

Inteligencia artificial aplicada a la gestión del mantenimiento

Jhonathan Vladimir Torres Martínez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Especialista en Gerencia de
Mantenimiento

Director

Octavio Andrés Gonzales Estrada

Ingeniero mecánico, PhD

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías

Fisicomecánicas Escuela de

Ingeniería Mecánica

Especialización en Gerencia de Mantenimiento

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

Este artículo está dedicado a mis padres, mi hijo y todos los profesionales que compartieron conmigo en la especialización y académicos que trabajan incansablemente en el campo de la inteligencia artificial aplicada a la gestión del mantenimiento. Su dedicación y compromiso son fundamentales para impulsar la innovación y mejorar la eficiencia en las organizaciones.

Agradecimientos

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron a la realización de este trabajo. En primer lugar, agradezco a mis colegas y colaboradores por su apoyo y sus valiosas contribuciones durante el proceso de investigación y redacción.

Además, quiero expresar mi gratitud a los autores e investigadores cuyo trabajo sirvió como base para este estudio. Sus ideas y descubrimientos han sido fundamentales para enriquecer nuestro análisis y comprensión del tema.

También deseo agradecer a las instituciones y organizaciones que brindaron recursos y apoyo logístico para llevar a cabo esta investigación.

Finalmente, agradezco a mis amigos y familiares por su constante ánimo y apoyo a lo largo de este proyecto. Su aliento y comprensión fueron cruciales para mantenerme motivado durante todo el proceso.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	12
1. Objetivos.....	16
1.1. Objetivo General	16
1.2. Objetivos Específicos	16
2. Metodología.....	17
3. Revisión del Estado del Arte	18
4. Análisis Bibliométrico	21
4.1. Revisión Bibliográfica y Análisis De Literatura.....	21
4.2. Ecuaciones de Búsqueda Utilizadas en la Base de Datos Scopus:	21
4.3. Identificación De Fuentes.....	26
4.4. Procesamiento De Datos.....	27
4.5. Visualización De Redes De Colaboración.....	28
4.6. Análisis De Tendencias Temporales	31
4.6.1. Tendencia Temporal	32
4.6.2. Años Destacados.....	34
4.6.3. Años Con Menor Actividad.....	37
4.6.4. Comparación Con El Pasado	37
4.7. Cálculo De Indicadores Bibliométricos.....	38

4.8.	Identificación De Temas Relevantes.....	38
4.9.	Métricas Cuantitativas	38
4.9.1.	Frecuencias De Citas	38
4.9.2.	Índice H	39
4.9.3.	Número De Publicaciones	40
4.9.4.	Selección De Artículos Relevantes.....	43
4.9.5.	Análisis de Síntesis De La Información	44
4.9.6.	Recopilación De Datos	45
4.9.7.	Validación De resultados	49
4.10.	Métricas Cualitativas	49
4.10.1.	Inteligencia Artificial en la gestión de mantenimiento	50
4.10.2.	Procesamiento De Lenguaje Natural (NLP).....	53
4.10.3.	Redes Neuronales Artificiales.....	55
4.10.4.	Internet De Las Cosas (IoT)	56
4.10.5.	Realidad Aumentada (AR).....	57
4.10.6.	Gemelos Digitales (Digital Twins).....	58
4.10.7.	Relevancia Temática.....	60
4.10.8.	Calidad Metodológica.....	60
4.11.	Resultados Esperados	61
	Conclusiones.....	64

Recomendaciones65

Referencias Bibliografía67

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Vos Viewer redes – estrucutra comunidad científica.....	31
Figura 2 Documentos por año	32
Figura 3 Frecuencia de citas Vos Viewer	39
Figura 4 Ilustración publicaciones por autor	41
Figura 5 Ilustración 2documentos por año por fuente.....	46
Figura 6 Ilustración 3Vosviewer co-citación- cited sources.....	47
Figura 7 Modulo Overlay	50
Figura 8 Machine Learning Vos Viewer.....	52
Figura 9 Resultados Machine Learning.....	53
Figura 10 Resultados	62
Figura 11 Mapa de calor.....	63

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Número de publicaciones por autor.....	42
Tabla 2 Documentos por año y fuente.....	48

Glosario

Análisis Bibliométrico: método de investigación que utiliza métricas cuantitativas para analizar la producción científica, como la cantidad de publicaciones, citas, y la red de colaboraciones entre investigadores, con el fin de evaluar el impacto y la relevancia de un tema de investigación.

Costos Operativos: gastos asociados con la operación y el mantenimiento de los activos de una organización, que incluyen mano de obra, materiales, energía y servicios externos.

Estado del Arte: revisión exhaustiva de la literatura y el conocimiento existente sobre un tema específico en un momento dado, que proporciona una visión general de los avances, tendencias y desafíos en el campo de estudio.

Eficiencia Operativa: capacidad de una organización para maximizar la producción y el rendimiento de sus activos, minimizando al mismo tiempo los costos, los desperdicios y los tiempos de inactividad.

Fiabilidad de los Activos: medida de la capacidad de los activos de una organización para operar de manera continua y consistente, cumpliendo con los requisitos de desempeño y minimizando los fallos y averías.

Gestión del Mantenimiento: conjunto de actividades y procesos destinados a garantizar el correcto funcionamiento y la conservación de los activos físicos de una organización, como maquinaria, equipos e instalaciones.

Inteligencia Artificial (IA): campo de la informática que se enfoca en la creación de sistemas capaces de realizar tareas que requieren inteligencia humana, como el razonamiento, la resolución de problemas, el aprendizaje y la percepción.

Métricas Cuantitativas: medidas numéricas utilizadas para evaluar y cuantificar diversos aspectos de un fenómeno o proceso, como la cantidad, la frecuencia, la magnitud o el impacto.

Revisión Cualitativa: proceso de análisis que se centra en la comprensión en profundidad de los aspectos cualitativos de un fenómeno, como las percepciones, interpretaciones y significados, a menudo a través de métodos como el análisis de contenido o el enfoque de la teoría fundamentada.

Tecnología Emergente: avances tecnológicos reciente que muestran un alto potencial de impacto y aplicación en diversas áreas, como la inteligencia artificial, la computación cuántica, la biotecnología y la nanotecnología

Resumen

Título: Inteligencia artificial aplicada a la gestión del mantenimiento*

Autor: Jhonathan Vladimir Torres Martínez**

Palabras Clave: Gestión del Mantenimiento, Inteligencia Artificial, Eficiencia Operativa, Optimización de Recursos, Predictividad.

Descripción:

La gestión del mantenimiento ha evolucionado de enfoques reactivos a estrategias proactivas, integrando tecnología y análisis de datos para mejorar la eficiencia y el aprovechamiento de los activos. La implementación de la Inteligencia Artificial (IA) se presenta como fundamental en este proceso, superando los métodos programados y preventivos tradicionales. Además, la IA ofrece capacidades predictivas que permiten anticipar fallos en equipos, optimizar programas de mantenimiento y reducir tiempos de inactividad no planificados, minimizando costos y optimizando recursos. Sus beneficios incluyen corrección de errores, reducción de costos laborales y aumento de la rentabilidad empresarial. La presente investigación es de tipo documental – descriptiva y analítica, desarrollada bajo un enfoque mixto empezando con una búsqueda documental sistemática en bases de datos seguida de un análisis de los artículos seleccionados, identificando tendencias, enfoques metodológicos y hallazgos clave sobre la temática abordada. La información relevante se sintetizó para proporcionar una visión general de los avances recientes en el campo.

* Trabajo de Grado

** Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica.
Director: Octavio Andrés Gonzales Estrada. Ingeniero mecánico, PhD.

Abstract

Title: Artificial Intelligence Applied to Maintenance Management *

Author: Jhonathan Vladimir Torres Martínez **

Key Words: Maintenance Management, Artificial Intelligence, Operational Efficiency, Resource Optimization, Predictivity.

Description:

Maintenance management has evolved from reactive approaches to proactive strategies, integrating technology and data analysis to improve efficiency and asset utilization. The implementation of Artificial Intelligence (AI) is presented as fundamental in this process, surpassing traditional programmed and preventive methods. In addition, AI offers predictive capabilities that allow you to anticipate equipment failures, optimize maintenance programs and reduce unplanned downtime, minimizing costs and optimizing resources. Its benefits include error correction, reduced labor costs, and increased business profitability. The present research is of a documentary type – descriptive and analytical, developed under a mixed approach starting with a systematic documentary search in databases followed by an analysis of the selected articles, identifying trends, methodological approaches and key findings on the topic addressed. Relevant information was synthesized to provide an overview of recent advances in the field. It is concluded that AI positively impacts maintenance management, improving performance and responsibility and is positioned as a strategic tool for resource optimization and constant innovation in organizations.

* Degree Work

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering.
Advisor: Octavio Andres Gonzales Estrada, PhD.

Introducción

A lo largo del tiempo, la gestión de mantenimiento ha experimentado una notable evolución, pasando de enfoques reactivos a estrategias proactivas que integran tecnología y análisis de datos para mejorar la eficiencia y el rendimiento de los activos organizacionales. En este contexto, la implementación de la Inteligencia Artificial (IA), (Palacios , 2023) emerge como un recurso fundamental para optimizar las estrategias de mantenimiento. (Álvarez et al. , 2023), Esta transición implica superar los métodos tradicionales programados y preventivos mediante el uso de la IA y sus tecnologías asociadas, representando así una oportunidad significativa para el área de mantenimiento al potenciar la seguridad y la eficiencia operativa de los activos

La gestión del mantenimiento, vital para el éxito de cualquier organización que opera con maquinaria o equipos, tiene como objetivo primordial garantizar la confiabilidad, seguridad y eficiencia de los activos, mientras minimiza los costos y los tiempos de inactividad. (Cristhian & Ramón, 2023) Tradicionalmente, se ha fundamentado en dos enfoques principales: el reactivo, que implica intervenir solo en caso de falla, lo que puede generar reparaciones costosas, inactividades no planificadas y riesgos para la seguridad; y el preventivo, que consiste en realizar mantenimiento a intervalos regulares, independientemente del estado real del equipo, lo que puede resultar ineficiente e innecesario. (García, et al. , 2022).

La capacidad predictiva de la IA, al anticipar posibles fallos en los equipos y optimizar los programas de mantenimiento, se traduce en una reducción del tiempo de inactividad no planificado, la minimización de costos asociados al mantenimiento y una asignación más eficiente de recursos, (Hurtado, Villareal, & Villareal, 2016). Entre

los beneficios de la implementación de la IA en el mantenimiento se incluyen la corrección de errores, la reducción de costos laborales y, lo más importante, un aumento en la rentabilidad empresarial. En la búsqueda constante de eficiencia y optimización de recursos, la Inteligencia Artificial se convierte en una herramienta estratégica fundamental. (Forero Corba & Negre Bennasar, 2024).

Dada la importancia y el potencial de esta tecnología, es esencial realizar investigaciones que fortalezcan las competencias a nivel global, contribuyendo a comprender cómo las herramientas basadas en Inteligencia Artificial pueden potenciar la función de mantenimiento y gestión de activos en las organizaciones, promoviendo así la constante innovación y la mejora continua, (Alhaj et al. , 2022). La gestión eficiente del mantenimiento es un componente crítico en diversas industrias, ya que afecta directamente la disponibilidad de equipos, la calidad de producción y los costos operativos, (Ramos et al. , 2019). Tradicionalmente, este proceso ha dependido en gran medida de enfoques reactivos o planificaciones estáticas, lo que puede llevar a tiempos de inactividad no planificados, costos elevados y una menor confiabilidad de los equipos, (Gondres, Lajes, & Castillo, 2018).

El uso de la inteligencia artificial (IA) en el ámbito del mantenimiento industrial plantea una serie de desafíos y oportunidades que merecen una atención detallada, (Álvarses et al. , 2023). Aunque la IA ofrece la promesa de mejorar la eficiencia, reducir costos y aumentar la disponibilidad operativa de los activos, su implementación conlleva desafíos significativos (Calderón, Flores, & Chavarri, 2022). Entre ellos se encuentran la necesidad de datos de alta calidad y la integración efectiva de sistemas de monitoreo y

diagnóstico basados en IA en los procesos existentes de mantenimiento, (López-Martín, 2024). Además, la adopción de la IA plantea interrogantes sobre la capacitación del personal, la seguridad cibernética y la gestión de cambios organizativos necesarios para aprovechar plenamente su potencial (Adamson, Campbell, & Orsoni, 2005). Por lo tanto, es fundamental abordar estos desafíos para maximizar los beneficios que la IA puede aportar al campo del mantenimiento industrial, (Walas & Redchuk, 2021).

En los últimos años, la inteligencia artificial (IA) ha surgido como una herramienta revolucionaria para revolucionar la gestión del mantenimiento (Rojek et al. , 2023). La IA brinda la capacidad de predecir de manera más precisa las fallas al analizar grandes volúmenes de datos provenientes de sensores, registros históricos de mantenimiento y otras fuentes, lo que permite identificar patrones y pronosticar cuándo es probable que ocurra una falla (Fernández et al. , 2022). Además, ofrece la posibilidad de optimizar las estrategias de mantenimiento al determinar la táctica más efectiva para cada tipo de equipo, teniendo en cuenta aspectos como costos, confiabilidad y riesgos asociados, (Forcael er al. , 2023). Asimismo, la IA posibilita la automatización de tareas repetitivas y tediosas, como la inspección visual de equipos o la generación de informes de mantenimiento, lo que contribuye a mejorar la eficiencia y reducir los tiempos de inactividad, (Zheng, Zhang, & Shi, 2023).

A pesar del gran potencial que ofrece, la adopción de la inteligencia artificial (IA) en la gestión del mantenimiento aún se encuentra en sus etapas iniciales debido a diversas barreras, (Gondres, Lajes, & Castillo, 2018). Estas incluyen la falta de conocimiento y experiencia en muchas empresas para implementar la IA en sus procesos de mantenimiento, los costos de implementación, especialmente para las

pequeñas y medianas empresas, y el desafío de integrar la IA con los sistemas de gestión de mantenimiento existentes, (Farfán & Zepeda, 2020). Con el objetivo de abordar esta problemática, este artículo se propone responder a la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo puede la inteligencia artificial superar las barreras existentes y ser utilizada de manera efectiva para optimizar la gestión del mantenimiento en las organizaciones? Para ello, se llevará a cabo un análisis de las tecnologías de IA más relevantes para la gestión del mantenimiento, se revisarán las experiencias de empresas que han implementado la IA en sus procesos de mantenimiento, se identificarán las mejores prácticas para la implementación exitosa de la IA en este ámbito, y se presentarán recomendaciones para las empresas que buscan implementar la IA en la gestión del mantenimiento. Se espera que este artículo contribuya significativamente a la adopción de la IA en la gestión del mantenimiento, permitiendo a las organizaciones mejorar la confiabilidad, seguridad y eficiencia de sus activos, al mismo tiempo que reducen los costos y los tiempos de inactividad, (Antosz et al. , 2021).

Este trabajo tiene como objetivo abordar cómo la inteligencia artificial puede superar estas barreras y ser utilizada de manera efectiva para optimizar la gestión del mantenimiento en las organizaciones. Para ello, se analizaron tecnologías de IA relevantes, se revisaron experiencias en su implementación y se identificaron mejores prácticas, lo cual permite presentar recomendaciones para la adopción exitosa de la IA en la gestión del mantenimiento. Se espera que este artículo contribuya a mejorar la fiabilidad, seguridad y eficiencia de los activos, mientras se reducen costos y tiempos de inactividad.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Evaluar la pertinencia y perspectivas futuras del uso de la inteligencia artificial aplicada a la gestión del mantenimiento, por medio de una revisión del estado del arte y análisis bibliométrico, empleando métricas cuantitativas y revisión cualitativa, con el propósito de recopilar y analizar datos de diversas fuentes e identificar tecnologías emergentes para la aplicación de la inteligencia artificial en el mantenimiento.

1.2. Objetivos Específicos

- Realizar una revisión exhaustiva del estado del arte en el ámbito de la inteligencia artificial aplicada en la gestión del mantenimiento en la base de datos bibliográfica Scopus.
- Llevar a cabo un análisis bibliométrico para evaluar la producción científica relacionada con la aplicación de inteligencia artificial en la gestión del mantenimiento con la ayuda del software VosViewer.
- Emplear métricas cuantitativas para evaluar el impacto de las investigaciones existentes en términos de resultados tangibles en la gestión del mantenimiento.
- Realizar una revisión cualitativa para identificar tecnologías emergentes y posibles direcciones futuras en la aplicación de inteligencia artificial al mantenimiento.

2. Metodología

Para abordar nuestro estudio sobre la aplicación de inteligencia artificial en la gestión del mantenimiento, implementamos una metodología rigurosa y estructurada. En primer lugar, definimos claramente los objetivos y alcances de nuestra investigación. A continuación, desarrollamos ecuaciones de búsqueda específicas, las cuales fueron diseñadas meticulosamente para garantizar la obtención de resultados precisos y exhaustivos en bases de datos académicas clave, como Scopus. Estas ecuaciones se centraron en términos relevantes para nuestro tema de estudio, como "inteligencia artificial" y "gestión de mantenimiento", y fueron ajustadas según las necesidades específicas de nuestra investigación.

Una vez recopilados los artículos relevantes, llevamos a cabo un análisis bibliométrico detallado. Esto incluyó la recopilación de datos bibliográficos esenciales, como autores, instituciones, revistas y citas recibidas. Además, examinamos las tendencias temporales en la publicación de estos artículos para identificar períodos de crecimiento o declive en la investigación relacionada con nuestra temática.

Para evaluar la calidad y el impacto de los artículos seleccionados, utilizamos tanto métricas cualitativas como cuantitativas. Las métricas cualitativas nos permitieron evaluar la relevancia temática y la originalidad de los enfoques presentados en los artículos. Por otro lado, las métricas cuantitativas, como el número de citas y la frecuencia de publicación, nos proporcionaron una medida objetiva del impacto y la influencia de cada artículo en la comunidad académica.

En resumen, esta metodología nos brindó una aproximación integral para comprender el estado actual de la investigación en nuestra área de interés, identificando patrones, áreas de interés y posibles direcciones para investigaciones futuras.

3. Revisión del Estado del Arte

La literatura sobre la aplicación de inteligencia artificial en la gestión de mantenimiento es amplia y diversa, abarcando estudios sobre diagnóstico de fallas (Hurtado Cortés, Villarreal López, & Villarreal López, 2016), pronóstico de vida útil de activos, optimización de inventarios de repuestos, entre otros temas relevantes, (Rojek et al. , 2023). Estas investigaciones han demostrado el potencial significativo de la IA para mejorar la confiabilidad, disponibilidad y rendimiento de los activos industriales (Borroto et al. , 2021), así como para reducir los costos operativos asociados al mantenimiento, (Fuentes & Gratzia, 2022). En resumen, la combinación de la evolución histórica de la gestión de mantenimiento con los avances en inteligencia artificial representa una oportunidad única para impulsar la eficiencia y la competitividad en diversas industrias (García García et al. , 2022). Sin embargo, es fundamental comprender en profundidad tanto las estrategias tradicionales como las tecnologías emergentes para aprovechar al máximo su potencial en el contexto específico de cada organización (Awuku et al. , 2023).

El desarrollo de las temáticas abordadas en la literatura se llevó a cabo mediante una exhaustiva búsqueda en la base de datos Scopus (Velmutugan, Saravanasankar, & Bathrinath, 2022). Esta metodología permitió explorar de manera sistemática y completa el cuerpo existente de conocimiento relacionado con el desarrollo de la

inteligencia artificial en la gestión del mantenimiento (Fernández Álvarez, 2018). A través de Scopus, se pudo acceder a una amplia gama de estudios académicos (Pan et al. , 2021), informes técnicos y artículos de revistas especializadas que abordaban temáticas relevantes para el fortalecimiento y la salvaguarda de los recursos empresariales (Granados Ferreira, 2022).

La búsqueda en Scopus se realizó utilizando términos clave relacionados con la inteligencia artificial, el mantenimiento industrial y la gestión de recursos empresariales, (Fuentes & Gratzia, 2022). Posteriormente, se aplicaron filtros y criterios de selección para identificar los estudios más relevantes y pertinentes para la investigación en cuestión, (Álvarez et al., 2023). Esta estrategia garantizó la obtención de información útil y actualizada que contribuyó significativamente a enriquecer las bases teóricas y conceptuales de la propuesta de investigación (Rojek et al., 2023).

Para abordar el enfoque de mantenimiento, se hace referencia a la distinción planteada por (Amirat, Benbouzid, Bensaker, & Wamkeue, 2007), quienes señalan que el mantenimiento preventivo se fundamenta en la ejecución de inspecciones y actividades programadas con el propósito de prevenir fallas imprevistas (Abidi, Mohammed, & Alkhalefah, 2022). En contraste, el mantenimiento predictivo, como lo describen, (Wang, Zhu, & Zhao, 2024), se apoya en el análisis de datos para anticipar cuándo es probable que ocurran fallos, lo que facilita una intervención precisa y oportuna (Hurtado Cortés, Villarreal López, & Villarreal López, 2016).

Para esta etapa de la investigación, se analiza la aplicación de la inteligencia artificial (IA) en el contexto de la gestión del mantenimiento (Tume Fuentes, 2022). Según lo señalado por (Obura et al. , 2024), la IA se ha destacado como una

herramienta poderosa para mejorar la eficiencia operativa. En particular, se hace referencia a la implementación de algoritmos de aprendizaje automático, procesamiento de lenguaje natural y otras técnicas de IA (García García et al. , 2022).

Esta aplicación de la IA en la gestión del mantenimiento ha abierto nuevas perspectivas y posibilidades. Según lo indicado por (Kao, S & Chien, C, 2023), estas incluyen la detección temprana de fallos, la optimización de las programaciones de mantenimiento y la toma de decisiones más informadas (Ramírez, Sarmiento, & Lopez-Lezama, 2018). Estos aspectos son cruciales para mejorar la efectividad y la eficiencia de los procesos de mantenimiento en diversos contextos industriales (Serras et al. , 2020).

Se han realizado análisis detallados de las tecnologías de IA más relevantes para la gestión del mantenimiento (Márquez, Alberca, & del Castillo, 2023), incluyendo algoritmos de aprendizaje automático, redes neuronales, sistemas expertos y procesamiento de lenguaje natural, (Kale et al. , 2023). Se evalúan cómo estas tecnologías pueden abordar los desafíos específicos del mantenimiento industrial y superar las barreras identificadas (Xie & Wan, 2023). También se han llevado a cabo revisiones de experiencias empresariales con casos de estudio y experiencias de empresas que han implementado la IA en sus procesos de mantenimiento, (Antosz et al. , 2021). Se analizaron los éxitos y desafíos encontrados en la implementación de la IA (Wang et al., 2024), así como las lecciones aprendidas que puedan guiar a otras organizaciones en su propio viaje hacia la adopción de la IA en la gestión del mantenimiento (Rojek et al., 2023).

La revisión de la literatura permite identificar mejores prácticas para la implementación exitosa de la IA en la gestión del mantenimiento (Antosz et al., 2021). Considerando las lecciones aprendidas de la literatura y las experiencias empresariales, se presentan recomendaciones específicas que permiten a las organizaciones adoptar la IA en su estrategia de mantenimiento, con el objetivo de maximizar los beneficios y minimizar los riesgos asociados (Gondres, Lajes, & Castillo, 2018).

4. Análisis Bibliométrico

4.1. Revisión Bibliográfica y Análisis De Literatura.

Se inicia con una exhaustiva revisión de la literatura relacionada con la utilización de la inteligencia artificial en el mantenimiento, abarcando estudios académicos, informes técnicos, artículos de revistas especializadas y otras fuentes relevantes (Ibarra, 2024). Esta revisión analiza las tendencias, los enfoques metodológicos, las tecnologías utilizadas y los resultados obtenidos en investigaciones previas.

4.2. Ecuaciones de Búsqueda Utilizadas en la Base de Datos Scopus:

- **Ecuación de Búsqueda General:**
 - ("maintenance management" AND "artificial intelligence") Esta cadena de búsqueda se utiliza de manera general y se aplica en todos los campos de los documentos. Inicialmente, esta búsqueda arroja un total de 4,017 documentos encontrados. Luego, para refinar los resultados, se filtra la búsqueda por campos específicos, como el título del artículo, el resumen

y las palabras clave, y se limita el tipo de documento a "artículo". Esto reduce el número de documentos a 2,215. Entre estos documentos, el artículo con el mayor número de citas es "Aprendizaje Automático para el Mantenimiento Predictivo", el cual cuenta con 534 citas y fue publicado en la revista "Transacciones IEEE sobre Informática Industrial". Los autores de este artículo son Susto, Georgia de EE. UU., Schirru, A., Pampuri, S., McLoone,

S. y Beghi, A. (Susto et al. , 2014).

- ("neural AND networks AND in AND industrial AND maintenance AND management") La búsqueda inicial con la cadena arrojó un total de 4,152 documentos encontrados. Luego de aplicar filtros adicionales por palabras clave ("mantenimiento" e "inteligencia artificial") y limitar el tipo de documento a "artículo", se redujo el número de documentos a 24. Uno de los documentos resultantes es (Zio, 2022), "Prognostics and Health Management (PHM): Where are we and where do we (need to) go in theory and practice", escrito por Zio, E., publicado en la revista "Reliability Engineering and System Safety" en el año 2022. Este artículo ha recibido 202 citas.
- ("digital twins applied to maintenance management") arrojó un total de 43 documentos encontrados. Al filtrar y limitar por palabras clave ("mantenimiento" e "inteligencia artificial") y por tipo de documento (artículo), se obtuvieron 24 documentos relevantes. Entre ellos, se destacan los siguientes: "Evaluación inteligente digital impulsada por gemelos de la degradación de la superficie de los engranajes" de (Feng et

al. , 2023), publicado en "Sistemas Mecánicos y Procesamiento de Señales" en 2023, con 107 citas; "Gemelos digitales de microrredes: conceptos, aplicaciones y tendencias futuras" de (Bazmohammadi et al. , 2021), en "Acceso IEEE" en 2022, con 73 citas; y "Monitoreo multimedia del estado del puente basado en el conocimiento mediante un gemelo digital" de (Kang, J, Chung, & Hong, E, 2021), en "Herramientas y Aplicaciones Multimedia" en 2021, con 50 citas. Estos documentos proporcionan información valiosa sobre la aplicación de gemelos digitales en la gestión de mantenimiento.

- ("natural language maintenance") La búsqueda utilizando la cadena "natural language maintenance" arrojó un total de 627 elementos. Al limitarla por palabras clave ("mantenimiento" e "inteligencia artificial"), se obtuvieron 91 documentos relevantes. Entre estos documentos, se destacan varios artículos importantes, como "Investigación y Aplicación de Inteligencia Artificial en Operación y Mantenimiento de Equipos Eléctricos" de (Zhang, Zhang, & Hu, 2020), publicado en "Gaodianya Jishu/Ingeniería de Alto Voltaje" en 2020, con 89 citas; "Procesamiento del Lenguaje Técnico: Desbloquear el Conocimiento de Mantenimiento" de (Brundage et al. , 2021) "Cartas de Fabricación" (Jain & Vaishya, 2021), con 54 citas; y "Asignación Automatizada de Personal para el Mantenimiento de Edificios Mediante Procesamiento de Lenguaje Natural" (Mo et al. , 2020), en "Automatización en la Construcción" (Cai et al. , 2020), con 42 citas. Estos documentos proporcionan valiosos

conocimientos sobre la aplicación de la inteligencia artificial en el mantenimiento.

- ("vibration AND sound AND analysis AND in AND maintenance") La búsqueda utilizando las palabras clave "vibration AND sound AND analysis AND in AND maintenance" arrojó un total de 80 documentos. Sin embargo, al limitarla por palabras clave específicas relacionadas con el mantenimiento, el número se redujo a 16 documentos. Entre los documentos más relevantes se encuentran: "Una Fusión de Información Multisensor para el Diagnóstico de Fallas de una Caja de Cambios que Utiliza Características de Ondas Discretas" por (Kumar et al. , 2019. En "Ciencia y Tecnología de Medición" (Lin, Zheng, & Li, 2019), con 46 citas; "Detección Automática y Eficiente de Fallos en Maquinaria Rotativa Mediante Señales Sonoras" por (Altaf et al. , 2019). en "Acústica Australia" en 2019, con 24 citas; y "Método de Diagnóstico de Fallas de la Rueda Guía del Transportador de Correa Basado en una Señal Sonora" (Peng et al. , 2020) en "Revista de Ciencia y Tecnología Mecánica" en 2023, con 4 citas. Estos documentos ofrecen valiosa información sobre el análisis de vibraciones y sonidos en el mantenimiento de equipos industriales.
- ("Augmented Reality (AR) applied to Maintenance Management") La búsqueda de "Augmented Reality (AR) applied to Maintenance Management" arrojó inicialmente 15 documentos. Sin embargo, al limitarla, se redujo a 6 documentos relevantes. Entre ellos se encuentran: "Mantenimiento remoto de realidad aumentada basado en la nube a través del monitoreo del taller: un enfoque de sistema de producto-

servicio" por (Mourtzis et al. , 2017), en "Revista de Ciencia e Ingeniería de Manufactura, Transacciones de la ASME" en 2017, con 105 citas; "Desarrollo de un sistema de mantenimiento y evaluación de riesgos de instalaciones basado en BIM-AR" por (Wang, T & Piao, 2019), en "Revista de Desempeño de Instalaciones Construidas" en 2019, con 37 citas; y "Un paso hacia la estandarización de los servicios de mantenimiento y entrenamiento en sistemas militares C4I con aplicación de Realidad Mixta" por (Ullo et al. , 2019). en "Medición: Revista de la Confederación Internacional de Medición" en 2019, con 30 citas. Estos documentos ofrecen valiosa información sobre la aplicación de la realidad aumentada en la gestión de mantenimiento.

- **Ecuación de Búsqueda Detallada:**

("inteligencia artificial" OR "IA") AND ("gestión del mantenimiento" OR "mantenimiento industrial") AND ("predictive maintenance" OR "mantenimiento predictivo" OR "machine learning" OR "aprendizaje automático" OR "data mining" OR "minería de datos" OR "artificial neural networks" OR "redes neuronales artificiales")

- **Ecuación de Búsqueda Ampliada:**

("inteligencia artificial" OR "IA" OR "machine learning" OR "aprendizaje automático" OR "artificial neural networks" OR "redes neuronales artificiales" OR "predictive maintenance" OR "mantenimiento predictivo" OR "data mining" OR "minería de datos" OR "deep learning" OR "aprendizaje profundo") AND ("gestión del

mantenimiento" OR "mantenimiento industrial" OR "maintenance management" OR "maintenance optimization" OR "optimización del mantenimiento")

Estas ecuaciones de búsqueda fueron una herramienta fundamental para localizar artículos pertinentes sobre la aplicación de inteligencia artificial en la gestión del mantenimiento en la base de datos Scopus. Se pueden ajustar según las necesidades específicas de investigación y los términos de interés para explorar con mayor profundidad. Se filtraba la información por medio de las cadenas de búsqueda ya que no se encontraban documentos que coincidieran con las palabras claves

Para llevar a cabo un análisis bibliométrico exhaustivo, se emplearon herramientas especializadas como Scopus y el software VosViewer. Estas plataformas son ampliamente reconocidas en el ámbito de la bibliometría por su capacidad para analizar y visualizar datos bibliográficos de manera precisa y detallada. El uso combinado de Scopus y VosViewer nos permitió cuantificar la producción científica relacionada con la aplicación de la inteligencia artificial en la gestión del mantenimiento, así como visualizar las relaciones y colaboraciones entre diversos autores, instituciones y países que contribuyen al avance de este campo. Además, se evaluaron indicadores clave como el número de citas, el factor de impacto y la colaboración interdisciplinaria para comprender mejor la influencia y el alcance de las investigaciones en la comunidad académica y profesional. Este análisis nos proporcionó una visión integral y objetiva de la evolución y el estado actual de la investigación en este campo en constante desarrollo.

4.3. Identificación De Fuentes

Para llevar a cabo una búsqueda exhaustiva y rigurosa, se utilizaron diversas fuentes académicas y científicas de renombre. Inicialmente, se accedió a la Biblioteca de la Universidad Industrial de Santander (UIS), aprovechando su amplia colección de recursos académicos. Además, se empleó la potente herramienta Scopus, reconocida por su eficacia en estudios bibliométricos y evaluaciones de producción científica. Scopus ofrece una amplia gama de funcionalidades que facilitan el análisis bibliométrico, incluyendo perfiles de autor e institución, rastreador de citas, índice h y analizador de revistas científicas. Su colección multidisciplinar abarca una amplia variedad de disciplinas a nivel mundial, proporcionando acceso a resúmenes, referencias e índices de literatura científica, técnica y médica. Además de Scopus, se consultaron otras bases de datos relevantes como IEEE Xplore y ScienceDirect, con el fin de ampliar la cobertura y asegurar la inclusión de estudios relevantes en el campo de la inteligencia artificial aplicada a la gestión de mantenimiento, (Fuentes & Gratzia, 2022). Durante el proceso de búsqueda, se emplearon términos clave cuidadosamente seleccionados para garantizar la precisión y exhaustividad de los resultados obtenidos.

- Inteligencia artificial
- Mantenimiento industrial
- Gestión del mantenimiento
- Predictive maintenance (mantenimiento predictivo)
- Machine learning (aprendizaje automático)
- Data mining (minería de datos)
- Artificial neural networks (redes neuronales artificiales)

- Maintenance management (gestión del mantenimiento)
- Maintenance optimization (optimización del mantenimiento)
- Maintenance strategies (estrategias de mantenimiento)

La combinación de estas fuentes proporcionó una base sólida y completa para la identificación de estudios pertinentes, permitiendo así realizar un análisis comprehensivo del estado del arte en este campo en constante evolución.

4.4. Procesamiento De Datos

El proceso de procesamiento de datos comenzó una vez que se recopilaron todos los datos relevantes. Se implementó un preprocesamiento exhaustivo con el objetivo de limpiar y organizar la información de manera efectiva. Esta etapa abarcó la eliminación de duplicados para garantizar la integridad de los datos y la normalización de los términos para homogeneizar la información. Además, se llevó a cabo la corrección de posibles errores que pudieran afectar la precisión de los resultados. Para optimizar aún más la selección de documentos, se filtraron las cadenas de búsqueda y palabras clave más relevantes, priorizando aquellos documentos con mayor citación. Este enfoque permitió centrarse en los trabajos más influyentes y pertinentes dentro del ámbito de estudio, asegurando así la calidad y relevancia de los datos analizados.

Una vez completadas estas etapas preliminares, se procedió a filtrar los documentos en función de su relevancia y popularidad, priorizando aquellos que presentaban un mayor número de citas o que estaban relacionados con las cadenas de búsqueda y palabras clave más relevantes para el estudio. Esta selección cuidadosa permitió focalizar el análisis en los documentos más influyentes y pertinentes para los

objetivos de la investigación.

4.5. Visualización De Redes De Colaboración

Utilizando VosViewer, se generarán redes de colaboración entre autores, instituciones y países que contribuyen a la investigación en el campo de la inteligencia artificial aplicada al mantenimiento. Estas redes permitieron identificar patrones de colaboración y visualizar la estructura de la comunidad científica.

En la Figura 1, creada mediante el software, se pueden identificar elementos que destacan más que otros, lo cual sugiere una mayor relevancia o frecuencia en la aparición de ciertas palabras clave. Esta prominencia suele estar relacionada con términos que han sido citados repetidamente por otros investigadores en el campo.

El análisis de los clusters generados por VosViewer proporciona una visión detallada de los temas y áreas de investigación relacionados con la aplicación de inteligencia artificial en la gestión del mantenimiento. Cada color representa un conjunto específico de temas que han sido identificados a partir de la bibliografía analizada. A continuación, se presenta una breve explicación de cada cluster:

- **Cluster Rojo:** Este cluster abarca temas relacionados con la arquitectura del diseño, tecnologías de inteligencia artificial, automatización, manejo de datos, minería de datos, aprendizaje profundo y redes de transmisión de energía eléctrica, entre otros. Destaca la presencia de temas relacionados con la aplicación de tecnologías avanzadas en el mantenimiento, como la inteligencia artificial y el análisis de datos.
- **Cluster Verde:** En este cluster se agrupan temas vinculados con la inteligencia artificial, el control presupuestario, los sistemas de gestión de mantenimiento

asistido por computadora y la toma de decisiones. Se observa una relación directa con la utilización de herramientas tecnológicas para mejorar la gestión y el control de los recursos en el mantenimiento.

- **Cluster Azul:** Este cluster se centra en aspectos relacionados con la gestión de activos, los costos, la adquisición de datos, la confiabilidad y el ciclo de vida de los equipos. Destaca la importancia de la gestión eficiente de los recursos y la optimización de los procesos de mantenimiento.
- **Cluster Amarillo:** Aquí se agrupan temas como el mantenimiento basado en la condición, el monitoreo de la condición, los gemelos digitales, la optimización y la programación. Este cluster resalta la relevancia de la implementación de estrategias predictivas y proactivas en el mantenimiento.
- **Cluster Morado:** En este cluster se incluyen temas relacionados con la educación en ingeniería, sistemas inteligentes, aprendizaje automático y redes neuronales. Sugiere un enfoque en el desarrollo y la aplicación de tecnologías inteligentes en el ámbito del mantenimiento.
- **Cluster Azul Claro:** Este cluster se enfoca en la eficiencia energética, la industria 4.0 y el mantenimiento predictivo, evidenciando la importancia de la integración de tecnologías emergentes para optimizar los procesos de mantenimiento.
- **Cluster Naranja:** Aquí se destacan temas relacionados con el análisis y diagnóstico de fallas, incluyendo la detección y el diagnóstico de fallos mediante lógica difusa. Este cluster resalta la relevancia de la identificación temprana de problemas en los equipos para evitar posibles fallas y optimizar la eficiencia del mantenimiento.

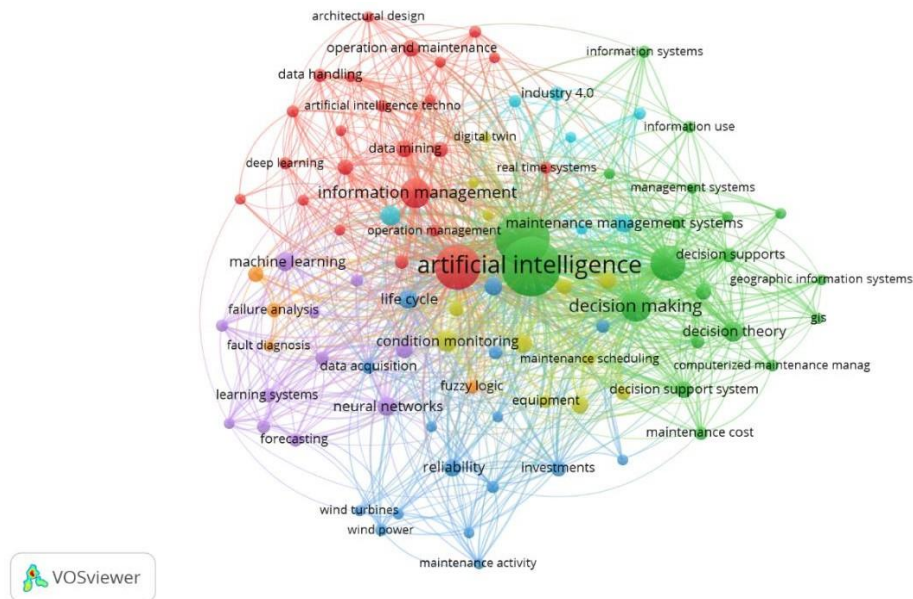
Es importante recordar que la interpretación de los colores puede variar según el contexto y la finalidad de la visualización de datos. Además, los usuarios tienen la flexibilidad de personalizar los colores según sus propias preferencias y necesidades

específicas en herramientas como VOS Viewer.

En redes tan extensas como esta, puede resultar difícil identificar los clusters a simple vista. Sin embargo, el software proporciona una pestaña de colores que nos permite asociar cada color con un clúster específico. De esta manera, podemos entender que cada vértice en el gráfico representa a un autor que ha sido citado, y los nodos más grandes indican una mayor cantidad de citas recibidas.

Figura 1

Vos Viewer redes- estructura comunidad científica



Nota: En la figura los elementos que destacan más que otros están representados por colores más intensos o brillantes, lo que indica una mayor prominencia o escala en la visualización. Estos colores intensos suelen estar asociados con palabras clave que han sido citadas en numerosas ocasiones por colegas en el campo de estudio. Por otro lado, los elementos menos prominentes se muestran con colores más suaves o apagados, lo que sugiere una menor frecuencia de citación o relevancia en la red de términos.

4.6. Análisis De Tendencias Temporales

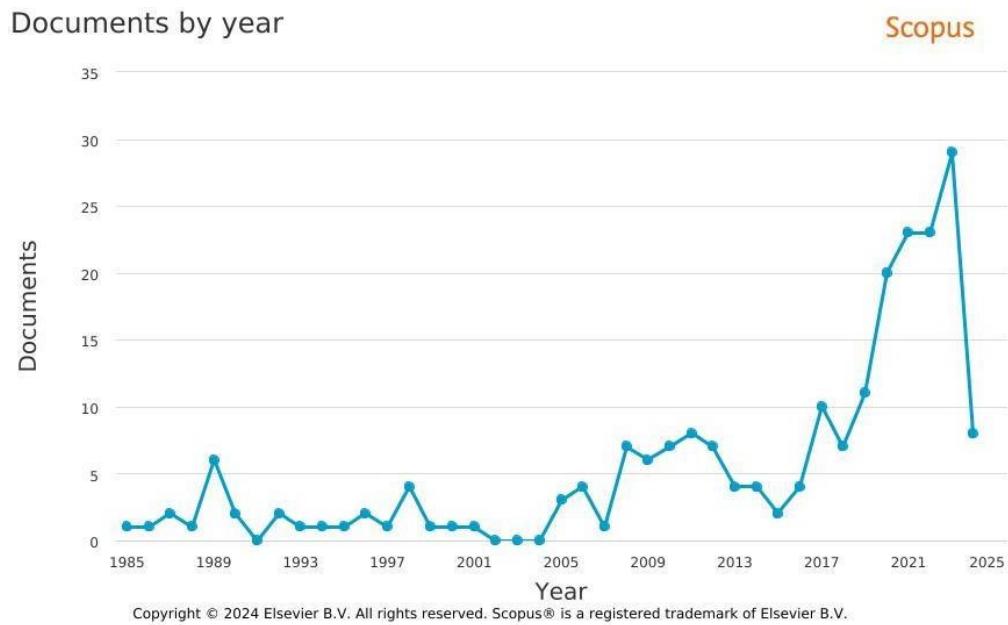
Se analizó la evolución temporal de la producción científica mediante gráficos que representen el número de publicaciones por año, figura 2, Esto permitió identificar

tendencias emergentes y evaluar el crecimiento del campo a lo largo del tiempo.

Ahora, con esta información, podemos comenzar a analizar la tendencia temporal de la producción científica en este campo. Por ejemplo, observamos un aumento significativo en la cantidad de documentos a partir de 2010, lo que podría indicar un creciente interés en el tema en la última década. Además, podemos identificar los años con el mayor número de publicaciones para investigar más a fondo qué eventos o avances podrían haber contribuido a este aumento.

Figura 2

Documentos por año



Nota: La imagen muestra que el pico más alto fue en el 2023 con 29 artículos publicados en Scopus.

4.6.1. Tendencia Temporal

Podemos observar una clara tendencia temporal en la producción científica en el campo de la inteligencia artificial aplicada a la gestión del mantenimiento. Desde finales de la década de 1990 hasta la década actual, se ha producido un aumento gradual

en el número de documentos publicados por año. Este aumento es especialmente notable a partir de 2010, lo que sugiere un creciente interés y actividad investigativa en este campo durante la última década. El aumento notable a partir de 2010 en la producción científica relacionada con la inteligencia artificial aplicada a la gestión del mantenimiento puede justificarse mediante el análisis de la información proporcionada sobre los documentos de conferencia. En el año 2010, se observa una serie de documentos significativos que abordan diversas facetas de este campo emergente.

- "Un sistema de apoyo a la toma de decisiones para integrar el mantenimiento correctivo, el mantenimiento preventivo y el mantenimiento basado en la condición" (Hao et al. , 2010). Este documento aborda la integración de diferentes estrategias de mantenimiento a través de un sistema de apoyo a la decisión, lo que refleja un enfoque más integral y avanzado en la gestión del mantenimiento.
- "Introducción del diagnóstico y pronóstico inteligente de fallas de máquinas" (Yang, O & Widodo, 2009). Este trabajo introduce conceptos clave como el diagnóstico y pronóstico inteligente de fallas, lo que sugiere un avance en la aplicación de técnicas de inteligencia artificial para mejorar la eficacia y la eficiencia del mantenimiento.
- "Apoyo a la toma de decisiones para la gestión del mantenimiento de zonas verdes" (Lee et al. , 2010). Este documento presenta un enfoque específico para la gestión del mantenimiento en un contexto particular, lo que indica una mayor atención a la aplicación de técnicas de inteligencia artificial en diferentes áreas de mantenimiento.

Estos destacan el nivel de innovación y el alcance de la investigación en inteligencia artificial aplicada a la gestión del mantenimiento en 2010. Además, la variedad de autores y fuentes involucradas sugiere una creciente colaboración y

difusión de conocimientos en el campo durante este período. Por lo tanto, el aumento en la producción científica a partir de 2010 puede atribuirse a un mayor interés y actividad investigativa en el campo, respaldado por avances significativos y una mayor conciencia de la importancia de la inteligencia artificial en la gestión del mantenimiento.

4.6.2. Años Destacados

Al observar los años con el mayor número de publicaciones, podemos identificar momentos clave en el desarrollo del campo. Por ejemplo, 2023 presenta un alto número de documentos (29), lo que podría indicar un período de actividad intensa o avances significativos en la investigación. Investigar más a fondo qué eventos o descubrimientos ocurrieron durante estos años destacados puede proporcionar información valiosa sobre las tendencias y avances en el campo.

- **Previsión de la Demanda de Repuestos en Flotas de Autobuses:** El artículo titulado "Previsión de la demanda de repuestos con métodos de regresión y aprendizaje automático" aborda un tema crucial para la gestión eficiente del mantenimiento en el transporte público. Utilizando métodos de regresión y aprendizaje automático, los autores proponen un enfoque para prever la demanda de repuestos en flotas de autobuses, lo que podría optimizar la planificación de inventario y reducir los tiempos de inactividad (Ífraz et al. , 2023).
- **Gemelo Digital en Fabricación Discreta:** El documento sobre el "Diseño y aplicación del método de modelado de fusión de cuatro dimensiones del gemelo digital a la línea de fabricación discreta" destaca la aplicación del gemelo digital en el sector manufacturero. Esta tecnología emergente permite la creación de réplicas virtuales de sistemas físicos, lo que facilita el monitoreo en tiempo real y la optimización de procesos en entornos de fabricación, (Xie & Wan, 2023)

- **Inteligencia Artificial en el Sector Energético:** El artículo "Inteligencia artificial (IA) en el sector de la energía sostenible" explora el papel de la inteligencia artificial en la transición hacia un sector energético más sostenible. Este trabajo destaca cómo la IA puede utilizarse para mejorar la eficiencia energética, optimizar la generación de energías renovables y facilitar la gestión inteligente de la demanda (Tiwari, 2023).
- **Gestión del mantenimiento basada en el análisis de fiabilidad de robots de soldadura mediante SVM:** Este artículo, publicado en el International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering, propone un enfoque para la gestión del mantenimiento de robots de soldadura basado en el análisis de fiabilidad utilizando SVM (Support Vector Machines). La aplicación de métodos de aprendizaje automático como SVM puede mejorar la eficiencia y la fiabilidad del mantenimiento en entornos industriales (Ech & Znaidi, 2023).
- **Gemelos digitales en aplicaciones de mantenimiento basado en la condición: Un estudio de caso para rodamientos de ejes de tren:** Publicado en Computers in Industry, este estudio presenta un caso de estudio sobre la aplicación de gemelos digitales en aplicaciones de mantenimiento basado en condiciones para rodamientos de ejes de tren. Los gemelos digitales permiten la creación de réplicas virtuales de sistemas físicos, lo que facilita el monitoreo y la optimización del rendimiento de los activos (Márquez, Alberca, & del Castillo, 2023).
- **CyberMan4.0: Mantenimiento avanzado en HSM Roll Shop:** Este artículo, publicado en Metallurgia italiana, describe el CyberMan4.0, un sistema avanzado de mantenimiento para talleres de laminación en caliente. El estudio destaca la aplicación de tecnologías avanzadas, como el Internet de las Cosas (IoT) y el análisis de datos, para mejorar la eficiencia y la fiabilidad del mantenimiento en la industria metalúrgica (Trevisan et al. , 2023).
- **Mejora de los paquetes de software de GMAO existentes mediante reglas de asociación:** Publicado en Revue d'Intelligence Artificielle, este artículo se centra

en mejorar los paquetes de software CMMS (Computerized Maintenance Management System) utilizando reglas de asociación. El estudio propone métodos para optimizar la funcionalidad y la eficiencia de los sistemas de gestión del mantenimiento mediante el análisis de reglas de asociación entre diferentes variables y parámetros (Beldjoudi, 2023).

- **Método y sistema de gestión inteligente de la operación y el mantenimiento de proyectos de ingeniería basados en BIM:**

- **Presentado en la 4th IEEE Global**

Conference for Advancement in Technology, este documento describe un método y un sistema de gestión inteligente de operación y mantenimiento para proyectos de ingeniería basados en BIM (Building Information Modeling). El estudio propone integrar tecnologías avanzadas, como el modelado de información de construcción (BIM) y la inteligencia artificial, para optimizar la operación y el mantenimiento de infraestructuras y proyectos de ingeniería (Liu, 2023).

- **Investigación sobre las tecnologías clave de la patrulla inteligente de subestaciones basada en WLAN de confianza:**

Presentado en las Proceedings - 2023 International Conference on Power System Technology, este artículo investiga las tecnologías clave para la patrulla inteligente de subestaciones eléctricas basada en WLAN (Wireless Local Area Network) confiable. El estudio propone soluciones para mejorar la eficiencia y la seguridad de las patrullas de mantenimiento en subestaciones eléctricas mediante el uso de redes inalámbricas confiables y sistemas de monitoreo inteligente (Zhang et al. , 2023).

- **Solución de Sistema de Monitorización del Estado de Equipos Eléctricos Basado en Arquitectura Orientada a Cosas:**

Presentado en las Proceedings - 2023 International Conference on Power System Technology, este documento presenta una solución para el monitoreo del estado de equipos eléctricos basada en una arquitectura orientada a las cosas (Things Oriented Architecture). El

estudio propone un enfoque integral para el monitoreo y la gestión del estado de equipos eléctricos en sistemas de energía, utilizando tecnologías IoT (Internet of Things) y sistemas de gestión de datos avanzados (Gong & Zhu, 2023).

- **Sistema integrado de gestión para el mantenimiento predictivo de carreteras interurbanas mediante técnicas de inteligencia artificial:** Presentado en el Congreso Internacional sobre Gestión de Proyectos e Ingeniería, este documento describe un sistema de gestión integrada para el mantenimiento predictivo de carreteras interurbanas utilizando técnicas de inteligencia artificial (Llopis-Castelló et al., 2021). El estudio propone un enfoque avanzado para la planificación y ejecución del mantenimiento de infraestructuras de transporte, aprovechando algoritmos de aprendizaje automático y análisis predictivo para mejorar la eficiencia y la fiabilidad del mantenimiento de carreteras (González-Marco et al. , 2023).

Estos ejemplos ilustran la diversidad de temas y aplicaciones que abarca la investigación en inteligencia artificial y gestión del mantenimiento en el año 2023. Cada uno de estos documentos contribuye al avance del conocimiento en el campo y ofrece perspectivas únicas sobre cómo la tecnología puede mejorar la eficiencia y la sostenibilidad en diversas industrias.

4.6.3. Años Con Menor Actividad

Por otro lado, hay años con una cantidad mínima o nula de documentos publicados, como 2004, 2003 y 2002. Estos años pueden representar períodos de menor actividad investigativa o interés en el campo. Identificar las razones detrás de esta baja actividad podría revelar desafíos o áreas de oportunidad para futuras investigaciones.

4.6.4. Comparación Con El Pasado

Es interesante observar que, si bien la cantidad de publicaciones ha aumentado

significativamente en los últimos años, hubo períodos en el pasado, como a fines de la década de 1980 y principios de la década de 1990, con una cantidad considerable de publicaciones. Investigar qué temas o desarrollos impulsaron la investigación en ese momento podría proporcionar información valiosa sobre el origen y la evolución del campo. Este análisis nos proporciona una visión general de la evolución temporal de la investigación en el campo de la inteligencia artificial aplicada a la gestión del mantenimiento. Identificar tendencias, años destacados y áreas de menor actividad nos permite comprender mejor el panorama investigativo y puede servir como punto de partida para investigaciones más detalladas y análisis adicionales.

4.7. Cálculo De Indicadores Bibliométricos

Se calcularon diversos indicadores bibliométricos, como el número total de publicaciones, el número de citas recibidas, el factor de impacto de las revistas y el índice h de los autores más influyentes. Estos indicadores proporcionarán información sobre la relevancia y la influencia de las investigaciones en el campo.

4.8. Identificación De Temas Relevantes

Mediante técnicas de análisis de clustering y análisis de co-ocurrencia de términos, se identificaron los temas más relevantes en la investigación sobre inteligencia artificial y gestión del mantenimiento. Esto permitirá identificar áreas de investigación prometedoras y establecer prioridades para futuros estudios.

4.9.2. Índice H

El índice H se tomó como una medida que combina la productividad y el impacto de un investigador o un conjunto de trabajos académicos. Se calculo considerando que un investigador tiene un índice H si ha publicado H trabajos que han sido citados al menos H veces cada uno.

Al observar los perfiles de distintos investigadores en Scopus, podemos identificar ejemplos concretos de cómo se calcula este índice. Por ejemplo:

- **Márquez, Fausto Pedro García:** Con 360 documentos publicados, ha recibido un total de 7,134 citas, lo que sugiere un índice H de 48. Esto significa que ha publicado al menos 48 trabajos que han sido citados al menos 48 veces cada uno.
- **Bin Mohd Aboobaidar, Burhanuddin:** Ha publicado 97 documentos que han recibido 1,172 citas, lo que indica un índice H de 18.
- **Saravanasankar, Subramaniam:** Con 37 documentos y 252 citas, su índice H es de 9.
- **Carpio, Manuel:** Tiene un total de 52 documentos y 802 citas, lo que resulta en un índice H de 17.
- **Del Castillo-Serpa, Alfredo M.:** Con 11 documentos y 46 citas, su índice H es de 3

Estos ejemplos muestran cómo se aplica el concepto de índice H para evaluar la productividad y el impacto de los investigadores en base a sus publicaciones y citas recibidas.

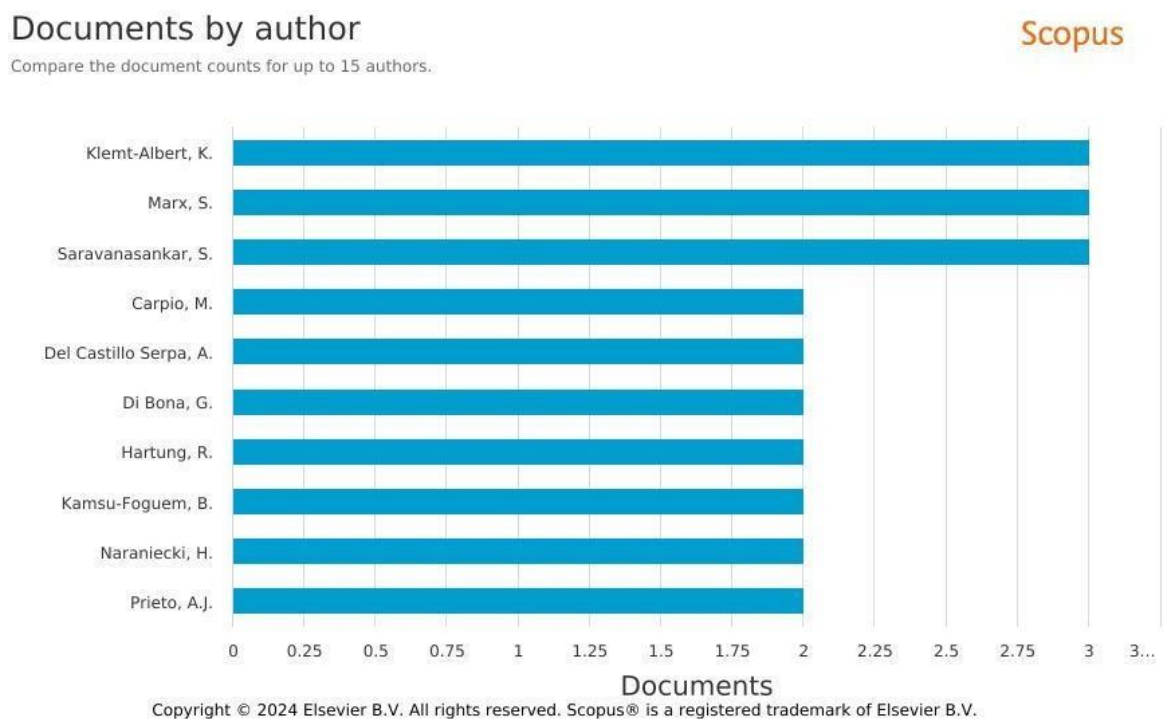
4.9.3. Número De Publicaciones

La métrica del número de publicaciones es fundamental para evaluar la

contribución académica y científica de un autor, una institución o un área temática específica. En Scopus, se realizó un análisis exhaustivo filtrando por título del artículo, resumen, palabras clave y limitando la búsqueda al tipo de documento "artículo" para garantizar la precisión en la cantidad de artículos recuperados. Además, los resultados se ordenaron por el número de citas recibidas, lo que proporciona una indicación adicional del impacto y la relevancia de cada publicación dentro del campo de estudio. Cuantas más publicaciones tenga un autor o una institución en un área temática determinada, mayor será su contribución a la producción científica en ese ámbito específico.

Figura 4

Ilustración publicaciones por autor



Nota: análisis scopus, cantidad de artículos académicos o científicos producidos por un autor, una institución o un área temática específica.

Tabla 1*Número de publicaciones por autor*

AUTOR	DOCUMENTO
Klemt-Albert, K.	3
Marx, S.	3
Saravanasankar, S.	3
Carpio, M.	2
Del Castillo Serpa, A.	2
Di Bona, G.	2
Hartung, R.	2
Kamsu-Foguem, B.	2
Naraniecki, H.	2
Prieto, A.J.	2
Velmurugan, K.	2
Abanda, H.F.	1
Abbondati, F.	1

Nota: presenta el recuento de publicaciones por autor durante un año. Los autores se enumeran junto con el número de documentos asociados a cada uno.

El análisis del número de publicaciones por año proporciona información relevante sobre la actividad investigativa de los autores en el campo de estudio. A partir de los datos proporcionados por Scopus, se observa que varios autores tienen múltiples publicaciones en un mismo año, lo que sugiere un alto nivel de actividad y contribución en el ámbito de la inteligencia artificial aplicada en la gestión del mantenimiento.

Por ejemplo, los autores Klemt-Albert, Marx y Saravanasankar tienen cada uno 3 publicaciones en un año determinado. Esto indica un compromiso significativo

con la investigación en este campo durante ese período específico. Por otro lado, hay otros autores que también han contribuido con múltiples publicaciones, aunque en menor medida, como Carpio, Del Castillo Serpa, Di Bona, Hartung, Kamsu-Foguem, Naraniecki, Prieto y Velmurugan, cada uno con 2 publicaciones en un año dado.

4.9.4. Selección De Artículos Relevantes

Se aplicaron criterios de inclusión y exclusión para seleccionar los artículos más relevantes, priorizando aquellos que abordaban específicamente la aplicación de inteligencia artificial en el contexto del mantenimiento.

Los criterios de inclusión podrían haber incluido:

- Artículos que exploran técnicas de inteligencia artificial aplicadas al mantenimiento predictivo, preventivo o correctivo.
- Estudios que investigan el desarrollo de modelos o algoritmos de IA para optimizar procesos de mantenimiento.
- Investigaciones que examinan el uso de sistemas expertos, redes neuronales, aprendizaje automático u otras tecnologías de IA en la gestión del mantenimiento.
- Artículos que presentan casos de estudio o aplicaciones prácticas de inteligencia artificial en entornos industriales o empresariales.

Por otro lado, los criterios de exclusión fueron:

- Artículos que no están relacionados directamente con la aplicación de inteligencia artificial en el mantenimiento.
- Estudios que se centran exclusivamente en aspectos teóricos de la inteligencia artificial sin una aplicación práctica en el mantenimiento.
- Investigaciones que se enfocan en otros aspectos del mantenimiento no relacionados con la inteligencia artificial.

- Artículos duplicados o que no cumplen con estándares de calidad académica.

Al aplicar estos criterios, se identificaron y seleccionaron los artículos más relevantes que contribuyen de manera significativa al avance del conocimiento en el campo de la inteligencia artificial aplicada al mantenimiento. Este proceso garantiza que los recursos se centren en la revisión de estudios que son pertinentes y ofrecen información valiosa para la investigación en curso.

4.9.5. Análisis de Síntesis De La Información

Se llevó a cabo un análisis detallado de los artículos seleccionados, identificando tendencias, enfoques metodológicos y hallazgos clave. La información relevante se sintetizó para proporcionar una visión general de los avances recientes.

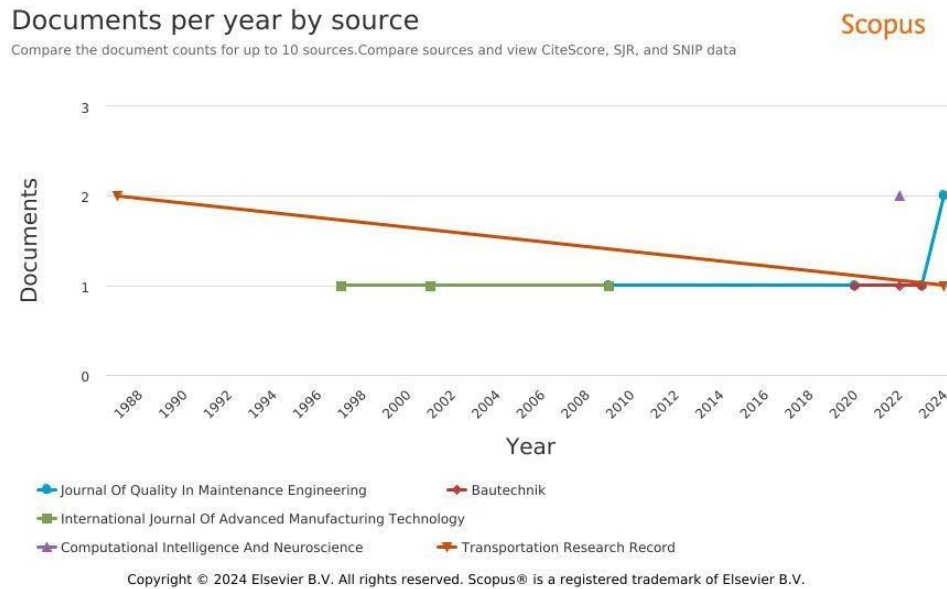
- **Tendencias Temporales:** Se observó un crecimiento significativo en la publicación de artículos relacionados con la inteligencia artificial aplicada al mantenimiento en los últimos años, con un notable aumento en la producción académica a partir del año 2015. Este incremento sugiere un interés creciente en el tema y un enfoque cada vez mayor en la investigación en este ámbito.
- **Enfoques Metodológicos:** Se identificaron diversos enfoques metodológicos utilizados en los estudios revisados. Entre ellos, destacan el uso de algoritmos de aprendizaje automático, análisis predictivo, modelos de optimización y sistemas de soporte a decisiones. Estos enfoques reflejan la diversidad de métodos empleados para abordar los desafíos en la gestión del mantenimiento mediante la inteligencia artificial.
- **Hallazgos Clave:** Los artículos revisados presentaron una variedad de hallazgos significativos en el campo. Entre ellos, se destacan el desarrollo de modelos predictivos precisos para la detección temprana de fallas, la optimización de procesos de mantenimiento mediante el uso de algoritmos avanzados y la

implementación de sistemas inteligentes de gestión de activos. Estos hallazgos demuestran el impacto positivo de la inteligencia artificial en la eficiencia y la efectividad de las operaciones de mantenimiento.

En resumen, el análisis de síntesis de la información revela un panorama dinámico y prometedor en la aplicación de inteligencia artificial en la gestión del mantenimiento. Los estudios revisados muestran avances significativos en la aplicación de diversas metodologías y enfoques para mejorar la eficiencia y la fiabilidad de los procesos de mantenimiento en diferentes sectores industriales

4.9.6. Recopilación De Datos

Se recopilaron datos bibliográficos de los artículos seleccionados, incluyendo información sobre autores, instituciones, revistas y citas recibidas. Así mismo, se examinaron las tendencias temporales en la publicación de artículos relacionados con la aplicación de inteligencia artificial en la gestión de mantenimiento, identificando períodos de crecimiento o declive en la investigación.

Figura 5*Ilustración 1 documentos por año por fuente*

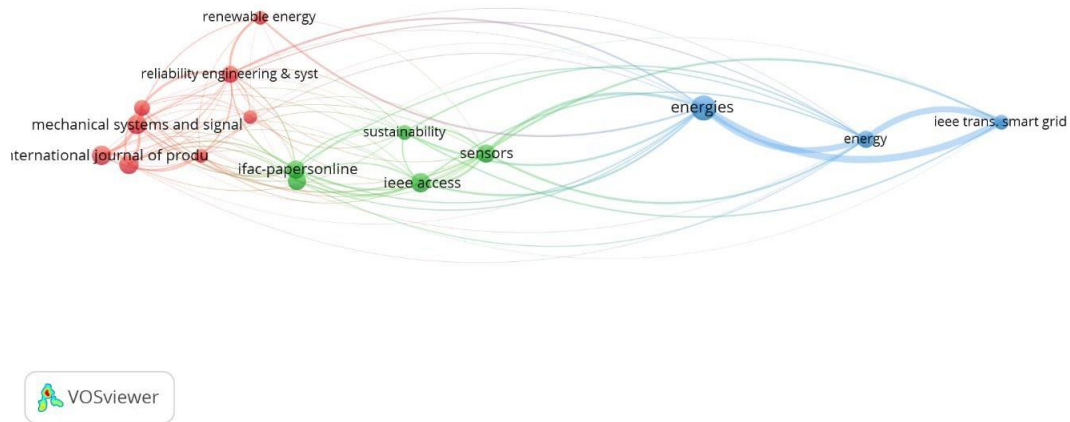
Nota: Los datos obtenidos revelan una amplia variedad de fuentes de publicación que abordan este tema, incluyendo revistas como Journal of Quality in Maintenance Engineering, Bautechnik, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Computational Intelligence and Neuroscience, y Transportation Research Record, entre otras.

Al observar la distribución de los documentos por año y fuente, se pueden identificar tendencias significativas en la producción académica. Por ejemplo, se observa un aumento en el número de documentos publicados en el Journal of Quality in Maintenance Engineering a lo largo de los años, lo que puede indicar un creciente interés en esta área de investigación en esa revista en particular. Del mismo modo, otras fuentes también muestran variaciones en la cantidad de documentos publicados a lo largo del tiempo, lo que puede reflejar cambios en el enfoque o la popularidad de ciertos temas dentro del campo de estudio. Este análisis detallado de los datos recopilados proporciona una visión general completa de los avances recientes en el

área de inteligencia artificial aplicada a la gestión de mantenimiento.

Figura 6

Ilustración 2 Vosviewer co-citacion- cited sources



Nota: Análisis de agrupamiento de revistas en el campo de la ingeniería y la tecnología

El análisis realizado con el VOS Viewer revela una agrupación de revistas en tres clusters distintos. En el cluster rojo, se encuentran revistas relacionadas con la automatización en la construcción, sistemas expertos, gestión de mantenimiento, y procesamiento de señales, entre otras áreas afines. Por otro lado, el cluster verde incluye revistas como IEEE Access, IFAC-PapersOnline y Procedia CIRP, sugiriendo una concentración en temas de acceso a la información, publicaciones en línea y eventos de la comunidad IFAC. Además, hay un tercer cluster que abarca revistas centradas en energías renovables, sistemas de energía y redes inteligentes. Este análisis proporciona una visión detallada de cómo las revistas se agrupan en diferentes áreas temáticas dentro de la ingeniería y la tecnología.

Tabla 2*Documentos por año y fuente*

Título	Autores	Fuente	Año	Citas
Aprendizaje automático para el mantenimiento predictivo: un enfoque de clasificadores múltiples	Susto, Georgia; Schirru, A.; Pampuri, S.; McLoone, S.; Beghi, A.	Transacciones IEEE sobre informática industrial	2015	534
Estudio comparativo de algoritmos de aprendizaje automático para la fabricación inteligente: Predicción del desgaste de herramientas mediante bosques aleatorios	Wu, D.; Jennings, C.; Terpenney, J.; Gao, R.X.; Kumara, S.	Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME	2017	438
Desarrollo de un marco de medición del rendimiento del mantenimiento: utilización del proceso de red analítica (ANP) para la selección de indicadores del rendimiento del mantenimiento.	Van Horenbeek, A.; Pintelon, L.	Omega (United Kingdom)	2014	171

4.9.7. Validación De resultados

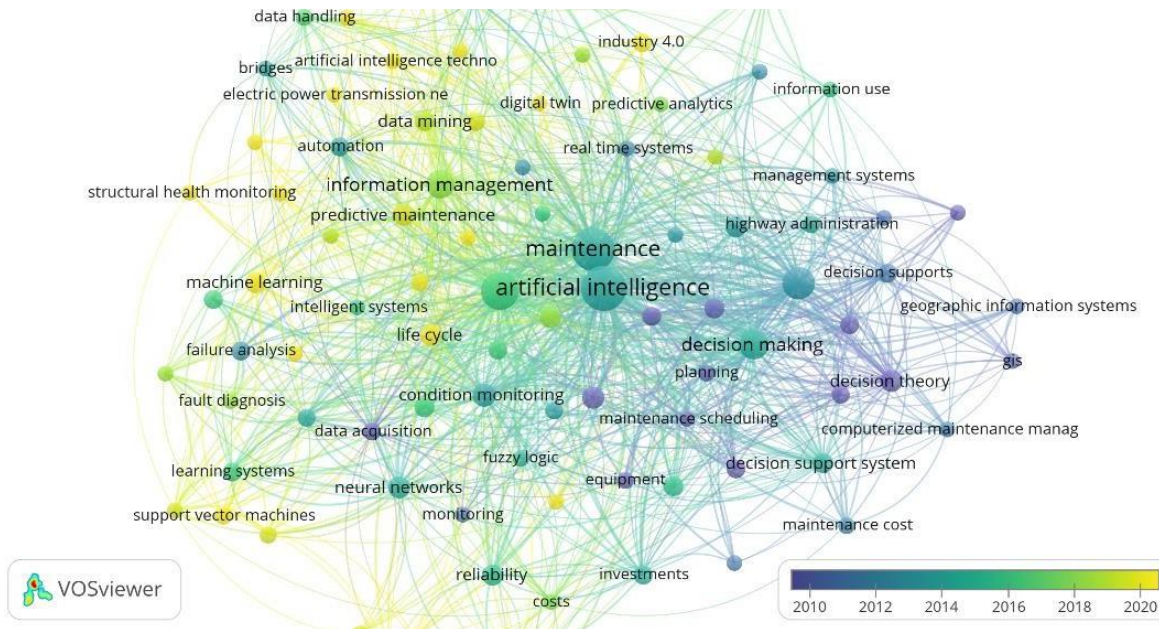
La revisión del estado del arte y el análisis bibliométrico proporcionando una visión integral y fundamentada sobre el panorama actual de la investigación en este campo, así como sobre las tendencias emergentes y las áreas de oportunidad para futuros estudios.

En el proceso de evaluación se emplearon tanto métricas cuantitativas como cualitativas para obtener una comprensión exhaustiva y precisa de los aspectos relevantes relacionados con la aplicación de la inteligencia artificial en la gestión de mantenimiento. A continuación, se explican estas métricas.

4.10. Métricas Cualitativas

Se llevo a cabo una revisión cualitativa de la literatura para identificar tecnologías emergentes y posibles direcciones futuras en la aplicación de inteligencia artificial al mantenimiento. Por ejemplo, examinamos estudios de casos y revisiones sistemáticas para identificar las tecnologías más prometedoras, como el aprendizaje automático basado en datos de sensores para la detección temprana de fallos en equipos de mantenimiento. También evaluamos las opiniones de expertos en el campo para obtener perspectivas sobre las tendencias emergentes y los desafíos futuros en la aplicación de inteligencia artificial al mantenimiento. A través del análisis detallado de este módulo Overlay figura 7, se detalla como la inteligencia artificial está transformando y optimizando los procesos de mantenimiento en diversas industrias.

Figura 7
Modulo Overlay



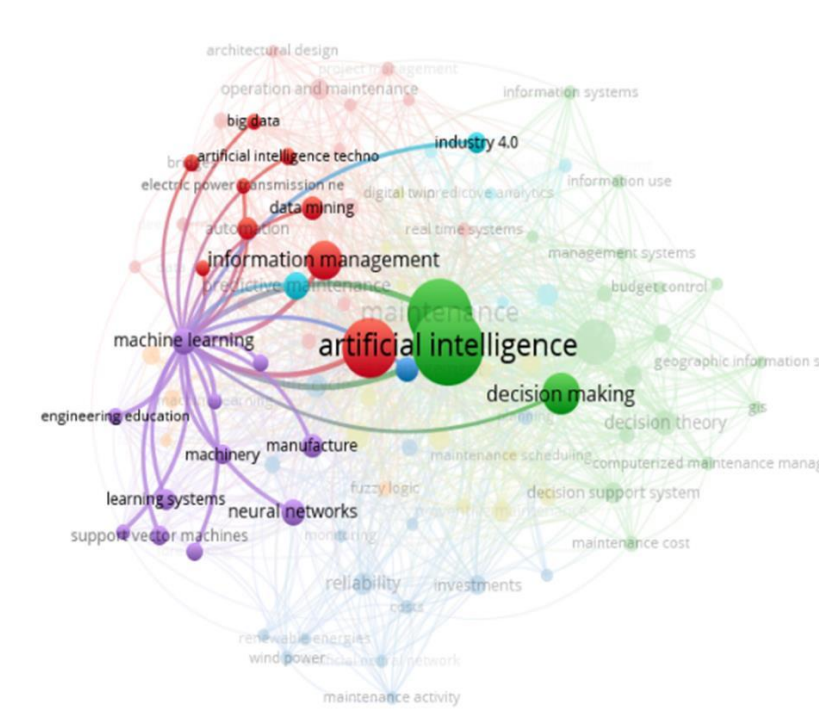
Nota: Podemos identificar tecnologías emergentes y las posibles direcciones futuras en la aplicación de inteligencia artificial al mantenimiento se encuentran ilustradas por colores desde la más antigua a las más modernas

4.10.1. Inteligencia Artificial en la gestión de mantenimiento

La inteligencia artificial comprende un conjunto de técnicas y algoritmos diseñados para que las máquinas puedan realizar tareas que requieren inteligencia humana, (Fuentes & Gratzia, 2022). En el contexto de la gestión de mantenimiento, la IA se utiliza para analizar datos, detectar patrones y tomar decisiones automatizadas con el objetivo de mejorar la eficiencia y la efectividad de los procesos de mantenimiento, esto puede resultar sumamente beneficioso al adoptar un enfoque predictivo en lugar de correctivo, (Awuku, Huang, & Yodo, 2023). En vez de aguardar el surgimiento de fallos la inteligencia artificial tiene la capacidad de anticipar cuando podrían producirse, posibilitando tomar medidas preventivas antes que ocurran daños significativos, (Rojek, et al. , 2023). Entre los conceptos clave de la inteligencia

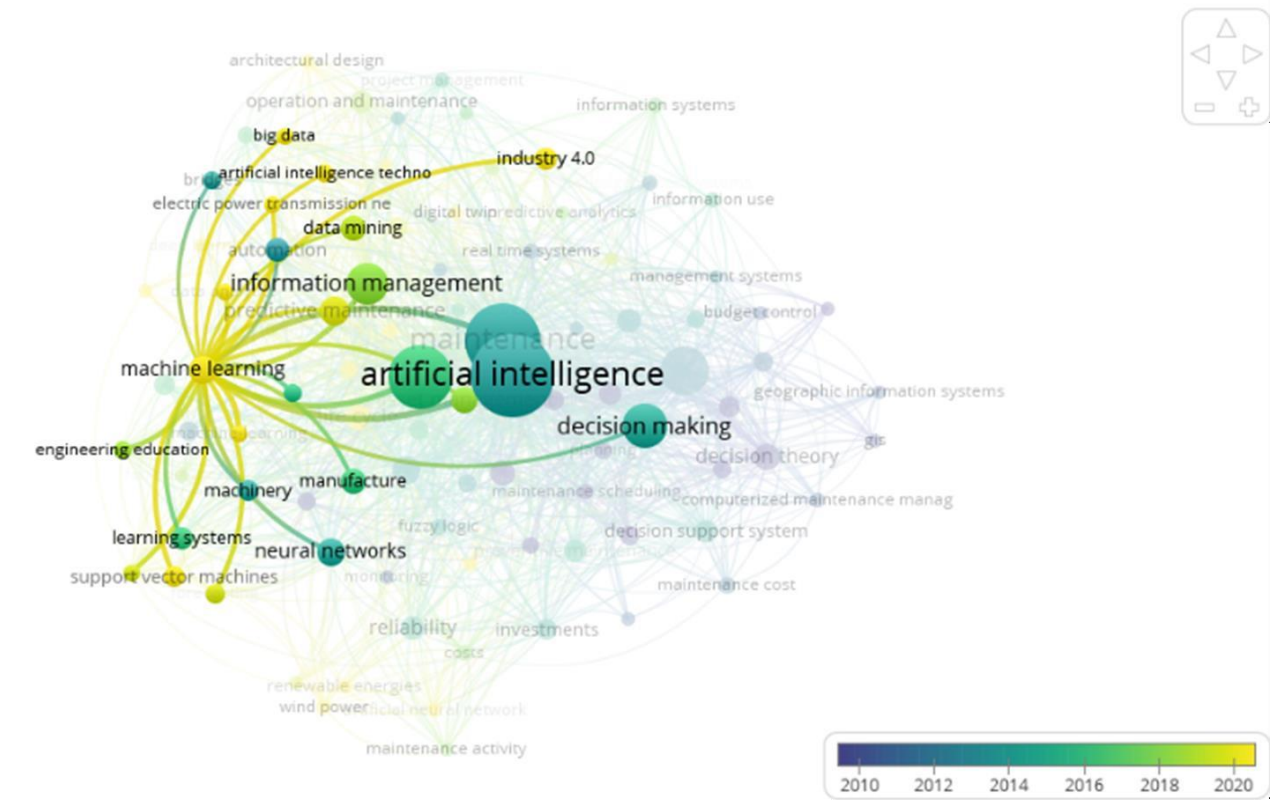
artificial aplicada al mantenimiento se encuentran:

- **Tecnologías Emergentes En La Gestión de Mantenimiento con IA:** El progreso tecnológico ha propiciado el surgimiento de una amplia gama de tecnologías innovadoras con un potencial considerable en el campo del mantenimiento. Estas tecnologías emergentes, impulsadas por la inteligencia artificial (IA), están revolucionando la forma en que se gestionan los activos industriales y se llevan a cabo las operaciones de mantenimiento, (Yang, Meng, & Zhang, 2024). Algunas de estas tecnologías y sus posibles aplicaciones son:
- **Aprendizaje Automático (Machine Learning):** Es una rama de la inteligencia artificial que se centra en el desarrollo de algoritmos que permiten a las computadoras aprender a partir de datos y mejorar su rendimiento con la experiencia, sin necesidad de una programación explícita, figura 8. Esta tecnología es fundamental en la gestión del mantenimiento predictivo, (Ricciardi Celsi & Valli, 2023). Los algoritmos de aprendizaje automático analizan grandes cantidades de datos históricos de equipos y procesos para identificar patrones y anomalías, (Awuku, Huang, & Yodo, 2023). Con esta información, pueden predecir posibles fallos antes de que ocurran, permitiendo así intervenciones preventivas y minimizando tiempos de inactividad no planificados, (Cardoso & Ferreira, 2021). El análisis realizado utilizando VOS Viewer sobre el tema de “Machine Learning”, figura 9, arrojó resultados significativos que ofrecen una visión profunda de la estructura y las relaciones dentro del campo.

Figura 8*Machine Learning Vos Viewer*

Nota: Mediante la detección de clusters o grupos de términos, se identificaron temas y subtemas dentro del campo del machine learning. Estos clusters representan áreas de investigación o enfoques específicos que son frecuentemente discutidos en la literatura científica.

El análisis realizado con Vos Viewer proporcionó una visión detallada y estructurada del campo del Machine Learning, permitiendo identificar temas clave, relaciones entre conceptos, colaboraciones entre investigadores y tendencias temporales. Estos hallazgos mostrados en la figura 9, los tomo desde el año 2010 a la fecha; son fundamentales para comprender la dinámica y la evolución de este campo en constante crecimiento.

Figura 9*Resultados Machine Learning*

Nota: El diagrama diferencia por medio de colores desde el 2010 siendo el más antiguo hasta la fecha de hoy con las tecnologías más recientes o las más utilizadas de acuerdo con los últimos tiempos.

4.10.2. Procesamiento De Lenguaje Natural (NLP)

Se refiere a la capacidad de las computadoras para entender, interpretar y generar lenguaje humano de manera natural. En el contexto del mantenimiento, el NLP se utiliza, por ejemplo, en la interpretación de informes de mantenimiento o en la comunicación con sistemas de soporte técnico.

La gestión del mantenimiento implica la interpretación y análisis de grandes cantidades de documentación técnica, como manuales de equipos, informes de mantenimiento y registros de servicio, (Fernández et al., 2022). La

inteligencia artificial basada en NLP puede automatizar la extracción de información relevante de estos documentos, facilitando la identificación de problemas recurrentes, la elaboración de planes de mantenimiento y la toma de decisiones informadas, (Adamson, Campbell, & Orsoni, 2005).

El anhelo de que las máquinas comprendan y respondan al lenguaje humano de manera coherente es una aspiración central del Procesamiento del Lenguaje Natural (PLN), una disciplina de la Inteligencia Artificial (IA) que está cobrando cada vez más importancia en el ámbito empresarial, especialmente en el contexto del mantenimiento. Esta tecnología permite a las empresas extraer información valiosa de los datos y automatizar tareas rutinarias, como traducciones, correcciones ortográficas y clasificación de temas, lo que contribuye significativamente a mejorar la eficiencia y la productividad en los procesos de mantenimiento.

El procesamiento de lenguaje natural es un mundo donde la tecnología y la ingeniería convergen para transformar la forma en que se gestiona el mantenimiento en entornos industriales, (Rojek et al., 2023). En un esfuerzo por mejorar la eficiencia y la comunicación entre técnicos y equipos de producción, se están desarrollando y aplicando mecanismos innovadores de interacción que permiten una comunicación más natural entre humanos y máquinas. Este avance representa un paso significativo hacia la implementación de sistemas que respondan a comandos y consultas en lenguaje natural, allanando el camino hacia una mayor automatización y optimización en la gestión de mantenimiento industrial.

4.10.3. Redes Neuronales Artificiales

Son modelos computacionales inspirados en la estructura y el funcionamiento del cerebro humano. Estas se utilizan en el análisis de datos para reconocer patrones complejos y tomar decisiones basadas en ellos. En resumen, las redes neuronales desempeñan un papel fundamental en la gestión del mantenimiento al permitir la predicción de fallos, el diagnóstico preciso de problemas, la optimización de los programas de mantenimiento y el análisis de datos de sensores para la detección temprana de anomalías. Su capacidad para aprender de los datos y adaptarse a diferentes contextos los convierte en una herramienta poderosa para mejorar la eficiencia y la fiabilidad de los sistemas industriales, (Villegas et al., 2021). Las redes neuronales son una tecnología crucial en el ámbito de la inteligencia artificial aplicada a la gestión del mantenimiento. Así se utilizan las redes neuronales en este campo:

- **Mantenimiento Predictivo:** Las redes neuronales se utilizan para construir modelos predictivos que pueden predecir fallos y problemas en equipos y maquinaria. Estos modelos aprenden de datos históricos de funcionamiento y mantenimiento para identificar patrones y tendencias que preceden a fallos o degradaciones en el rendimiento. Una vez entrenados, estos modelos pueden anticipar futuros problemas y sugerir acciones correctivas antes de que ocurran, (Guo, Li, & Shen, 2024).
- **Diagnóstico De Fallos:** Las redes neuronales se emplean para el diagnóstico automático de fallos en sistemas y equipos industriales. Estas redes pueden analizar datos de sensores y registros de operación para identificar anomalías y determinar la causa subyacente de los problemas de rendimiento, (Urgiles, Ortega, & Japa, 2019). Al identificar rápidamente la causa raíz de un fallo, los equipos de mantenimiento pueden tomar medidas correctivas de manera más eficiente.

- **Optimización De Procesos De Mantenimiento:** Las redes neuronales también se utilizan para optimizar los programas de mantenimiento, (Chen, Lai, & Lin, 2020), ayudando a determinar cuándo y cómo realizar actividades de mantenimiento preventivo. Al analizar datos históricos de mantenimiento y rendimiento, estas redes pueden identificar patrones de desgaste y determinar los intervalos óptimos entre mantenimientos para maximizar la disponibilidad de los equipos y minimizar los costos operativos.
- **Análisis De Vibraciones y Sonidos:** En aplicaciones donde el estado de la maquinaria se puede determinar mediante la vibración o el sonido, las redes neuronales se utilizan para analizar y clasificar estos datos. Por ejemplo, en el caso de rodamientos, una red neuronal puede identificar patrones característicos en las señales de vibración que indican un desgaste o una falla inminente, (Hsu, W & Chang, C, 2023).

Las redes neuronales, prometen transformar radicalmente la gestión del mantenimiento, (Villegas et al. , 2021). Estas redes ofrecen la capacidad de detectar fallos de manera temprana, optimizar programas de mantenimiento preventivo y mejorar la eficiencia general en múltiples sectores industriales. Su aplicación está allanando el camino hacia un futuro donde el mantenimiento predictivo y la gestión proactiva de activos son la norma, (Guo, Li, & Shen, 2024). En mantenimiento las redes neuronales se utilizan en una variedad de aplicaciones industriales, incluyendo: optimización de procesos, análisis de datos, mantenimiento predictivo, gestión de inventarios, mejora de la eficiencia, toma de decisiones informada, reducción de costos, (Kao, S & Chien, C, 2023).

4.10.4. Internet De Las Cosas (IoT)

La integración de sensores en equipos y maquinaria permite recopilar datos en

tiempo real sobre su estado y rendimiento. Estos datos se pueden utilizar para alimentar sistemas de inteligencia artificial y mejorar los modelos predictivos de mantenimiento, (Villa et al. ,2021). Además, el IoT facilita la monitorización remota, lo que permite a los equipos de mantenimiento supervisar el estado de los activos desde cualquier ubicación. (De Leon, Alcazar, & Villa, 2019). En el mantenimiento, el IoT se utiliza para monitorear el rendimiento de los equipos y predecir posibles fallas, (Walas & Redchuk, 2021), ha revolucionado la forma de ver y gestionar los sistemas de mantenimiento. Con una recopilación de datos más precisa y análisis en tiempo real, nos ha permitido supervisar nuestros activos de forma más eficiente y rentable

4.10.5. Realidad Aumentada (AR)

Proporciona información digital sobre el entorno físico, lo que permite a los técnicos visualizar manuales de mantenimiento, instrucciones de reparación o datos de diagnóstico superpuestos a los equipos en tiempo real, (Valentini et al. , 2023). La Realidad Aumentada ofrece una variedad de aplicaciones en la gestión del mantenimiento, incluyendo asistencia remota, formación y capacitación, visualización de datos, e inspección y análisis de equipos, (Serras et al. , 2020). Al mejorar la eficiencia y la eficacia de las operaciones de mantenimiento, la AR contribuye a reducir los tiempos de inactividad, aumentar la productividad y prolongar la vida útil de los activos industriales, (Fang, Nguyen, & Jing, 2023).

- **Asistencia Remota:** La Realidad Aumentada permite a los técnicos recibir asistencia remota mientras realizan tareas de mantenimiento. Utilizando dispositivos como gafas inteligentes o dispositivos móviles con capacidades de AR, los técnicos pueden superponer información relevante, como manuales de servicio, diagramas o instrucciones paso a paso, directamente en su campo de

visión. Esto les permite solucionar problemas de manera más rápida y eficiente, incluso si no tienen experiencia previa en la reparación de un equipo específico.

- **Formación y Capacitación:** La AR se utiliza para mejorar la formación y capacitación de los técnicos de mantenimiento. Mediante la creación de simulaciones interactivas y experiencias de aprendizaje inmersivas, los trabajadores pueden practicar procedimientos de mantenimiento en un entorno virtual antes de enfrentarse a situaciones reales, (Serras et al. 2020). Esto no solo ayuda a reducir los errores durante las operaciones de mantenimiento, sino que también acelera el proceso de capacitación y permite a los técnicos adquirir habilidades de manera más efectiva, (Yang, Meng, & Zhang, 2024).
- **Visualización De Datos:** La AR se utiliza para visualizar datos en tiempo real sobre el estado y el rendimiento de los equipos. Al superponer gráficos, métricas y datos de sensores directamente en el equipo o en el entorno de trabajo, los técnicos pueden monitorear el rendimiento de manera más efectiva y tomar decisiones informadas sobre el mantenimiento, (Kao, S & Chien, C, 2023). Esto ayuda a identificar anomalías y tendencias antes de que se conviertan en problemas mayores, permitiendo un mantenimiento proactivo y predictivo.
- **Inspección y Análisis:** La AR se emplea para facilitar la inspección y el análisis de equipos y componentes durante las operaciones de mantenimiento, (Pan, Zhang, & Zhou, 2021). Al superponer imágenes y datos de sensores en tiempo real sobre los activos físicos, los técnicos pueden identificar fácilmente áreas problemáticas, como puntos de desgaste o defectos, y tomar medidas correctivas de manera inmediata. Esto reduce el tiempo necesario para inspeccionar y analizar equipos, mejorando así la eficiencia de las operaciones de mantenimiento, (Shekargoftar et al., 2022).

4.10.6. Gemelos Digitales (Digital Twins)

Consisten en réplicas digitales de activos físicos que permiten simular su

comportamiento y realizar análisis predictivos, (Lehrfeld et al., 2024). Los gemelos digitales facilitan la optimización de estrategias de mantenimiento y la toma de decisiones basadas en datos. Los Gemelos Digitales, son una herramienta poderosa en la gestión del mantenimiento al permitir la creación de modelos virtuales precisos de equipos y sistemas industriales. Al proporcionar información detallada sobre el rendimiento y el estado de los activos, los Gemelos Digitales ayudan a optimizar las estrategias de mantenimiento, mejorar la eficiencia operativa y reducir los costos asociados con el mantenimiento y las reparaciones, (Rojek et al., 2023).

- **Modelado y Simulación:** Los Gemelos Digitales permiten crear modelos virtuales precisos de equipos, sistemas o procesos industriales, (Tavakoli, et al., 2024). Estos modelos son una réplica digital exacta de su contraparte física y están conectados en tiempo real a través de sensores y sistemas de monitoreo (Lehrfeld et al., 2024). Los datos recopilados de estos sensores se utilizan para actualizar constantemente el gemelo digital, lo que permite simular diferentes escenarios de funcionamiento y prever cómo responderán los activos a cambios en las condiciones de operación, (Kang, J, Chung, & Hong, E, 2021).
- **Análisis de Rendimiento:** Los Gemelos Digitales facilitan el análisis detallado del rendimiento de los equipos y sistemas. Al comparar el comportamiento del gemelo digital con los datos en tiempo real de la planta, los ingenieros de mantenimiento pueden identificar desviaciones, anomalías o tendencias preocupantes que podrían indicar problemas potenciales. Esto les permite tomar medidas proactivas para evitar fallos costosos y minimizar los tiempos de inactividad no planificados.
- **Optimización de Mantenimiento:** Los Gemelos Digitales permiten optimizar las estrategias de mantenimiento al proporcionar información detallada sobre el estado y el rendimiento de los activos. Al analizar datos históricos de mantenimiento y rendimiento, así como información en tiempo real del gemelo

digital, los equipos de mantenimiento pueden desarrollar programas de mantenimiento predictivo y preventivo más efectivos. Esto ayuda a maximizar la disponibilidad de los equipos, reducir los costos operativos y prolongar su vida útil.

- **Detección de Fallos y Resolución de Problemas:** Los Gemelos Digitales facilitan la detección temprana de fallos y la resolución de problemas al proporcionar una representación virtual en tiempo real de los activos físicos, (Feng et al. , 2023). Al simular diferentes escenarios y condiciones de funcionamiento, los ingenieros pueden identificar las causas subyacentes de los problemas de rendimiento y desarrollar estrategias de mantenimiento o ajustes operativos para abordarlos de manera efectiva, (Deebak, B & Al-Turjman, 2022).

La combinación de inteligencia artificial y tecnologías emergentes ofrece un amplio abanico de posibilidades para mejorar la gestión de mantenimiento, permitiendo una mayor eficiencia, reducción de costos y una mayor fiabilidad de los activos industriales, (Lehrfeld et al. , 2024).

4.10.7. Relevancia Temática

Se evalúa la pertinencia de los artículos seleccionados para la temática específica de la investigación. Se considera la claridad y la profundidad con la que se abordan los aspectos relacionados con la inteligencia artificial en la gestión de mantenimiento.

4.10.8. Calidad Metodológica

Se analiza la rigurosidad y la validez de los métodos utilizados en los artículos seleccionados. Se considera la adecuación de los enfoques metodológicos para abordar las preguntas de investigación planteadas y la validez de los resultados obtenidos.

La gestión del mantenimiento, en la actualidad, se enfrenta a la creciente demanda de mejorar la eficiencia y la efectividad en la operación de los activos simples y complejos. En este sentido, la inteligencia artificial (IA) emerge como una herramienta clave que promete transformar la forma en que se planifica, ejecuta y supervisa el mantenimiento de los equipos y maquinarias industriales. Este marco teórico se enfocará en explorar los conceptos fundamentales de la IA y su aplicación en la gestión del mantenimiento, así como las tecnologías emergentes que están impulsando la innovación en este ámbito, (Xia, et al. , 2023).

4.11. Resultados Esperados

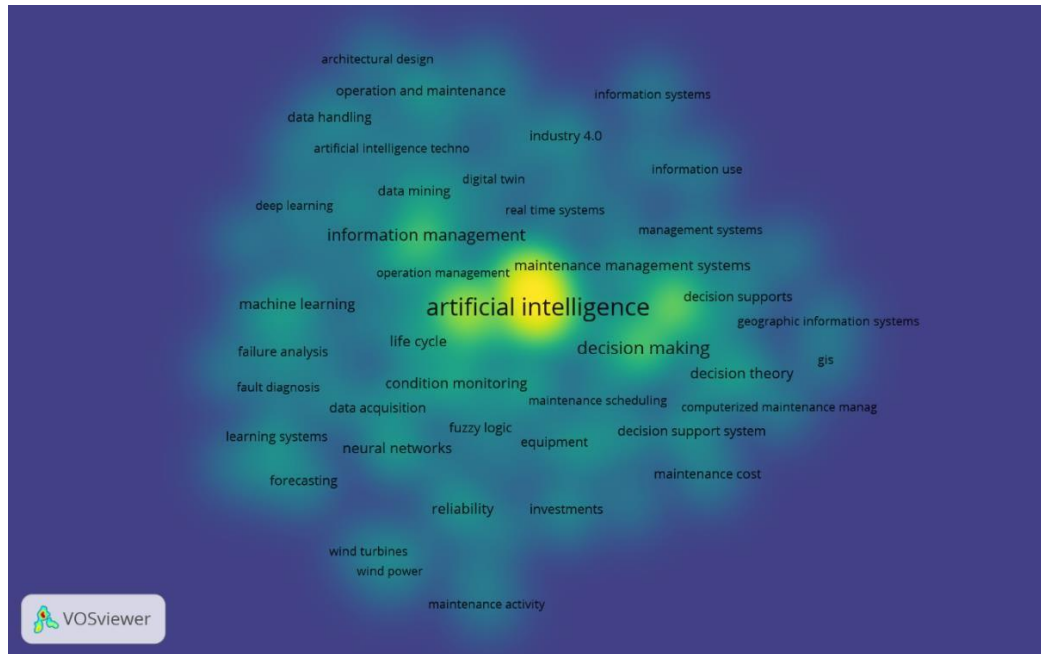
Los resultados del análisis arrojaron una recopilación de datos bibliográficos de los artículos seleccionados, que incluyeron información detallada sobre autores, instituciones, revistas y citas recibidas. Además, se examinaron las tendencias temporales en la publicación de estos artículos relacionados con la aplicación de inteligencia artificial en la gestión de mantenimiento.

En cuanto a la distribución de los documentos por año y por fuente, se observó una variedad de revistas y conferencias que abordan la temática, con diferentes niveles de representación en cada una. Se identificaron períodos de mayor y menor producción de artículos a lo largo del tiempo, lo que podría indicar momentos de mayor actividad investigativa o avances significativos en el campo. Además, se pudieron visualizar las fuentes que contribuyeron con un mayor número de documentos, lo que proporciona una idea de la relevancia y el impacto de cada una en el ámbito del mantenimiento y la inteligencia artificial.

En resumen, el análisis reveló una amplia diversidad de fuentes y una evolución temporal en la producción de artículos relacionados con la aplicación de inteligencia artificial en la gestión de mantenimiento, lo que brinda una visión general del estado actual de la investigación en este campo y señala áreas potenciales para futuros estudios.

En la figura 10, se muestra una visión completa y detallada de la producción científica en el campo de la inteligencia artificial aplicada a la gestión del mantenimiento, se identificaron patrones de colaboración, tendencias emergentes y áreas de investigación prometedoras. Los resultados de este análisis bibliométrico proporcionarán una base sólida para la evaluación de la relevancia y perspectivas futuras de la investigación en este campo. Hemos recopilado un conjunto de artículos científicos de la base de datos Scopus sobre inteligencia artificial en la gestión del mantenimiento. Después de procesar estos datos con VOSviewer, obtenemos una visualización de la red de coautoría.

En esta visualización, los nodos representan autores y las conexiones entre nodos representan colaboraciones entre autores. Observamos que algunos autores están muy interconectados entre sí, lo que sugiere una colaboración activa en el campo.

Figura 10*Resultados*

Nota: identificamos clústers temáticos que representan áreas de investigación específicas dentro del campo de la inteligencia artificial en la gestión del mantenimiento

Además, al analizar los términos más relevantes, identificamos clusters temáticos que representan áreas de investigación específicas dentro del campo de la inteligencia artificial en la gestión del mantenimiento. Por ejemplo, encontramos un cluster relacionado con el "aprendizaje automático en el mantenimiento predictivo" y otro cluster relacionado con "sistemas de diagnóstico asistido por IA".

En la figura 11 al examinar los mapas de calor de citación, notamos que ciertos artículos han recibido un alto número de citas, lo que indica su impacto significativo en el campo. Por ejemplo, un artículo sobre "aplicaciones de redes neuronales en el mantenimiento industrial" ha sido ampliamente citado y se destaca como un trabajo influyente en el área.

Conclusiones

En las conclusiones, se destaca el impacto positivo de la inteligencia artificial (IA) en la gestión de mantenimiento, evidenciado por la mejora en la eficiencia, la reducción de costos operativos y la minimización del tiempo de inactividad no planificado. Se subraya la necesidad imperante de una evaluación continua y rigurosa de las soluciones de IA para garantizar su pertinencia y eficacia a largo plazo. Además, se resalta la importancia de integrar la IA con otras tecnologías y procesos de negocio para potenciar su efectividad en la gestión de mantenimiento. Por último, se hace un llamado a las organizaciones para que adopten proactivamente la IA en sus estrategias de gestión de mantenimiento, invirtiendo en capacitación y desarrollo de habilidades para aprovechar al máximo los beneficios que esta tecnología puede ofrecer. Se confirma que la IA tiene un impacto positivo en la gestión de mantenimiento al mejorar la eficiencia, reducir los costos operativos y minimizar el tiempo de inactividad no planificado.

Se detectó la necesidad de enfatizar en la evaluación continua y rigurosa de las soluciones de IA para garantizar su relevancia y efectividad a largo plazo. La importancia de integrar la IA con otras tecnologías y procesos de negocio se debe dar para maximizar su potencial en la gestión de mantenimiento. La aplicación de inteligencia artificial al mantenimiento está evolucionando rápidamente, con tecnologías emergentes que mejoran la eficiencia, la fiabilidad y la seguridad en los procesos industriales. Las posibles direcciones futuras, como la integración con IoT y la robótica autónoma, señalan un horizonte prometedor para el desarrollo de soluciones más avanzadas en la gestión del mantenimiento.

El análisis bibliométrico realizado con la ayuda del software VosViewer permitirá evaluar de manera objetiva la producción científica relacionada con la aplicación de inteligencia artificial en la gestión del mantenimiento. Los resultados obtenidos proporcionarán insights valiosos para investigadores, profesionales y tomadores de decisiones en el ámbito industrial, contribuyendo así al avance y la innovación en este campo crucial para la eficiencia y el rendimiento de las operaciones industriales. El empleo de métricas cuantitativas para evaluar el impacto de las investigaciones existentes en la gestión del mantenimiento permitirá demostrar de manera concreta los beneficios obtenidos a partir de la aplicación de la inteligencia artificial en este campo. Estos resultados contribuirán a justificar la inversión en tecnologías basadas en inteligencia artificial y proporcionarán una base sólida para la toma de decisiones en la implementación de soluciones innovadoras en entornos industriales.

Recomendaciones

El análisis de las tendencias actuales sugiere que la IA seguirá desempeñando un papel crucial en la gestión del mantenimiento en el futuro. Se espera que avances en áreas como el procesamiento de lenguaje natural, la visión por computadora y la robótica contribuyan aún más a la automatización y la optimización de los procesos de mantenimiento. Además, la integración de tecnologías emergentes como el Internet de las cosas (IoT) y el gemelo digital promete abrir nuevas oportunidades para la mejora continua. Al integrar estos elementos en el artículo, se proporciona una visión completa y perspicaz sobre el papel de la inteligencia artificial en la gestión del mantenimiento y se ofrece orientación práctica para aquellos interesados en aprovechar

esta tecnología de manera efectiva, (Villa et al. , 2021).

En cuanto a las recomendaciones y perspectivas futuras, se sugiere lo siguiente: En primer lugar, es necesario promover la realización de más investigaciones y estudios de caso para comprender mejor el impacto de la IA en la gestión de mantenimiento en diversos contextos industriales. Además, se recomienda que las organizaciones inviertan en el desarrollo de capacidades internas en IA y análisis de datos para aprovechar al máximo las soluciones de IA en la gestión de mantenimiento. Asimismo, se enfatiza la importancia de fomentar la colaboración entre ingenieros de mantenimiento, científicos de datos y expertos en IA para desarrollar innovadoras y adaptadas a las necesidades específicas de cada organización. Por último, se alienta a las organizaciones a explorar nuevas aplicaciones de IA, como el mantenimiento predictivo y la optimización de la programación de mantenimiento, con el fin de mejorar aún más la eficiencia y la fiabilidad de los activos industriales, (Ricciardi Celsi & Valli, 2023).

Referencias Bibliografía

- Alhaj, M., Liu, H., Abudayyeh, O., & Sulaiman, M. (2022). Development of a mobile application for occupant-centric facility maintenance management. *022 IEEE World AI IoT Congress (AIIoT)*. Seattle, WA, USA, 2022, pp. 323-329. doi:0.1109/AIIoT54504.2022.9817248.
- Ramos, C., Corrêa, D., Veras, E., & Souza, S. (2019). CEP APPLICATION IN AN ENERGY MANAGEMENT EQUIPMENT MAINTENANCE INDUSTRY REMOTELY. *Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications*. Edition. 19.Vol: 05. doi: <https://dx.doi.org/10.5935/2447-0228.20190020>
- Abidi, M., Mohammed, M., & Alkhalefah, H. (2022). Predictive maintenance planning for industry 4.0 using machine learning for sustainable manufacturing. *Sustainability*, *14*(6), 3387.
- Adamson, K., Campbell, P., & Orsoni, A. (2005). Hybrid Decision Support Based on Knowledge Discovery and AI Techniques for the Management of Maintenance Services in the Public Transport Sector. Sofia, Bulgaria, 2005, pp. 674-678. doi:10.1109/IDAACS.2005.283071
- Altaf, M., Uzair, M., Naeem, M., Ahmad, A., Badshah, S., Shah, J., & Anjum, A. (2019). Automatic and efficient fault detection in rotating machinery using sound signals. *Acoustics Australia*, *47*, 125-139.

Álvarez, J., Martínez, D., Blanco, A., Catalán, J., García, N., & López, F. (2023).

Diseño de la configuración de brazos robóticos vestibles para tareas de instalación y mantenimiento. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*. 21(1), pp. 62–68. doi: <https://doi.org/10.4995/riai.2023.18746>

Amirat, Y., Benbouzid, M., Bensaker, B., & Wamkeue, R. (2007).

ConditionMonitoringandFaultDiagnosisinWind EnergyConversionSystems:AREview. IEEE IEMDC'07, Antalya,Turkey. pp.1434- 1439. doi:10.1109/IEMDC.2007.383639

Antosz, K., Jasiulewicz-Kaczmarek, M., Paško, Ł., Zhang, C., & Wang, S. (2021).

Application of machine learning and rough set theory in lean maintenance decision support system development. *Eksploatacja i Niezawodność*. 23(4), 695-708. doi:<https://doi.org/10.17531/ein.2021.4.12>

Automática e Instrumentación . (2021). *Gemelos Digitales (Digital Twins): Qué Son,*

Sus Beneficios y Cómo Crearlos Rápidamente. Obtenido de <https://www.autom>

Awuku, B., Huang, Y., & Yodo, N. (2023). Predicting Natural Gas Pipeline Failures

Caused by Natural Forces: An Artificial Intelligence Classification Approach. *Applied Sciences*, 13(7). 4322. doi: <https://doi.org/10.3390/app13074322>

Bazmohammadi, N., Madary, A., Vasquez, J., Mohammadi, H., Khan, B., Wu, Y., &

Guerrero, J. (2021). Microgrid digital twins: Concepts, applications, and future trends. *IEEE Access*, 10, 2284-2302.

- Beldjoudi, S. (2023). Improving Existing CMMS Software Packages Using Association Rules. *Revue d'Intelligence Artificielle*, 37(1).
- Borroto Pentón, Y., Alfonso Llanes, Caraza Morales, M., Alfonso Llanes, A., & Marrero Delgado, F. (2021). Optimization tools applied to physical asset maintenance management: state of the art. *Dyna*, 88(219), 162-170.
- Brundage, M., Sexton, T., Hodkiewicz, M., Dima, A., & Lukens, S. (2021). Technical language processing: Unlocking maintenance knowledge. *Manufacturing Letters*, 27, 42-46.
- Cai, S., Ma, Z., Skibniewski, M., Bao, S., & Wang, H. (2020). Construction automation and robotics for high-rise buildings: Development priorities and key challenges. *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(8), 04020096.
- Calderón, J., Flores, C., & Chavarri, C. (2022). Implementation of Integrated Autonomous Maintenance and Standard Work to improve the productivity in post-harvest production: Case study of a Peruvian coffee farm. Conference: 20th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology: "Education, Research and Leadership in Post-pandemic Engineering: Resilient, Inclusive and Sustainable Actions". doi::10.18687/LACCEI2022.1.1.732
- Cardoso, D., & Ferreira, L. (2021). Application of Predictive Maintenance Concepts Using Artificial Intelligence Tools. *Applied Sciences*, 11(1), 18. doi: <https://doi.org/10.3390/app11010018>

- Chen, Y., Lai, Y., & Lin, Y. (2020). BIM-based augmented reality inspection and maintenance of fire safety equipment. *Automation in Construction*. 110, 103041. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103041>
- Cristhian, R., & Ramón, P. (2023). Operational Reliability, Availability and Maintainability Model for a Gas Compression Plant. *Revista Politécnica*. 51(1), 117-129. doi: <https://doi.org/10.33333/rp.vol51n1.10>.
- De Leon, V., Alcazar, Y., & Villa, J. (2019). Use of Edge Computing for Predictive Maintenance of Industrial Electric Motors. *Applied Computer Sciences in Engineering: 6th Workshop on Engineering Applications*. Santa Marta, Colombia, October 16–18, 2019, Proceedings 6 (pp. 523-533). Springer International Publishing. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-31019-6_44
- Deebak, B. D., & Al-Turjman, F. (2022). Digital-twin assisted: Fault diagnosis using deep transfer learning for machining tool condition. *International Journal of Intelligent Systems*, 37(12). 10289-10316. doi: <https://doi.org/10.1002/int.22493>
- Ech, L., & Znaidi, C. (2023). MAINTENANCE MANAGEMENT BASED ON RELIABILITY ANALYSIS OF WELDING ROBOTS USING SVM.
- Fang, X., Nguyen, T., & Jing, D. (2023). Augmented Reality for Maintenance Tasks with ChatGPT for Automated Text-to-Action. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.03351>
- Farfán, J., & Zepeda, V. (2020). Mantenibilidad del Software. Consideraciones para su especificación y validación. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*. 28, no. 4. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052020000400654>

- Feng, K., Ji, J. C., Zhang, Y., Ni, Q., Liu, Z., & Beer, M. (2023). Digital twin-driven intelligent assessment of gear surface degradation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 186, 109896. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109896>
- Feng, K., Ji, J., Zhang, Y., Ni, Q., Liu, Z., & Beer, M. (2023). Digital twin-driven intelligent assessment of gear surface degradation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 186, 109896.
- Fernández Álvarez, E. (2018). Gestión de Mantenimiento. Lean Maintenance y TPM.
- Fernández, J., Corrales, L., Benítez, I., & Núñez, J. (2022). Fault Diagnosis of Combustion Engines in MTU 16VS4000-G81 Generator Sets Using Fuzzy Logic: An Approach to Normalize Specific Fuel Consumption. *Communications in Computer and Information Science*. vol 1569. Springer, Cham. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-030-98457-1_2
- Forcael, E., Román, O., Stuardo, H., & Herrera, R. (2023). Evaluation of Fissures and Cracks in Bridges by Applying Digital Image Capture Techniques Using an Unmanned Aerial Vehicle. doi:10.3390/drones8010008
- Forero Corba, W., & Negre Bannasar, F. (2024). Techniques and applications of Machine Learning and Artificial Intelligence in education: a systematic review. *RIED-Revista Iberoamericana de Educación a Distancia*. 27(1). doi:<https://doi.org/10.5944/ried.27.1.37491>
- Fuentes, T., & Gratzia, M. (2022). *Estado del arte de la inteligencia artificial y su*

- aplicación en el mantenimiento.* (Tesis para optar el título de Ingeniera Mecánico- Eléctrico). Universidad de Piura. Piura, Perú.
- García García, C., Cárcel Carrasco, J., Vergara Paredes, M., Rivas Echverria, F., & Camacho, F. (2022). Algoritmo para la asignación de actividades de Mantenimiento utilizando la gestión de conocimiento. *Ingeniare. Rev. chil. ing.* vol.30 no.1 Arica. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052022000100057>
- Gondres, I., Lajes, S., & Castillo, A. (2018). Modelo de gestión de mantenimiento parcial a interruptores de potencia mediante inteligencia artificial. *Ingeniare Revista chilena de ingeniería.* 26(3). doi:10.4067/S0718-33052018000300391
- Gong, S., & Zhu, J. (2023). Solution of Power Equipment Condition Monitoring System Based on Things Oriented Architecture. In *2023 International Conference on Power System Technology (PowerCon)* (pp. 1-6). IEEE.
- González-Marco, C., García-Segura, T., López-Marco, J., Mansanet, J., & Sánchez-Robles, J. (2023). SISTEMA DE GESTIÓN INTEGRAL PARA EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE VÍAS INTERURBANAS MEDIANTE TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL.
- Granados Ferreira, J. (2022). Granados Ferreira, J. (2022). Análisis de la inteligencia artificial en las relaciones laborales. *Revista CES Derecho*, 13(1), 111-132.
- Guo, W., Li, X., & Shen, Z. (2024). A lightweight residual network based on improved knowledge transfer and quantized distillation for cross-domain fault diagnosis of rolling bearings. *Expert Systems with Applications*, 245. 123083. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.123083>

- Hao, Q., Xue, Y., Shen, W., Jones, B., & Zhu, J. (2010). A decision support system for integrating corrective maintenance, preventive maintenance, and condition-based maintenance. *In Construction Research Congress 2010: Innovation for Reshaping Construction Practice*. (pp. 470-479).
- Hsu, W. L., & Chang, C. M. (2023). Rail Corrugation Index Development by Sound-Field Excitation on the Carriage Floor of In-Service Train. *Sensors*, *23*(17). 7539. doi:<https://doi.org/10.3390/s23177539>
- Hurtado Cortés, L., Villarreal López, E., & Villarreal López, L. (2016). Detección y diagnóstico de fallas mediante técnicas de inteligencia artificial, un estado del arte. *Dyna*, *83*(199), 19-28.
- Hurtado, L., Villareal, E., & Villareal, L. (2016). Detección y diagnóstico de fallas mediante técnicas de inteligencia artificial, un estado del arte. Universidad Nacional de Colombia, *Dyna*, vol. 83, núm. 199, pp. 19-28, 2016. doi:<https://doi.org/10.15446/dyna.v83n199.55612>
- Ibarra, M. (2024). ¿Qué puede y qué no puede hacer (aún) la inteligencia artificial en el mundo editorial científico? *Arch Argent Pediatr*. 122(1): e202310104. doi:<http://dx.doi.org/10.5546/aap.2023-10104>
- Ífraz, M., Aktepe, A., Ersöz, S., & Çetinyokuş, T. (2023). Demand forecasting of spare parts with regression and machine learning methods: Application in a bus fleet. *Journal of Engineering Research*, *11*(2), 100057.
- Jain, S., & Vaishya, R. (2021). Jain, S., & Vaishya, R. O. (2021). Case study: application of SMED in SIM card manufacturing company. *International*

Journal of Productivity and Quality Management, 32(1), 109-128.

- Kale, A., Kassa, Y., Ricks, B., & Gandhi, R. (2023). A Comparative Assessment of Bridge Deck Wearing Surfaces: Performance, Deterioration, and Maintenance. *Applied Sciences*, 13(19). 10883. doi: <https://doi.org/10.3390/app131910883>
- Kang, J, S., Chung, K., & Hong, E, J. (2021). Multimedia knowledge-based bridge health monitoring using digital twin. *Multimedia Tools and Applications*, 80(26-27). 34609-34624. doi: <https://doi.org/10.1007/s11042-021-10649-x>
- Kang, J., Chung, K., & Hong, E. (2021). Multimedia knowledge-based bridge health monitoring using digital twin. *Multimedia Tools and Applications*, 80(26), 34609- 34624.
- Kao, S, K., & Chien, C, F. (2023). Deep Learning-Based Positioning Error Fault Diagnosis of Wire Bonding Equipment and an Empirical Study for IC Packaging. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*. vol. 36, no. 4, pp. 619-628. doi:10.1109/TSM.2023.3243775
- Kumar, T, P., Saimurugan, M., Haran, R., Siddharth, S., & Ramachandran, K, I. (2019). A multi-sensor information fusion for fault diagnosis of a gearbox utilizing discrete wavelet features. *Measurement Science and Technology*, 30(8), 085101.
- Lee, H, Y., Tseng, H, H., Zheng, M, C., & Li, P, Y. (2010). Decision support for the maintenance management of green areas. *Expert Systems with Applications*, 37(6). 4479-4487.
- Lehrfeld, A., Jaskowiec, K., Wilk-Kołodziejczyk, D., Małysza, M., Bitka, A., Marcjan, L., & Głowacki, M. (2024). Analysis of the Possibility of Making a Digital

- Twin for Devices Operating in Foundries. *Electronics*. 13(2):349. doi:
<https://doi.org/10.3390/electronics13020349>
- Lin, X., Zheng, L., & Li, W. (2019). Measurement of the contributions of science and technology to the marine fisheries industry in the coastal regions of China. *Marine Policy*, 108, 103647.
- Liu, H. (2023). Intelligent Operation and Maintenance Management Method and System of Engineering Project Based on BIM. In *2023 4th IEEE Global Conference for Advancement in Technology (GCAT) (pp. 1-6)*. IEEE.
- López-Martín, E. (2024). El papel de la inteligencia artificial generativa en la publicación científica. *Educación XXI*. doi:<https://doi.org/10.5944/educxx1.39205>
- Márquez, C., Alberca, J., & del Castillo, A. (2023). Simulating dynamic RUL based CBM scheduling. A case study in the railway sector. *Computers in Industry*, 148, 103914.
- Mo, Y., Zhao, D., Syal, M., Aziz, A., & Li, H. (2020). Mo, Y., Zhao, D., Du, J., Syal, M., Aziz, A., & Li, H. (2020). Automated staff assignment for building maintenance using natural language processing. *Automation in Construction*, 113, 103150.
- Mourtzis, D., Vlachou, A., & Zogopoulos, V. (2017). Cloud-based augmented reality remote maintenance through shop-floor monitoring: a product-service system approach. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 139(6), 061011.
- Obura, D., Nabifo, V., Apiny, I., Akanushaba, O., & Dadebo, D. (2024). Application of a decision support system for monitoring and maintenance management of water

- valley tank facilities: A technological transformation toward sector sustainability. *Groundwater for Sustainable Development*. 25:101109. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101109>
- Palacios, M. (2023). Human intelligence for authors, reviewers and editors using artificial intelligence. *Colomb Méd (Cali)*; 54(3): e1005867. doi: <http://doi.org/10.25100/cm.v54i3.5867>
- Pan, Q., Zhang, M., & Zhou, H. (2021). Application of Augmented Reality (AR) Technology in Power Grid Emergency Training. *ournal of Physics: Conference Series*. (Vol. 2074, No. 1, p. 012095). IOP Publishing. doi:10.1088/1742-6596/2074/1/012095
- Peng, C., Li, Z., Yang, M., Fei, M., & Wang, Y. (2020). An audio-based intelligent fault diagnosis method for belt conveyor rollers in sand carrier. *Control Engineering Practice*, 105, 104650.
- Ramírez, J., Sarmiento, H., & Lopez-Lezama, J. (2018). Diagnóstico de fallas en procesos industriales mediante inteligencia artificial. *Diagnóstico*, 39(24).
- Ricciardi Celsi, L., & Valli, A. (2023). Applied Control and Artificial Intelligence for Energy Management: An Overview of Trends in EV Charging, Cyber-Physical Security and Predictive Maintenance. *Energies*, 16(12). 4678. doi: <https://doi.org/10.3390/en16124678>
- Rojek, I., Jasiulewicz-Kaczmarek, M., Piechowski, M., & Mikołajewski, D. (2023). An Artificial Intelligence Approach for Improving Maintenance to Supervise Machine Failures and Support Their Repair. *Applied Sciences*, 13(8). 4971. doi:

<https://doi.org/10.3390/app13084971>

Serras, M., García-Sardiña, L., Sim, B., Álvarez, H., & Arambarri, J. (2020). AREVA:

Augmented Reality Voice Assistant for Industrial Maintenance. *Procesamiento*

del Lenguaje Natural, 65, 135-138. Obtenido de <http://journal.sepln.>

Shekargoftar, A., Taghaddos, H., Azodi, A., Nekouvaght Tak, A., & Ghorab, K. (2022).

An Integrated Framework for Operation and Maintenance of Gas Utility

Pipeline Using BIM, GIS, and AR. *Journal of Performance of Constructed*

Facilities, 36(3). 04022023. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-)

5509.0001722

Susto, G, A., Schirru, G., Pampuri, S., McLoone, S., & Beghi, A. (2014). Machine

learning for predictive maintenance: A multiple classifier approach. *IEEE*

transactions on industrial informatics, 11(3), 812-820.

Tavakoli, P., Yitmen, I., Sadri, H., & Taheri, A. (2024). Blockchain-based digital twin

data provenance for predictive asset management in building facilities. *Smart*

and Sustainable Built Environment, 13(1). Vol. 13 No. 1, pp. 4-21. doi:

<https://doi.org/10.1108/SASBE-07-2023-0169>

Tiwari, S. (2023). Artificial Intelligence (AI) in the Sustainable Energy Sector.

Engineering Proceedings, 37(1), 11.

Trevisan, C., Bavestrelli, G., Ventura, A., Sanfilippo, F., Rizzi, A., & Dester, A. (2023).

CyberMan4. 0: Advanced Maintenance in HSM Roll Shop. *METALLURGIA*

ITALIANA, (3), 37-47.

Tume Fuentes, M. (2022). Estado del arte de la inteligencia artificial y su aplicación en

- el mantenimiento. Ullo, S, L., Piedimonte, P., Leccese, F., & De Francesco, E. (2019). A step toward the standardization of maintenance and training services in C4I military systems with Mixed Reality application. *Measurement*, *138*, 149-156.
- Urgiles, W., Ortega, J., & Japa, R. (2019). APPLICATION OF FEED-FORWARD BACKPROPAGATION NEURAL NETWORK FOR THE DIAGNOSIS OF MECHANICAL FAILURES IN ENGINES PROVOKED IGNITION. *Ingenius [online]*. n.21, pp.32-40. ISSN 1390-860X.
doi:<https://doi.org/10.17163/ings.n21.2019.03>.
- Valentini, L., Grandi, F., Peruzzini, M., & Pellicciari, M. (2023). UX-Driven Methodology to Design Usable Augmented Reality Applications for Maintenance. *Leveraging Transdisciplinary Engineering in a Changing and Connected World*. (pp. 42-51). IOS Press. doi:10.3233/ATDE230596
- Velmutugan, K., Saravanasankar, S., & Bathrinath, S. (2022). Smart maintenance management approach: Critical review of present practices and future trends in SMEs 4.0. *Today: Proceedings*, *62*, 2988-2995.
- Villa, V., Naticchia, B., Bruno, G., Aliev, K., Piantanida, P., & Antonelli, D. (2021). IoT Open-Source Architecture for the Maintenance of Building Facilities. *Applied Sciences*, *11*(12). 5374. doi: <https://doi.org/10.3390/app11125374>
- Villegas, J., Cota, L., Caraveo, C., Vega, Y., & Rodriguez, L. (2021). Software for Analysis of Industrial Motors. *16th Iberian Conference on Information Systems*

- and Technologies (CISTI)*. Chaves, Portugal, 2021, pp. 1-6. doi: 10.23919/CISTI52073.2021.9476347
- Walas, F., & Redchuk, A. (2021). IIoT/IoT and Artificial Intelligence/Machine Learning as a Process Optimization Driver under Industry 4.0 Model IIoT/IoT e Inteligencia Artificial/Aprendizaje Automático como Motor de Optimización de Procesos en el Modelo de Industria 4.0. *Journal of Computer Science and Technology* 21(2). e15. doi: <https://doi.org/10.24215/16666038.21.e15>
- Wang, L., Zhu, Z., & Zhao, X. (2024). Dynamic predictive maintenance strategy for system remaining useful life prediction via deep learning ensemble method. *Reliability Engineering & System Safety*. 110012. doi: <https://doi.org/10.1016/j.res.2024.110012>
- Wang, T, K., & Piao, Y. (2019). Development of BIM-AR-based facility risk assessment and maintenance system. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 33(6), 04019068.
- Xia, L., Liang, Y., Leng, J., & Zheng, P. (2023). Maintenance planning recommendation of complex industrial equipment based on knowledge graph and graph neural network. *Reliability Engineering & System Safety*, 232. doi: <https://doi.org/10.1016/j.res.2022.109068>
- Xie, J., & Wan, J. (2023). Digital Twin Four-Dimension Fusion Modeling Method Design and Application to the Discrete Manufacturing Line. *Big Data and*

Cognitive Computing, 7(2), 89.

Yang, J., Meng, Q., & Zhang, X. (2024). Improvement of operation and maintenance efficiency of power transformers based on knowledge graphs. *IET Electric Power Applications*. doi: <https://doi.org/10.1049/elp2.12418>

Yang, O. S., & Widodo, A. (2009). Introduction of intelligent machine fault diagnosis and prognosis. *Nova Science Publishers*.

Zhang, H., Zheng, L., Lv, Z., Yuan, C., Zhao, Z., Jiang, X., & Wang, H. (2023). Research on Key Technologies of Substation Intelligent Patrol Based on Trusted WLAN. In *2023 International Conference on Power System Technology (PowerCon)* (pp. 1-7). IEEE.

Zhang, X., Zhang, M., & Hu, Q. (2020). Research on the application of artificial intelligence in operation and maintenance for power equipment. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. (Vol. 617, No. 1, p. 012001). IOP Publishing.

Zheng, X., Zhang, H., & Shi, J. (2023). Retracted: Application Based on Artificial Intelligence in Substation Operation and Maintenance Management. *Computational Intelligence and Neuroscience*. vol. 2022, Article ID 7509532, 12 pages. doi: <https://doi.org/10.1155/2022/7509532>

Zio, E. (2022). Zio, E. (2022). Prognostics and Health Management (PHM): Where are we and where do we (need to) go in theory and practice. *Reliability Engineering & System Safety*, 218, 108119.