



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Revisión sistemática de la optimización de procesos industriales mediante la aplicación de realidad aumentada.

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO INDUSTRIAL

AUTOR:

Marjury Aracely Vallejo Pilataxi

TUTOR:

Ing. Msc. José Ezequiel Naranjo Robalino

Latacunga, agosto 2024



DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Marjury Aracely Vallejo Pilataxi, con cédula de ciudadanía No. 1501053118 declaro ser autor del presente **PROYECTO DE INVESTIGACIÓN: “REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LA OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS INDUSTRIALES MEDIANTE LA APLICACIÓN DE REALIDAD AUMENTADA.”**, siendo Ing. MsC. José Ezequiel Naranjo Robalino, Tutor del presente trabajo; y, eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Latacunga, agosto 2024

.....
Marjury
Marjury Aracely Vallejo Pilataxi
C.I: 1501053118



AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutor del Proyecto de Investigación sobre el título:

“REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LA OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS INDUSTRIALES MEDIANTE LA APLICACIÓN DE REALIDAD AUMENTADA.”, de Vallejo Pilataxi Marjury Aracely de Ingeniería Industrial, considero que dicho Informe Investigativo es merecedor del aval de aprobación al cumplir las normas técnicas, traducción y formatos previstos, así como también ha incorporado las observaciones y recomendaciones propuestas en la pre-defensa.

Latacunga, agosto 2024

Ing. MsC. José Ezequiel Naranjo Robalino
CC: 1804710463
TUTOR



AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, los postulante: Vallejo Pilataxi Marjury Aracely, con el título de Proyecto de Investigación: **“REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LA OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS INDUSTRIALES MEDIANTE LA APLICACIÓN DE REALIDAD AUMENTADA”** ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del trabajo de titulación.

Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

Latacunga, agosto del 2024

Para constancia firman:

Ing. MsC. Diego Paul Monga Sánchez
CC: 0503569964
Presidente

Ing. MsC. Jonnatan Josue Constante Armas
CC: 0502034564
Lector 2

Ing. MsC. Dr. Medardo Ángel Ulloa Enríquez
CC: 1000970325
Lector 3

Agradecimiento

Primero, agradezco a Dios por Su infinita gracia y amor, que han sido mi faro en los momentos más oscuros y mi impulso en cada paso dado hacia adelante. Gracias por permitir que las personas más importantes en mi vida estén conmigo en una de las metas más importantes de mi vida.

A mis padres, quienes con su amor incondicional, apoyo incansable y sacrificios diarios, me han enseñado el verdadero significado del esfuerzo y la perseverancia, permitiéndome llegar hasta aquí. A mis hermanos, por su amor, apoyo y respeto. A mis tíos y primos, cuya fe en mí ha sido mi mayor motivación. Gracias, familia, por ser mi fuerza, mi inspiración y por caminar siempre a mi lado en este viaje.

También quiero expresar mi gratitud a mis docentes, quienes con su dedicación y conocimientos han contribuido enormemente a mi formación. A mi tutor, el Ing. Msc. José Naranjo, mi más sincero agradecimiento por su apoyo a lo largo del desarrollo de esta tesis. Su dedicación, paciencia y confianza en mi trabajo han sido fundamentales para alcanzar este logro.

Finalmente, quiero agradecer a mis amigos más cercanos por los momentos inolvidables que hemos compartido. Sepan que siempre significarán alguien especial en mi vida y siempre desearé lo mejor para ustedes, ya que me llevo tan bonitos recuerdos de esta hermosa etapa. Su presencia, paciencia y compañía han hecho de este viaje una experiencia enriquecedora y memorable.

Dedicatoria

Dedico este trabajo principalmente a Alcides Vallejo y Zoila Pilataxi, quienes han sido los pilares de mi vida. Su fe en mí y su guía han sido mi mayor fuente de inspiración y fortaleza. Gracias por su amor sincero y constante apoyo.

A mis hermanos Jenni, Mariela, Claudio y Jhonny, cuya presencia en mi vida ha sido un pilar fundamental en cada paso de este viaje. Su amor y apoyo han sido esenciales para alcanzar este logro.

A mis sobrinos y primos Maykel, Esmeralda, Ander y Jhon, quienes han llenado mi vida de alegría y han sido un recordatorio constante de la importancia de la familia. Gracias por su amor y por ser una fuente constante de felicidad.

A Thiago, el amor de mi vida, quien, sin imaginarlo, se ha convertido en mi mayor fortaleza, mi apoyo y mi todo en este viaje llamado vida. Su amor ha sido mi refugio y mi fuerza en los momentos de desafío. Este proyecto está dedicado al inmenso amor sincero que le tengo y agradezco todos los momentos de felicidad que hemos compartido.

Finalmente, dedico esta tesis con todo mi corazón a Segundo Pilataxi, cuyo amor y memoria me han inspirado a lo largo de mi vida. Aunque ya no estés físicamente aquí, tu espíritu vive en mí.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
TEMA: REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LA OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS
INDUSTRIALES MEDIANTE LA APLICACIÓN DE REALIDAD AUMENTADA.

AUTOR:

Vallejo Pilataxi Marjury Aracely

RESUMEN:

Utilizando la metodología PRISMA, se realizó una revisión sistemática para evaluar exhaustivamente la optimización de procesos industriales mediante la aplicación de la realidad aumentada (RA), una de las tecnologías clave de la Industria 4.0. Los objetivos específicos incluyen caracterizar implementaciones exitosas de RA en varios procesos industriales, comparar diferentes hardware, motores gráficos y costos asociados, y determinar el porcentaje de optimización logrado a través de la RA. Los criterios de elegibilidad se definieron como artículos en inglés publicados entre 2019 y 2024 que proporcionen contribuciones significativas a las aplicaciones de RA en la ingeniería. Las bases de datos que se incluyeron son Scopus, SpringerLink, IEEEExplore y MDPI. El método Cochrane se utilizó para evaluar el sesgo. El riguroso proceso de selección resultó en la inclusión de 38 artículos. Los hallazgos clave indican que la RA reduce errores y tiempos de ejecución, mejora la eficiencia y productividad, y optimiza los procesos de capacitación y mantenimiento, lo que lleva a ahorros de costos y mejora de la calidad. Unity 3D es el motor gráfico más utilizado para aplicaciones de RA. Las principales aplicaciones de la RA se encuentran en el mantenimiento, ensamblaje, capacitación e inspección, siendo el mantenimiento el área más investigada. Los desafíos incluyen la curva de aprendizaje, los altos costos iniciales y las limitaciones del hardware.

Palabras Clave: Industria 4.0, Metodología PRISMA, Optimización de Procesos Industriales, Realidad Aumentada, Revisión Sistemática.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES

TOPIC: A SYSTEMATIC REVIEW OF THE OPTIMIZATION OF INDUSTRIAL PROCESSES THROUGH THE APPLICATION OF AUGMENTED REALITY.

AUTHOR:

Vallejo Pilataxi Marjury Aracely

ABSTRACT:

Using the PRISMA methodology, a systematic review was carried out to exhaustively evaluate the optimization of industrial processes through the application of augmented reality (AR), one of the key technologies of Industry 4.0. Specific objectives include characterizing successful AR implementations in several industrial processes, comparing different hardware, graphics engines and associated costs, and determining the percentage of optimization achieved through AR. To Eligibility criteria, articles in English published between 2019 and 2024 were defined that provide significant contributions to AR applications in engineering. The databases that were included are Scopus, SpringerLink, IEEExplore and MDPI. The Cochrane method was used to evaluate bias. The rigorous selection process resulted in the inclusion of 38 articles. Key findings indicate that AR reduces errors and execution times, improves efficiency and productivity, and optimizes training and maintenance processes, leading to cost savings and quality improvement. Unity 3D is the most used graphics engine for AR applications. The main applications of AR are in maintenance, assembly, training and inspection area. Maintenance is being the most researched area. Challenges include learning curve, high initial costs, and hardware limitations.

Keywords: Industry 4.0, PRISMA Methodology, Industrial Process Optimization, Augmented Reality, A Systematic Review.

ÍNDICE GENERAL

1.	INFORMACIÓN GENERAL	1
2.	INTRODUCCIÓN	2
2.1.	PROBLEMA	2
2.1.1.	Situación problemática.	2
2.1.1.1.	Formulación del problema.	3
2.2.	OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN	4
2.3.	BENEFICIARIOS	4
2.4.	JUSTIFICACIÓN	5
2.5.	OBJETIVOS	5
2.5.1.	Objetivo general:	5
2.5.2.	Objetivos específicos:	6
3.	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	6
4.	METODOLOGÍA	11
4.1.	descriptiva	11
4.2.	Prisma	12
4.3.	Preguntas de investigación	12
4.4.	Búsqueda de documentos	13
4.5.	Selección de artículos	14
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	24
6.	CONCLUSIONES	64
7.	RECOMENDACIONES	65
8.	REFERENCIAS	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Beneficiarios	4
Tabla 2. Investigaciones previas de la RA.....	8
Tabla 3. Preguntas de investigación	13
Tabla 4. Criterios de elegibilidad.....	15
Tabla 5. Aplicación de RA en Procesos Industriales.....	24
Tabla 6. Hardware y software utilizado.....	47
Tabla 7 Impacto de la Implementación de RA en Procesos Industriales.	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Parcela de semáforo.	17
Figura 2. Diagrama de barras de sesgo Cochrane.	18
Figura 3. Diagrama de flujo PRISMA.	19
Figura 4. Análisis de co-ocurrencia de palabras clave.	21
Figura 5. Análisis de co-ocurrencia de términos del resúmen.	22
Figura 6. Análisis de co-ocurrencia de autores.	23
Figura 7. Hardware utilizado.	52
Figura 8. Procesos en los que se aplica la RA.	62

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título: Revisión sistemática de la optimización de procesos industriales mediante la aplicación de realidad aumentada.

Tipo de Proyecto: Proyecto de Investigación.

Carrera: Ingeniería Industrial.

Proyecto de investigación vinculado:

Equipo de Trabajo:

Tutor de Titulación: Ing. Msc. José Ezequiel Naranjo Robalino.

Autor: Marjury Aracely Vallejo Pilataxi.

Área de Conocimiento: Industria y producción

Línea de investigación: Tecnología Industrial, gestión de la producción, riesgos y seguridad laboral.

Sub líneas de investigación de la Carrera: Investigación de operaciones y de tecnología.

Optimización de procesos productivos métodos y técnicas para el mejoramiento continuo en el sector productivo.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. PROBLEMA

2.1.1. Situación problemática.

La optimización de procesos industriales en un mundo empresarial cada vez más digitalizado y globalizado actual, demanda que las empresas e industrias implementen estrategias innovadoras para mantener su competitividad entre fabricantes, a nivel nacional e internacional lo que permita asegurar su permanencia en el mercado global. En este contexto, la competitividad empresarial se ve reforzada no solo mediante la tradicional reducción de costos, sino también mediante la adopción de un enfoque organizacional que fomente la innovación y garantice la competitividad a largo plazo para idear nuevas formas de mejorar la satisfacción del cliente [1] [2]. Por ello se ha convertido en un objetivo crucial la mejora continua para las empresas que buscan mejorar su eficiencia, productividad y competitividad en el mercado. Esta necesidad surge en un contexto de constante evolución tecnológica y competencia global, donde las empresas deben adaptarse para maximizar su rendimiento operativo y satisfacer las demandas del mercado, por ende, la optimización de procesos industriales es vital por su capacidad para mejorar la utilización de recursos, reducir costos, minimizar tiempos de producción y aumentar la calidad de los productos o servicios ofrecidos. Hoy en día, el concepto de Industria 4.0 representa un nuevo paradigma para organizar el proceso de fabricación, que se caracteriza por niveles cada vez mayores de digitalización y automatización capaces de impulsar la transformación digital de las industrias hacia las llamadas fábricas inteligentes [3]. De hecho, implementar la producción inteligente es de suma importancia para satisfacer las demandas de los consumidores en rápido crecimiento en el mercado global para lograr una alta productividad y proporcionar productos de alta calidad a un costo y tiempo reducidos. En este contexto, la aplicación de tecnologías emergentes como la realidad aumentada (RA) como parte de la industria 4.0 emerge como una tecnología prometedora que ofrece potenciales beneficios en términos de mejora de procesos y toma de decisiones, ha surgido como una herramienta prometedora para impulsar estos esfuerzos de mejora continua en la optimización de procesos industriales [1], [4]. La tecnología RA moderna aplica información virtual al mundo real a través de tecnologías informáticas: el entorno real y los objetos virtuales se superponen en la misma imagen o espacio en tiempo real.

De igual forma, se ha descubierto que la realidad aumentada es particularmente beneficiosa para el mantenimiento, la capacitación, el montaje y la inspección y control de calidad de las actividades [4] [5]. Cuando se trata de esto último, el valor y las ventajas de las tecnologías de RA se vuelven más evidentes a medida que aumenta la complejidad de los elementos y conjuntos que deben inspeccionarse por ende la realidad aumentada ofrece una variedad de aplicaciones que pueden revolucionar la forma en que se gestionan y mejoran los procesos industriales.

Sin embargo, a pesar del creciente interés en la tecnología de realidad aumentada en procesos industriales, existe una falta de comprensión integral sobre cómo esta tecnología puede ser empleada de manera efectiva para optimizar procesos específicos en diferentes sectores industriales. La finalidad de la revisión sistemática es ofrecer una perspectiva clara y actualizada sobre la aplicación acertada de la realidad aumentada en los procesos industriales, se ha identificado en la revisión sistemática, que los estudios que traten sobre la optimización de procesos industriales mediante el uso de realidad aumentada son limitados por ello en este análisis, se examinarán diferentes artículos, mediante la metodología PRISMA para comprender mejor el impacto y el potencial de la realidad aumentada en la optimización de procesos industriales mediante una lectura analítica de publicaciones y artículos que permita identificar los procesos industriales donde se ha implementado acertadamente la RA y con ello determinar el porcentaje de optimización, mediante un análisis cuantitativo, en los procesos industriales.

1.1.1. Formulación del problema.

No se tiene un documento exhaustivo que recopile y evalúe sistemáticamente la eficiencia de la aplicación de tecnologías 4.0, como la realidad aumentada, en la optimización de procesos industriales, lo cual impide una comprensión integral y comparativa de sus beneficios y desafíos en distintos contextos industriales.

2.2.OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN

Objeto de investigación: La implementación de RA en la optimización de procesos industriales.

Campo de acción: Industria y producción

2.3. BENEFICIARIOS

- **Empresas:** Las empresas que operan en diversos sectores industriales podrán utilizar los hallazgos para mejorar la eficiencia operativa dentro de sus procesos y mejorar la calidad de sus productos y servicios mediante la implementación de RA. Según [6] en la provincia de Cotopaxi hay 1767 empresas, y en Ecuador en según el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) en el 2021 hay 849.831 empresas [7].
- **Ingenieros y Técnicos Industriales:** Profesionales del sector industrial que buscan implementar la RA en sus procesos podrán acceder a información crítica y actualizada sobre las mejores prácticas, beneficios y tecnologías disponibles, mejorando sus habilidades y conocimiento.
- **Investigadores y Académicos:** Los investigadores y académicos del campo de la ingeniería industrial y tecnología aplicada tendrán acceso a una base teórica consolidada y estudios comparativos, facilitando nuevas investigaciones y desarrollos en la materia. En la facultad de CIYA de la universidad técnica de Cotopaxi existen 76 docentes y 250 estudiantes de ingeniería industrial de la UTC.
- **Trabajadores y operarios de sectores industriales:** Empleados que trabajan en procesos industriales optimizados con RA podrán beneficiarse de una mayor seguridad laboral, menos errores humanos y una mejor calidad del entorno laboral.

En la Tabla 1, se muestra un resumen de los beneficiarios indicando el tipo y la cuantificación de los mismos.

Tabla 1. Beneficiarios

Beneficiario	Tipo	Total
Empresas de Cotopaxi	Directo	1767 empresas
Empresas de Ecuador	Indirecto	849.831 empresas
Investigadores y Académicos	Directo	76 docentes.
Académicos	Directo	250 estudiantes.

2.4. JUSTIFICACIÓN

La realización de una revisión sistemática de la optimización de procesos industriales mediante la aplicación de RA se fundamenta en varias razones esenciales. En primer lugar, la industria está experimentando una rápida transformación impulsada por avances tecnológicos, y la realidad aumentada se posiciona como una herramienta prometedora para mejorar la eficiencia y la productividad en los procesos industriales. Sin embargo, a pesar del interés creciente en esta tecnología, aún existe una falta de comprensión completa sobre cómo puede aplicarse de manera efectiva para optimizar los procesos industriales específicos. Por tanto, una revisión sistemática proporciona una evaluación exhaustiva de la investigación existente en este campo. Además, dado el potencial impacto económico y competitivo de la implementación de esta tecnología en la industria, es crucial contar con una base de evidencia sólida y confiable para respaldar las decisiones estratégicas y facilitar una adopción efectiva de esta tecnología, por ello este proyecto tiene un significativo valor teórico, metodológico y práctico. Teóricamente, contribuirá al avance del conocimiento al sintetizar y analizar de manera crítica la literatura existente sobre la aplicación de realidad aumentada en la industria. Metodológicamente, la utilización de la metodología PRISMA garantizará una revisión sistemática rigurosa [8], estableciendo un nivel de referencia alto para investigaciones futuras en este campo y en lo práctico los resultados proporcionarán directrices claras y aplicables para la implementación de realidad aumentada en procesos industriales, ayudando a las empresas a mejorar su eficiencia operativa dentro de sus procesos industriales.

2.5. OBJETIVOS

2.5.1. Objetivo general:

Desarrollar una revisión sistemática de la optimización de procesos industriales mediante la aplicación de realidad aumentada.

2.5.2. Objetivos específicos:

- Aplicar la metodología PRISMA para la realización de la revisión sistemática de literatura usando preguntas de investigación para la conducción crítica del estudio.
- Caracterizar procesos industriales en los que se ha implementado acertadamente la realidad aumentada, mediante la lectura analítica de las publicaciones seleccionadas, para un estudio comparativo de los diferentes hardware, motores gráficos y costo asociados.
- Determinar el porcentaje de optimización de los procesos industriales identificados, mediante un análisis cuantitativo, para la presentación una base teórica a la industria sobre los beneficios de la implementación de realidad aumentada.

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

La RA ha demostrado ser una herramienta valiosa para la optimización de procesos industriales en sectores como la manufactura, automoción, gestión de almacenes y construcción. Las investigaciones han mostrado cómo la RA puede mejorar la eficiencia, precisión y productividad en estos contextos. Según [9], la combinación de RA con inteligencia artificial (IA) está emergiendo como una dirección prominente en la industria, permitiendo aumentar la velocidad de producción y mejorar la capacitación de la fuerza laboral. Con los avances en la industria del silicio, los procesadores serán más eficientes y menos costosos, optimizando el consumo de energía y apoyando el auge de la RA junto con IA para mejorar la fabricación, manejo de errores, ensamblaje y empaquetado. Esta investigación sistemática identifica los principales algoritmos de aprendizaje profundo utilizados en RA, como YOLO, MobileNets y SSD, y revisa plataformas y marcos recientes para aplicaciones de RA asistida por IA en entornos industriales. En la industria automotriz, la RA se ha utilizado en diseño logístico, ensamblaje, mantenimiento, evaluación, diagnóstico, reparación, inspección, control de calidad, capacitación y marketing. La RA ofrece interfaces interactivas e intuitivas que proporcionan la información correcta al operador humano en el momento y lugar adecuados. A pesar de sus ventajas, la aceptación de la RA en la industria automotriz aún no es clara, aunque está en crecimiento. Esta tecnología tiene el potencial de revolucionar la forma en que se llevan a cabo diversas actividades dentro del sector, ofreciendo soluciones innovadoras para mejorar la precisión y reducir los tiempos de operación [10]. En la gestión de almacenes, la tecnología de pick-by-vision en RA ha mostrado un impacto significativo en la eficiencia operativa de los

sistemas de gestión de almacenes (WMS). Esta tecnología ayuda a optimizar los flujos de trabajo mediante la guía visual en dispositivos móviles y gafas inteligentes, mejorando la eficiencia general de las operaciones del almacén. Sin embargo, hay brechas en la claridad de búsqueda de palabras clave y la necesidad de revisar documentos específicos señalados en estudios anteriores [11]. La implementación de estas tecnologías puede transformar la gestión de inventarios y procesos logísticos, aumentando la precisión y reduciendo los errores humanos.

El uso de la RA en tareas de mantenimiento y montaje industrial ha sido estudiado desde una perspectiva neurofisiológica. Se ha demostrado que la RA puede reducir los tiempos de mantenimiento y aumentar la carga de trabajo mental en comparación con las instrucciones en papel, especialmente para tareas altamente exigentes [12]. Esto sugiere que la RA es superior para tareas complejas, ya que facilita la adquisición de conocimientos y habilidades a largo plazo. La capacidad de la RA para proporcionar instrucciones visuales y en tiempo real puede mejorar significativamente el rendimiento y la eficiencia en entornos industriales. La investigación también indica que la RA asistida en el entrenamiento de ensamblaje, utilizando algoritmos de reconocimiento y predicción de gestos, es efectiva y asequible para la capacitación laboral en las industrias automotriz y electrónica [13]. Este método descompone las tareas en operaciones de mano y acciones continuas, lo que permite evaluar y predecir los estándares y logros de las operaciones manuales. La integración de RA en los programas de capacitación puede mejorar la precisión y reducir los tiempos de aprendizaje, preparando mejor a los trabajadores para tareas complejas. En la construcción la RA se ha adoptado cada vez más, identificando beneficios como la facilidad de implementación y el tiempo de capacitación, así como limitaciones relacionadas con el rendimiento del hardware y software. La divergencia en los informes sobre ciertos atributos de rendimiento, como el costo y el rendimiento cognitivo, destaca la importancia de los factores contextuales en el éxito de la implementación de la RA. La RA puede proporcionar a los trabajadores de la construcción información crítica en tiempo real, mejorando la precisión y reduciendo los errores en el sitio de construcción [14]. La realidad aumentada presenta múltiples beneficios para la optimización de procesos industriales, incluyendo mejoras en la productividad, precisión y capacitación de la fuerza laboral. Sin embargo, la aceptación y el éxito de la RA dependen de varios factores contextuales y técnicos. La RA tiene el potencial de transformar diversos sectores industriales, ofreciendo soluciones innovadoras para mejorar la eficiencia y la precisión de los procesos, y preparando mejor a la fuerza laboral para los desafíos del futuro.

Tabla 2. Investigaciones previas de la RA.

Año	Autor	Título	Tipo	Contribuciones
2022	Devagiri	Augmented reality and artificial intelligence in industry: trends, tools, and future challenges.	Contextualizing benefits and limitations reported Revisión sistemática	<p>Combinación de RA con IA: el artículo destaca la integración de RA con inteligencia artificial IA como una tendencia emergente en la industria, permitiendo un aumento significativo en la velocidad de producción y mejorando la capacitación de la fuerza laboral.</p> <p>Avances en la industria del silicio: se menciona que los procesadores serán más eficientes y menos costosos, optimizando el consumo de energía y apoyando el auge de la ra junto con ia.</p> <p>Algoritmos de aprendizaje profundo: identificación de los principales algoritmos de aprendizaje profundo utilizados en RA, como YOLO, MOBILenets y SSD, y revisión de plataformas y marcos recientes para aplicaciones de ra asistida por ia en entornos industriales.</p>
2024	Gonzalez-Argote	Application of augmented reality in automotive industry	Revisión	<p>Aplicaciones en la industria automotriz: el artículo describe cómo la RA se utiliza en diseño logístico, ensamblaje, mantenimiento, evaluación, diagnóstico, reparación, inspección, control de calidad, capacitación y marketing.</p> <p>Interfaz interactiva e intuitiva: destaca que la RA ofrece interfaces que proporcionan la información correcta al operador humano en el momento y lugar adecuados.</p> <p>Crecimiento de la aceptación de RA: aunque la aceptación de la RA en la industria automotriz aún no es clara, se está observando un crecimiento en su adopción.</p>

2023	Jumahat	A review on the positive implications of augmented reality pick-by-vision in warehouse management systems	Revisión narrativa	<p>Impacto en la gestión de almacenes: el artículo revisa cómo la tecnología de pick-by-vision la RA ha mostrado un impacto significativo en la eficiencia operativa de los sistemas de gestión de almacenes (wms).</p> <p>Optimización de flujos de trabajo: la tecnología ayuda a optimizar los flujos de trabajo mediante la guía visual en dispositivos móviles y gafas inteligentes, mejorando la eficiencia general de las operaciones del almacén.</p>
2023	Mao	A Physical Fatigue Evaluation Method for Automotive Manual Assembly: An Experiment of Cerebral Oxygenation with ARE Platform	Estudio experimental	<p>Efectos neurofisiológicos: se estudian los efectos de la ra en la carga cognitiva y la eficiencia durante tareas de mantenimiento y montaje industrial.</p> <p>Reducción de tiempos de mantenimiento: la RA puede reducir los tiempos de mantenimiento y aumentar la carga de trabajo mental en comparación con las instrucciones en papel, especialmente para tareas altamente exigentes.</p> <p>Facilitación de la adquisición de conocimientos: sugiere que la RA es superior para tareas complejas, facilitando la adquisición de conocimientos y habilidades a largo plazo.</p>

2021	Dong	Augmented reality assisted assembly training oriented dynamic gesture recognition and prediction.	Propuesta de algoritmo	<p>Entrenamiento de ensamblaje asistido por RA: el artículo aborda cómo la RA asistida en el entrenamiento de ensamblaje, utilizando algoritmos de reconocimiento y predicción de gestos, es efectiva y asequible para la capacitación laboral.</p> <p>Descomposición de tareas: descompone las tareas en operaciones de mano y acciones continuas, lo que permite evaluar y predecir los estándares y logros de las operaciones manuales.</p> <p>Mejora de la precisión y reducción de tiempos de aprendizaje: la integración de RA en programas de capacitación puede mejorar la precisión y reducir los tiempos de aprendizaje.</p>
2021	Asmar	Contextualizing benefits and limitations reported for augmented reality in construction research	Revisión sistemática	<p>Adopción de ra en la construcción: el artículo identifica los beneficios de la RA en la construcción, como la facilidad de implementación y el tiempo de capacitación.</p> <p>Limitaciones del hardware y software: también aborda las limitaciones relacionadas con el rendimiento del hardware y software utilizados.</p> <p>Importancia de factores contextuales: destaca la importancia de los factores contextuales en el éxito de la implementación de la RA, mencionando divergencias en los informes sobre costos y rendimiento cognitivo.</p>

4. METODOLOGÍA

4.1. DESCRIPTIVA

La investigación descriptiva se enfoca en detallar y analizar las características de un fenómeno o población específica. Según Mario Tamayo y Tamayo, este tipo de investigación se define como un proceso que implica el registro, análisis e interpretación de la situación actual y los procesos involucrados en los fenómenos, con énfasis en las tendencias dominantes o en el comportamiento presente de individuos, grupos o entidades. Las características de la investigación descriptiva exigen que la información recolectada sea precisa, verídica y sistemática, evitando cualquier inferencia sobre el fenómeno y centrándose únicamente en las características observables y verificables. En este contexto, la formulación de la pregunta de investigación debe ser original y creativa, además, la investigación descriptiva tiene como objetivo principal describir las características fundamentales de conjuntos homogéneos de fenómenos. Para ello, emplea criterios sistemáticos que permiten establecer la estructura o el comportamiento de los fenómenos estudiados, proporcionando información que puede ser comparada sistemáticamente con la obtenida de otras fuentes [15].

La presente revisión sistemática está enfocada a analizar la aplicación de la RA en la optimización de procesos industriales en un sentido amplio, abarcando diversas industrias y sectores productivos. La investigación permite proporcionar una visión integral de cómo la RA ha sido utilizada para mejorar la eficiencia operativa de los procesos.

Para abordar esta necesidad, la presente revisión sistemática se ha diseñado para evaluar y sintetizar la evidencia disponible sobre la aplicación de la RA en la optimización de procesos industriales. En esta investigación, se utilizará PRISMA como herramienta fundamental para asegurar la rigurosidad y transparencia del proceso de revisión. PRISMA proporcionará una guía estructurada para la identificación, selección, evaluación y síntesis de los estudios relevantes, garantizando que se cumplan altos estándares de calidad en cada etapa del análisis.

4.2. PRISMA

La metodología propuesta para la realización de la revisión sistemática de la literatura se basa en las directrices de PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Esta investigación sigue estrictamente las directrices de PRISMA, cuyo objetivo es ayudar a los autores de revisiones sistemáticas a generar un documento libre de sesgos y de alta calidad científica. En su última versión, publicada en 2020, PRISMA incorpora avances metodológicos significativos en la clasificación, selección y resumen de estudios, asegurando un proceso de revisión más riguroso y transparente [8]. En la declaración del 2020, refleja los avances metodológicos en la clasificación, selección y resumen de los diferentes estudios. Esta revisión se ha centrado en la extracción de información de varias bases de datos y editoriales reconocidas, como Scopus, SpringerLink, IEEEExplore y MDPI, con el objetivo de caracterizar exhaustivamente los procesos industriales. Para lograr esto, se han recopilado estudios relevantes que abordan la implementación de la RA en el ámbito industrial. Posteriormente, se llevará a cabo un análisis cuantitativo detallado, enfocado en la recopilación y evaluación de datos numéricos obtenidos de estos estudios. Este análisis permitirá determinar el porcentaje de optimización alcanzado en los procesos industriales gracias a la implementación de la realidad aumentada. Al examinar indicadores clave de rendimiento, como la eficiencia operativa, la reducción de errores y el ahorro de tiempo, se pretende ofrecer una visión integral de los beneficios y limitaciones de esta tecnología en el sector industrial.

Esta metodología no solo facilitará una comprensión profunda de los impactos actuales, sino que también identificará áreas potenciales para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas.

4.3. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

Se plantearon cuatro preguntas de investigación con el propósito de comprender la importancia de implementar la tecnología de la RA en diferentes procesos industriales. A través de estas preguntas, se busca proporcionar una comprensión integral y fundamentada sobre el potencial y las limitaciones de la RA en el sector industrial, apoyando así decisiones informadas sobre su adopción y optimización en diversas aplicaciones. Ver Tabla 3 para un resumen detallado de estas preguntas y la motivación de las mismas.

Tabla 3. Preguntas de investigación

Preguntas de investigación		
Número	Pregunta	Motivación
PI1	¿Cuáles son los principales beneficios de aplicar la RA en la optimización de procesos industriales?	Identificar las ventajas de aplicar la RA en procesos industriales.
PI2	¿Cuál es el motor gráfico más utilizado?	Identificar las tendencias del mercado y beneficiarse de una amplia comunidad de soporte para tomar decisiones informadas.
PI3	¿En qué procesos industriales es recomendable implementar la RA?	Asegurar una adopción estratégica y beneficiosa de la RA en procesos industriales.
PI4	¿Qué desafíos y limitaciones enfrentan las industrias al implementar la RA?	Identificar los inconvenientes que se presentan al implementar la RA.

4.4. BÚSQUEDA DE DOCUMENTOS

Según [16], muestra que, para alcanzar el máximo recuento, las búsquedas en revisiones sistemáticas deben incluir una combinación de bases de datos y editoriales. Para garantizar un rendimiento adecuado en las búsquedas (es decir, recuento, precisión y número necesario para leer), se encontró que las búsquedas bibliográficas para una revisión sistemática deben realizarse, como mínimo, en la combinación de cuatro. Por ello, se optó por utilizar las siguientes fuentes de información: Scopus, una extensa base de datos de citas y resúmenes que abarca una amplia gama de revistas científicas, conferencias y libros a nivel global y regional, con un estricto proceso de selección para garantizar la calidad y relevancia de los datos; SpringerLink, una reconocida plataforma científica que ofrece contenido de alta calidad a investigadores académicos, instituciones científicas y empresas, proporcionando acceso a una vasta colección de libros, artículos de revistas y trabajos de conferencias; MDPI (Multidisciplinary Digital Publishing Institute), un instituto editorial líder en acceso abierto, conocido por su modelo de negocio basado en cargos por procesamiento de artículos, que garantiza la rápida publicación de investigaciones revisadas por pares y asegura la accesibilidad y difusión global de los resultados científicos sin restricciones; e IEEE Xplore, una fuente relevante de información que proporciona acceso a la literatura técnica y científica publicada por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), incluyendo artículos de revistas, actas de conferencias, normas técnicas y otros documentos importantes, siendo una referencia esencial para investigadores y profesionales en los campos de la ingeniería, informática y

tecnologías afines. La elección de estas fuentes de información garantiza una cobertura exhaustiva y de alta calidad de la literatura relevante, permitiendo una revisión sistemática rigurosa y bien fundamentada sobre la implementación de la realidad aumentada en los procesos industriales [17] [18] [19]. Primero, se realizó una búsqueda de artículos en las bases de datos desde el 2019 hasta el 2024. Se eligió este intervalo de tiempo porque la implementación de la realidad aumentada en procesos industriales ha avanzado exponencialmente en los últimos años, por lo que se consideró que seleccionar artículos que comprendan desde el 2019 hasta el 2024 es un periodo adecuado para analizar las aplicaciones, ventajas y desventajas de la realidad aumentada en la industria [20]. Este enfoque temporal permite capturar los desarrollos más recientes y relevantes en el campo. La búsqueda de documentos en las diversas bases de datos se llevó a cabo ingresando la siguiente combinación de términos específicos: ("augmented reality") AND ("industry" OR "industrial process" OR "manufacturing" OR "production" OR "Industrial") AND ("optimization" OR "Enhancement" OR "Improvement" OR "Maximization"). Estas palabras clave están directamente relacionadas con las preguntas de investigación, teniendo en cuenta que el enfoque de la revisión sistemática corresponde a las aplicaciones de la realidad aumentada en procesos industriales. Este proceso de búsqueda y selección de artículos es esencial para asegurar que la revisión sistemática incluya estudios relevantes y de alta calidad que aporten una comprensión integral de las implicaciones y beneficios de la realidad aumentada en los procesos industriales.

4.5. SELECCIÓN DE ARTÍCULOS

Para la selección de artículos, se utilizó el diagrama de flujo de la metodología PRISMA, el cual permite representar la información a través de las diferentes fases de una revisión sistemática. Esto incluye la cantidad de registros identificados, los artículos incluidos y excluidos, así como los motivos de las exclusiones. Este diagrama se dividió en tres fases: Identificación, selección e inclusión.

En la fase de identificación se encontraron 437 artículos en las cuatro bases de datos y editoriales, en el primer paso de esta fase se encontraron 23 artículos duplicados de los cuales quedaron 414 artículos para la fase de selección en esta fase como primer paso se eliminaron 306 artículos de acuerdo a la lectura de títulos y resúmenes, luego como segundo paso de la fase selección se analizaron los 108 artículos para eliminar 25 de acuerdo a los criterios de elegibilidad, indicados en la Tabla 4.

Tabla 4. Criterios de elegibilidad

Criterios de elegibilidad		
Abreviatura	Criterios	Descripción
CE1	Diseño del estudio.	Artículos relacionados con aplicaciones de la realidad aumentada en procesos industriales.
CE2	Idioma.	Únicamente fueron elegidos artículos redactados en inglés.
CE3	Rango de tiempo.	Se eligieron artículos publicados entre los años 2019 y 2024
CE4	Contribución significativa	Artículos que aporten sobre las aplicaciones de la realidad aumentada en la ingeniería mediante su implementación y obtención de resultados tangibles.

Además, como tercer paso de la fase de selección, se examinaron los 83 artículos restantes para eliminar 37 de acuerdo a su relevancia y perspectiva. Posteriormente, se evaluaron 46 artículos completos para su elegibilidad. De estos, se excluyeron 3 artículos debido a que no cumplían con el tipo de estudio adecuado para los propósitos de la revisión. Luego, mediante un análisis de "riesgo de sesgo Cochrane", que se refiere a la posibilidad de que los resultados de un estudio en una revisión sistemática sean distorsionados debido a ciertos factores, se evaluaron los sesgos potenciales en los estudios incluidos. Este proceso de selección rigurosa garantiza la calidad y fiabilidad de los estudios incluidos en la revisión sistemática. Los siete dominios de sesgos fueron adaptados a la revisión a cinco dominios por los investigadores estos dominios fueron:

- D1. Sesgo de criterios de inclusión: La inexactitud de los criterios de selección dará lugar a sesgos [20]. Según el objetivo de la investigación, este artículo delimita claramente el tema de estudio y el tipo de enfoque de revisión literaria, estableciendo así las palabras clave a buscar. Se establecen criterios, como el período y el idioma de búsqueda, para controlar cualquier sesgo potencial. En este dominio se ha decidido incluir artículos que a pesar que no están dentro del periodo de tiempo establecido son de alta relevancia para la investigación.

- D2. Sesgo de integridad de los datos: Se refiere a la completitud y la precisión de los datos recopilados durante la evaluación de los procesos industriales y si se aplicaron métodos para garantizar la objetividad y la validez de los resultados.
- D3. Sesgo de calidad metodológica: Evaluar la calidad metodológica de los estudios incluidos en la revisión, considerando aspectos como el diseño del estudio, el tamaño de la muestra, el cegamiento y otros elementos que puedan influir en la validez de los resultados específicamente en el contexto de la RA en procesos industriales.
- D4. Síntesis de la evidencia: Sintetizar los resultados de los estudios incluidos en la revisión de manera transparente y objetiva, considerando el riesgo de sesgo en la interpretación de los resultados. Esto implica una evaluación cuidadosa de la consistencia y la heterogeneidad entre los estudios, así como la consideración de posibles sesgos en la interpretación de los resultados. Permite identificar todos los componentes necesarios para juzgar el riesgo de sesgos en la presentación de informes para mejorar la credibilidad de las síntesis de evidencia .
- D5. Sesgo de experiencia del investigador: Permite identificar si él o los autores influyen en los resultados del estudio, de manera consciente o inconsciente en el resultado del estudio consciente o inconsciente del investigador a influir ya sea en el diseño del estudio o la interpretación de los datos, lo que puede afectar la validez de los resultados.

Utilizando la aplicación web Risk of Bias, diseñada para visualizar evaluaciones de riesgo de sesgo realizadas como parte de una revisión sistemática, se elaboró un gráfico de "Parcela de semáforo" de los juicios a nivel de dominio para cada artículo individual (ver Figura 1), lo que proporciona una representación visual clara del riesgo de sesgo. Además, esta herramienta permite generar gráficos de barras ponderadas que muestran la distribución de juicios de riesgo de sesgo dentro de cada dominio, como se muestra en la Figura 2, lo que facilita una comprensión más detallada y precisa de cómo se ha evaluado el riesgo de sesgo en cada aspecto de los estudios revisados [21]. Estas visualizaciones ayudan a los revisores y a los lectores a interpretar y comunicar de manera efectiva los resultados de la evaluación del riesgo de sesgo, facilitando así la toma de decisiones informadas en la investigación."

Study	Risk of bias domains					Overall
	D1	D2	D3	D4	D5	
(Alatawi et al., 2023)	+	+	+	+	+	+
(Ancione et al., 2023)	+	+	+	×	+	×
(Angelopoulos & Mourtzis, 2022)	+	+	+	+	+	+
(Avalle et al., 2019)	+	+	+	+	+	+
(Bavelos et al., 2024)	+	+	+	+	+	+
(Borro et al., 2021)	+	+	+	+	+	+
(Choi & Park, 2021)	+	+	+	+	+	+
(Computer Science and Engineering et al., 2019)	+	+	+	+	+	+
(Dorloh et al., 2023)	+	+	+	+	+	+
(Doshi et al., 2017)	-	+	+	+	+	-
(Dzeng et al., 2024)	+	+	+	×	+	×
(Eversberg & Lambrecht, 2023)	+	+	+	+	+	+
(Fani et al., 2023)	+	+	+	+	+	+
(Garcia et al., 2024)	+	+	+	+	+	+
(H. Kang et al., 2024)	+	+	+	+	+	+
(Havliková et al., 2023)	+	+	+	+	+	+
(Hořejší et al., 2020)	+	+	+	+	+	+
(J. A. Erkoyuncu et al., 2017)	-	+	+	+	+	-
(J. Erkoyuncu & Khan, 2020)	+	+	+	×	+	×
(Konstantinidis et al., 2020)	+	+	+	+	+	+
(Koteleva et al., 2020)	+	+	+	+	+	+
(Kouch et al., 2021)	+	+	+	+	+	+
(Kunkera et al., 2024)	+	+	+	+	+	+
(Kwon et al., 2021)	+	+	+	+	+	+
(Lai et al., 2020)	+	+	+	+	+	+
(Maffei et al., 2023)	+	+	+	+	+	+
(Maibach et al., 2022)	+	+	+	+	+	+
(Maio et al., 2023)	+	+	+	+	+	+
(Mao et al., 2023)	+	-	+	-	+	×
(Marino et al., 2024)	+	+	+	+	+	+
(Mourtzis et al., 2020)	+	+	+	+	+	+
(Ortega et al., 2021)	+	+	+	+	+	+
(Pham et al., 2022)	+	+	+	+	+	+
(Piardi et al., 2019)	+	-	+	-	+	×
(Pinto et al., 2020)	+	+	+	+	+	+
(Rossi et al., 2020)	+	+	+	+	+	+
(Seeliger et al., 2023)	+	+	+	+	+	+
(Szajna et al., 2020)	+	+	+	+	+	+
(Wang & Qi, 2022)	+	+	+	+	+	+
(Win et al., 2022)	+	+	+	+	+	+
(Wu et al., 2024)	+	+	+	+	+	+
(Yi et al., 2021)	+	+	+	+	+	+
(Zywicki & Bun, 2021)	+	+	+	+	+	+

Figura 1. Parcela de semáforo.

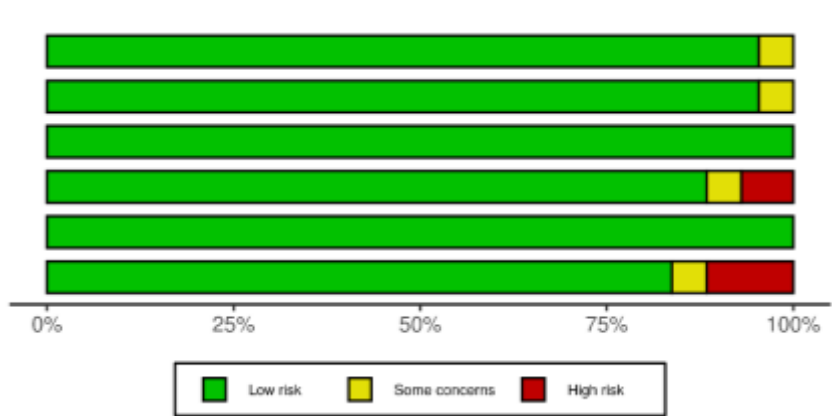


Figura 2. Diagrama de barras de sesgo Cochrane.

En esta etapa de eliminación por riesgo de sesgo, se eliminaron 5 artículos debido a su alto nivel de riesgo, ya que sus resultados podrían haber estado distorsionados. Sin embargo, 2 de ellos presentaban algunas preocupaciones menores ya que se encontraban fuera del CE3, aunque aún así se decidió incluirlos en la investigación debido a su relevancia para el tema en estudio. Después de haber realizado una selección rigurosa de los artículos, en la fase de inclusión quedaron 38 seleccionados para la investigación, tal como se muestra en la Figura 3, representando así un conjunto robusto y adecuado de estudios para el análisis y la interpretación de los resultados.

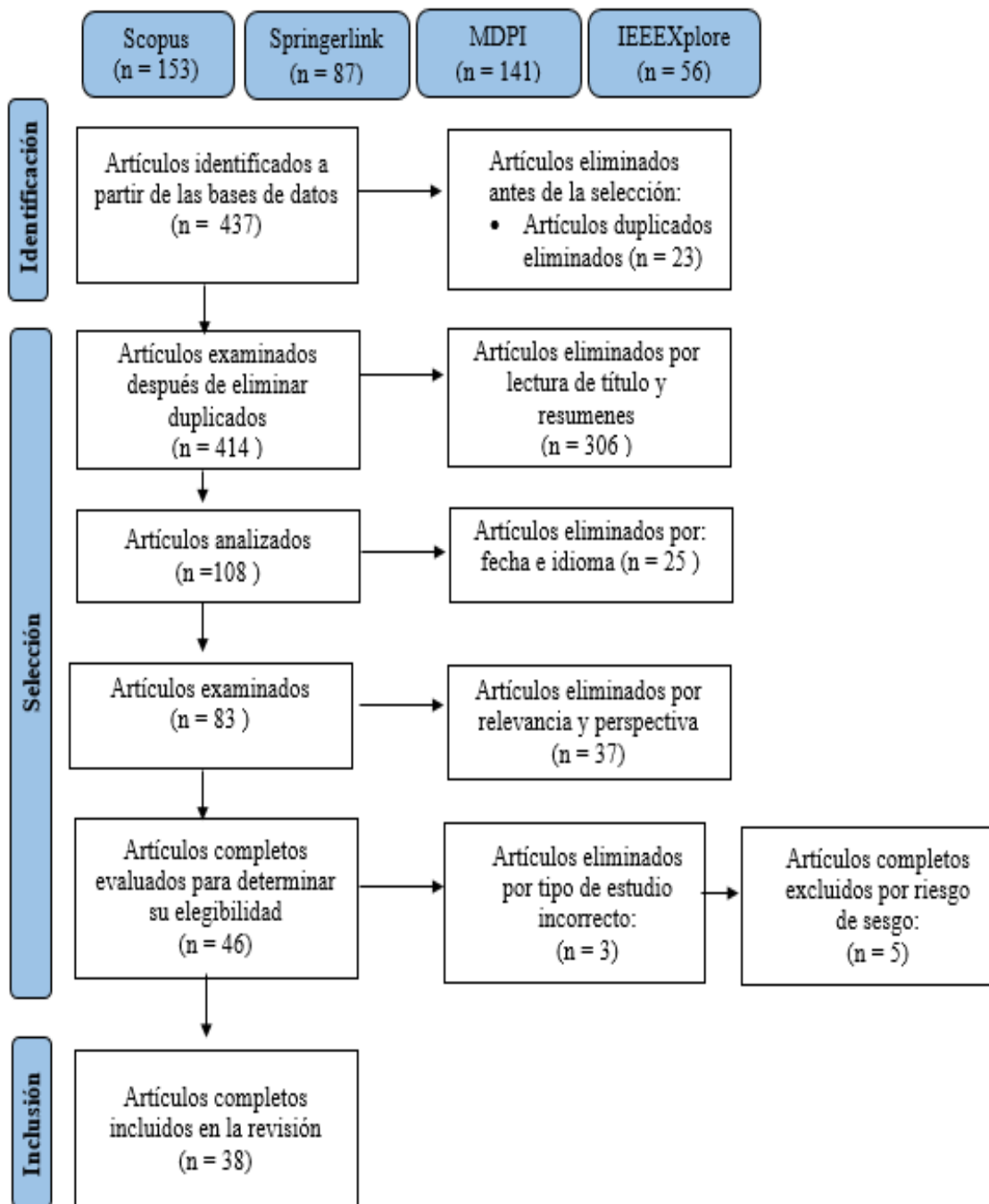


Figura 3. Diagrama de flujo PRISMA.

Se llevó a cabo un análisis exhaustivo de la co-ocurrencia de todas las palabras incluyendo el abstracto resumen en cada documento utilizando VOSviewer. Este enfoque permitió profundizar en la comprensión de qué términos específicos identifican a cada artículo y cuáles de ellos son los más relevantes en el contexto de la investigación. Entre las palabras clave principales identificadas se destacan “realidad aumentada”, “mantenimiento”, “Internet de las cosas” e “Industria 4.0”, lo que subraya la importancia de estos conceptos en el cuerpo de literatura revisada. Este análisis proporciona una visión detallada y matizada de los temas y enfoques abordados en los documentos seleccionados, lo que enriquece nuestra comprensión general del campo de estudio y nos orienta hacia áreas de interés específicas para explorar en mayor profundidad. Además, con este análisis se corrobora que la selección final de artículos fue adecuada.

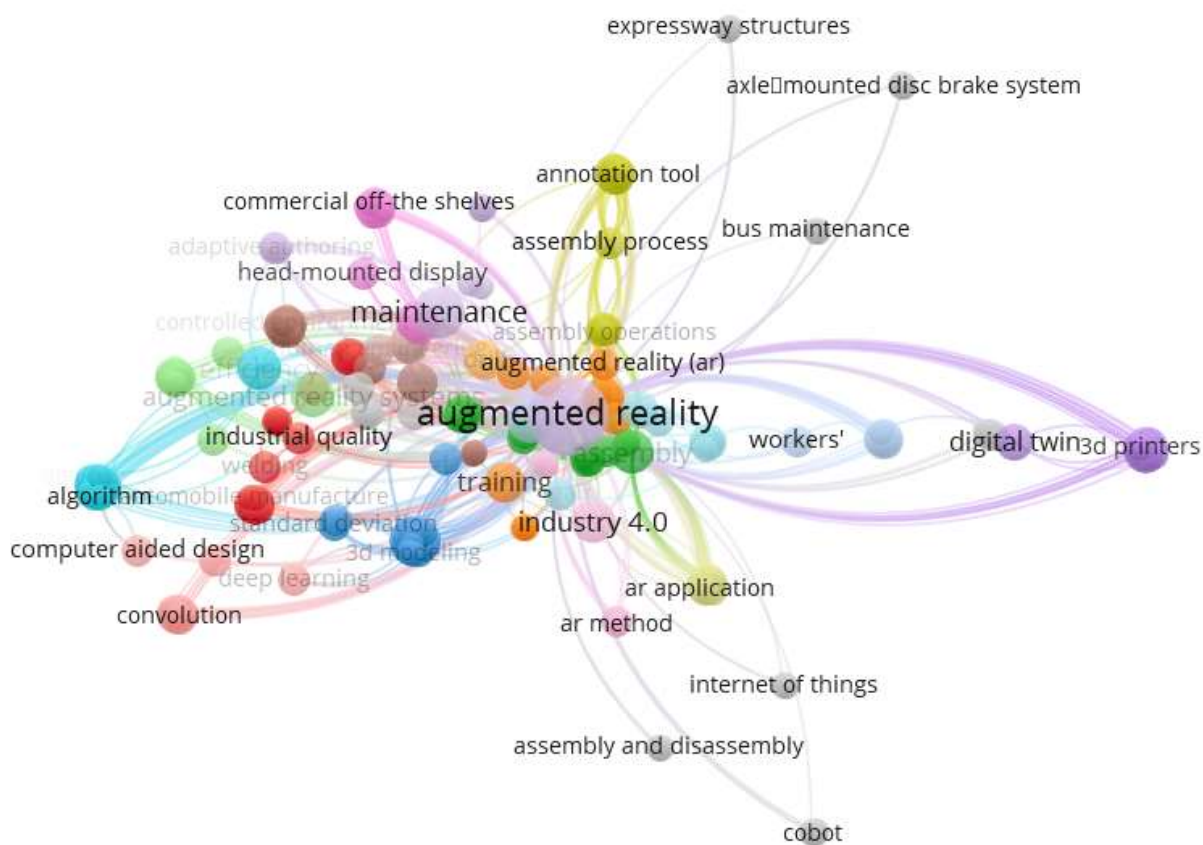


Figura 4 de VOSviewer muestra un análisis de coocurrencia de términos, agrupándolos en diferentes clusters que representan temas de investigación relacionados entre sí. Cada color indica un clúster diferente, y la densidad de las conexiones muestra la frecuencia con la que estos términos aparecen juntos en la literatura. El Clúster 1 de color rojo incluye términos como "augmented reality," "efficiency," "industrial quality," "human engineering," y "maintenance", centrado en la realidad aumentada y su aplicación en la ingeniería industrial para mejorar la

calidad y eficiencia. El clúster verde contiene términos como "computer aided design," "deep learning," y "standard deviation," y se relaciona con el uso de tecnologías avanzadas y técnicas de aprendizaje automático en el diseño y la fabricación. El clúster azul claro incluye términos como "assembly," "workers," y "digital twin," enfocándose en los procesos de ensamblaje y la implementación de tecnologías digitales para mejorar el trabajo y la producción. Las conexiones entre los términos de diferentes clústeres indican que hay coincidencias en los temas de investigación. Por ejemplo, términos como "augmented reality" se conectan con múltiples clústeres, sugiriendo su amplia aplicación en varias áreas de investigación.

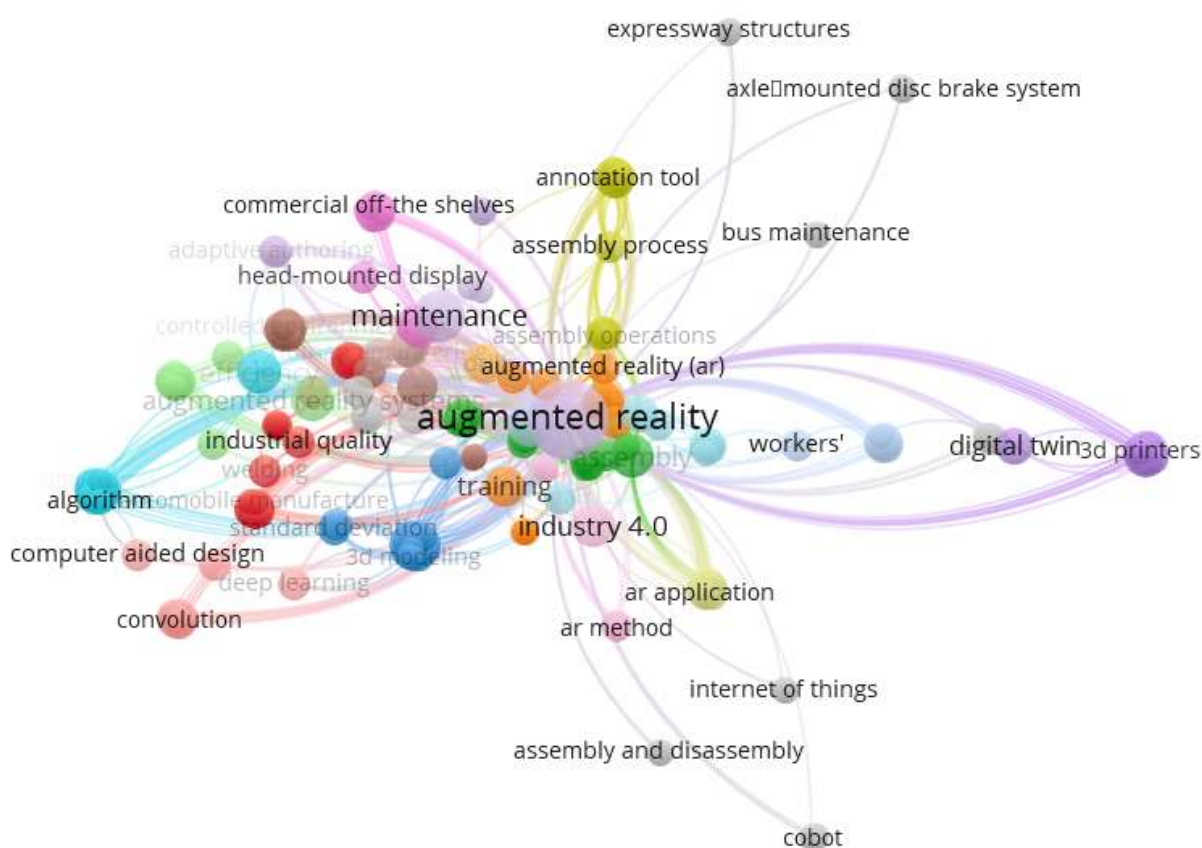


Figura 4. Análisis de co-ocurrencia de palabras clave.

A continuación, en la Figura 5 muestra una red de co-ocurrencia de términos generados por VOSviewer. Este tipo de red muestra cómo los términos de los artículos académicos están interrelacionados. Los nodos representan términos específicos y las líneas que los conectan indican co-ocurrencia entre ellos. La imagen muestra múltiples clústeres de términos, cada uno representado por un color diferente, indicando grupos de términos que tienden a aparecer juntos en los mismos artículos. El cluster rojo se centra en términos relacionados con "augmented

reality" y su aplicación en diversos contextos como mantenimiento, eficiencia y ensamblaje. El cluster azul agrupa términos que parecen estar más relacionados con la tecnología, desarrollo y componentes específicos de la realidad aumentada.

El cluster verde incluye términos que parecen estar relacionados con el rendimiento de tareas, sistemas de asistencia y aplicaciones manuales de la realidad aumentada y el cluster amarillo muestra una concentración de términos relacionados con precisión y exactitud, en el contexto de aplicaciones de realidad aumentada. La red fue realizada con un mínimo de coocurrencia de tres términos del resumen.

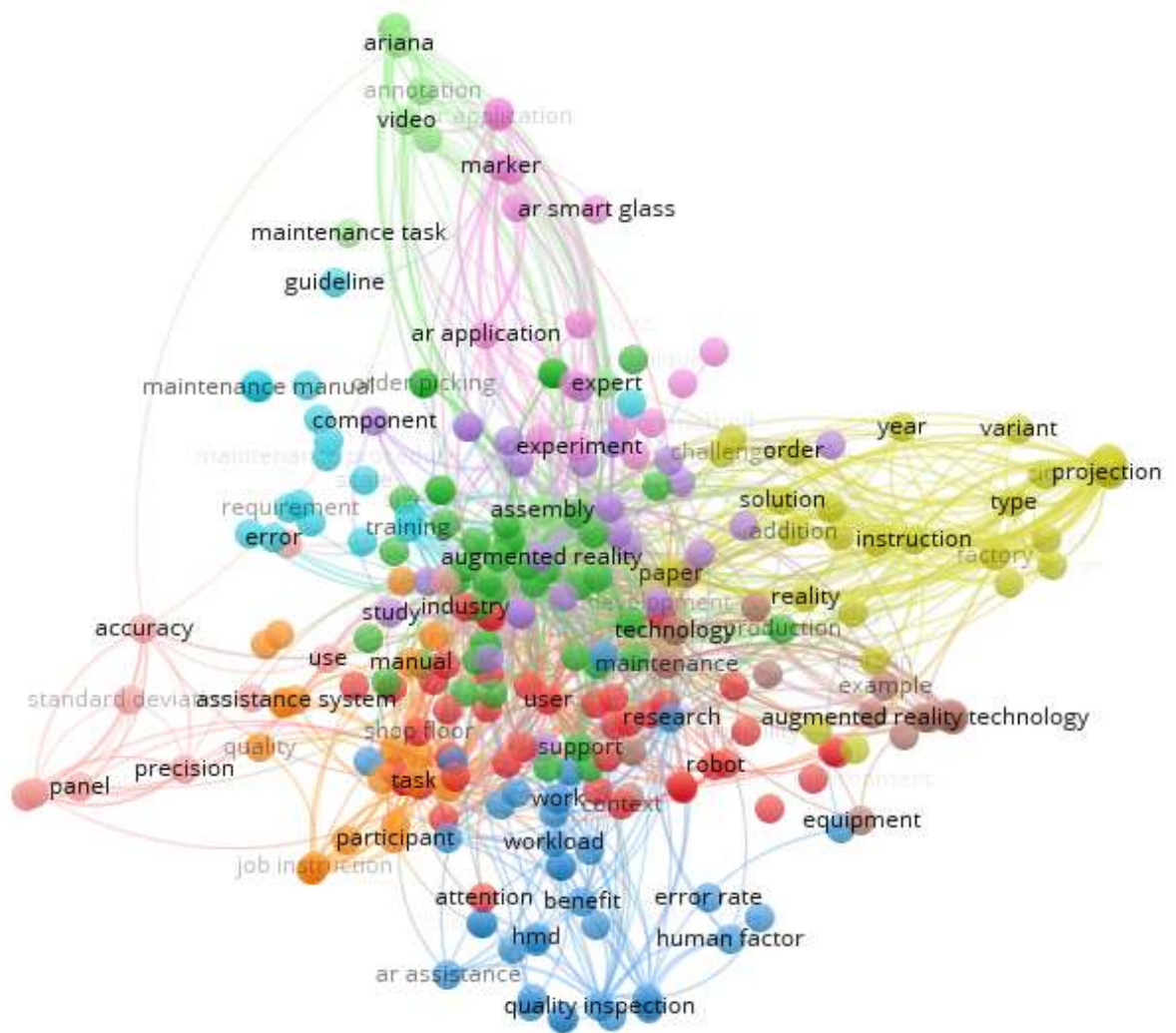


Figura 5. Análisis de co-ocurrencia de términos del resumen.

La Figura 6 de VOSviewer muestra un análisis de co-ocurrencia de autores, agrupándolos en dos clusters principales, representados por colores rojo y verde. El cluster rojo incluye a los autores alcañiz, m.; ivorra, e.; juan, a.; martínez, j.; ortega, m.; y venegas, p. Este clúster muestra una red densa de colaboraciones, sugiriendo que estos autores frecuentemente trabajan juntos o en temas muy relacionados, destacándose ortega, m. e ivorra, e. como nodos centrales con muchas colaboraciones. El cluster verde incluye a los autores alcañiz, m.l.; contero, m.; garcía, c.; y mora, p. Aunque también muestra conexiones significativas, es menos denso que el clúster rojo, lo que puede indicar un número menor de colaboraciones, con alcañiz, m.l. y mora, p. como nodos más importantes. Existen conexiones entre los clústeres, evidenciando colaboraciones entre autores de diferentes grupos, como ortega, m. del clúster rojo, que tiene conexiones con autores del clúster verde, sugiriendo proyectos o estudios en común entre estos grupos de investigación.

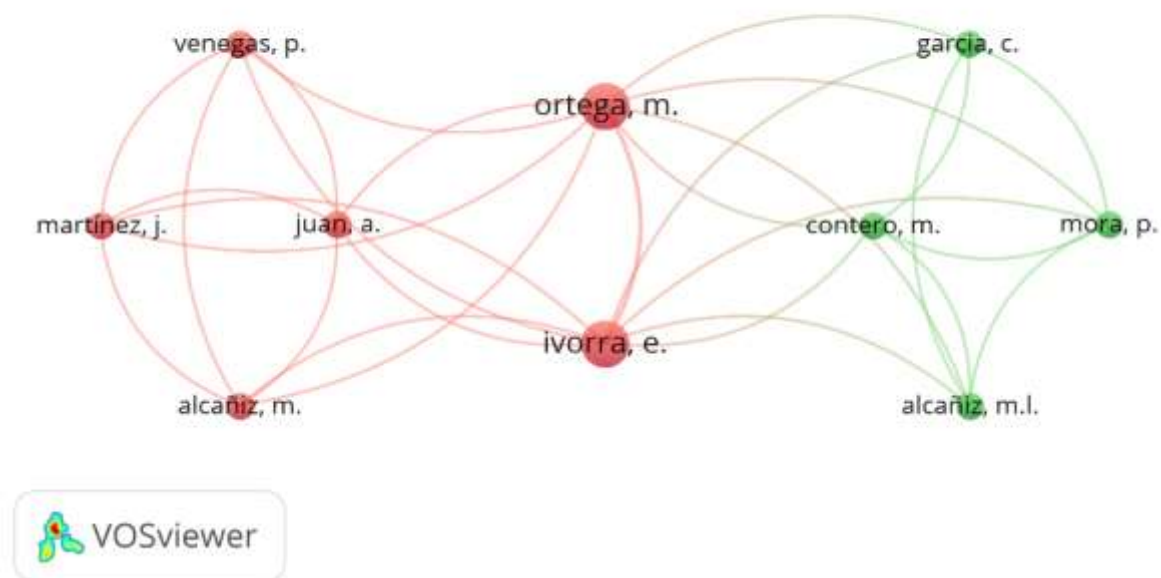


Figura 6. Análisis de co-ocurrencia de autores.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

La Tabla 5 presenta una recopilación de diversas aplicaciones de la RA distintos procesos industriales. Cada entrada incluye el título del artículo, una descripción del proceso industrial en cuestión, cómo se implementó la RA, así como los beneficios y limitaciones observados. Esta información proporciona una visión integral de las ventajas y desafíos asociados con el uso de RA para la optimización de procesos industriales.

Tabla 5. Aplicación de RA en Procesos Industriales.

Aplicación de la RA en Procesos Industriales						
Cita	Título	Sector	Proceso	Descripción de la aplicación de RA	Beneficios	Limitaciones
[22]	A Multi-User Collaborative AR System for Industrial Applications	Metalmecánica	Diseño	<p>Mucsys es un sistema que proporciona servicios de RA para diversos procesos industriales a través de tres componentes colaborativos: Mucstudio, que genera escenas; Mucview, que brinda experiencias de RA mediante el seguimiento de una cámara para detección de colisiones, edición de objetos, carga de datos, edición de anotaciones y representación de objetos virtuales y Mucserver, que gestiona bases de datos y servicios colaborativos. En el diseño de corte CNC, Mucsys permite transformar el modelo CAD del cabezal de corte al formato "obj" para su visualización y determina la posición relativa entre el cabezal de corte y el marcador. Los datos del sensor se vinculan al modelo del cabezal de corte, y el diseñador imprime y coloca el marcador en la ubicación correspondiente usando Mucstudio. Finalmente, para verificar el diseño del modelo, Mucview representa el modelo CAD virtual en la máquina real.</p>	<p>El sistema de RA permite identificar y evitar errores, reducir el tiempo y los costos, y disminuir la cantidad de prototipos físicos mediante la tecnología de RA. Esta tecnología ayuda de manera eficiente a los operadores a comprender los procedimientos de diseño al superponer información e instrucciones virtuales en el entorno real.</p>	<p>La principal dificultad de implementar el sistema radica en la curva de aprendizaje en la cual los operadores y diseñadores pueden necesitar tiempo y capacitación para familiarizarse con las herramientas y técnicas necesarias para utilizar el sistema de manera efectiva.</p>

[23]	A Smart Factory in a Smart City: Virtual and Augmented Reality in a Smart Assembly Line	Mamufactura	Mantenimiento y Montaje	La RA permite proporcionar instrucciones animadas en 3D que ayudan a los trabajadores a realizar tareas de montaje y mantenimiento, mediante la proyección de la información directamente en el lugar de trabajo mediante un proyector instalado encima de la tarea. Esta técnica permite que las instrucciones se visualizan directamente sobre el objeto o área de trabajo permitiendo a los operadores realizar el proceso de manera efectiva.	Reducción significativa de la tasa de error. Reducción de tiempos en las realización de tareas	Los dispositivos portátiles requieren demasiada potencia computacional.
[24]	An Augmented Reality Assisted Order Picking System using iot	Logístico	Preparación de pedidos.	El sistema RASPICK tiene dos componentes: un dispositivo de RA montado en la cabeza y un sistema de gestión de almacenes basado en web. El recolector pone el dispositivo, que se conecta a Wi-Fi y descarga una lista de artículos a recoger. El dispositivo muestra una lista de artículos a recoger junto con la cantidad requerida de cada uno. El recolector utiliza la información proporcionada por el dispositivo para encontrar el pasillo correspondiente al artículo, identificado por una letra asignada que se muestra en la pantalla del dispositivo. Una vez que el recolector localiza el pasillo correcto, toca un sensor táctil en el costado del dispositivo para recibir el número de contenedor donde se encuentra el artículo. El dispositivo guía al recolector al pasillo y contenedor correctos, mostrando la cantidad necesaria de cada artículo. El recolector escanea el código QR del artículo recogido, y el sistema confirma la recolección. Este proceso se repite hasta completar la lista de recolección.	Permite que ambas manos del recolector permanezcan libres, El sistema también reduce la carga cognitiva general del recolector, lo que permite que el recolector sea más eficiente en su trabajo.	El sistema no puede trazar la secuencia de recolección más eficiente para que el seleccionador dedique el menor tiempo a viajar en sus recorridos de recolección

[25]	An Augmented Reality System for Operator Training in the Footwear Sector	Textil	Capacitación/ entrenamiento	El sistema utiliza gafas inteligentes Microsoft hololens, lo que permite a los usuarios interactuar con elementos tanto virtuales como del mundo real. La arquitectura del software comprende tres capas: interfaz, gestión y datos. La capa de interfaz permite a los alumnos y usuarios acceder al contenido de la capacitación a través de una interfaz intuitiva, mediante comandos de voz o gestos. La capa de gestión permite a los administradores y formadores organizar y gestionar actividades de formación, grupos de usuarios y materiales de formación, garantizando un proceso de formación eficiente y eficaz que minimice la interferencia con las actividades de producción diarias.	La capacitación puede realizarse en un entorno dedicado, minimizando la interrupción de las operaciones de producción diarias y mejorando la eficiencia general.	El costo inicial es elevado de la implementación de sistemas RA requiere inversiones significativas en hardware especializado y desarrollo de software adaptado a las necesidades específicas de cada proceso.
[26]	An Augmented Reality System to Support Fault Visualization in Industrial Robotic Tasks	Automatización	Gestión y diagnóstico de fallos	La RA se aplica en el proceso de diagnóstico y gestión de fallos en robots industriales. Utilizando el dispositivo Microsoft hololens, se desarrolló un sistema adaptativo de RA que muestra metáforas virtuales 3D en tiempo real, cerca de la ubicación de la falla del robot. Esta visualización dinámica permite a los técnicos identificar rápidamente los problemas, ya que los iconos de falla se posicionan de manera que siempre sean visibles y no queden ocultos por el manipulador.	La modalidad adaptativa de RA permite a los usuarios reconocer fallos más rápido y con menos movimientos, mejorando la eficiencia y reduciendo el tiempo de inactividad del robot.	El estrecho campo de visión del dispositivo hololens puede limitar la cantidad de información visible simultáneamente, lo que puede dificultar la percepción completa de los iconos de falla en algunas situaciones.

[27]	An Intelligent Product Service System for Adaptive Maintenance of Engineered-to-Order Manufacturing Equipment Assisted by Augmented Reality	Mammanufactura	Inspección y mantenimiento	En el mantenimiento y la inspección de moldes de inyección, la RA se utiliza para proporcionar instrucciones interactivas durante el proceso de mantenimiento. Esto incluye guías visuales para el montaje y desmontaje de componentes, así como pruebas de inspección facilitadas por algoritmos de precedencia implementados. Los técnicos pueden acceder a estas instrucciones de RA a través de dispositivos equipados con códigos QR únicos, que permiten la visualización del estado del molde mediante un sistema de codificación por colores (verde, amarillo y rojo), indicando la condición de los componentes de manera rápida y clara.	La RA permite una visualización precisa y guiada de los procedimientos, lo que puede reducir los errores humanos y aumentar la eficiencia del proceso de mantenimiento.	La implementación inicial de sistemas de RA puede ser costosa, especialmente la instalación y configuración de infraestructuras como redes de sensores inalámbricos (WSN) para monitoreo en tiempo real.
[28]	ARiana: Augmented Reality Based In-Situ Annotation of Assembly Videos	Fabricación e ingeniería.	Anotación de in situ	ARiana, una herramienta portátil de anotación de vídeo in situ basada en realidad aumentada que guía a los expertos de campo para crear anotaciones de manera eficiente mientras realizan las tareas de montaje o mantenimiento. Ariana tiene tres características clave que incluyen el conocimiento del contexto habilitado por la interacción mano-objeto, la interacción multimodal para la anotación sobre la marcha y la guía audiovisual en tiempo real habilitada por la descarga de borde.	Reduce la necesidad de comunicaciones adicionales entre los trabajadores de campo y los anotadores, mejorando así la eficiencia del proceso de anotación de video.	La creación de modelos 3D interactivos y la implementación de tecnologías de RA pueden ser costosas y requerir una inversión significativa en tiempo y dinero.

[29]	Assessing user performance in augmented reality assembly guidance for industry 4.0 operators	Manufacturero	Montaje/ensamblaje	En el proceso de ensamblaje, la RA se aplica de manera efectiva mediante una herramienta de guía que proporciona a los usuarios una visualización virtual detallada y en tiempo real de los procedimientos de ensamblaje. Esto permite a los trabajadores realizar las tareas con mayor precisión y eficiencia, independientemente de su nivel de experiencia previa. La RA facilita una comprensión intuitiva de la posición y orientación de los componentes, reduce la ambigüedad y mejora la coordinación entre las acciones físicas y las instrucciones visuales.	La RA tiene el potencial de mejorar el rendimiento del ensamblaje al reducir los errores y el tiempo necesario para las tareas de ensamblaje, lo que garantiza una carga mental muy baja.	La efectividad de la RA puede depender significativamente de la calidad y compatibilidad de los dispositivos de hardware utilizados, lo que puede resultar en costos adicionales para empresas o usuarios individuales que deseen implementar esta tecnología.
[30]	Assessment of Augmented Reality in Manual Wiring Production Process with Use of Mobile AR Glasses	Automatización	Montaje/ensamblaje	El sistema de RA desarrollado para el proceso de ensamblaje y producción de cables en armarios de control ha demostrado ser un dispositivo de asistencia eficaz. Este sistema, equipado con gafas de RA, funciona en línea identificando los elementos del entorno y proporcionando apoyo significativo al operador en la línea de ensamblaje. Mediante el reconocimiento automático de unidades y la provisión de datos apropiados, el sistema facilita el cableado de los gabinetes de control, mejorando la eficiencia y precisión del proceso.	El sistema RA reduce el tiempo de inactividad en caso de avería. Esto se logra mediante la provisión de información contextual y significativa automáticamente a mano, permitiendo un mantenimiento más rápido y eficiente de los gabinetes de control.	La implementación de sistemas de realidad aumentada implica un costo inicial significativo en términos de hardware y desarrollo de software.

[31]	Augmented reality for industrial quality inspection: An experiment assessing task performance and human factors	Fabricación	Inspección y control de calidad	La aplicación de la RA en este contexto se centra en optimizar la inspección de calidad industrial mediante el HMD (head mounted display) hololens 2. Utilizando modelos 3D e imágenes 2D, RA permite detectar y resaltar posibles defectos en productos físicos mediante señales visuales proyectadas directamente sobre el objeto inspeccionado. El sistema RA no solo facilita el seguimiento preciso del producto en tiempo real, ajustándose automáticamente a movimientos y giros, sino que también mejora la eficiencia al agrupar y visualizar de manera clara las áreas problemáticas. Con soporte para interacción multimodal, este enfoque innovador no solo incrementa la precisión en la detección de defectos, sino que también agiliza el proceso de inspección, mejorando así la calidad final del producto y la eficiencia operativa en entornos industriales.	El uso de un HMD de RA para el control de calidad industrial puede reducir significativamente e el tiempo de finalización de la tarea, así como el número de errores en las tareas	La implementación de sistemas de RA implica un costo inicial significativo en términos de hardware y desarrollo de software. Esto puede ser una barrera para las empresas que no están dispuestas a realizar una inversión inicial alta.
[32]	Augmented Reality System and Maintenance of Oil Pumps	Petrolero	Mantenimiento	La RA se emplea de manera efectiva en el mantenimiento de bombas mediante la visualización interactiva de procedimientos. En el estudio, se utilizó un modelo físico de una unidad de demostración de transferencia de aceite que incluye bombas centrífugas eléctricas verticales Grundfos. La RA facilita la creación de algoritmos para el desmontaje y montaje de las bombas, optimizando así los procedimientos de mantenimiento, lo que agiliza los procesos de mantenimiento al proporcionar visualizaciones precisas y guiadas, sino que también contribuye a la estandarización y mejora continua de los procesos.	Reducción del tiempo requerido para llevar a cabo el mantenimiento. Esto se logra mediante la visualización guiada de las acciones necesarias, lo que optimiza el proceso y minimiza errores,	Aunque la RA puede mejorar la experiencia del usuario una vez que se domina, puede requerir tiempo y capacitación adicional para que los trabajadores se familiaricen con la tecnología y aprendan a usarla de manera efectiva.

[33]	<p>Augmented Reality-Assisted Deep Reinforcement Learning-Based Model towards Industrial Training and Maintenance for nanodrop Spectrophotometer</p>		<p>Mantenimiento y capacitación/entrenamiento</p>	<p>El sistema propuesto utiliza un modelo basado en aprendizaje por refuerzo profundo asistido por RA. Esto implica que se utiliza un modelo de aprendizaje automático para ayudar a guiar a los trabajadores durante las tareas de mantenimiento y capacitación. La RA se integra con este modelo para proporcionar instrucciones claras y fácilmente comprensibles para los operadores de mantenimiento mediante sus dispositivos. El proceso comienza con el escaneo de una imagen o modelo del objeto objetivo. Luego, se extraen y comparan características para determinar su posición y orientación en el entorno. Esto se combina con la acción del operador para generar una visualización 3D en la pantalla del dispositivo. El algoritmo de aprendizaje por refuerzo se utiliza para mejorar la localización y el seguimiento de objetos en el sistema.</p>	<p>Mejora la eficiencia del proceso y reduce los costos en tareas de capacitación y mantenimiento industrial. El sistema ofrece oportunidades para mejorar continuamente el rendimiento lo que puede llevar a mejoras significativas en el rendimiento del sistema con el tiempo.</p>	<p>El sistema requerirá mantenimiento continuo y actualizaciones para garantizar su rendimiento óptimo, lo que puede requerir recursos adicionales y tiempo.</p>
------	--	--	---	--	---	--

[34]	Augmented reality-based method for road maintenance operators in human-robot collaborative interventions	Infraestructura vial	<p>Mantenimiento</p> <p>La aplicación de la realidad aumentada RA en el proceso de mantenimiento de carreteras permite mejorar significativamente la seguridad y la eficiencia operativa. La metodología propuesta integra un conjunto de herramientas de RA que proporciona visualizaciones en tiempo real, instrucción interactiva y colaboración entre humanos y robots (HRC). En un entorno dinámico y peligroso, como el mantenimiento de carreteras, los operadores reciben información actualizada sobre áreas seguras y eventos en su entorno inmediato y ampliado. Las instrucciones detalladas, que incluyen modelos 3D, imágenes y texto, guían a los operadores en cada paso del proceso, permitiendo una ejecución precisa y rápida de las tareas. Además, la colaboración con robots, controlados a través de interfaces RA, facilita la realización de tareas complejas, como la instalación de barreras de seguridad y el sellado de grietas, reduciendo la exposición a riesgos y mejorando la eficiencia del trabajo. Este enfoque no solo mejora la productividad y la precisión, sino que también minimiza el tiempo que los operadores pasan en entornos peligrosos, contribuyendo así a una mayor seguridad en las operaciones de mantenimiento de carreteras.</p>	<p>Mejora de la eficiencia del proceso la RA proporciona instrucciones visuales directamente superpuestas sobre el entorno físico, lo que facilita y agiliza el proceso de ejecución de tareas como la instalación de barreras de seguridad o el sellado de grietas en carreteras permitiendo reducir errores.</p>	<p>El costo inicial es elevado en la implementación de sistemas de RA requiere inversiones significativas en hardware especializado y desarrollo de software adaptado a las necesidades específicas de cada aplicación.</p>
------	--	----------------------	--	--	---

[35]	Data Mining and Augmented Reality: An Application to the Fashion Industry	Moda	Control de calidad	<p>La RA ofrece un soporte diferencial tanto a expertos como aprendices en el acelerado proceso de control de calidad en la industria de la moda. En primer lugar, se utiliza para visualizar el tamaño de muestra actualizado para la orden de control seleccionada, redefiniendo estratégicamente las reglas de muestreo. Además, permite mostrar las áreas a controlar de manera secuencial en la pantalla, organizadas según la detección de defectos. Los controladores tienen acceso directo a la descripción del conjunto de control con solo hacer clic en el ícono correspondiente en la interfaz. Por otra parte, en el sitio físico, los trabajadores pueden utilizar gafas de RA o dispositivos móviles para superponer planos de construcción e instrucciones, facilitando así el montaje y la colocación precisa de los componentes.</p>	<p>Al proporcionar datos y visualizaciones precisas en tiempo real, la RA reduce los errores en la construcción y ayuda a mantener la alineación con las especificaciones del diseño.</p>	<p>Puede existir resistencia por parte de los trabajadores y las partes interesadas que están acostumbrados a métodos tradicionales y pueden ser reacios a adoptar nuevas tecnologías.</p>
[36]	Design of Augmented Reality Training Content for Railway Vehicle Maintenance Focusing on the Axle-Mounted Disc Brake System	Ferroviario	Mantenimiento	<p>La RA se aplica en el mantenimiento de vehículos ferroviarios al desarrollar contenido de capacitación que visualiza procedimientos de mantenimiento en un espacio tridimensional (3D). Utilizando dispositivos móviles como tabletas o teléfonos inteligentes, los operadores de mantenimiento pueden acceder a manuales de mantenimiento interactivos y detallados que proyectan imágenes virtuales sobre el entorno real. Estos manuales en RA incluyen señales de advertencia para procedimientos riesgosos y permiten a los operadores controlar la posición, escala y rotación de modelos 3D mediante gestos táctiles. Esto proporciona una experiencia de capacitación inmersiva y práctica que mejora la comprensión y la competencia en el mantenimiento de componentes críticos como los sistemas de frenos de disco montados en el eje.</p>	<p>La RA permite a los operadores visualizar y practicar procedimientos de mantenimiento complejos en un entorno controlado y seguro, reduciendo el error humano y permitiendo una formación más rápida y efectiva.</p>	<p>La creación de modelos 3D interactivos y la implementación de tecnologías de RA pueden ser costosas y requerir una inversión significativa en tiempo y dinero.</p>

[37]	Development of Augmented Reality Application for Onsite Inspection of Expressway Structures Using Microsoft hololens	Infraestructura vial	Inspección	<p>La RA se aplica en el proceso de inspección de estructuras de autopistas mediante la utilización de la aplicación Arinspector, desarrollada para el dispositivo Microsoft Hololens de primera generación. Durante las actividades de inspección, el sistema de RA permite a los inspectores realizar tareas de inspección sin necesidad de usar las manos, superponiendo información relevante como el historial de la autopista, dibujos técnicos, informes de inspecciones previas y manuales de especificaciones y estándares sobre la escena real mientras el inspector visualiza la estructura de la autopista. Esto facilita la realización de inspecciones detalladas y precisas, optimizando el tiempo y los recursos empleados en el proceso.</p>	<p>Mejora de la comunicación y gestión de datos con bases de datos en línea ya que al utilizar la aplicación, los inspectores de autopistas pueden enviar datos a la base de datos en línea en tiempo real, donde todos pueden acceder, editar y compartir con otras personas relevantes.</p>	<p>Aunque el ahorro de tiempo y recursos en las inspecciones diarias puede justificar la inversión a largo plazo, el costo inicial puede ser una barrera significativa para la adopción inmediata de esta tecnología, especialmente para organizaciones con presupuestos limitados.</p>
[38]	Development of Augmented Reality System for Productivity Enhancement in Offshore Plant Construction	Ingeniería marina	Inspección y fabricación	<p>El sistema de RA en el proceso mejora la fabricación e inspección al permitir ajustar la transparencia de las representaciones 3D para comparar fácilmente el diseño CAD con las piezas reales, visualizar sólo las disciplinas relevantes para evitar confusión, ajustar el campo de visión para inspeccionar partes ocultas en entornos complejos y facilitar el acceso y la comparación de planos y datos CAD mediante la selección de piezas en la pantalla, mejorando así la precisión y eficiencia en la instalación e inspección.</p>	<p>Mejora de la Productividad y Eficiencia: La RA permite a los trabajadores de la construcción de plantas marinas visualizar información crucial, como los diseños CAD y las instrucciones de instalación, directamente en su campo de visión</p>	<p>Capacitación y curva de aprendizaje: Aprender a usar la RA eficazmente puede llevar tiempo y esfuerzo. Esto puede requerir capacitación adicional para los trabajadores, especialmente aquellos menos familiarizados con tecnologías avanzadas.</p>

[39]	Development of Augmented Reality Technology Implementation in a Shipbuilding Project Realization Process		Montaje/ensamblaje y reparación	<p>La implementación de realidad aumentada RA en el proceso de equipamiento naval ofrece múltiples beneficios significativos. Primero, automatiza el registro digital del inicio y fin de las actividades de trabajo mediante dispositivos inteligentes y códigos QR, permitiendo una gestión precisa del tiempo y la productividad al registrar quién realiza cada tarea y por cuánto tiempo. Además, los objetos virtuales 3D proyectados sobre el entorno real facilitan a supervisores y gerentes monitorear visualmente el progreso de las actividades de montaje, generando informes diarios en tiempo real para comparar el avance con las horas estándar planificadas, optimizando así la planificación y asignación de recursos. La RA también desempeña un papel crucial en la detección temprana de errores de montaje al identificar discrepancias antes de que se conviertan en costosas reparaciones, como cortes faltantes entre bloques, lo que potencialmente reduce significativamente los costos y tiempos de procedimiento.</p>	<p>Reducción de costos y tiempos al permitir la detección precoz de errores durante el montaje mediante RA previene problemas mayores en etapas posteriores, reduciendo significativamente los costos de reparaciones y retrabajos, así como los tiempos de inactividad relacionados.</p>	<p>La iluminación insuficiente y alta presencia de polvo, ralentizan y complican la inicialización y el seguimiento en el proceso, además puede existir resistencia al cambio en el proceso.</p>
------	--	--	---------------------------------	---	---	--

[40]	Dynamic Mixed Reality Assembly Guidance Using Optical Recognition Methods	Manufacturero	Montaje/ensamblaje	<p>La aplicación de RA desarrollada para este proceso tiene como objetivo guiar a los usuarios durante el ensamblaje de componentes utilizando las capacidades del hololens 2 y el motor de Vuforia. La aplicación de RA ofrece instrucciones visuales superpuestas directamente en el campo de visión del usuario, facilitando así una experiencia de montaje intuitiva y eficiente. Además, utiliza el seguimiento manual del hololens 2 para validar las acciones del usuario, asegurando que los componentes se seleccionan y posicionan correctamente en tiempo real. Esto se logra mediante la identificación y el seguimiento preciso de los objetos reconocidos por el sistema, permitiendo una mayor precisión y control durante el proceso de ensamblaje.</p>	<p>Permite el seguimiento manual para validar las acciones del usuario, asegurando que los componentes se seleccionan y posiciona correctamente en tiempo real, lo que reduce errores.</p>	<p>La implementación de tecnología de RA y sistemas de captura de movimiento puede ser costosa, incluyendo el hardware, software y la capacitación del personal.</p>
[41]	Effect of Augmented Reality Support on Quality Inspection of Welded Structures	Manufactura de estructuras metálicas	Inspección	<p>La RA se aplica en el proceso de control de calidad de soldaduras industriales, la RA se utiliza para guiar a los inspectores durante la inspección visual de las soldaduras. Esto se logra superponiendo información digital directamente sobre las piezas físicas, lo que permite a los inspectores comparar rápidamente las soldaduras con los estándares ideales y detectar posibles defectos de manera más eficiente. Además, permite la guía visual, la RA también ayuda en la interpretación de requisitos y en la evaluación de las piezas permitiendo facilitar el proceso de interpretación de requisitos al proporcionar indicaciones claras y directas sobre las características que deben cumplir las soldaduras.</p>	<p>Permite reducir el tiempo de inspección especialmente entre los inspectores menos experimentados, y una menor carga mental al permitir una comparación rápida entre las piezas inspeccionadas y el modelo ideal.</p>	<p>Las condiciones de iluminación pueden afectar la estabilidad de la visualización en algunos casos.</p>

[42]	Effectiveness on training method using virtual reality and augmented reality applications in automobile engine assembly	Automotriz	Capacitación/ entrenamiento	<p>La RA se utiliza de manera efectiva para mejorar la capacitación en el ensamblaje de motores. Se utilizó RA sin marcadores para permitir a los estudiantes interactuar con componentes virtuales en un entorno físico, utilizando gafas inteligentes. Esto facilitó la visualización y manipulación de partes del motor, mejorando la comprensión y ejecución de tareas complejas. Por otro lado, la RA con marcadores proporcionó orientación visual adicional durante el ensamblaje, mejorando la precisión y eficiencia en comparación con métodos tradicionales basados en video. Ambos enfoques ofrecieron una experiencia educativa más inmersiva y efectiva que los métodos convencionales.</p>	<p>La RA aumento la motivación y el rendimiento en el aprendizaje comparado con los métodos tradicionales basados en videos</p>	<p>El costo inicial y los recursos necesarios para desarrollar y desplegar el contenido de RA. La creación de modelos 3D interactivos y la implementación de tecnologías de RA pueden ser costosas y requerir una inversión significativa en tiempo y dinero.</p>
[43]	Evaluating digital work instructions with augmented reality versus paper-based documents for manual, object-specific repair tasks in a case study with experienced workers	Metalúrgico	Mantenimiento	<p>Se aplica la RA en la reparación de Álabes de Turbinas en la industria metalúrgica. Para ello en el proceso de reparación de álabes de turbinas, la RA proporciona instrucciones de trabajo digitales que son más intuitivas y accesibles en comparación con los métodos tradicionales basados en papel el sistemas de asistencia cognitiva (CAS) mejoran las capacidades cognitivas al proporcionar instrucciones de trabajo digitales. Estas instrucciones digitales pueden incluir modelos 3D de las piezas, diagramas interactivos y datos en tiempo real, todo lo cual ayuda a los trabajadores a comprender mejor las tareas y a reducir la posibilidad de errores. La RA permite una visualización detallada y clara de los componentes de las turbinas, facilitando la identificación y reparación de áreas problemáticas.</p>	<p>El sistema de asistencia basado en RA muestra toda la información necesaria de manera predeterminada. Esto asegura que los trabajadores no se salten pasos importantes, como la verificación de mediciones, mejorando así la precisión del trabajo.</p>	<p>Resistencia al cambio: Algunos trabajadores, especialmente aquellos con poca familiaridad con la tecnología, tienden a ignorar la RA basada en pantalla. Esto sugiere que, aunque la RA es poderosa, requiere tiempo y entrenamiento para que los usuarios se acostumbren a su uso.</p>

[44]	Holorailway: an augmented reality system to support assembly operations in the railway industry	Ferroviario	Mantenimiento y Montaje/ensamblaje	En el proceso de montaje de paneles aislantes en el sector industrial ferroviario, la RA se aplica de manera innovadora y efectiva a través del sistema Holorailway basado en el dispositivo de visualización HoloLens 2. Este sistema utiliza tecnologías avanzadas de visión por computadora para alinear automáticamente contenido virtual con componentes reales del vagón para que los trabajadores reciban instrucciones visuales precisas y en tiempo real sobre la ubicación y ensamblaje de los paneles, lo que simplifica el proceso y mejora significativamente la eficiencia en el montaje de paneles.	El sistema RA guía a los trabajadores con instrucciones visuales precisas y en tiempo real, lo que mejora la precisión del montaje y reduce el número de errores, además, elimina la necesidad de conocimientos previos extensos por parte de los operadores, lo que facilita la capacitación y reduce la curva de aprendizaje.	La implementación de sistemas de realidad aumentada como HoloLens 2 implica un costo inicial significativo en términos de hardware y desarrollo de software. Esto puede ser una barrera para las empresas que no están dispuestas a realizar una inversión inicial alta.
[45]	Improving efficiency of industrial maintenance with context aware adaptive authoring in augmented reality	Productivo	Mantenimiento	Mediante el uso de tecnología de RA, los técnicos pueden acceder a información contextualizada y visualizada en tiempo real sobre los equipos y componentes específicos que están reparando o manteniendo. Esta información incluye guías paso a paso, animaciones superpuestas en los dispositivos físicos y datos relevantes del equipo, lo cual facilita la comprensión y ejecución de las tareas de manera más eficiente. Además, la RA permite una mejor gestión de datos adaptativa, ajustándose dinámicamente a las necesidades específicas del usuario final, lo que contribuye a una mayor precisión y rapidez en la ejecución de las actividades de mantenimiento.	La RA mejora la eficiencia del mantenimiento al proporcionar información contextualizada y visual en tiempo real, lo que facilita la comprensión de las tareas y reduce el tiempo necesario para completarlas.	La implementación de sistemas de realidad aumentada implica un costo inicial significativo en términos de hardware y desarrollo de software.

[46]	Integrated Augmented and Virtual Reality Technologies for Realistic Fire Drill Training	Seguridad y emergencia	Capacitación/entrenamiento	<p>Se utiliza la RA en el entrenamiento contra incendios para proporcionar una experiencia de capacitación integral y realista que combina el mundo real y el virtual. Se implementa RA utilizando el dispositivo VIVE Pro HMD, que originalmente está dedicado a la RV, pero se aprovecha de sus funciones de realidad aumentada a través de su cámara estéreo incorporada. Se utiliza el SDK srworks para aprovechar las capacidades de la cámara estéreo, que incluyen percepción de profundidad y reconocimiento de objetos aproximados. Los modelos de inteligencia artificial (IA) se utilizan para reconocer información detallada sobre los objetos, como volumen y masa, y se emplean para generar efectos de incendios virtuales realistas en el cual se puede entrenar a operadores proporcionándoles una experiencia de entrenamiento más completa y versátil. .</p>	<p>La realidad aumentada proporciona un entorno de entrenamiento seguro y controlado donde los usuarios pueden practicar situaciones de emergencia sin riesgos reales.</p>	<p>La implementación de sistemas de realidad aumentada implica un costo inicial significativo en términos de hardware y desarrollo de software. Esto puede ser una barrera para las empresas que no están dispuestas a realizar una inversión inicial alta.</p>
[47]	MANTRA: An Effective System Based on Augmented Reality and Infrared Thermograph y for Industrial Maintenance	Fabricación	Mantenimiento	<p>MANTRA es una solución innovadora que combina RA con termografía infrarroja (IRT) para aplicaciones específicas en mantenimiento industrial. MANTRA automatiza la superposición de información virtual y datos de temperatura sobre objetos 3D en tiempo real mediante el uso conjunto de un sensor RGB-D y una cámara IRT. Este enfoque garantiza una alta precisión y robustez en las operaciones de mantenimiento al detectar y estimar la pose de objetos 3D con métodos avanzados como YOLOV4 para detección de objetos y LINEMOD para estimación de pose.</p>	<p>MANTRA facilita operaciones de mantenimiento más rápidas y precisas Y facilita la visualización de información crucial sin requerir que los técnicos aparten la vista del equipo o dispositivo que están reparando, lo que puede reducir errores y mejorar la seguridad.</p>	<p>La implementación de sistemas de realidad aumentada como MANTRA puede requerir una inversión inicial significativa en hardware y desarrollo de software especializado.</p>

[48]	MARMA: A Mobile Augmented Reality Maintenance Assistant for Fast-Track Repair Procedures in the Context of Industry 4.0	Fabricación	Mantenimiento y reparación	<p>MARMA es un sistema de RA que puede ubicar un componente en la planta de fabricación y visualizar las instrucciones de mantenimiento de los modos de falla correspondientes de manera portátil y vívida en el dispositivo móvil de los operadores. Una cámara actúa como entrada sensorial del sistema AR propuesto, registrando la actividad dentro de la planta industrial. En primer lugar, el activo de interés se detecta en el plano de la imagen, mientras que posteriormente, un algoritmo de seguimiento robusto es responsable de seguir la posición y escala del activo detectado para los fotogramas posteriores de la grabación. Según la posición calculada y los valores de escala, el CAD 3D del activo específico se proyecta en el plano de la imagen de una manera fácil de usar. Cuando el operador se acerca a la máquina, el sistema propuesto proporciona instrucciones sobre los primeros pasos del procedimiento de mantenimiento. Luego, el usuario controla fácilmente el sistema a través de botones adecuados que proceden a los pasos de mantenimiento anteriores o posteriores del activo.</p>	<p>Mejora del proceso al reemplazar las instrucciones en papel por instrucciones digitales, aprovechando las funciones RA para limitar los tiempos de recuperación.</p>	<p>La implementación de MARMA requiere hardware específico, como cámaras de alta calidad y dispositivos capaces de ejecutar aplicaciones RA lo que conlleva a un aumento de costos de implementación.</p>
------	---	-------------	----------------------------	--	---	---

[49]	Multimodal Mixed Reality Impact on a Hand Guiding Task with a Holographic Cobot	Manufacturero	Mantenimiento y reparación	<p>La RA en los procesos de interacción manual, especialmente en tareas de mantenimiento y reparación, se ha mostrado prometedora al combinar información virtual y real, mejorando significativamente la eficiencia y precisión. En el contexto de tareas de recoger y colocar, la implementación de sistemas basados en RA permite a los usuarios manipular objetos holográficos con una precisión de posicionamiento notable, manteniendo un margen de error por debajo de los 3 mm. La integración de retroalimentación táctil a través de actuadores hápticos en el aire mejora la sensación de control y la percepción física del holograma, proporcionando una experiencia más natural y familiar. Esto facilita a los usuarios la confirmación inmediata de sus acciones, reduciendo la demanda temporal y mejorando la ejecución de tareas complejas sin la necesidad de un aprendizaje extenso.</p>	<p>La RA permite una interacción intuitiva con objetos holográficos, reduciendo la necesidad de un aprendizaje extenso y permitiendo una ejecución más eficaz de tareas complejas.</p>	<p>Los sistemas de RA y los actuadores hápticos pueden requerir mantenimiento y actualizaciones frecuentes para garantizar un rendimiento óptimo.</p>
[50]	Pervasive Augmented Reality to support logistics operators in industrial scenarios: a shop floor user study on kit assembly	Logístico	Logística	<p>La RA ayuda a los operadores logísticos durante las tareas de preparación de pedidos en plantas industriales. Se utilizó una metodología de Diseño Centrado en las Personas (HCD) con socios del sector industrial para identificar las dificultades y desafíos de los operadores y definir los requisitos. A continuación, se desarrollaron dos métodos HMD y HHD (Handheld Device), que permiten configurar y visualizar contenido RA en el entorno industrial. En definitiva, se puede visualizar contenido virtual, lo que permite a los operadores saber cómo realizar las operaciones de picking, es decir, tener instrucciones paso a paso, que incluyen texto, imágenes y modelos 3D, sobre cómo montar un determinado kit.</p>	<p>La RA ofrece una experiencia más inmersiva, manteniendo la información RA directamente en el campo de visión del usuario, lo que puede mejorar la concentración y reducir el tiempo de búsqueda de información.</p>	<p>Los dispositivos HMD suelen ser más costosos en comparación con los dispositivos HHD, lo que puede ser una barrera para su adopción, especialmente en pequeñas y medianas empresas</p>

[51]	Presenting Job Instructions Using an Augmented Reality Device, a Printed Manual, and a Video Display for Assembly and Disassembly Tasks: What Are the Differences?	Fabricación	Montaje/ensamblaje La RA para presentar las instrucciones de las tareas. Este dispositivo abarca lentes holográficas transparentes. Los usuarios pueden ver tanto la instrucción virtual como los componentes de la computadora. Se adoptó la aplicación Dynamics 365 Guides. En hololens 2 para presentar las instrucciones del trabajo. El texto de cada paso tanto para las tareas de montaje como desmontaje se incorporó a la aplicación Dynamic 365. Se agrega círculos y cuadrados virtuales utilizando el kit de herramientas RA para resaltar las ubicaciones de los tornillos y las conexiones de los cables, respectivamente, a fin de proporcionar información complementaria. Cuando era necesario enchufar o desenchufar un cable, aparecía una mano virtual para resaltar la operación. También aparecieron manos virtuales cuando se requería empujar o tirar de un componente. Las manos virtuales desaparecen después de que el participante siguió esta instrucción. El participante puede hacer clic en una flecha virtual en la esquina superior derecha de la instrucción para ir al siguiente paso cuando haya completado un paso con su dedo índice.	Al proporcionar una representación visual en 3D de los componentes y procesos de montaje/desmontaje, la RA puede ayudar a los usuarios a comprender mejor las tareas que están realizando, lo que puede conducir a una ejecución más precisa.	Aunque la RA puede mejorar la experiencia del usuario una vez que se domina, puede requerir tiempo y capacitación adicional para que los trabajadores se familiaricen con la tecnología y aprendan a usarla de manera efectiva.
------	--	-------------	---	---	---

[52]	<p>Process monitoring of economic and environmental performance of a material extrusion printer using an augmented reality-based digital twin</p>	<p>Fabricación aditiva</p>	<p>Monitoreo</p>	<p>La RA se utiliza para desarrollar gemelos digitales destinados al monitoreo del proceso de una impresora de extrusión de materiales en la industria de la fabricación aditiva. La RA permite integrar elementos virtuales, como modelos 3D y datos de rendimiento, en el entorno físico del usuario en tiempo real, superponiéndolos sobre la vista del mundo real capturada por un dispositivo RA, o un HHD como un teléfono móvil o una tableta como Samsung Galaxy S21. La RA permite el monitoreo remoto del proceso de impresión desde cualquier ubicación con conectividad adecuada. Los usuarios pueden supervisar el progreso de la impresión, verificar parámetros y realizar ajustes en tiempo real sin estar físicamente presentes en la planta de fabricación.</p>	<p>Permite a los operadores y técnicos visualizar los modelos digitales de componentes y procesos de impresión directamente sobre la impresora 3D real o en la mesa de trabajo. Esto facilita una comprensión más clara de cómo se comportan los modelos digitales en comparación con el proceso físico real.</p>	<p>Los usuarios pueden necesitar tiempo y capacitación para familiarizarse con la tecnología de RA y utilizarla eficazmente, lo que puede retrasar la adopción y los beneficios iniciales.</p>
[53]	<p>Process of Materials Picking Using Augmented Reality</p>	<p>Logística</p>	<p>Preparación de pedidos.</p>	<p>La RA se utiliza para mejorar el proceso de preparación de pedidos al reducir el tiempo de búsqueda de información y mejorar la precisión. En el HMD solo se muestran los datos relevantes, lo que facilita la identificación de ubicaciones de almacenamiento y la verificación de las piezas necesarias. Los empleados utilizan dispositivos equipados con tecnología de RA, como gafas inteligentes o auriculares, que les permiten ver información digital superpuesta sobre el entorno físico en tiempo real. Esta información puede incluir detalles sobre las ubicaciones de almacenamiento de los materiales, las cantidades requeridas y cualquier otra instrucción relevante para el proceso de preparación de pedidos. Permite la identificación de ubicaciones de los materiales en el almacén.</p>	<p>Permite acortar el tiempo de finalización de los pedidos de recolección al reducir el tiempo de búsqueda y selección de los materiales por ende el proceso se realiza con mayor eficiencia.</p>	<p>La implementación de tecnologías de RA, incluidos los dispositivos HMD, puede ser costosa, lo que podría ser una barrera para pequeñas organizaciones.</p>

[54]	Real-Time Remote Maintenance Support Based on Augmented Reality (AR)	Manufacturero	Mantenimiento	<p>La RA en el proceso de mantenimiento permite a los técnicos de taller recibir asistencia remota en tiempo real de ingenieros expertos sin necesidad de su presencia física en el mismo lugar. Utilizando dispositivos como visores montados en la cabeza mediante el HMD, los técnicos pueden transmitir una transmisión de video en vivo del entorno de trabajo al ingeniero experto. Este, a su vez, puede guiar al técnico en la resolución de problemas a través de anotaciones y la superposición de contenido de RA directamente en el campo de visión del técnico. Esta interacción en tiempo real facilita una comprensión precisa del mal funcionamiento y permite la creación de contenido de RA específico a medida que se presentan los problemas, eliminando la necesidad de preparar escenarios de RA predefinidos.</p>	<p>Capacidad de reducir el tiempo medio de reparación (MTTR). Los ingenieros expertos pueden proporcionar asistencia inmediata y precisa a los técnicos de taller, lo que minimiza el tiempo de inactividad de las máquinas y mejora la eficiencia operativa.</p>	<p>Dependencia de una infraestructura tecnológica avanzada, que incluye dispositivos HMD y conexiones de red estables y de alta velocidad. Esto puede representar un desafío en entornos industriales con limitaciones tecnológicas</p>
[55]	Smart Augmented Reality Instructional System for Mechanical Assembly Towards Worker-Centered Intelligent Manufacturing	Fabricación	Montaje/ensamblaje	<p>La RA en el proceso de montaje se utiliza para superponer instrucciones visuales directamente en el entorno de trabajo del operario. Estas instrucciones pueden incluir textos, vídeos, animaciones en 3D y otros medios visuales que guían al trabajador a través de las distintas etapas del montaje. La RA ayuda a mejorar la precisión y eficiencia del operario al proporcionar indicaciones claras y detalladas en tiempo real. El sistema integrado utiliza una red neuronal convolucional basada en regiones (Faster R-CNN), entrenada con un conjunto de datos sintéticos de herramientas generados a partir de modelos CAD, lo que permite detectar herramientas físicas reales</p>	<p>El sistema puede disminuir el tiempo de finalización y el número de errores en comparación con los métodos tradicionales de instrucción en papel.</p>	<p>El implementar sistemas de RA puede ser costoso y requiere que los trabajadores se adapten a nuevos métodos de trabajo, lo que podría generar resistencia o una curva de aprendizaje inicial.</p>

[56]	Use of projector based augmented reality to improve manual spot-welding precision and accuracy for automotive manufacturing	Automotriz	Soldadura	La RA se aplica en el proceso de soldadura mediante un sistema de proyección basado en proyectores que resalta las ubicaciones de soldadura por puntos en los paneles de los vehículos. Este sistema ayuda a los operadores manuales de soldadura a mejorar la precisión y exactitud de la colocación de los puntos de soldadura mediante el uso de pistas visuales. Estas pistas son proyectadas directamente sobre las superficies de los paneles, proporcionando una guía visual que facilita la identificación rápida y precisa de los puntos de soldadura correctos, reduciendo así los errores y mejorando la calidad del producto final.	El uso de RA en el proceso de soldaduras es la mejora en la precisión y exactitud de las soldaduras lo que reduce significativamente la variabilidad en la ubicación de los puntos de soldadura, lo cual es crucial para mantener altos estándares de calidad en la producción.	Necesidad de calibración y mantenimiento continuo del sistema de proyección para asegurar que las pistas visuales sean precisas y estén alineadas correctamente con los paneles. Esto puede requerir recursos adicionales y tiempo
[57]	Using augmented reality to reduce workload in offshore environments	Aviación	Capacitación/entrenamiento	La RA superpone información virtual sobre el campo de visión real de los pilotos a través de un HMD. Durante las misiones simuladas, los pilotos usaron el HMD para recibir simbología adicional y datos críticos, como indicadores de control del motor, que se mostraban directamente en su línea de visión. Esto les permitía realizar tareas complejas, como el vuelo estacionario y las maniobras de aterrizaje y despegue, con una mayor conciencia de su entorno y del estado de la aeronave, mejorando su capacidad para manejar situaciones imprevistas y reducir el riesgo de errores.	Aumento de la conciencia situacional de los pilotos. La superposición de información vital en el campo de visión del piloto permite una toma de decisiones más rápida y precisa, lo que es crucial en operaciones de alta carga de trabajo y en condiciones ambientales adversas.	Posible incomodidad ergonómica y problemas de visibilidad con los dispositivos HMD especialmente en condiciones de poca luz, lo que puede dificultar su uso prolongado y afectar negativamente la experiencia del usuario

[58]	Using Eye-Tracking to Measure Worker Situation Awareness in Augmented Reality	Construcción	Capacitación/Entrenamiento	<p>La RA se aplica al proceso de mejora de la percepción situacional de los trabajadores en la industria de la construcción. El uso de RA se centra específicamente en la creación de sistemas de advertencia visuales que alertan a los trabajadores sobre peligros inmediatos en su entorno laboral, tales como la proximidad de objetos en movimiento (camiones, carretillas elevadoras, etc.). Estos sistemas de advertencia de RA están diseñados para mejorar la capacidad de los trabajadores para percibir y reaccionar a estos peligros, mejorando así la seguridad en el sitio de construcción.</p>	<p>La RA se utiliza para generar señales visuales que advierten a los trabajadores sobre peligros en su entorno. Estas advertencias se superponen al campo de visión de los trabajadores, ayudándoles a identificar y reaccionar rápidamente a los peligros.</p>	<p>Los dispositivos RA de seguimiento ocular que pueden ser costosos y requieren mantenimiento regular. La adquisición de dispositivos de RA de alta calidad y sistemas precisos de seguimiento ocular puede ser una inversión significativa para las empresas de construcción.</p>
[59]	WARM: Wearable AR and Tablet-Based Assistant Systems for Bus Maintenance	Automotriz	Mantenimiento	<p>La aplicación de la RA en el mantenimiento de flotas de autobuses ha sido desarrollada utilizando auriculares Microsoft hololens . Esta solución de la RA emplea diferentes métodos de seguimiento, como el mapeo espacial y la detección de objetos, para analizar el entorno y localizar al usuario en relación con el entorno y el autobús. Una vez identificado y localizado el autobús, se pueden añadir objetos virtuales para ayudar en el mantenimiento. Las pruebas realizadas en condiciones reales en el garaje de DBUS, en San Sebastián, demostraron que, aunque la solución basada en tableta fue más eficiente en términos de gestión y procesamiento de datos, la RA proporcionó un valor añadido significativo. La RA permite a los trabajadores realizar tareas de mantenimiento con las manos libres y acceder a información multimedia adicional, como vídeos y fotografías, que enriquece el sistema de información.</p>	<p>La aplicación en la tableta conecta directamente con el sistema de gestión de mantenimiento, lo que permite una asignación rápida y eficiente de órdenes de trabajo y una transmisión de datos sin necesidad de intervención adicional de los gestores de mantenimiento.</p>	<p>La implementación de tecnologías de RA, incluidos los dispositivos HMD y sensores, puede ser costosa, lo que podría ser una barrera para pequeñas organizaciones.</p>

La RA se aplica en una amplia variedad de procesos industriales para mejorar la eficiencia, precisión y seguridad de las operaciones. En el ámbito del mantenimiento, la RA facilita la visualización de procedimientos y guías interactivas que ayudan a los técnicos a realizar tareas complejas con mayor precisión. Por ejemplo, en el mantenimiento de robots industriales y moldes de inyección, la RA proporciona instrucciones visuales que guían el desmontaje y montaje de componentes, mejorando la precisión y reduciendo el tiempo de operación. En el área de ensamblaje, la RA es utilizada para superponer instrucciones visuales directamente en el entorno de trabajo del operario. Esto incluye textos, videos y animaciones en 3D que guían a los trabajadores a través de las distintas etapas del montaje, mejorando la precisión y eficiencia del proceso. La implementación de RA en la fabricación e inspección de piezas permite comparar fácilmente el diseño CAD con las piezas reales y ajustar la transparencia de las representaciones 3D para evitar confusiones.

En logística y gestión de almacenes, la RA se aplica para optimizar la preparación de pedidos. Sistemas como RASPICK utilizan dispositivos montados en la cabeza que muestran listas de artículos y guían a los recolectores a las ubicaciones correctas en el almacén. La RA también facilita la identificación de ubicaciones de almacenamiento y la verificación de piezas necesarias, mejorando la precisión y reduciendo el tiempo de búsqueda. La RA tiene un papel crucial en la capacitación y formación de trabajadores. En el ensamblaje de motores y la reparación de componentes críticos, la RA permite a los estudiantes interactuar con componentes virtuales en un entorno físico, mejorando la comprensión y ejecución de tareas complejas. Además, en el entrenamiento contra incendios, la RA proporciona una experiencia de capacitación integral y realista, combinando el mundo real y el virtual para mejorar la preparación de los operadores. En el proceso de control de calidad, la RA se utiliza para guiar a los inspectores durante la inspección visual de soldaduras y otros componentes, superponiendo información digital directamente sobre las piezas físicas. Esto permite a los inspectores comparar rápidamente las soldaduras con los estándares ideales y detectar posibles defectos de manera más eficiente. Finalmente, en el mantenimiento de infraestructuras como carreteras y flotas de autobuses, la RA mejora la seguridad y eficiencia operativa. La RA proporciona visualizaciones en tiempo real, instrucción interactiva y colaboración entre humanos y robots, reduciendo la exposición a riesgos y mejorando la precisión y rapidez en la ejecución de tareas. En resumen, la RA se aplica de manera efectiva en diversos procesos industriales, mejorando la precisión, eficiencia y seguridad de las operaciones.

La Tabla 6 presenta una recopilación del hardware de realidad aumentada junto con sus costos aproximados en dólares estadounidenses y el motor gráfico utilizado. Esta información ofrece una visión comparativa de las opciones disponibles en el mercado, facilitando la evaluación de las tecnologías de realidad aumentada según sus características técnicas y económicas.

Tabla 6. Hardware y software utilizado..

Realidad aumentada			
Cita	Hardware	Costo Aproximado (USD)	Motor Gráfico
[22]	Teléfonos inteligentes o tabletas	Teléfonos inteligentes: Gama media: 400 – 700 UDS Gama alta: 700 – 1500 USD Tabletas: Gama media: 300 – 700 USD Gama alta: 700 – 1200 USD	Unity 3D y mediante el SDK CAD Exchanger.
[23]	AR In-Situ utiliza proyectores	Alrededor de 800 a 1200 USD	Unity 3D (2021.4.05.fl).
[24]	RASPICK Placa Raspberry Pi Zero W: Utilizada como el cerebro del dispositivo.	No especifica	No especifica.
[25]	HoloLens	Hololens 1: Alrededor de 3000 USD. HoloLens 2 con ISO 14644-14: Alrededor de 5407,18 USD	No específica.
[26]	Hololens	Hololens 1: Alrededor de 3000 USD. HoloLens 2 con ISO 14644-14: Alrededor de 5407,18 USD	Unity 3D del SDK Vuforia y el MRTK (Mixed Reality Tool Kit).
[27]	Teléfonos inteligentes o tabletas.	Teléfonos inteligentes: Gama media: 400 – 700 UDS Gama alta: 700 – 1500 USD Tabletas: Gama media: 300 – 700 USD Gama alta: 700 – 1200 USD	Unity 3D y el SDK Vuforia.

[28]	Vuzix M400	Alrededor de 1,500 a 1800	Algoritmo SaliencyMDC y algoritmo de rastreo KCF (Kernelized Correlation Filters)
[29]	Apple iPad Pro 2020	Aproximadamente de 1,050 USD – 1,650 USD	Unity 3D
[30]	HoloLens	Hololens 1: Alrededor de 3000 USD. HoloLens 2 con ISO 14644-14: Alrededor de 5407,18 USD	Unity 3D
[31]	HoloLens	Hololens 1: Alrededor de 3000 USD. HoloLens 2 con ISO 14644-14: Alrededor de 5407,18 USD	Unity3D junto con el SDK Mixed Reality Toolkit 2 (MRTK 2) y Vuforia.
[32]	Teléfonos inteligentes o tabletas	Teléfonos inteligentes: Gama media: 400 – 700 UDS Gama alta: 700 – 1500 USD Tabletas: Gama media: 300 – 700 USD Gama alta: 700 – 1200 USD	Unity 3D y con el SDK Vuforia
[33]	Portátil HP Pavilion Huawei Nova Y70 Una cámara HP 320	Portátil HP Pavilion: 600 USD a 1800 USD Huawei Nova Y70: 200 a 600 USD Una cámara HP 320: 80 USD a 300 USD	Unity 3D
[34]	HoloLens y tableta	Hololens 1: Alrededor de 3000 USD. HoloLens 2 con ISO 14644-14: Alrededor de 5407,18 USD Tabletas: Gama media: 300 – 700 USD Gama alta: 700 – 1200 USD	Unity 3D y SDK Mixed Reality Toolkit (MRTK)
[35]	Tableta comercial con doble cámara	Tabletas: Gama media: 300 – 700 USD Gama alta: 700 – 1200 USD	Aplicación web desarrollada con Xamarin y vinculada a un servidor LAMP (Linux, Apache, MySQL y PHP)

[36]	Teléfonos inteligentes o tabletas con sistema Android	Teléfonos inteligentes: Gama media: 400 – 700 UDS Gama alta: 700 – 1500 USD Tabletass: Gama media: 300 – 700 USD Gama alta: 700 – 1200 USD	Unity 3D y el software Blender
[37]	Hololens	Hololens 1: Alrededor de 3000 USD. HoloLens 2 con ISO 14644-14: Alrededor de 5407,18 USD	Unity 3D
[38]	Teléfonos móviles	Teléfonos inteligentes: Gama media: 400 – 700 UDS Gama alta: 700 – 1500 USD	Project Tango Development Kit (PTDK) se integra a motores gráficos como Unity y Unreal Engine
[39]	Tableta o teléfono inteligente	Teléfonos inteligentes: Gama media: 400 – 700 UDS Gama alta: 700 – 1500 USD Tabletass: Gama media: 300 – 700 USD Gama alta: 700 – 1200 USD	Unity3D y el SDK ARCore
[40]	HoloLens	Hololens 1: Alrededor de 3000 USD. HoloLens 2 con ISO 14644-14: Alrededor de 5407,18 USD Tabletass: Gama media: 300 – 700 USD Gama alta: 700 – 1200 USD	Unity Engine y el SDK Vuforia Engine
[41]	Samsung Galaxy Tab 8	Alrededor de 250 USD	Unity 3D y el SDK de Vuforia Engine.
[42]	EPSON MOVERIO BT-300	EPSON Moverio BT-2000: 2,196.15 USD	Unity 3D
[43]	Cámaras 3D Microsoft Azure Kinect Escáner Cognex DataMan DM 8600, Monitor de pantalla táctil de 27 pulgadas Monitor de 43 pulgadas	Cámaras: Alrededor de 399 USD. Escáner: Alrededor de 1000 USD Monitor de 27 pulgadas: Alrededor de 500 a 100 USD Monitor de 43 pulgadas: Alrededor de 1000 a 2000 USD	No especifica

[44]	HoloLens	Hololens 1: Alrededor de 3000 USD. HoloLens 2 con ISO 14644-14: Alrededor de 5407,18 USD	Unity3D y el SDK Mixed Reality Toolkit y Vuforia
[45]	Teléfonos inteligentes o tabletas	Teléfonos inteligentes: Gama media: 400 – 700 UDS Gama alta: 700 – 1500 USD Tabletas: Gama media: 300 – 700 USD Gama alta: 700 – 1200 USD	Unity 3D con el SDK Vuforia
[46]	VIVE Pro HMD	Alrededor de \$1,199 - \$1400 USD	Unity 3D y el SDK SRWorks
[47]	Microsoft Surface Book 2, cámara Intel RealSense d415 RGB-D y cámara termográfica Optris PI640	Microsoft Surface Book 2: Alrededor de 400 a 600 USD Cámara Intel RealSense d415 RGB-D: Aproximadamente 450 USD Cámara termográfica Optris: PI640 7,834.00 USD	Unity 3D
[48]	Teléfonos inteligentes que pueden cargar la aplicación	Teléfonos inteligentes: Gama media: 400 – 700 UDS Gama alta: 700 – 1500 USD	Unity y el SDK Vuforia
[49]	Hololens	Hololens 1: Alrededor de 3000 USD. HoloLens 2 con ISO 14644-14: Alrededor de 5407,18 USD	Unity 3D
[50]	HoloLens para el método HMD. Asus Zenfone AR o el Samsung Galaxy A52 para el método HHD.	Hololens 1: Alrededor de 3000 USD. HoloLens 2 con ISO 14644-14: Alrededor de 5407,18 USD Asus Zenfone AR: 300 a 600 USD Samsung Galaxy A52: 300 a 500 USD	Unity y el SDK Arcore
[51]	HoloLens	Hololens 1: Alrededor de 3000 USD. HoloLens 2 con ISO 14644-14: Alrededor de 5407,18 USD	Dynamics 365 Guides
[52]	Samsung Galaxy S21.	Alrededor de 480 USD	Unity 3D

[53]	Epson MOVERIO BT-300 y Vuzix MT300	EPSON Moverio BT-2000: 2,196.15 USD Vuzix MT300: Alrededor de 1,500 a 1800	Unity 3D
[54]	Hololens y PC de escritorio.	Hololens 1: Alrededor de 3000 USD. HoloLens 2 con ISO 14644-14: Alrededor de 5407,18 USD PC de escritorio: Alrededor de 600 USD	Unity 3D y el SDK Vuforia y el y MRTK (Mixed Reality Tool Kit)
[55]	Cámaras web Logitech C920 Pro y un monitor	Cámaras: Alrededor de 100 USD Monitor Alrededor de 600 a 1800 USD	Unity3D
[56]	Proyectores (NEC NP-PA500UG) y cámaras	Proyectores: Alrededor de 2000 USD Cámaras: Alrededor 100 USD	Software SAR no específica exacto
[57]	HoloLens	Hololens 1: Alrededor de 3000 USD. HoloLens 2 con ISO 14644-14: Alrededor de 5407,18 USD	Unity3D
[58]	HoloLens y iPhone SE	Hololens 1: Alrededor de 3000 USD. HoloLens 2 con ISO 14644-14: Alrededor de 5407,18 USD iPhone SE: Alrededor de 600 USD	Unity con Mixed Reality Toolkit 2 (MRTK2)
[59]	HoloLens	Hololens 1: Alrededor de 3000 USD. HoloLens 2 con ISO 14644-14: Alrededor de 5407,18 USD	Unity 3D y el SDK Mixed Reality Toolkit y Vuforia

Los Hardware más utilizados para aplicaciones de realidad aumentada en los procesos industriales incluye el HMD HoloLens se destaca como una opción avanzada y especializada, especialmente en entornos industriales y profesionales, a pesar de su costo más elevado. Otros hardware como Vuzix M400 y Epson MOVERIO BT-300 también son populares en nichos específicos. Dispositivos como teléfonos inteligentes y tabletas, son también utilizados debido a sus características especializadas principalmente debido a su amplia disponibilidad y rango de precios accesibles.

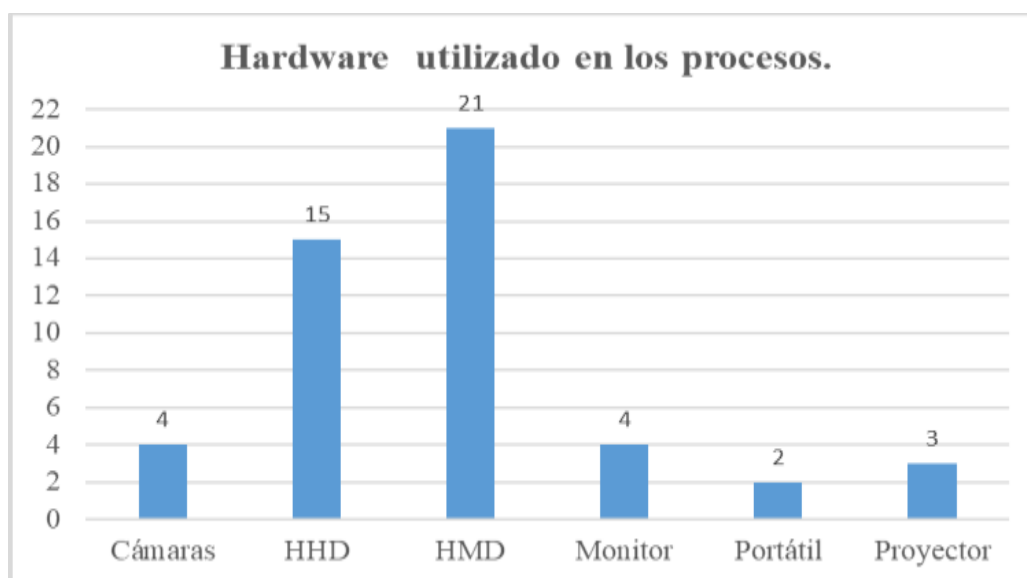


Figura 7. Hardware utilizado.

El análisis realizado al diagrama de columnas de la Figura 7. Hardware utilizado. Revela que los HMD (Head-Mounted Displays) son el hardware más utilizado en aplicaciones de RA en los procesos identificados, con un total de 21 unidades. Esto se debe a su capacidad para ofrecer experiencias inmersivas y manos libres, lo que los hace ideales para una amplia gama de aplicaciones de RA. Los HHD (Hand-Held Devices) también tienen una alta tasa de uso, destacando su popularidad y versatilidad. Hardware como cámaras, monitores, portátiles y proyectores tienen un uso más específico y limitado, pero siguen siendo importantes en ciertos contextos de RA.

En cuanto a los motores gráficos, Unity 3D es el más utilizado debido a su versatilidad y capacidad para soportar múltiples SDK, como Vuforia, ARCore y el Mixed Reality Toolkit (MRTK). Esto permite a los desarrolladores crear aplicaciones robustas y funcionales para una variedad de Hardware. Otros motores gráficos y SDK también se utilizan, aunque en menor medida, para aplicaciones específicas que requieren capacidades particulares.

La Tabla 7 presenta un análisis del impacto de la implementación de la RA en los procesos industriales. Se compara el estado antes y después de la adopción de RA, destacando el porcentaje de optimización alcanzado. Esta información proporciona una visión clara de los beneficios cuantitativos que la RA puede aportar a la eficiencia y productividad en entornos industriales.

Tabla 7 Impacto de la Implementación de RA en Procesos Industriales.

Impacto de la Implementación de RA en Procesos Industriales			
Cita	Antes de la Implementación de RA	Después de la Implementación de RA	Porcentaje de Optimización (%)
[22]	El tiempo ejecutado para realizar la tarea de diseño es de 23 minutos.	El tiempo ejecutado para realizar la actividad mediante el sistema fue de 12,6 minutos.	Se observa que la tarea de diseño se finalizó 45,22% más rápido.
[23]	Tiempo de ejecutar la tarea de montaje mediante instrucciones de papel= 3:24 min.	Tiempo de ejecutar la tarea de montaje mediante guía 3D= 2:34 min.	Se reduce el tiempo de ejecutar la tarea en 25%.
[24]	Tiempo de recolección de 10 art=145 seg Tiempo de recolección de 20 art=280 seg.	Tiempo de recolección de 10 art=131 seg Tiempo de recolección de 20 art=240 seg.	Se observa una disminución del tiempo en recolectar los artículos en un 9 % para listas de 10 artículos y del 12.55% para listas de 20 artículos.
[25]	Tiempo dedicado por los formadores CON interrupciones en su trabajo de manera tradicional (% del total de horas de formación) 20/100%.	Tiempo dedicado por los formadores CON interrupciones en su trabajo con RA (% del total de horas de formación) 10/100%.	Se ve un aumento de la productividad en un 10%.
[26]	El tiempo promedio del sistema en reconocer la tipología de la falla de forma no adaptativa en segundos 97.85.	El tiempo promedio del sistema en reconocer la tipología de la falla de forma adaptativa en segundos 71.82.	Se observa una disminución del 26% del tiempo en reconocer la falla.

[27]	Tiempo de inspección en días =2 y tiempo de documentación de averías= 1.5 horas.	Tiempo de inspección en días =1 y tiempo de documentación de averías= 0.5 horas.	la reducción del tiempo de inspección del molde hasta en un 50 % y el tiempo de documentación de averías en aproximadamente 66%.
[28]	Tiempo en anotar el proceso de montaje con Ajalón (herramienta de anotación de video de última generación) 17,86 minutos.	Tiempo en anotar el proceso de montaje con ARiana (herramienta de anotación de video basada en RA) 5,2 minutos	Implementando ARiana se reduce el tiempo en aproximadamente 70%
[29]	Tiempo medio de realización de la actividad de montaje con documentos técnicos 839 segundos.	Tiempo medio de realización de la actividad de montaje con RA 583 segundos.	Se observa una reducción en realizar la actividad de montaje de 30,51%.
[30]	Tiempo promedio en minutos de la duración del ensamblaje sin gafas de RA por el Tester 1: 17:40 y por el Tester 2: 19:03.	Tiempo promedio en minutos de la duración del ensamblaje con gafas de RA por el Tester 1: 11:06 y por el Tester 2: 7:00.	Mediante el uso de gafas de RA en el proceso de ensamblaje se observa una disminución del 37% por el Tester 1 y del 36% por el Tester 2.
[31]	Tiempo de finalización de la tarea y número de errores de una tarea simple con una pantalla tiempo: 630s.	Tiempo de finalización de la tarea y número de errores de una tarea con RA tiempo: 439s.	Se reduce en un 30,31% el tiempo mediante el uso de la RA con un dispositivo de HMD.
[32]	Tiempo promedio ejecutando durante el mantenimiento de bombas de aceite con solo instrucciones manuales= 672 segundos.	Tiempo promedio ejecutado durante el mantenimiento de bombas de aceite con recomendaciones del sistema= 424,5.	Utilizando la recomendaciones del sistema de RA se puede ver una reducción del tiempo en 36.83%
[33]	La exactitud del sistema de Chan y otros 3D con reconocimiento de geometría usando GAN es de =. 87,2%.	Exactitud del sistema de RL-PipTrack: modelo basado en RL profundo asistido por AR tiene una Recompensa promedio = 1000 + desviación estándar = 0%.	RL-PipTrack mejora el rendimiento en aproximadamente un 14.68% en comparación con el modelo de "Chan y otros.

[34]	Tiempo en ejecutar la tarea por usuarios expertos sin RA 2.5 min.	Tiempo en ejecutar la tarea por usuarios expertos con RA 3.5 min.	Usar la RA se ve un claro aumento de la eficiencia al realizar la tarea ya que reduce el tiempo alrededor del 28%.
[35]	Duración normalizada del procedimiento de control de calidad Experto OK=10,19 No experto OK=9,84.	Duración normalizada del procedimiento de control de calidad con tecnología RA Experto OK=7,68 No experto OK=5,01.	Se observa que el proceso de control de calidad que la duración normalizada mediante RA de operadores expertos es 24,63% más rápida y de 49,08 más rápida en operadores no expertos.
[36]	El grupo A obtiene una puntuación de eficiencia de la tarea ejecutada del sistema de freno de disco montado en el eje a través de manual tipo folleto 47,2.	El grupo A obtiene una puntuación de eficiencia de la tarea de mantenimiento ligero del sistema de freno de disco montado en el eje a través de RA 63,5.	Se observa una eficiencia superior del 32.53% de la tarea realizada por guía RA.
[37]	El ciclo de inspección actual desde una inspección in situ hasta la entrada de datos en la oficina tarda aproximadamente 4,5 hrs.	Utilizar el enfoque RA digital desarrollado para una inspección in situ de las estructuras de las autopistas se lo realiza en un tiempo de inspección de 1 hora.	Utilizar un enfoque de RA puede disminuir el tiempo de inspección en aproximadamente 78%.
[38]	Tiempo promedio de trabajo (en min) en Comprobación de interferencias en la instalación >40 Estimación de la carga de trabajo >180.	Tiempo promedio de trabajo (en min) en Comprobación de interferencias en la instalación <15 Estimación de la carga de trabajo <60.	En el proceso de inspección se reduce el tiempo de comprobación e interferencia en un 62,5% y el tiempo de la carga de trabajo en 33.33%.
[39]	Número de horas de trabajo requeridas para las actividades de reparación en el proceso de equipamiento antes de la RA= 12973,06 horas.	Número de horas de trabajo requeridas para las actividades de reparación en el proceso de equipamiento con RA= 9600 horas.	La aplicación de la tecnología de RA en el proceso de reparación reduce en un 26% el tiempo del proceso.

[40]	Número de componentes colocados en la tarea de montaje de usuarios sin experiencia 71.	Número de componentes colocados en la tarea de montaje de usuarios con experiencia 80.	Se observa que el número de componentes colocados por usuarios con experiencia es 12,67% superior al de sin experiencia.
[41]	Tiempo medio de finalización de la tarea del G1=1238,3 s y G2 logró un tiempo medio de 1528 s con soporte en papel.	Tiempo medio de finalización de la tarea del G1=927,8 s utilizando el y G2 logró un tiempo medio de 1051,5 s con el enfoque RA.	Se reduce el tiempo de finalización de la tarea del G1 en 25,07% y del G2 en 31.18%
[42]	Se calcula el porcentaje de mejora luego de realizar la tarea con capacitación de RV es del 23/40	Se calcula el porcentaje de mejora luego de realizar la tarea con capacitación de RA sin marcadores es del 37/40	Se observa una mejora al ejecutar la tarea al ser capacitados con RA sin marcadores superior en 60% respecto a la de RV
[43]	Tiempo en reparación mediante guía de papel=466,1 s.	Tiempo en reparación mediante guías RA CAS=367,3 s.	Se reduce el tiempo en un 21.19% mediante la guía RA CAS.
[44]	Tiempo medio general en el montaje por el método tradicional Tiempo global de montaje=108.37 y número de errores= 17.	Tiempo medio general en el montaje por el método de RA Tiempo global=56,5 y número de errores= 2.	Mediante el uso de RA en el montaje se reduce el tiempo en un 52.13% y los errores disminuyeron en un 88%.
[45]	Tiempo para realizar las tareas de mantenimiento con el procedimiento manual basado en papel aproximadamente 13 minutos.	Tiempo para realizar las tareas de mantenimiento con el uso de RA 7 minutos.	Se observa una reducción en realizar la actividad de mantenimiento de alrededor de 46%.
[46]	Según [60] el tiempo en completar la formación contra incendios duro 6 minutos con RV.	El entrenamiento duró 5 minutos, tiempo durante el cual se pidió a los participantes que simularán el entrenamiento de extinción de incendios RA/VR utilizando el sistema.	Se reduce el tiempo de capacitación en un 16.66% respecto al método VR.

[47]	Tiempo en realizar la tarea de diagnóstico en minutos con guía detallada 6,74 y número de errores en = 3.60.	Tiempo en realizar la tarea de diagnóstico en minutos con RA= 6.00 y número de errores en = 1.33.	Existe una disminución del tiempo de 10,98% y del errores de 62,96%.
[48]	Se realiza la reparación del compresor con el procedimiento basado en papel.	Se realiza la reparación del compresor con el procedimiento MARMA un sistema de RA.	Expertos mencionaron que MARMA puede reducir el tiempo total de reparación del compresor en un 30%, en comparación con el procedimiento basado en papel.
[49]	Tiempo empleado durante la ejecución del cobot sin (V) retroalimentación háptica= 26,614s.	Tiempo empleado durante la ejecución del cobot con (V + H) con retroalimentación háptica= 24,027s	El tiempo de ejecución del Cobot con (V+ H) se reduce en 9,72s respecto al (V).
[50]	Tiempo promedio de recolección por componente, instruido por papel, considerando el orden secuencial 36 y no secuencial. 28	Tiempo promedio de recolección por componente, instruido por HMD de manera secuencial= 11 y no secuencial =13 y por un HHD de manera secuencial=25 y no secuencial= 17	De manera secuencial mediante el HMD y EL HHD la tarea se ejecuta 70% y un 31% más rápido respectivamente mientras de manera no secuencial un 54% y 39%.
[51]	Número de errores al realizar una tarea entre manual impreso= 1.33.	Número de errores al realizar una tarea por RA= 0,33.	Se reduce el 75,19% de los errores mediante el uso de RA.
[52]	Al comparar las porosidades del estudio con las porosidades del PLA Hebeeb et al. y Liao et al., que se calculan en 22,5% y 10,1%, respectivamente.	Porosidad media de este estudio, que se calcula en 7,56%.	Se reduce la porosidad del producto en un 14,94% respecto a Hebeeb y en un 2,54% respecto a Liai.
[53]	Tiempo en seleccionar la pieza 4,04.	Tiempo en seleccionar la pieza el HMD EPSON Moverio 4,01.	Mediante el HMD se reduce el tiempo en seleccionar la pieza en un 1,47%.

[54]	Tiempo aproximado para ejecutar la tarea de mantenimiento del método tradicional = 140.	Tiempo aproximado para ejecutar la tarea de mantenimiento del método actual= 62.	Se interpreta que se puede reducir aproximadamente el tiempo de la tarea de mantenimiento 55%.
[55]	Tiempo para la tarea de montaje del husillo con instrucciones de manual en papel = 755 segundos y 34 errores.	Tiempo para la tarea de montaje del husillo con instrucción RA = 504 segundos y 23 errores.	En la tarea de montaje de husillos con instrucción RA se observa la disminución de tiempo del 33.24% y 32.35% de errores.
[56]	La precisión para las seis posiciones de soldadura por puntos soldadas sin RA es de 4,08 mm.	La precisión para las seis posiciones de soldadura por puntos soldadas con RA es de 1,94 mm.	Se aumentó en aproximadamente un el 52 % en la precisión para operadores al momento de realizar la soldadura por puntos.
[57]	Distancia recorrida promedio en (m) desde la plataforma EDYV hasta la turbina 4 sin HMD 3855.	Distancia recorrida promedio en (m) desde la plataforma EDYV hasta la turbina 4 sin HMD 3551.	RA reduce la distancia recorrida en un 8.92%.
[58]	Número de fallos en una tarea de ensamblaje sin recibir advertencias RA =74.	Número de fallos en una tarea de ensamblaje con HMD y recibiendo advertencias RA= 14.	El número de fallos en la tarea de ensamblaje se reduce un 81.08% .
[59]	Costos de personal de mantenimiento por vehículo EUR/(vehículo × 10.000 km)= 24,78 EUR.	Costos de personal de mantenimiento por vehículo EUR/(vehículo × 10.000 km)= 24.7 EUR.	Se minimizan los costos en un 0,32%.

Los resultados muestran claramente los beneficios significativos de aplicar la RA en diversos procesos industriales. La implementación de RA ha mostrado una reducción notable en el tiempo de ejecución de tareas. Por ejemplo, se observó una reducción del tiempo de diseño en un 45.22% y del montaje en un 25%. El tiempo de recolección de artículos disminuyó en un 9% para listas de 10 artículos y en un 12.55% para listas de 20 artículos. En cuanto a la inspección y documentación, el tiempo de inspección se redujo hasta en un 50% y el tiempo de documentación de averías en un 66%. Además, la capacitación y el mantenimiento también presentaron reducciones significativas, con una disminución del tiempo de capacitación en un 75% y del tiempo de mantenimiento en un 46%.

La productividad y eficiencia también mejoraron considerablemente con la RA. La productividad de los formadores aumentó en un 10% al reducir las interrupciones durante el trabajo. La eficiencia en tareas simples y complejas se incrementó, reduciéndose el tiempo de finalización de tareas en un 30.31% mediante el uso de hardware HMD. Adicionalmente, la eficiencia en el mantenimiento del sistema de freno de disco aumentó en un 32.53%. La calidad del trabajo también se vio beneficiada, reduciéndose la duración del proceso de control de calidad en un 24.63% para operadores expertos y en un 49.08% para operadores no expertos. La reducción de errores es otro beneficio significativo de la implementación de la RA. Se observó una disminución del 32.35% en errores durante el montaje de husillos y una reducción del 81.08% en errores durante el ensamblaje con advertencias RA. Además, la precisión en la soldadura por puntos aumentó en un 52%, mejorando la exactitud del trabajo realizado. La calidad del producto también mejoró con la RA, reduciéndose la porosidad del producto en un 14.94% respecto a estudios anteriores, lo que indica una mejora en la calidad del producto final. En cuanto a los costos, los costos de personal de mantenimiento por vehículo se redujeron en un 0.32%, lo que representa una pequeña pero significativa reducción en costos operativos. La optimización en procesos de inspección y reparación también se benefició de la RA. El tiempo de inspección de estructuras de autopistas se redujo en un 78% y la reparación de compresores con un sistema MARMA de RA mostró una reducción del tiempo de reparación en un 30%.

Por ello se demuestra que aplicar RA en procesos industriales proporciona beneficios notables, incluyendo la reducción del tiempo de ejecución de tareas, la mejora en la productividad y eficiencia, la disminución de errores, la mejora en la calidad del producto y el ahorro de costos. Estos beneficios se reflejan en una optimización general del desempeño operativo y una mayor eficacia en la realización de tareas críticas en el entorno industrial.

Respuesta a preguntas:

Los 38 artículos seleccionados anteriormente contienen suficiente información para emitir un criterio científico respecto a la optimización de procesos industriales mediante la aplicación de la RA. A continuación, se responden las preguntas planteadas en la metodología.

PI1: Implementar RA en procesos industriales ofrece una amplia gama de beneficios que contribuyen a la optimización y eficiencia de las operaciones. Estos beneficios incluyen la reducción de errores y tiempos, ya que la RA permite identificar y evitar errores, reduciendo significativamente la tasa de error en tareas como el montaje y la inspección. Además, los tiempos de ejecución de tareas se reducen considerablemente, como se observa en la reducción del tiempo de diseño y montaje, y en la finalización de tareas de mantenimiento. La RA también contribuye al aumento de la eficiencia y productividad. Esta tecnología ayuda a los operadores a comprender los procedimientos de diseño al superponer información e instrucciones virtuales en el entorno real, facilitando la realización de tareas complejas. El sistema permite que ambas manos del recolector permanezcan libres y reduce la carga cognitiva, mejorando así la eficiencia y productividad en el trabajo. En términos de capacitación, la RA permite realizarla en un entorno dedicado, minimizando la interrupción de las operaciones diarias y mejorando la eficiencia general. Además, permite una visualización precisa y guiada de procedimientos, reduciendo errores humanos y acelerando el proceso de aprendizaje. La optimización del mantenimiento es otro beneficio clave. La modalidad adaptativa de RA permite a los usuarios reconocer fallos más rápido y con menos movimientos, mejorando la eficiencia y reduciendo el tiempo de inactividad. La RA proporciona información contextual y significativa automáticamente, permitiendo un mantenimiento más rápido y eficiente de los equipos. La mejora en la calidad del trabajo y del producto es evidente con el uso de RA, ya que la precisión en tareas como la soldadura y el control de calidad se incrementa, reduciendo la variabilidad y mejorando los estándares de calidad. La RA también reduce la necesidad de comunicaciones adicionales entre trabajadores, optimizando el proceso de anotación de video y otros procedimientos de documentación. En cuanto a la reducción de costos, la detección precoz de errores durante el montaje mediante RA previene problemas mayores, reduciendo significativamente los costos de reparaciones y retrabajos. La RA ofrece oportunidades para mejorar continuamente el rendimiento, lo que puede llevar a ahorros significativos en costos operativos a largo plazo, también la RA facilita la mejora de la comunicación y la gestión de datos con bases de datos en línea, permitiendo el acceso, edición y compartición en tiempo real. De igual forma al proporcionar una representación visual en 3D de componentes y procesos,

mejorando la comprensión y precisión en la ejecución de tareas. Finalmente, la RA incrementa la seguridad al generar señales visuales que advierten a los trabajadores sobre peligros en su entorno, mejorando la seguridad y reduciendo el riesgo de accidentes. Además, proporciona un entorno de entrenamiento seguro y controlado, donde los usuarios pueden practicar situaciones de emergencia sin riesgos reales.

PI2: El motor gráfico más utilizado para desarrollar sistemas de RA es Unity 3D. Unity 3D es un motor gráfico ampliamente utilizado para el desarrollo de aplicaciones de RA en videojuegos, simulaciones y experiencias interactivas en 2D y 3D. Desarrollado por Unity Technologies, este motor permite a los desarrolladores crear contenido visualmente impresionante y altamente interactivo de manera eficiente. Una de sus principales ventajas es la facilidad de uso, gracias a su interfaz intuitiva y a su extensa biblioteca de recursos y herramientas que facilitan la creación de gráficos y la programación de comportamientos. Unity 3D soporta múltiples plataformas, lo que permite a los desarrolladores lanzar sus aplicaciones en sistemas operativos como Windows, macOS, iOS, Android, y consolas de videojuegos, entre otros. El motor gráfico Unity 3D, es una plataforma de desarrollo completa que proporciona las herramientas y el entorno necesarios para crear, diseñar y ejecutar aplicaciones interactivas y visuales. Un motor gráfico incluye capacidades para el manejo de gráficos, física, audio, animaciones, inteligencia artificial, y otros componentes esenciales para el desarrollo de aplicaciones. Por otro lado, un SDK (Software Development Kit) es un conjunto de herramientas y librerías que permite a los desarrolladores integrar funcionalidades específicas en sus aplicaciones. Los SDKs no son plataformas de desarrollo completas, sino complementos que se añaden a un motor gráfico u otro entorno de desarrollo para proporcionar capacidades adicionales.

PI3: La RA está emergiendo como una tecnología valiosa en diversos procesos industriales. Su capacidad para proporcionar información visual y guías interactivas está revolucionando la manera en que se realizan tareas en diversos procesos industriales. La investigación realizada presenta en la Figura 8, un análisis del número de procesos industriales donde la RA se aplica, respaldada por la literatura existente.

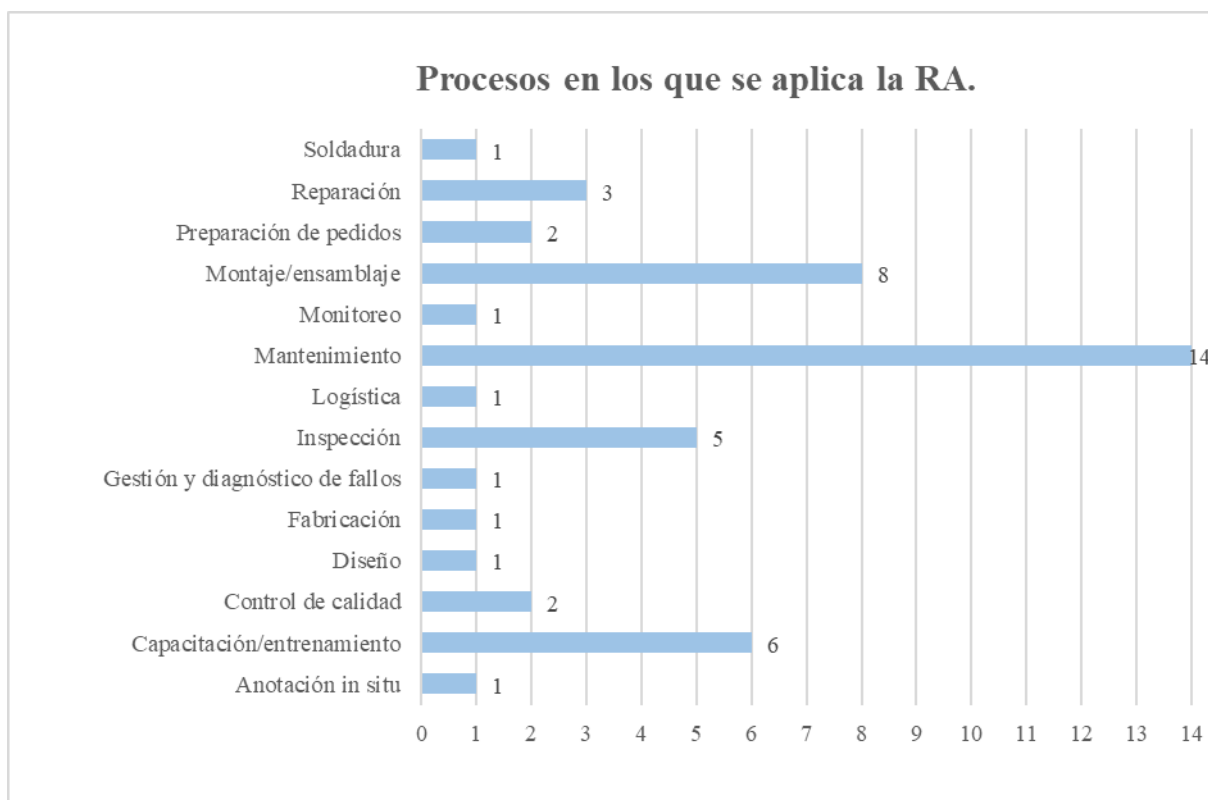


Figura 8. Procesos en los que se aplica la RA.

Luego de interpretar los datos proporcionados, los procesos industriales en los que es altamente recomendable implementar la RA son: mantenimiento, montaje/ensamblaje, capacitación/entrenamiento e inspección. Estos procesos han sido respaldados por un mayor número de artículos, lo que sugiere que la implementación de RA en estos ámbitos ha sido ampliamente investigada y considerada beneficiosa. Otros procesos también pueden beneficiarse de la RA, pero se recomienda una evaluación más detallada basada en necesidades específicas y casos de uso.

La RA se usa más en el proceso de mantenimiento debido a una combinación de ventajas únicas que esta tecnología ofrece para mejorar la eficiencia, precisión y seguridad en diversas tareas de mantenimiento. La RA proporciona instrucciones animadas en 3D directamente sobre el objeto o área de trabajo, facilitando la comprensión de los procedimientos y reduciendo la posibilidad de errores. Los técnicos pueden recibir asistencia remota de ingenieros expertos

mediante dispositivos HMD, transmitiendo video en vivo del entorno de trabajo y recibiendo anotaciones y contenido de RA superpuesto en su campo de visión, lo cual es especialmente útil en talleres donde la presencia física del experto no es necesaria. En el mantenimiento de vehículos ferroviarios, la RA se utiliza para desarrollar contenido de capacitación que visualiza procedimientos en un espacio 3D, mejorando la comprensión y competencia de los operadores.

PI4.: La implementación de RA en procesos industriales conlleva una serie de desafíos y limitaciones que deben ser considerados. Uno de los principales obstáculos es la curva de aprendizaje asociada con la tecnología. Los operadores y diseñadores pueden necesitar tiempo y capacitación para familiarizarse con las herramientas y técnicas necesarias para utilizar el sistema de manera efectiva. Además, el hardware portátil utilizado en RA requieren una potencia computacional significativa, lo que puede representar un desafío técnico. Otra limitación importante es el costo inicial de implementación es elevado, ya que requiere inversiones significativas en hardware especializado y desarrollo de software adaptado a las necesidades específicas de cada proceso. Además, el estrecho campo de visión de hardware como HoloLens puede limitar la cantidad de información visible simultáneamente, dificultando la percepción completa de los iconos de falla en algunas situaciones. La instalación y configuración inicial de infraestructuras como redes de sensores inalámbricos (WSN) para monitoreo en tiempo real pueden ser costosas. La creación de modelos 3D interactivos y la implementación de tecnologías de RA requieren una inversión significativa en tiempo y dinero, lo que puede ser una barrera para algunas empresas. La efectividad de la RA también depende de la calidad y compatibilidad del hardware utilizado, lo que puede resultar en costos adicionales para las empresas que deseen implementar esta tecnología. El sistema de RA requiere mantenimiento continuo y actualizaciones para garantizar su rendimiento óptimo, lo que puede demandar recursos adicionales y tiempo. Además, puede existir resistencia al cambio por parte de los trabajadores y las partes interesadas acostumbrados a métodos tradicionales, lo que puede dificultar la adopción de nuevas tecnologías. La iluminación insuficiente y la alta presencia de polvo pueden ralentizar y complicar la inicialización y el seguimiento en el proceso. La implementación de sistemas de RA y captura de movimiento también es costosa, incluyendo el hardware, software y la capacitación del personal. Las condiciones de iluminación pueden afectar la estabilidad de la visualización, lo que puede ser problemático en entornos industriales. Además, algunos trabajadores, especialmente aquellos con poca familiaridad con la tecnología, pueden tender a ignorar la RA basada en pantalla, lo que sugiere que, aunque la RA es poderosa, requiere tiempo y entrenamiento para que los usuarios se

acostumbren a su uso. Aunque la RA puede mejorar la experiencia del usuario una vez que se domina, puede requerir tiempo y capacitación adicional para que los trabajadores se familiaricen con la tecnología y aprendan a usarla de manera efectiva. Los usuarios pueden necesitar tiempo y capacitación para familiarizarse con la tecnología de RA y utilizarla eficazmente, lo que puede retrasar la adopción y los beneficios iniciales. La dependencia de una infraestructura tecnológica avanzada, que incluye hardware HMD y conexiones de red estables y de alta velocidad, puede representar un desafío en entornos industriales con limitaciones tecnológicas. La necesidad de calibración y mantenimiento continuo de sistemas de proyección para asegurar que las pistas visuales sean precisas y estén alineadas correctamente con los paneles requiere recursos adicionales y tiempo. Además, la posible incomodidad ergonómica y problemas de visibilidad con los hardware HMD, especialmente en condiciones de poca luz, pueden dificultar su uso prolongado y afectar negativamente la experiencia del usuario.

6. CONCLUSIONES

- La aplicación rigurosa de la metodología PRISMA aseguró la transparencia y exhaustividad en la selección y evaluación de estudios, permitiendo identificar con precisión los beneficios y desafíos de la implementación de realidad aumentada (RA) en procesos industriales. Esto garantiza que las conclusiones extraídas sean fundamentadas en evidencia sólida y relevante.
- Los procesos industriales que se han beneficiado notablemente de la RA incluyen mantenimiento, montaje/ensamblaje, capacitación/entrenamiento e inspección. El hardware más utilizado es el HoloLens, mientras que Unity 3D se destaca como el motor gráfico preferido por su compatibilidad con SDKs como Vuforia y ARCore. Sin embargo, la implementación de RA enfrenta barreras financieras significativas debido a los altos costos iniciales y la necesidad de capacitación especializada.
- El análisis cuantitativo reveló mejoras sustanciales en la eficiencia operativa, con reducciones en tiempos de ejecución y disminución de errores que contribuyen a una mejor calidad del producto final y reducción de costos a largo plazo. Estos resultados proporcionan una base teórica sólida que resalta la viabilidad y los beneficios significativos de la RA en la optimización de procesos industriales.

7. RECOMENDACIONES

- Se sugiere que futuras investigaciones en la aplicación de la RA se centren en explorar con mayor profundidad los procesos industriales específicos que han mostrado los mayores beneficios en la revisión realizada, como el mantenimiento, el montaje/ensamblaje, la capacitación y la inspección.
- Explorar la intersección de RA con otras tecnologías emergentes: Dado que la RA a menudo se implementa junto con otras tecnologías como la inteligencia artificial, el internet de las cosas (IoT), y la robótica, sería útil explorar cómo estas combinaciones afectan la optimización de procesos industriales y si generan sinergias adicionales.

8. REFERENCIAS

- [1] D. Mourtzis, V. Zogopoulos, y E. Vlachou, «Augmented Reality Application to Support Remote Maintenance as a Service in the Robotics Industry», *Procedia CIRP*, vol. 63, pp. 46-51, ene. 2017, doi: 10.1016/j.procir.2017.03.154.
- [2] M. D. Nardo, M. Madonna, P. Addonizio, y M. Gallab, «A mapping analysis of maintenance in Industry 4.0», *J. Appl. Res. Technol.*, vol. 19, n.º 6, pp. 653-675, dic. 2021.
- [3] S. Fortuna, L. Barbieri, E. Marino, y F. Bruno, «A comparative study of Augmented Reality rendering techniques for industrial assembly inspection», *Comput. Ind.*, vol. 155, p. 104057, feb. 2024, doi: 10.1016/j.compind.2023.104057.
- [4] C. Kollatsch, M. Schumann, P. Klimant, V. Wittstock, y M. Putz, «Mobile Augmented Reality Based Monitoring of Assembly Lines», *Procedia CIRP*, vol. 23, pp. 246-251, ene. 2014, doi: 10.1016/j.procir.2014.10.100.
- [5] H. H. Rajalah, M. A. M. Jusoh, S. A. Jaafar, y S. C. Abdullah, «Optimization of the material handling system in adapting the real-time AR simulation», presentado en AIP Conference Proceedings, 2023. doi: 10.1063/5.0142835.
- [6] «Cotopaxi: la provincia - El Comercio». Accedido: 4 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.elcomercio.com/opinion/editorial/cotopaxi-provincia-volcan-industria-agricultura.html>
- [7] I. N. de E. y Censos, «En 2021: Ecuador registró 849 mil 831 empresas», Instituto Nacional de Estadística y Censos. Accedido: 9 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/ecuador-directorio-empresas-registro-2021/>
- [8] M. J. Page *et al.*, «The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews», *BMJ*, p. n71, mar. 2021, doi: 10.1136/bmj.n71.
- [9] J. S. Devagiri, S. Paheding, Q. Niyaz, X. Yang, y S. Smith, «Augmented Reality and Artificial Intelligence in industry: Trends, tools, and future challenges», *Expert Syst. Appl.*, vol. 207, 2022, doi: 10.1016/j.eswa.2022.118002.

- [10] D. Gonzalez-Argote, A. A. Vitón-Castillo, y J. Gonzalez-Argote, «Application of augmented reality in automotive industry», *EAI Endorsed Trans. Internet Things*, vol. 10, feb. 2024, doi: 10.4108/eetiot.5223.
- [11] S. Jumahat, M. Sidhu, y S. Shah, «A review on the positive implications of augmented reality pick-by-vision in warehouse management systems», *Acta Logist.*, vol. 10, n.º 1, pp. 1-10, mar. 2023, doi: 10.22306/al.v10i1.337.
- [12] W. Mao, X. Yang, C. Wang, Y. Hu, y T. Gao, «A Physical Fatigue Evaluation Method for Automotive Manual Assembly: An Experiment of Cerebral Oxygenation with ARE Platform», *Sensors*, vol. 23, n.º 23, 2023, doi: 10.3390/s23239410.
- [13] J. Dong, Z. Xia, y Q. Zhao, «Augmented Reality Assisted Assembly Training Oriented Dynamic Gesture Recognition and Prediction», *Appl. Sci.*, vol. 11, n.º 21, p. 9789, ene. 2021, doi: 10.3390/app11219789.
- [14] P. G. El Asmar, J. Chalhoub, S. K. Ayer, y A. S. Abdallah, «CONTEXTUALIZING BENEFITS and LIMITATIONS REPORTED for AUGMENTED REALITY in CONSTRUCTION RESEARCH», *J. Inf. Technol. Constr.*, vol. 26, pp. 720-738, 2021, doi: 10.36680/j.itcon.2021.039.
- [15] G. P. Guevara Alban, G. P. G. Alban, A. E. V. Arguello, y N. E. C. Molina, «Metodologías de investigación educativa (descriptivas, experimentales, participativas, y de investigación-acción)», *RECIMUNDO*, vol. 4, n.º 3, pp. 163-173, jul. 2020, doi: 10.26820/recimundo/4.(3).julio.2020.163-173.
- [16] W. M. Bramer, M. L. Rethlefsen, J. Kleijnen, y O. H. Franco, «Optimal database combinations for literature searches in systematic reviews: a prospective exploratory study», *Syst. Rev.*, vol. 6, n.º 1, p. 245, dic. 2017, doi: 10.1186/s13643-017-0644-y.
- [17] J. Baas, M. Schotten, A. Plume, G. Côté, y R. Karimi, «Scopus as a curated, high-quality bibliometric data source for academic research in quantitative science studies», *Quant. Sci. Stud.*, vol. 1, n.º 1, pp. 377-386, 2020, doi: 10.1162/qss_a_00019.
- [18] R. L. Walden, «SpringerLink Platform Review», *J. Electron. Resour. Med. Libr.*, vol. 18, n.º 4, pp. 188-197, oct. 2021, doi: 10.1080/15424065.2021.2006847.
- [19] H. I. Okagbue, J. A. Teixeira da Silva, y T. A. Anake, «Exploring the relationship between journal indexing and article processing charges of journals published by mdpi, the multidisciplinary digital publishing institute», *Eur. Sci. Ed.*, vol. 46, pp. 1-4, 2020, doi: 10.3897/ese.2020.e54523.
- [20] J. E. Naranjo, G. Caiza, R. Velastegui, M. Castro, A. Alarcon-Ortiz, y M. V. Garcia, «A Scoping Review of Pipeline Maintenance Methodologies Based on Industry 4.0», *Sustainability*, vol. 14, n.º 24, Art. n.º 24, ene. 2022, doi: 10.3390/su142416723.
- [21] L. A. McGuinness y J. P. T. Higgins, «Risk-of-bias VISualization (robvis): An R package and Shiny web app for visualizing risk-of-bias assessments», *Res. Synth. Methods*, vol. n/a, n.º n/a, abr. 2020, doi: 10.1002/jrsm.1411.
- [22] J. Wang y Y. Qi, «A Multi-User Collaborative AR System for Industrial Applications», *Sensors*, vol. 22, n.º 4, 2022, doi: 10.3390/s22041319.
- [23] P. Hořejší, K. Novikov, y M. Šimon, «A Smart Factory in a Smart City: Virtual and Augmented Reality in a Smart Assembly Line», *IEEE Access*, vol. 8, pp. 94330-94340, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2994650.

- [24] S. I. of S. and T. Computer Science and Engineering Kattankulathur, India., M. K. Nagda*, S. Sinha, S. I. of S. and T. Computer Science and Engineering Kattankulathur, India., P. E. y S. I. of S. and T. Computer Science and Engineering Kattankulathur, India., «An Augmented Reality Assisted Order Picking System using IoT», *Int. J. Recent Technol. Eng. IJRTE*, vol. 8, n.º 3, pp. 744-749, sep. 2019, doi: 10.35940/ijrte.C3991.098319.
- [25] M. Rossi, A. Papetti, M. Germani, y M. Marconi, «An Augmented Reality System for Operator Training in the Footwear Sector», *Comput.-Aided Des. Appl.*, vol. 18, n.º 4, pp. 692-703, nov. 2020, doi: 10.14733/cadaps.2021.692-703.
- [26] G. Avalle, F. De Pace, C. Fornaro, F. Manuri, y A. Sanna, «An Augmented Reality System to Support Fault Visualization in Industrial Robotic Tasks», *IEEE Access*, vol. 7, pp. 132343-132359, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2940887.
- [27] J. Angelopoulos y D. Mourtzis, «An Intelligent Product Service System for Adaptive Maintenance of Engineered-to-Order Manufacturing Equipment Assisted by Augmented Reality», *Appl. Sci.*, vol. 12, n.º 11, Art. n.º 11, ene. 2022, doi: 10.3390/app12115349.
- [28] T. an Pham, T. Moesgen, S. Siltanen, J. Bergström, y Y. Xiao, «ARiana: Augmented Reality Based In-Situ Annotation of Assembly Videos», *IEEE Access*, vol. 10, pp. 111704-111724, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3216015.
- [29] E. Marino, L. Barbieri, F. Bruno, y M. Muzzupappa, «Assessing user performance in augmented reality assembly guidance for industry 4.0 operators», *Comput. Ind.*, vol. 157-158, 2024, doi: 10.1016/j.compind.2024.104085.
- [30] A. Szajna, R. Stryjski, W. Woźniak, N. Chamier-Gliszczyński, y M. Kostrzewski, «Assessment of Augmented Reality in Manual Wiring Production Process with Use of Mobile AR Glasses», *Sensors*, vol. 20, n.º 17, Art. n.º 17, ene. 2020, doi: 10.3390/s20174755.
- [31] A. Seeliger, L. Cheng, y T. Netland, «Augmented reality for industrial quality inspection: An experiment assessing task performance and human factors», *Comput. Ind.*, vol. 151, p. 103985, oct. 2023, doi: 10.1016/j.compind.2023.103985.
- [32] N. Koteleva, G. Buslaev, V. Valnev, y A. Kunshin, «Augmented Reality System and Maintenance of Oil Pumps», *Int. J. Eng.*, vol. 33, n.º 8, pp. 1620-1628, ago. 2020, doi: 10.5829/ije.2020.33.08b.20.
- [33] H. Alatawi, N. Albalawi, G. Shahata, K. Aljohani, A. Alhakamy, y M. Tuceryan, «Augmented Reality-Assisted Deep Reinforcement Learning-Based Model towards Industrial Training and Maintenance for NanoDrop Spectrophotometer», *Sensors*, vol. 23, n.º 13, 2023, doi: 10.3390/s23136024.
- [34] A. C. Bavelos, E. Anastasiou, N. Dimitropoulos, G. Oikonomou, y S. Makris, «Augmented reality-based method for road maintenance operators in human-robot collaborative interventions», *Comput.-Aided Civ. Infrastruct. Eng.*, vol. 39, n.º 7, pp. 1077-1095, 2024, doi: 10.1111/mice.13185.
- [35] V. Fani, S. Antomarioni, R. Bandinelli, y F. E. Ciarapica, «Data Mining and Augmented Reality: An Application to the Fashion Industry», *Appl. Sci.*, vol. 13, n.º 4, 2023, doi: 10.3390/app13042317.
- [36] H.-J. Kwon, S.-I. Lee, J.-H. Park, y C.-S. Kim, «Design of Augmented Reality Training Content for Railway Vehicle Maintenance Focusing on the Axle-Mounted Disc Brake System», *Appl. Sci.*, vol. 11, n.º 19, Art. n.º 19, ene. 2021, doi: 10.3390/app11199090.

- [37] K. A. Kouch, K. Panuwatwanich, P. Sancharoen, y S. Sahachaisaree, «Development of Augmented Reality Application for Onsite Inspection of Expressway Structures Using Microsoft HoloLens», *J. Constr. Dev. Ctries.*, vol. 26, n.º 2, pp. 87-116, 2021, doi: 10.21315/jcdc2021.26.2.5.
- [38] S. Choi y J.-S. Park, «Development of Augmented Reality System for Productivity Enhancement in Offshore Plant Construction», *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 9, n.º 2, Art. n.º 2, feb. 2021, doi: 10.3390/jmse9020209.
- [39] Z. Kunkera, I. Željковиć, R. Mimica, B. Ljubenkov, y T. Opetuk, «Development of Augmented Reality Technology Implementation in a Shipbuilding Project Realization Process», *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 12, n.º 4, Art. n.º 4, abr. 2024, doi: 10.3390/jmse12040550.
- [40] A. Maffei, M. D. Mura, F. M. Monetti, y E. Boffa, «Dynamic Mixed Reality Assembly Guidance Using Optical Recognition Methods», *Appl. Sci. Switz.*, vol. 13, n.º 3, 2023, doi: 10.3390/app13031760.
- [41] K. Havlíková, P. Hořejší, y P. Kopeček, «Effect of Augmented Reality Support on Quality Inspection of Welded Structures», *Appl. Sci.*, vol. 13, n.º 21, 2023, doi: 10.3390/app132111655.
- [42] L. L. Win *et al.*, «EFFECTIVENESS ON TRAINING METHOD USING VIRTUAL REALITY AND AUGMENTED REALITY APPLICATIONS IN AUTOMOBILE ENGINE ASSEMBLY», *ASEAN Eng. J.*, vol. 12, n.º 4, Art. n.º 4, nov. 2022, doi: 10.11113/aej.v12.18009.
- [43] L. Eversberg y J. Lambrecht, «Evaluating digital work instructions with augmented reality versus paper-based documents for manual, object-specific repair tasks in a case study with experienced workers», *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 127, n.º 3-4, pp. 1859-1871, 2023, doi: 10.1007/s00170-023-11313-4.
- [44] C. Garcia, M. Ortega, E. Ivorra, M. Contero, P. Mora, y M. L. Alcañiz, «Holorailway: an augmented reality system to support assembly operations in the railway industry», *Adv. Manuf.*, mar. 2024, doi: 10.1007/s40436-023-00479-5.
- [45] J. A. Erkoyuncu, I. F. del Amo, M. Dalle Mura, R. Roy, y G. Dini, «Improving efficiency of industrial maintenance with context aware adaptive authoring in augmented reality», *CIRP Ann.*, vol. 66, n.º 1, pp. 465-468, ene. 2017, doi: 10.1016/j.cirp.2017.04.006.
- [46] H. Kang, J. Yang, B. -S. Ko, B. -S. Kim, O. -Y. Song, y S. -M. Choi, «Integrated Augmented and Virtual Reality Technologies for Realistic Fire Drill Training», *IEEE Comput. Graph. Appl.*, vol. 44, n.º 2, pp. 89-99, abr. 2024, doi: 10.1109/MCG.2023.3303028.
- [47] M. Ortega, E. Ivorra, A. Juan, P. Venegas, J. Martínez, y M. Alcañiz, «MANTRA: An Effective System Based on Augmented Reality and Infrared Thermography for Industrial Maintenance», *Appl. Sci.*, vol. 11, n.º 1, Art. n.º 1, ene. 2021, doi: 10.3390/app11010385.
- [48] F. K. Konstantinidis, I. Kansizoglou, N. Santavas, S. G. Mouroutsos, y A. Gasteratos, «MARMA: A Mobile Augmented Reality Maintenance Assistant for Fast-Track Repair Procedures in the Context of Industry 4.0», *Machines*, vol. 8, n.º 4, 2020, doi: 10.3390/machines8040088.
- [49] A. R. Pinto, J. Kildal, y E. Lazkano, «Multimodal Mixed Reality Impact on a Hand Guiding Task with a Holographic Cobot», *Multimodal Technol. Interact.*, vol. 4, n.º 4, 2020, doi: 10.3390/mti4040078.

- [50] R. Maio *et al.*, «Pervasive Augmented Reality to support logistics operators in industrial scenarios: a shop floor user study on kit assembly», *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 127, n.º 3-4, pp. 1631-1649, 2023, doi: 10.1007/s00170-023-11289-1.
- [51] H. Dorloh, K.-W. Li, y S. Khaday, «Presenting Job Instructions Using an Augmented Reality Device, a Printed Manual, and a Video Display for Assembly and Disassembly Tasks: What Are the Differences?», *Appl. Sci.*, vol. 13, n.º 4, 2023, doi: 10.3390/app13042186.
- [52] L. Yi, M. Glatt, S. Ehmsen, W. Duan, y J. C. Aurich, «Process monitoring of economic and environmental performance of a material extrusion printer using an augmented reality-based digital twin», *Addit. Manuf.*, vol. 48, 2021, doi: 10.1016/j.addma.2021.102388.
- [53] K. Zywicki y P. Bun, «Process of Materials Picking Using Augmented Reality», *IEEE Access*, vol. 9, pp. 102966-102974, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3096915.
- [54] D. Mourtzis, V. Siatras, y J. Angelopoulos, «Real-Time Remote Maintenance Support Based on Augmented Reality (AR)», *Appl. Sci.*, vol. 10, n.º 5, Art. n.º 5, ene. 2020, doi: 10.3390/app10051855.
- [55] Z.-H. Lai, W. Tao, M. C. Leu, y Z. Yin, «Smart augmented reality instructional system for mechanical assembly towards worker-centered intelligent manufacturing», *J. Manuf. Syst.*, vol. 55, pp. 69-81, abr. 2020, doi: 10.1016/j.jmsy.2020.02.010.
- [56] A. Doshi, R. T. Smith, B. H. Thomas, y C. Bouras, «Use of projector based augmented reality to improve manual spot-welding precision and accuracy for automotive manufacturing», *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 89, n.º 5, pp. 1279-1293, mar. 2017, doi: 10.1007/s00170-016-9164-5.
- [57] M.-J. Maibach, M. Jones, y C. Walko, «Using augmented reality to reduce workload in offshore environments», *CEAS Aeronaut. J.*, vol. 13, n.º 2, pp. 559-573, abr. 2022, doi: 10.1007/s13272-022-00578-2.
- [58] S. Wu, H. Chen, L. Hou, G. (Kevin) Zhang, y C.-Q. Li, «Using Eye-Tracking to Measure Worker Situation Awareness in Augmented Reality», *Autom. Constr.*, vol. 165, p. 105582, sep. 2024, doi: 10.1016/j.autcon.2024.105582.
- [59] D. Borro, Á. Suescun, A. Brazález, J. M. González, E. Ortega, y E. González, «WARM: Wearable AR and Tablet-Based Assistant Systems for Bus Maintenance», *Appl. Sci.*, vol. 11, n.º 4, 2021, doi: 10.3390/app11041443.
- [60] M. Saghafian, K. Laumann, R. S. Akhtar, y M. R. Skogstad, «The Evaluation of Virtual Reality Fire Extinguisher Training», *Front. Psychol.*, vol. 11, nov. 2020, doi: 10.3389/fpsyg.2020.593466.