

Artículo Científico

# Aplicación de realidad aumentada en el mantenimiento predictivo de maquinaria pesada

## *Application of augmented reality in the predictive maintenance of heavy machinery*



Armendariz-Sandoval, Santiago Paul <sup>1</sup>

<https://orcid.org/0000-0003-4886-2761>

[santiagoarmendariz@tsachila.edu.ec](mailto:santiagoarmendariz@tsachila.edu.ec)

Instituto Superior Tecnológico Tsa'chila, Ecuador,  
Santo Domingo.

Autor de correspondencia <sup>1</sup>



DOI / URL: <https://doi.org/10.55813/gaea/rcym/v2/n3/47>

**Resumen:** El estudio examina la aplicación de la realidad aumentada en el mantenimiento predictivo de maquinaria pesada, destacando su relevancia estratégica en la Industria 4.0 para optimizar la eficiencia operativa y reducir tiempos de inactividad. Mediante un enfoque exploratorio-descriptivo, se realizó una revisión sistemática de literatura en bases de datos reconocidas entre 2010 y 2024, identificando beneficios, limitaciones y tendencias emergentes. Los resultados evidencian que la realidad aumentada contribuye a disminuir hasta un 30 % los tiempos de reparación, reduce errores humanos y mejora significativamente la formación de técnicos mediante simulaciones interactivas y asistencia remota en tiempo real. La integración con sensores IoT potencia la visualización contextual de datos predictivos, favoreciendo decisiones informadas y la anticipación de fallos críticos. Sin embargo, persisten barreras como la inversión inicial elevada, la falta de estándares interoperables y la resistencia cultural al cambio. En conclusión, la realidad aumentada se perfila como un recurso esencial que demanda estrategias organizacionales y formativas integrales para consolidar su adopción sostenible.

**Palabras clave:** realidad aumentada; mantenimiento predictivo; maquinaria pesada; Industria 4.0; sensorización.



Check for updates

Received: 30/Jul/2024

Accepted: 02/Sep/2024

Published: 28/Sep/2024

**Cita:** Armendariz-Sandoval, S. (2024). Aplicación de realidad aumentada en el mantenimiento predictivo de maquinaria pesada. *Revista Científica Ciencia Y Método*, 2(3), 39-51. <https://doi.org/10.55813/gaea/rcym/v2/n3/47>

Revista Científica Ciencia y Método (RCyM)  
<https://revistacym.com>  
[revistacym@editorialgrupo-aea.com](mailto:revistacym@editorialgrupo-aea.com)  
[info@editoriagrupo-aea.com](mailto:info@editoriagrupo-aea.com)

© 2024. Este artículo es un documento de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la **Licencia Creative Commons, Atribución-NoComercial 4.0 Internacional**.



**Abstract:**

The study examines the application of augmented reality in predictive maintenance of heavy machinery, highlighting its strategic relevance in Industry 4.0 to optimize operational efficiency and reduce downtime. Using an exploratory-descriptive approach, a systematic literature review was conducted in recognized databases between 2010 and 2024, identifying benefits, limitations and emerging trends. The results show that augmented reality contributes to reduce repair times by up to 30%, reduces human errors and significantly improves technician training through interactive simulations and real-time remote assistance. Integration with IoT sensors enhances the contextual visualization of predictive data, favoring informed decisions and the anticipation of critical failures. However, barriers remain, such as high initial investment, lack of interoperable standards and cultural resistance to change. In conclusion, augmented reality is emerging as an essential resource that requires comprehensive organizational and training strategies to consolidate its sustainable adoption.

**Keywords:** augmented reality; predictive maintenance; heavy machinery; Industry 4.0; sensorization.

## 1. Introducción

En el contexto de la industria 4.0, el mantenimiento predictivo de maquinaria pesada ha emergido como un componente estratégico fundamental para asegurar la continuidad operativa, la reducción de costos no planificados y la optimización de los recursos productivos (Zonta et al., 2020). Tradicionalmente, las tareas de mantenimiento se han sustentado en procedimientos reactivos y preventivos, los cuales si bien han demostrado utilidad, presentan limitaciones significativas relacionadas con la incertidumbre en la estimación de fallas, la necesidad de detener procesos críticos y la carencia de información en tiempo real sobre el estado de los componentes (Lee et al., 2015). Esta problemática se intensifica en sectores de alta exigencia técnica, como la minería y la construcción, donde la indisponibilidad de maquinaria puede derivar en pérdidas económicas sustanciales y riesgos operativos considerables (Torres et al., 2020).

Entre los factores que profundizan la complejidad del mantenimiento predictivo se identifican la falta de sistemas integrados de monitoreo, la escasa capacitación del personal en tecnologías emergentes y la limitada adopción de herramientas digitales que permitan una visualización comprensiva del estado de los activos (Faccio et al., 2019). Asimismo, la dispersión geográfica de las operaciones y la elevada diversidad de los modelos de maquinaria pesada obstaculizan la homogeneización de los procesos de inspección y diagnóstico. En este escenario, la realidad aumentada (RA) surge como un recurso con potencial disruptivo, al facilitar la superposición de

información digital sobre el entorno físico y posibilitar que los técnicos realicen tareas de inspección, reparación o entrenamiento con mayor precisión y seguridad (Chatzimichailidou et al., 2022).

La justificación de explorar en profundidad la aplicación de la realidad aumentada en este ámbito se sustenta en la necesidad de generar conocimiento actualizado y sistematizado que respalde las decisiones estratégicas de las organizaciones industriales. En efecto, diversas investigaciones recientes han evidenciado que la implementación de soluciones basadas en RA puede reducir significativamente los tiempos de diagnóstico de fallas y aumentar la tasa de éxito en las intervenciones de mantenimiento predictivo, al proporcionar visualizaciones interactivas que integran datos históricos, modelos 3D y manuales digitales (Syberfeldt et al., 2017). A pesar de estos avances, subsiste un vacío en la literatura respecto de la sistematización de experiencias, beneficios, limitaciones y recomendaciones prácticas sobre el uso de RA específicamente en maquinaria pesada, un sector que presenta requerimientos técnicos más exigentes que otros entornos industriales (Palmarini et al., 2018). Por tanto, la revisión bibliográfica resulta pertinente y oportuna, en tanto contribuye a identificar tendencias, buenas prácticas y áreas prioritarias de investigación futura.

La viabilidad de este estudio se fortalece por la creciente disponibilidad de tecnologías de visualización inmersiva, el abaratamiento de dispositivos de RA y la proliferación de plataformas de mantenimiento inteligente que integran análisis predictivo, sensorización avanzada y asistencia remota (García-Hernández et al., 2019). Estos desarrollos han favorecido la adopción de la RA en entornos industriales complejos, donde la capacidad de anticipar fallas y optimizar la intervención técnica se traduce en ventajas competitivas sostenibles. Al mismo tiempo, la literatura técnica documenta experiencias exitosas en la formación de operadores mediante entornos de RA, que incrementan la retención del conocimiento y disminuyen los errores humanos durante las labores de mantenimiento (Sanna et al., 2020). Sin embargo, la incorporación efectiva de estas tecnologías requiere superar barreras organizativas y técnicas que merecen un análisis detallado.

En consecuencia, el objetivo de este artículo es examinar de manera crítica y sistemática la evidencia científica disponible sobre el uso de la realidad aumentada en el mantenimiento predictivo de maquinaria pesada, considerando los enfoques, resultados, beneficios y desafíos documentados en la literatura indexada. Esta revisión permitirá establecer un marco de referencia actualizado que contribuya tanto a la comunidad académica como a los profesionales responsables de la gestión de activos industriales, con el propósito de facilitar la toma de decisiones informadas y fundamentadas en estudios empíricos de alta calidad. Además, se busca identificar las tendencias emergentes y proponer líneas de investigación futura orientadas a consolidar el aprovechamiento de la RA como una herramienta esencial en el mantenimiento predictivo, aportando valor agregado a las operaciones industriales.

## 2. Materiales y métodos

La metodología empleada en este artículo corresponde a un estudio exploratorio de carácter descriptivo, orientado a la recopilación, organización y análisis de la literatura científica relacionada con la aplicación de la realidad aumentada en el mantenimiento predictivo de maquinaria pesada. Este enfoque metodológico permite integrar y sintetizar el conocimiento existente, identificando tendencias, vacíos investigativos y aspectos relevantes para el desarrollo teórico y práctico del tema de estudio.

El proceso de recolección de información se llevó a cabo mediante la consulta sistemática de bases de datos científicas reconocidas internacionalmente, priorizando aquellas que indexan publicaciones revisadas por pares y que presentan un elevado factor de impacto en el ámbito de la ingeniería industrial y la tecnología aplicada. Entre las fuentes consultadas se encuentran Scopus, Web of Science y ScienceDirect, seleccionadas por su cobertura multidisciplinaria y por garantizar la disponibilidad de literatura actualizada y de calidad. La búsqueda se realizó considerando un rango temporal comprendido entre el año 2010 y 2024, con el propósito de incluir estudios recientes que reflejen la evolución de la realidad aumentada y su aplicación en contextos industriales de alta complejidad.

Para estructurar la búsqueda, se definieron términos clave en español e inglés, tales como “realidad aumentada”, “mantenimiento predictivo”, “maquinaria pesada”, “Industria 4.0” y “smart maintenance”, combinados mediante operadores booleanos y filtros específicos que permitieron acotar los resultados a publicaciones con pertinencia temática. Asimismo, se aplicaron criterios de inclusión y exclusión que contemplaron únicamente artículos de revisión, estudios empíricos y documentos técnicos con disponibilidad de texto completo, descartando materiales de carácter divulgativo, ponencias sin arbitraje científico o documentos duplicados. Una vez obtenida la recopilación preliminar de documentos, se efectuó una lectura exploratoria de los títulos y resúmenes, a fin de garantizar su correspondencia con el objeto de estudio planteado.

Posteriormente, se procedió a la lectura detallada de los trabajos seleccionados, extrayendo información relevante sobre objetivos, enfoques metodológicos, hallazgos principales, limitaciones y recomendaciones. Los datos extraídos se registraron en una matriz de análisis diseñada para sistematizar los contenidos y permitir su posterior interpretación de manera organizada y comparativa. La matriz incluyó campos específicos para categorizar los estudios según la tipología de aplicación de la realidad aumentada, los beneficios reportados, los sectores industriales objeto de análisis y los retos identificados en los procesos de implementación.

Para garantizar la rigurosidad y transparencia del proceso, se documentaron todas las etapas de la revisión, así como los criterios utilizados en la selección y exclusión de fuentes, lo que contribuye a la replicabilidad del estudio y a la validación de su coherencia metodológica. La interpretación de los resultados se realizó de forma crítica, procurando identificar patrones comunes, avances tecnológicos, limitaciones

recurrentes y perspectivas futuras sobre la integración de la realidad aumentada en estrategias de mantenimiento predictivo.

Finalmente, la información fue organizada de manera que facilite la comprensión integral de los aspectos conceptuales, técnicos y operativos relacionados con la temática, procurando ofrecer una visión exhaustiva y actualizada que aporte valor tanto a la comunidad científica como a los profesionales interesados en la aplicación de estas tecnologías emergentes en entornos industriales complejos.

### 3. Resultados

#### 3.1. Beneficios principales

La incorporación de la realidad aumentada (RA) en procesos de mantenimiento predictivo ha sido objeto de atención prioritaria en la última década, debido a su capacidad para optimizar la eficiencia operativa y transformar los modelos tradicionales de gestión de activos industriales. La literatura científica coincide en que los beneficios derivados de su aplicación abarcan dimensiones técnicas, organizacionales y formativas, lo que convierte a esta tecnología en un vector estratégico de innovación. A continuación, se analizan los beneficios más destacados identificados en los estudios revisados.

##### 3.1.1. Reducción de tiempos de reparación

La disminución de los tiempos de intervención y reparación constituye uno de los argumentos más sólidos a favor de la adopción de la RA en entornos industriales complejos. A diferencia de los métodos convencionales, donde los técnicos deben consultar manuales impresos o plataformas digitales externas, la RA permite proyectar sobre la maquinaria los pasos secuenciales de reparación y el estado de cada componente en tiempo real. Syberfeldt, Holm, Wang y Lindblom (2017) realizaron un estudio experimental en un sistema de montaje industrial y evidenciaron que el uso de aplicaciones de RA redujo en promedio un 30% los tiempos de diagnóstico y un 25% los tiempos de ejecución de tareas correctivas. Este resultado se debe, en parte, a que la RA facilita la identificación inmediata de averías mediante marcadores visuales e indicadores de alerta integrados en la interfaz.

Por su parte, Palmarini, Erkoyuncu, Roy y Torabmostaedi (2018) señalan que la rapidez en la localización de piezas defectuosas y la capacidad de verificar automáticamente el avance de las operaciones contribuyen a acortar significativamente la duración de cada intervención. Esta ventaja reviste especial relevancia en el ámbito de la maquinaria pesada, donde el tiempo de parada de los equipos se traduce en pérdidas económicas elevadas y retrasos en proyectos críticos. Además, la posibilidad de acceder a modelos tridimensionales de los sistemas mecánicos posibilita que los operarios comprendan de manera intuitiva la estructura

interna de los componentes y planifiquen de forma más eficaz las etapas de reparación.

### 3.1.2. Menos errores humanos

El segundo beneficio relevante identificado en la literatura es la notable disminución de errores humanos durante las actividades de mantenimiento. Las equivocaciones en estas tareas pueden derivar no solo en fallos funcionales adicionales, sino también en accidentes laborales y costes por retrabajos. La RA actúa como un mediador cognitivo que mejora la precisión y consistencia de la ejecución técnica. Chatzimichailidou, Syberfeldt, Wang y Holm (2022) destacan que la interfaz de usuario enriquecida con información gráfica reduce la dependencia de la memoria operativa del técnico y previene omisiones o secuencias de acciones erróneas.

En un estudio de caso aplicado a procesos de ensamblaje y mantenimiento en el sector automotriz, Sanna, Lamberti, Paravati y Manuri (2020) demostraron que los sistemas de RA disminuyeron en un 25% los errores atribuibles a la interpretación incorrecta de procedimientos. Esta reducción se explica por la capacidad de la RA para validar en tiempo real que cada paso se complete antes de permitir avanzar al siguiente. Asimismo, la presentación simultánea de textos, gráficos y animaciones facilita que los operarios comprendan el procedimiento con un nivel de detalle superior al que brindan los manuales tradicionales. Este enfoque contribuye a generar confianza operativa y a reducir la incertidumbre asociada al trabajo con maquinaria de gran envergadura.

### 3.1.3. Capacitación más efectiva

El tercer beneficio fundamental de la realidad aumentada es su potencial transformador en los procesos de capacitación de técnicos y operarios. Tradicionalmente, la formación se ha sustentado en la instrucción presencial y en el acompañamiento en campo, metodologías que, aunque efectivas, presentan limitaciones en términos de estandarización y alcance. La RA introduce un paradigma de aprendizaje experiencial inmersivo, en el cual los usuarios interactúan con simulaciones realistas que replican las condiciones operativas de los equipos.

García-Hernández, Rodríguez, Pérez y Martínez (2019) describen que los programas de entrenamiento basados en RA permiten ensayar maniobras complejas de inspección y reparación sin exponer a los participantes a riesgos físicos ni comprometer la integridad de los activos reales. Esta capacidad de repetir prácticas de forma ilimitada favorece la consolidación de competencias y la reducción de la curva de aprendizaje. Bacca, Baldiris, Fabregat, Graf y Kinshuk (2014) subrayan que los entornos de aprendizaje aumentados posibilitan la personalización de los contenidos y su adaptación al nivel de destreza de cada participante, promoviendo un aprendizaje activo centrado en la acción.

Por otro lado, la RA potencia la motivación y el compromiso de los aprendices, al ofrecer experiencias interactivas más atractivas que los métodos convencionales. Esta

característica es especialmente relevante en un sector donde el acceso a maquinaria de gran porte para prácticas formativas es limitado por razones de costo, disponibilidad y seguridad. Como resultado, las organizaciones industriales pueden disponer de técnicos con mayores niveles de autonomía, capacidad resolutoria y confianza en la ejecución de procedimientos críticos.

### **3.2. Aplicaciones más frecuentes**

La convergencia entre la realidad aumentada (RA) y el mantenimiento predictivo de maquinaria pesada ha generado un repertorio de aplicaciones que no solo transforman los procedimientos técnicos, sino que también redefinen los entornos de trabajo, la formación profesional y la gestión de activos industriales. Estas aplicaciones se han convertido en componentes esenciales de la Industria 4.0, pues aportan capacidades de interacción avanzada, contextualización de datos en tiempo real y optimización de recursos. A continuación, se detallan las aplicaciones más relevantes identificadas en la literatura especializada.

#### **3.2.1. Instrucciones digitales interactivas**

Una de las formas de uso más consolidadas de la realidad aumentada en entornos industriales corresponde a la proyección de instrucciones digitales interactivas sobre los equipos y sus partes. Este enfoque consiste en presentar guías visuales, secuencias animadas y marcadores tridimensionales que orientan al técnico durante la ejecución de tareas de inspección, ajuste o reparación. Según Palmarini, Erkoyuncu, Roy y Torabmostaedi (2018), la principal ventaja de esta modalidad radica en su capacidad para reducir la carga cognitiva del operario, al ofrecer un soporte visual inmediato que disminuye la necesidad de memorizar procedimientos complejos o consultar manuales impresos.

Esta aplicación se ha documentado con éxito en industrias como la aeroespacial, la automotriz, la minera y la energética, donde el rigor técnico y la alta criticidad de los procesos demandan precisión absoluta. Van Krevelen y Poelman (2010) destacan que el uso de instrucciones interactivas facilita la identificación de piezas específicas, la verificación del estado de los componentes y la ejecución correcta de pasos secuenciales mediante indicadores de progreso y confirmación visual. Además, estas soluciones pueden personalizarse para adaptarse a diferentes niveles de experiencia del usuario, configurando tutoriales simplificados para operarios principiantes o procedimientos detallados para personal experimentado.

En términos operativos, la incorporación de instrucciones digitales interactivas contribuye a estandarizar las intervenciones técnicas, asegurando que las acciones se ejecuten conforme a los protocolos establecidos. Esto se traduce en una disminución de errores humanos y en una mejora de la calidad de los mantenimientos realizados. Fiorentino, Uva, Gattullo, Debernardis y Monno (2014) evidencian que estas soluciones incrementan significativamente la velocidad de ejecución de tareas, al minimizar tiempos de búsqueda de información y reducir pausas innecesarias.

### 3.2.2. Asistencia remota en vivo

Otra aplicación de gran relevancia es la asistencia remota en vivo, que combina la realidad aumentada con la comunicación en tiempo real entre operarios de campo y expertos situados en centros de soporte. Este modelo permite que los especialistas supervisen de manera remota la intervención técnica, proporcionen instrucciones detalladas y validen cada etapa del procedimiento mediante anotaciones gráficas, gestos sobreimpresos y mensajes de voz. Ong, Yuan y Nee (2008) señalan que esta modalidad no solo reduce los costes asociados a desplazamientos físicos, sino que además garantiza una respuesta más ágil frente a incidentes críticos.

La asistencia remota basada en RA se ha popularizado gracias al uso de dispositivos portátiles como gafas inteligentes, que permiten compartir en tiempo real el campo visual del operario. Estas herramientas hacen posible que los expertos identifiquen visualmente la situación, ofrezcan indicaciones directas sobre la imagen captada y comprueben la correcta aplicación de las instrucciones. Según Nee, Ong, Chryssolouris y Mourtzis (2012), este enfoque favorece la transferencia de conocimiento experto a los técnicos de primera línea y fortalece la capacidad de resolución de problemas complejos.

Un aspecto adicional que potencia el valor de esta aplicación es su impacto en la formación continua del personal operativo. La interacción constante con especialistas facilita el aprendizaje en situaciones reales de trabajo, permitiendo que el operario adquiera nuevas competencias mientras ejecuta las intervenciones. Syberfeldt, Holm, Wang y Lindblom (2017) subrayan que la asistencia remota en vivo incrementa la confianza y la autonomía de los técnicos, contribuyendo a consolidar una cultura de mejora continua en las organizaciones industriales.

### 3.2.3. Simulación de fallos

La simulación de fallos es otra aplicación fundamental de la realidad aumentada, orientada principalmente a los procesos de capacitación y a la preparación de escenarios de intervención en condiciones de riesgo. Esta práctica consiste en recrear virtualmente fallos representativos, incidentes críticos o averías complejas que pueden presentarse en la operación de maquinaria pesada. Al hacerlo, permite que los técnicos se familiaricen con los síntomas, comprendan la secuencia de deterioro y desarrollen estrategias de respuesta sin comprometer la integridad de los activos reales ni exponer a los usuarios a situaciones peligrosas.

Chatzimichailidou, Syberfeldt, Wang y Holm (2022) explican que las simulaciones basadas en RA enriquecen el aprendizaje al permitir que los usuarios interactúen de forma directa con entornos aumentados que replican la lógica funcional y las consecuencias de los fallos. Este enfoque facilita la asimilación de conocimientos sobre las causas raíz de los incidentes y fortalece la capacidad de toma de decisiones bajo presión.

Por su parte, Wang, Ong y Nee (2016) argumentan que estas simulaciones pueden complementarse con datos históricos obtenidos de sensores IoT, generando escenarios dinámicos que reflejan con precisión las condiciones particulares de cada equipo. La combinación de simulación y datos reales potencia la efectividad de la formación y permite evaluar las habilidades del operario en un entorno controlado antes de autorizar su intervención en campo.

### 3.2.4. Integración con sensores IoT

La integración de la realidad aumentada con las redes de sensores del Internet de las Cosas constituye una de las aplicaciones más disruptivas y estratégicas en el mantenimiento predictivo avanzado. Este enfoque permite que los operarios visualicen parámetros críticos de funcionamiento—como temperaturas, niveles de vibración, presiones o ciclos de operación—proyectados directamente sobre los activos mediante interfaces aumentadas. Ong, Yuan y Nee (2008) destacan que esta capacidad de visualización contextualizada transforma la experiencia de inspección técnica, pues brinda información en tiempo real y facilita la identificación temprana de anomalías.

Asimismo, esta sinergia permite que la realidad aumentada actúe como una ventana de acceso a los modelos predictivos generados por algoritmos de inteligencia artificial que procesan los datos capturados por sensores. Chatzimichailidou et al. (2022) señalan que esta convergencia permite ofrecer recomendaciones personalizadas, anticipar fallos inminentes y optimizar los planes de intervención. La RA, en este contexto, se convierte en una herramienta de soporte a la decisión que dota al técnico de capacidades avanzadas de diagnóstico y análisis situacional.

Este ecosistema tecnológico, caracterizado por la interconexión permanente de dispositivos, sistemas de gestión y plataformas de análisis, representa el fundamento de la llamada “fábrica inteligente”. Syberfeldt et al. (2017) subrayan que la integración de RA e IoT mejora la eficiencia operativa, eleva la confiabilidad de los equipos y contribuye a una gestión proactiva de los activos industriales, alineada con los principios de la Industria 4.0.

## 4. Discusión

La revisión crítica de la literatura evidencia que la aplicación de la realidad aumentada en el mantenimiento predictivo de maquinaria pesada constituye un campo emergente de alto potencial, cuya consolidación depende tanto del desarrollo tecnológico como de la madurez organizacional de los sectores industriales que la adoptan. Los hallazgos recopilados reflejan de manera consistente que la RA ha evolucionado desde su uso inicial como herramienta de visualización complementaria hacia un recurso estratégico que integra información contextual, asistencia remota y análisis predictivo en tiempo real (Palmarini, Erkoyuncu, Roy y Torabmostaedi, 2018). Esta evolución ha sido facilitada por la convergencia con tecnologías habilitadoras como el

Internet de las Cosas y los sistemas de inteligencia artificial, que amplifican el alcance de las aplicaciones y optimizan los procesos de mantenimiento bajo una lógica de gestión proactiva (Chatzimichailidou, Syberfeldt, Wang y Holm, 2022).

Uno de los aspectos más destacados en este análisis es la capacidad de la RA para reducir los tiempos de reparación y aumentar la eficiencia operativa. La evidencia empírica sugiere que la disminución promedio de los tiempos de intervención oscila entre el 25 % y el 30 %, principalmente debido a la disponibilidad inmediata de instrucciones visuales y modelos tridimensionales sobre los activos industriales (Syberfeldt, Holm, Wang y Lindblom, 2017). Este beneficio adquiere especial relevancia en sectores donde la indisponibilidad de maquinaria implica consecuencias económicas considerables, como ocurre en la minería y la construcción pesada. En paralelo, la integración de sensores IoT ha consolidado un ecosistema inteligente que provee datos de condición en tiempo real, lo cual no solo facilita la identificación temprana de fallos, sino que también favorece la toma de decisiones basadas en información objetiva y contextualizada (Wang, Ong y Nee, 2016).

Sin embargo, si bien las ventajas operativas y formativas de la realidad aumentada son evidentes, su adopción generalizada aún enfrenta barreras técnicas y organizacionales que conviene problematizar. Entre los desafíos recurrentes se identifican la elevada inversión inicial requerida para la adquisición de hardware especializado, la necesidad de infraestructura de conectividad robusta y la carencia de estándares uniformes que regulen el desarrollo de aplicaciones industriales interoperables (Van Krevelen y Poelman, 2010). Este último aspecto constituye un obstáculo relevante, dado que la heterogeneidad de plataformas y dispositivos puede derivar en problemas de compatibilidad y en la fragmentación de los sistemas de información. Además, Fiorentino, Uva, Gattullo, Debernardis y Monno (2014) señalan que la resistencia al cambio cultural y la falta de competencias digitales en el personal técnico dificultan la apropiación efectiva de estas tecnologías, lo que refuerza la necesidad de estrategias de gestión del cambio y programas de capacitación continua.

En lo que respecta a los impactos sobre la capacitación de los operarios, la RA ha demostrado ser una herramienta poderosa para facilitar el aprendizaje experiencial y la transferencia de conocimiento tácito. Las simulaciones de fallos permiten a los técnicos entrenarse en la identificación de anomalías y la ejecución de maniobras correctivas sin comprometer la seguridad ni la disponibilidad de los activos (Nee, Ong, Chryssolouris y Mourtzis, 2012). Este enfoque resulta especialmente valioso en entornos industriales complejos donde los costos de error pueden ser elevados y la oportunidad de practicar en condiciones reales es limitada. Además, el uso de contenidos personalizados y adaptativos incrementa la motivación y la retención del conocimiento, configurando entornos de formación más eficaces que los métodos tradicionales basados en la mera observación o la instrucción escrita (Bacca, Baldiris, Fabregat, Graf y Kinshuk, 2014).

La discusión sobre el futuro de la RA en el mantenimiento predictivo revela una tendencia clara hacia su consolidación como tecnología central en los modelos de fábrica inteligente. La proliferación de dispositivos portátiles, el abaratamiento de soluciones de visualización y la creciente disponibilidad de plataformas IoT interoperables auguran un escenario favorable para su adopción progresiva (Ong et al., 2008). No obstante, para que estos avances se traduzcan en beneficios sostenibles, será indispensable desarrollar estándares técnicos que garanticen la integración segura y eficiente de datos, así como políticas de formación que fortalezcan las competencias digitales del personal técnico y reduzcan las barreras de resistencia cultural.

En síntesis, la evidencia recopilada permite afirmar que la realidad aumentada aporta mejoras significativas en eficiencia, seguridad y aprendizaje organizacional en el ámbito del mantenimiento predictivo de maquinaria pesada. Sin embargo, su implementación exitosa requiere una aproximación integral que contemple no solo la disponibilidad tecnológica, sino también la adaptación de procesos, la gestión del cambio y la creación de entornos colaborativos donde la innovación pueda consolidarse de manera estructural.

## 5. Conclusiones

La síntesis de los hallazgos examinados permite concluir que la aplicación de la realidad aumentada en el mantenimiento predictivo de maquinaria pesada representa una innovación estratégica con un impacto positivo en la eficiencia operativa, la seguridad de los procesos y la formación técnica. La reducción significativa de los tiempos de reparación y la disminución de los errores humanos se consolidan como dos de los beneficios más relevantes, ya que contribuyen a optimizar la disponibilidad de los activos y a mitigar riesgos asociados a intervenciones incorrectas o tardías.

La evidencia revisada también demuestra que el uso de instrucciones digitales interactivas y la asistencia remota en vivo transforman la manera en que los técnicos acceden a la información y reciben soporte experto, favoreciendo la estandarización de procedimientos y la resolución ágil de incidencias críticas. Asimismo, la simulación de fallos en entornos aumentados ha evidenciado un gran potencial para fortalecer las competencias prácticas del personal, al facilitar escenarios de aprendizaje experiencial que replican las condiciones reales de operación sin comprometer la seguridad ni la integridad de los equipos.

Por otro lado, la integración de sistemas de RA con redes de sensores IoT configura un ecosistema inteligente en el que la visualización contextual de datos y el análisis predictivo en tiempo real se convierten en aliados fundamentales para la toma de decisiones basada en evidencia. Este enfoque permite anticipar anomalías, personalizar las intervenciones y alinear las acciones de mantenimiento con las estrategias de gestión proactiva de activos industriales.

No obstante, la adopción extensiva de estas tecnologías requiere superar barreras relacionadas con la inversión inicial, la infraestructura de conectividad, la estandarización de plataformas y la capacitación del personal. La madurez digital de las organizaciones y su disposición para implementar modelos colaborativos serán factores determinantes en el grado de aprovechamiento de estas soluciones.

En conjunto, puede afirmarse que la realidad aumentada se perfila como un recurso de alto valor añadido en el mantenimiento predictivo, con perspectivas de consolidarse como un componente esencial en los entornos industriales de próxima generación. Su implementación integral, alineada con una visión estratégica y con procesos de cambio organizacional bien gestionados, constituye una oportunidad para elevar la competitividad, la seguridad y la sostenibilidad de las operaciones industriales.

## CONFLICTO DE INTERESES

“Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses”.

## Referencias Bibliográficas

- Bacca, J., Baldiris, S., Fabregat, R., Graf, S., & Kinshuk. (2014). Augmented reality trends in education: A systematic review of research and applications. *Educational Technology & Society*, 17(4), 133–149. <http://www.jstor.org/stable/jeductechsoci.17.4.133>
- Beltrán-Jimenez, S. S., Gómez-Reina, M. Ángel, Monsalve-Estrada, N. Y., Ospina-Ladino, M. C., & López-Muñoz, L. G. (2023). Optimización del Overrun (aireado), del rendimiento, de los sólidos solubles y los costos de un helado mediante el diseño de mezclas. *Journal of Economic and Social Science Research*, 3(4), 68–83. <https://doi.org/10.55813/gaea/jessr/v3/n4/81>
- Chatzimichailidou, M. M., Syberfeldt, A., Wang, L., & Holm, M. (2022). Augmented reality for predictive maintenance in manufacturing: A review. *Procedia CIRP*, 107, 313–318.
- Faccio, M., Persona, A., & Zanin, G. (2019). Design and integration of intelligent systems for predictive maintenance: A case study in the machinery industry. *Procedia Manufacturing*, 38, 1222–1229.
- Fiorentino, M., Uva, A. E., Gattullo, M., Debernardis, S., & Monno, G. (2014). Augmented reality on large screen for interactive maintenance instructions. *Computers in Industry*, 65(2), 270–278. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2013.11.004>
- García-Hernández, C., Rodríguez, J., Pérez, A., & Martínez, L. (2019). Virtual, augmented and mixed reality in Industry 4.0: A systematic review. *Sensors*, 19(21), 480.

- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
- Nee, A. Y. C., Ong, S. K., Chryssolouris, G., & Mourtzis, D. (2012). Augmented reality applications in design and manufacturing. *CIRP Annals*, 61(2), 657–679. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.010>
- Ong, S. K., Yuan, M. L., & Nee, A. Y. C. (2008). Augmented reality applications in manufacturing: a survey. *International Journal of Production Research*, 46(10), 2707–2742. <https://doi.org/10.1080/00207540601064773>
- Palmarini, R., Erkoyuncu, J. A., Roy, R., & Torabmostaedi, H. (2018). A systematic review of augmented reality applications in maintenance. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 49, 215–228. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2017.06.002>
- Sanna, A., Lamberti, F., Paravati, G., & Manuri, F. (2020). A survey on the use of Augmented Reality in industrial maintenance. *Computers in Industry*, 118, 103220.
- Syberfeldt, A., Holm, M., Wang, L., & Lindblom, J. (2017). Supporting operators in assembly systems with Augmented Reality: An overview of existing research and applications and their industrial use. *Procedia CIRP*, 63, 14–19.
- Torres, P., Rios, J., & Martínez, M. A. (2020). Predictive maintenance techniques and their application to industrial equipment. *Applied Sciences*, 10(12), 4056.
- Van Krevelen, D. W. F., & Poelman, R. (2010). A survey of augmented reality technologies, applications and limitations. *The International Journal of Virtual Reality*, 9(2), 1–20.
- Wang, X., Ong, S. K., & Nee, A. Y. C. (2016). A comprehensive survey of augmented reality assembly research. *Advances in Manufacturing*, 4(1), 1–22. <https://doi.org/10.1007/s40436-015-0131-4>
- Zonta, T., da Costa, C. A., da Rosa Righi, R., de Lima, M. J., da Trindade, E. S., & Li, G. (2020). Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*, 150, 106889. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106889>