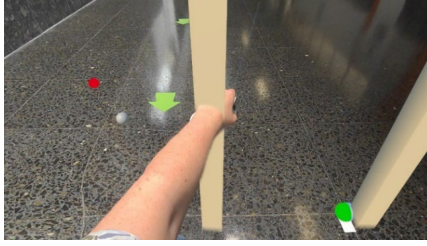


Figura 9: Vista de interferencias del modelo virtual con objetos reales.

## 5. Experimento

Con el objetivo de validar la metodología de posicionamiento espacial implementada en la plataforma de realidad mixta, se llevaron a cabo distintos ensayos experimentales orientados a evaluar tanto la precisión del recentrado inicial como la aplicabilidad del sistema en entornos industriales reales.

En una primera fase, se realizó una prueba sistemática en instalaciones universitarias empleando como referencia geométrica una cuadrícula regular definida de 40x40 cm por el pavimento existente. Sobre dicho entorno se cargó un modelo virtual que representaba el modelo de baldosas en forma de columna y se ejecutó el procedimiento completo de recentrado. Una vez finalizado el alineamiento, se analizaron diferentes posiciones distribuidas sobre la retícula con el fin de medir la desviación existente entre la geometría virtual proyectada y las referencias reales (Figura 10). Con el fin de analizar la estabilidad frente a la repetición del proceso, el experimento se repitió cinco veces de forma independiente. Esta prueba permitió estimar objetivamente el error de posicionamiento alcanzado en condiciones controladas.

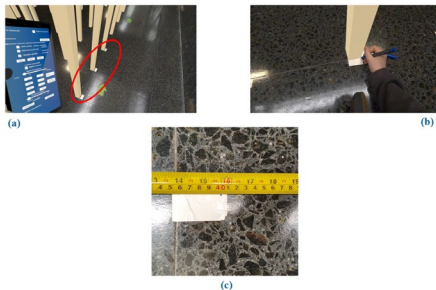


Figura 10: Proceso de medición de la desviación del objeto: (a) colocación sobre puntos de referencia, (b) marcado de la situación del objeto, (c) medición convencional entre marcas.

Posteriormente, se desarrollaron ensayos en la nave industrial de una empresa colaboradora interesada en la aplicación de la tecnología propuesta. En este caso, se utilizaron modelos tridimensionales reales de distintas instalaciones mecánicas proyectadas por la empresa y todavía no construidas físicamente.

Una vez representados en escena, el proceso de recentrado se llevó a cabo mediante referencias geométricas previamente marcadas por la empresa en localizaciones clave para ubicar la instalación completa (Figura 11, izquierda). Estas pruebas permitieron evaluar la viabilidad del sistema en escenarios reales de trabajo, analizando aspectos como la facilidad de uso por parte del operario (Figura 11, derecha), la rapidez del proceso de alineación, la estabilidad del posicionamiento y la utilidad práctica de la herramienta para tareas de verificación dimensional previa al montaje.

## 6. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos en el primer experimento se recogen en la Tabla 1, donde se analiza la desviación entre la posición del modelo virtual y las referencias reales tras el proceso de alineación.

Se observa un incremento progresivo del error en función de la distancia al punto de referencia inicial, evidenciando una relación aproximadamente lineal. Este comportamiento se produce debido a la propagación de incertidumbres del proceso de alineación espacial basado en transformaciones geométricas, cuando dependen de la selección y ajuste manual de puntos por parte del usuario.

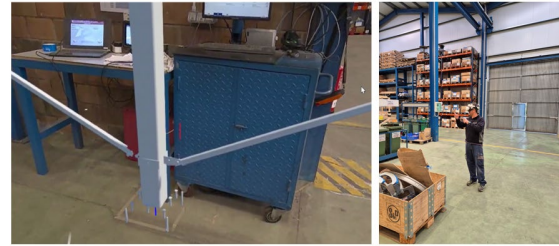


Figura 11: Prueba en empresa con situación de instalación sobre referencias (izquierda) y valoración de usuarios (derecha).

En términos cuantitativos, el sistema presenta un error medio absoluto de 1,1 mm y un error máximo de 3 mm para la mayor distancia evaluada (7,6 m). La repetibilidad del procedimiento queda reflejada en las cinco repeticiones realizadas, obteniéndose desviaciones estándar inferiores a 0,6 mm en todos los puntos de medida.

Estos resultados ponen de manifiesto que, aunque el error aumenta con la distancia, su magnitud se mantiene dentro de rangos aceptables para tareas de inspección geométrica en instalaciones de mediana escala, donde las tolerancias habituales suelen ser del orden de milímetros.

Tabla 1: Resultados de desviación sobre medida esperada (mm)

| N.º de baldosas | Distancia esperada | Media medida | Desviación $\sigma$ | Error medio |
|-----------------|--------------------|--------------|---------------------|-------------|
| 1               | 400                | 400          | 0                   | 0           |
| 2               | 800                | 800          | 0                   | 0           |
| 3               | 1200               | 1200         | 0                   | 0           |
| 7               | 2800               | 2800,8       | 0,45                | 0,8         |
| 8               | 3200               | 3201         | 0                   | 1           |
| 9               | 3600               | 3601,2       | 0,45                | 1,2         |
| 13              | 5200               | 5201,6       | 0,55                | 1,6         |
| 14              | 5600               | 5602         | 0                   | 2           |
| 17              | 6800               | 6802,6       | 0,55                | 2,6         |
| 19              | 7600               | 7603         | 0                   | 3           |

Adicionalmente, los ensayos realizados en entorno industrial real corroboran la aplicabilidad práctica del sistema. En estos escenarios, se ha verificado que el proceso de recentrado puede ejecutarse de forma ágil por parte del operario, manteniendo una estabilidad adecuada del modelo virtual una vez alineado. Dependiendo del uso objetivo, las prestaciones alcanzadas tanto en términos de precisión como de repetitividad avalan su uso industrial, siendo además empleada por una empresa dedicada a la construcción de sistemas de mantenimiento de la industria del automóvil.

La herramienta ha demostrado ser especialmente útil en la detección temprana de interferencias geométricas y en la validación visual de configuraciones antes de su montaje físico. Esto se valida en la Figura 12, donde se comprueba no solo la utilidad de recentrado en grandes instalaciones (arriba), sino también el posicionado en laboratorio de un robot de cables-CDPR para rehabilitación médica de 2500x1500x1810 mm- en su situación definitiva para validación previa de la geometría compleja (abajo). No obstante, se identifican como principales fuentes de error las limitaciones inherentes a los dispositivos de visualización y a las desviaciones asociadas al marcado inicial de puntos.

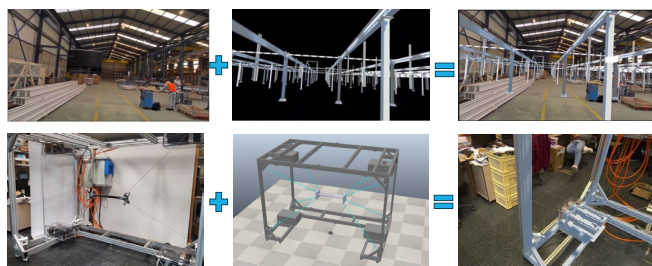


Figura 12: (arriba) Vista de una gran instalación situada en la empresa interesada, donde se observa el entorno y el almacén a construir. (abajo) Vista de un proceso de recentrado sobre el modelo de un robot de cables.

## 7. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado un sistema basado en Realidad Mixta orientado a la verificación dimensional previa al montaje de sistemas mecánicos en entornos industriales. La solución propuesta se enfoca en fases donde no se dispone de información escaneada del entorno, lo que requiere metodologías más ligeras y aplicables por el operario.

La principal contribución del trabajo radica en el desarrollo de una aplicación que permite el uso de Realidad Mixta para garantizar el correcto posicionado del modelo previamente enviado a las gafas mediante referencias geométricas seleccionadas por el usuario.

Los resultados experimentales obtenidos muestran una relación aproximadamente lineal entre el error y la distancia de trabajo (0,4-0,45 mm/m). La evaluación mediante cinco repeticiones independientes del experimento confirma la repetibilidad del sistema, con un error absoluto medio de 1,1 mm y desviaciones estándar inferiores a 0,6 mm en todos los puntos analizados. Esto sitúa al sistema en rangos de precisión aceptables según su uso. Asimismo, las pruebas realizadas en entorno industrial real han permitido validar la utilidad práctica de la herramienta, destacando su capacidad para facilitar la detección temprana de interferencias geométricas y mejorar la comprensión espacial durante las fases previas al montaje. Esta ha sido también validada por operarios como herramienta para sustituir el proceso de marcado manual.

No obstante, el sistema presenta ciertas limitaciones, principalmente asociadas a la selección manual de puntos de referencia y a las restricciones propias de los dispositivos de visualización empleados, lo que puede afectar a la repetibilidad y a la acumulación de error en escenarios de mayor complejidad.

Como líneas de trabajo futuro, se plantea la incorporación de modelos que representen las instalaciones en condiciones

reales de funcionamiento, incluyendo elementos dinámicos y componentes en movimiento. Esto permitiría analizar interferencias no solo desde el punto de vista geométrico estático, sino también considerando la interacción temporal entre equipos, robots, elementos de mantenimiento, operarios y otros elementos. Asimismo, se propone emplear un método de validación mediante sistemas de captura de movimiento de alta precisión basados en cámaras de tipo OptiTrack, con el objetivo de evaluar su uso en geometrías tridimensionales más complejas y en condiciones de mayor precisión metrológica.

## Agradecimientos

Este trabajo ha contado con el apoyo de la Xunta de Galicia a través del proyecto GPC-ED431B 2025/41.

## Referencias

- Alhady, A., Alanany, M., Khodair, Y., et al., 2024. Integrating building information modelling (BIM) and extended reality (XR) in the transportation infrastructure industry. *Advances in Bridge Engineering*. DOI: 10.1186/s43251-024-00132-6
- Andrews, C. M., Henry, A. B., Soriano, I. M., Southworth, M. K., Silva, J. R., 2021. Registration techniques for clinical applications of three-dimensional augmented reality devices. *IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine* 9, 1–10. DOI: 10.1109/JTEHM.2020.3045642.
- Bhattacharya, S., Momaya, K., 2021. Actionable strategy framework for digital transformation in AECO industry. *Engineering, Construction and Architectural Management* 28(5), 1397–1422. DOI: 10.1108/ECAM-07-2020-0587
- Eggers, G., Mühling, J., Marmulla, R., 2006. Image-to-patient registration techniques in head surgery. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery* 35(12), 1081–1095. DOI: 10.1016/j.ijom.2006.09.015.
- Erdélyi, J., Honti, R., Funtik, T., Mayer, P., Madiev, A., 2022. Verification of building structures using point clouds and building information models. *Buildings* 12(12), 2218. DOI: 10.3390/buildings12122218
- Foroughi Sabzevar, M., Gheisari, M., Lo, L. J., 2021. Improving access to design information of paper-based floor plans using augmented reality. *International Journal of Construction Education and Research* 17(2), 178–198. DOI: 10.1080/15578771.2020.1717682
- GAMMA AR, 2025. GAMMA AR Tutorial: Positioning on Grid Lines [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=n0zjQTYuHjQ>
- Gunduz, M., Naji, K. K., Daneshvar, M. S., 2026. Modelling the structural drivers of rework in construction projects: An integrated structural equation modelling approach. *Buildings* 16(8), 1590. DOI: 2075-5309/16/8/1590
- Menegon, J., da Silva Filho, L. C. P., 2023. The impact of Industry 4.0 concepts and technologies on different phases of construction project lifecycle: A literature review. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering* 47, 1293–1319. DOI: 10.1007/s40996-022-00989-5
- Meta Platforms, Inc., 2025. Customize passthrough with occlusions. Meta Horizon Developers Documentation. Disponible en: <https://developers.meta.com/horizon/documentation/unity/unity-customize-passthrough-passthrough-occlusions/>
- Park, E. S., Seo, H. C., Lee, A. Y., 2022. Development of a multi-layer marking toolkit for layout-printing automation at construction sites. *Sensors* 22(13), 4822. DOI: 10.3390/s22134822.
- Radanovic, M., Khoshelham, K., Fraser, C., 2023. Aligning the real and the virtual world: Mixed reality localisation using learning-based 3D–3D model registration. *Advanced Engineering Informatics* 56, 101960. DOI: 10.1016/j.aei.2023.101960
- Vermandere, J., Bassier, M., Vergauwen, M., 2022. Automatic alignment and completion of point cloud environments using XR data. In: *Proceedings of the SIGGRAPH '22 Posters Conference*, Vancouver, BC, Canada, 2 pp. DOI: 10.1145/3532719.3543258
- Zhang, X., Peng, Y., Zhao, X., Sun, Z., Li, W., Fan, X., 2024. Challenges of on-site implementation of mixed reality technology in the AECO industry. *Automation in Construction* 166, 105620. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105620