

Scientific Trends in Maintenance Engineering: A Bibliometric Study for Strengthening Engineering Education and Innovation (2015-2025)

Cristhian Ronceros-Morales¹  and Rubén Vega Mejía² 

¹Universidad Tecnológica del Perú, Facultad de Ingeniería Industrial, Perú. C20605@utp.edu.pe

²Universidad Universidad Nacional Experimental Antonio José de Sucre. Venezuela. rvegas@udo.edu.ve

Abstract– Between 2015 and May 2025, research in maintenance engineering has shown sustained growth, driven by technological advances in Industry 4.0. This study performs a bibliometric analysis of scientific output recorded in the Scopus database, using the keywords: maintenance management, maintenance 4.0, and reliability, associated with digital transformation in industrial environments. Initially, 4,715 documents were identified, including scientific articles, papers, books, book chapters, and reviews. After applying thematic filters, 3,613 documents were selected (76.6% of the initial total). The results show that Italy leads the way in terms of output with 423 publications, with the Politecnico di Milano standing out as the most productive institution. In Latin America, the Pontifícia Universidade Católica do Paraná (Brazil) stands out. The most active journal was Lecture Notes in Mechanical Engineering (Germany), with 113 documents. The most frequent keyword was Industry 4.0, and the main subject area was Engineering. The predominant language was English, which favors the international projection of the works. The most cited article was Predictive Maintenance in Industry 4.0: A Systematic Literature Review, with 746 citations. The author with the highest number of publications was C. Reich (Hochschule Furtwangen, Germany), with 14 papers. The study confirms an upward trend in scientific production on smart maintenance, from 24 publications in 2015 to 230 in May 2025. These results reflect the growing interest in optimizing maintenance through emerging technologies, in line with the principles of efficiency and innovation in contemporary engineering.

Keywords-- maintenance management, maintenance 4.0, reliability, bibliometric study.

Tendencias Científicas en Ingeniería de Mantenimiento: Un Estudio Bibliométrico para el Fortalecimiento de la Educación y la Innovación en Ingeniería (2015–2025)

Cristhian Ronceros-Morales¹ and Rubén Vega Mejía²

¹Universidad Tecnológica del Perú, Facultad de Ingeniería Industrial, Perú. C20605@utp.edu.pe

²Universidad Universidad Nacional Experimental Antonio José de Sucre. Venezuela. rvegas@udo.edu.ve

Resumen— Entre 2015 y mayo de 2025, la investigación en ingeniería de mantenimiento ha evidenciado un crecimiento sostenido, impulsado por los avances tecnológicos de la Industria 4.0. Este estudio realiza un análisis bibliométrico de la producción científica registrada en la base de datos Scopus, utilizando las palabras clave: gestión del mantenimiento, mantenimiento 4.0 y confiabilidad, asociadas a la transformación digital en entornos industriales. Se identificaron inicialmente 4.715 documentos, entre artículos científicos, ponencias, libros, capítulos de libro y revisiones. Tras aplicar filtros temáticos, se seleccionaron 3.613 documentos (76,6 % del total inicial). Los resultados muestran que Italia lidera la producción con 423 publicaciones, destacando el Politecnico di Milano como la institución más productiva. En América Latina, sobresale la Pontifícia Universidade Católica do Paraná (Brasil). La revista más activa fue Lecture Notes in Mechanical Engineering (Alemania), con 113 documentos. La palabra clave más frecuente fue Industria 4.0, y la principal área temática fue Ingeniería. El idioma predominante fue el inglés, lo que favorece la proyección internacional de los trabajos. El artículo más citado fue Predictive Maintenance in the Industry 4.0: A Systematic Literature Review, con 746 citas. El autor con mayor número de publicaciones fue C. Reich (Hochschule Furtwangen, Alemania), con 14 trabajos. El estudio confirma una tendencia ascendente en la producción científica sobre mantenimiento inteligente, pasando de 24 publicaciones en 2015 a 230 en mayo de 2025. Estos resultados reflejan el interés creciente por optimizar el mantenimiento mediante tecnologías emergentes, en sintonía con los principios de eficiencia e innovación de la ingeniería contemporánea.

Palabras clave — gestión de mantenimiento, mantenimiento 4.0, confiabilidad, estudio bibliométrico.

I. INTRODUCCIÓN

A medida que la sociedad avanza, también lo hace nuestra dependencia de industrias y servicios cada vez más tecnificados y automatizados para producir y distribuir bienes con eficiencia [1]. En este escenario, las organizaciones se ven empujadas a una transformación profunda que eleve la productividad y la sostenibilidad, reduzca costos, mejore la satisfacción del cliente e incorpore tecnologías emergentes en sus procesos clave [2]. Sin embargo, los activos industriales envejecen y sus componentes se degradan, afectando la disponibilidad operativa y la calidad del producto final [1]. Al mismo tiempo, la manufactura moderna compite en un mercado que exige mayor calidad, variedad y entregas más rápidas [3].

En este contexto, el mantenimiento ha pasado de ser percibido como un “mal necesario” a convertirse en una palanca estratégica de la eficacia organizacional [4]. Durante años se lo entendió como un conjunto de tareas costosas que se ejecutaban sólo cuando resultaban inevitables, sin reconocer su impacto directo en la rentabilidad [1]. Hoy, la automatización, la informatización y la robotización han elevado el listón: los sistemas productivos necesitan funcionar con alta confiabilidad para sostener la competitividad [5]. Tal como apuntan diversos autores, estos cambios se inscriben en el marco de la Cuarta Revolución Industrial [3].

Bajo el paraguas de la Industria 4.0, tecnologías inteligentes entre ellas la inteligencia artificial rediseñan la forma en que las máquinas y los sistemas industriales capturan, procesan e interpretan datos [6]. En ese entorno, la gestión del mantenimiento se vuelve un componente prioritario: bien implementada, genera beneficios técnicos y económicos tangibles en operaciones habilitadas por 4.0 [7]. Su propósito es mantener niveles de desempeño de clase mundial, mitigando la degradación derivada del uso y del tiempo para asegurar el funcionamiento normal de los equipos [8], [9]. Lo contrario un mantenimiento deficiente eleva la probabilidad de fallos, pone en riesgo a las personas, detiene operaciones y ocasiona pérdidas económicas [10].

Para responder a estos retos surge el Mantenimiento 4.0, que combina predicción de fallos y prescripción de intervenciones óptimas a partir del análisis avanzado de grandes volúmenes de datos: condición técnica, régimen de operación, entorno, historiales, información de equipos comparables y cualquier variable correlacionada con el rendimiento del activo [11]. No obstante, pese al notable progreso conceptual y tecnológico, muchas implementaciones siguen midiéndose con indicadores tradicionales centrados en productividad, confiabilidad y mantenibilidad [12]. En este marco, la confiabilidad describe la probabilidad de que un activo cumpla su función durante un período y bajo condiciones específicas [13]. En la práctica, suele evaluarse mediante métricas como el tiempo medio entre fallos (MTBF), con las que se monitorean y mejoran los resultados de la gestión del mantenimiento [14].

Así, gestión del mantenimiento, Mantenimiento 4.0 y confiabilidad forman un triángulo íntimamente conectado en la

ingeniería del mantenimiento. Coherente con ello, en los últimos años se observa un crecimiento notable de estudios y publicaciones en el área [15], lo que confirma su estatus como campo prioritario para la investigación aplicada y la innovación industrial. En este contexto, el presente trabajo analiza la producción científica entre 2015 y 2025 mediante un enfoque bibliométrico basado en tres palabras clave: gestión del mantenimiento, mantenimiento 4.0 y confiabilidad.

La bibliometría aporta una mirada cuantitativa y sistemática a la actividad científica y tecnológica [16], [17]. Este tipo de análisis ayuda a identificar fuentes influyentes, mapear la evolución del conocimiento y comprender su impacto y estructura interna mediante herramientas estadísticas y de visualización [18], [19]. En suma, ofrece el panorama necesario para situar tendencias, detectar vacíos y orientar futuras investigaciones y aplicaciones en la gestión del mantenimiento en la era 4.0.

El presente documento se organiza en las siguientes secciones: *Metodología*, donde se describe el marco sistemático aplicado a lo largo del estudio; *Resultados*, que presenta los hallazgos obtenidos como consecuencia de la metodología implementada; *Discusión*, en la que se contrastan los resultados con investigaciones previas, marcos teóricos y el estado del arte; y *Conclusiones*, que sintetizan los aportes principales del estudio y proponen líneas futuras de investigación.

II. METODOLOGÍA

Se definió un periodo de análisis de diez años, comprendido entre 2015 y mayo de 2025, utilizando como fuente principal la base de datos Scopus, perteneciente al grupo editorial Elsevier. El algoritmo de búsqueda aplicado incluyó los términos [maintenance-management], [maintenance 4.0] y [reliability], seleccionados por su estrecha vinculación con el campo de la ingeniería de mantenimiento. Tras obtener el conjunto inicial de documentos, se aplicaron filtros adicionales para delimitar el corpus, considerando únicamente las siguientes áreas del conocimiento: ingeniería, informática, ciencias de la decisión, energía, ciencias de los materiales y multidisciplinar.

Asimismo, se incluyeron únicamente los siguientes tipos de documentos: artículos científicos, ponencias de congresos, libros, capítulos de libros, artículos de revisión y reseñas de conferencias. Se excluyeron explícitamente aquellos trabajos que no estuvieran relacionados con el mantenimiento mecánico e industrial.

Para el procesamiento de los datos se emplearon técnicas de análisis bibliométrico basadas en los enfoques metodológicos propuestos por [20] y [21], considerando los siguientes indicadores: número total de documentos, producción científica por país (a nivel mundial y latinoamericano), principales revistas, términos clave más frecuentes, distribución temática de los documentos, instituciones más productivas (globales y regionales), idiomas de publicación, documentos más citados (top 10) y autores más citados (top 10).

III. RESULTADOS

Inicialmente, se encontraron 4.715 documentos relacionados con los términos de búsqueda, y cuando se aplicaron los delimitadores de búsqueda, este número se redujo a 3.613 documentos, lo que representa el 76,6 % del total de documentos encontrados inicialmente. La figura 1 muestra que la investigación relacionada con la gestión del mantenimiento, el mantenimiento 4.0 y la fiabilidad ha ido aumentando a lo largo de los años, con 24 publicaciones en 2015 y 230 publicaciones en mayo de 2025.

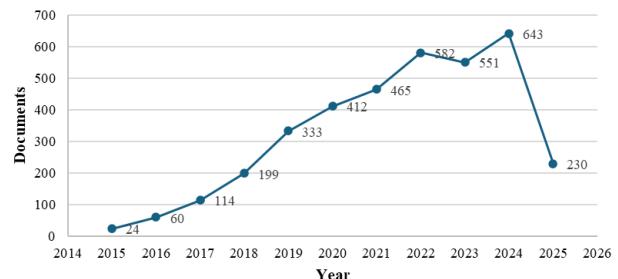


Fig 1. Publicaciones en mantenimiento industrial (2015 - 2025).

La tabla 1 muestra que, de un total de 106 países, los diez con mayor número de publicaciones son: Italia en primer lugar con 423 documentos, seguida de Alemania con 415 artículos, y Brasil en último lugar con 136 documentos. Cabe destacar que Brasil es el primer país de América Latina y el tercero de Iberoamérica, por detrás de España (203 documentos) y Portugal (137 documentos). En una revisión sólo de los países latinoamericanos, los países que siguen a Brasil son México, Ecuador, Colombia, Perú y Chile. Sin embargo, el número total de artículos de estos cinco países representa sólo el 77,9% de los publicados por Brasil.

TABLA I
DOCUMENTOS PUBLICADOS POR PAÍS

No.	Country	Number of documents
1	Italy	423
2	Germany	415
3	India	410
4	United States	224
5	Spain	203
6	France	200
7	China	194
8	United Kingdom	188
9	Portugal	137
10	Brazil	136
11	Mexico	41
12	Colombia	29
13	Ecuador	13
14	Peru	12
15	Chile	11

Se encontró un total de 147 revistas científicas que publican artículos sobre el tema estudiado. La Tabla 2 muestra

las diez primeras revistas, destacando Lecture Notes In Mechanical Engineering con 113 documentos publicados dentro del algoritmo de búsqueda, seguida de IFAC Papersonline con 84 documentos. De las diez revistas, seis tienen un índice h superior a 100, teniendo Lecture Notes in Computer Science (LNCS) un índice h de 499. En cuanto al factor de impacto de las revistas, dos son Q1, dos son Q2, una es Q3, dos son Q4 y a dos aún no se les ha asignado un cuartil.

TABLA II
REVISTAS PRINCIPALES

No.	Revista	N.D	SJR 2022	Q	H	País
1	Lecture Notes In Mechanical Engineering	113	0.168	Q4	35	Germany
2	IFAC Papersonline	94	0.328	--	99	Netherlands
3	Procedia Computer Science	90	0.471	--	152	Netherlands
4	<i>Lecture Notes In Networks And Systems</i>	89	0.166	Q4	48	Switzerland
5	Applied Sciences Switzerland	87	0.521	Q2	162	Switzerland
6	Procedia CIRP	56	0.550	--	115	Netherlands
7	Sensors	53	0.764	Q1	273	Switzerland
8	IFIP Advances In Information And Communication Technology	51	0.210	Q3	70	Germany
9	Lecture Notes in Computer Science (LNCS)	48	0.352	Q2	499	Germany
10	IEEE Access	45	0.849	Q1	290	United States

La mayoría de las revistas identificadas ($n = 9$) provienen de países europeos, siendo Alemania, Suiza y los Países Bajos los más representados, con tres publicaciones cada uno. La única revista restante corresponde a una editorial con sede en Estados Unidos. En cuanto al indicador *Scimago Journal Rank* (SJR), utilizado por Elsevier para medir la calidad de las publicaciones científicas en función del número de citas recibidas y su relevancia temática, la revista *Sensors* presenta el valor más alto dentro del conjunto analizado, con un SJR de 0,764.

Respecto al análisis de palabras clave, se identificaron un total de 160 términos distintos utilizados en los documentos evaluados. La Figura 2 presenta las diez palabras clave más frecuentes, destacándose “Industria 4.0” como la más utilizada, con 1.975 apariciones, seguida de “mantenimiento predictivo” (1.015 apariciones) y “mantenimiento” (818 apariciones). El término “fiabilidad” fue empleado en 575 ocasiones, mientras que “análisis de fiabilidad” apareció 263 veces. Las palabras clave empleadas en el algoritmo de búsqueda, como “gestión del mantenimiento”, “mantenimiento 4.0” y “fiabilidad”, se utilizaron en 80, 46 y 72 ocasiones, respectivamente.

Además, el análisis de cocurrencias evidencia una fuerte presencia de términos vinculados con tecnologías emergentes propias del ecosistema de la Industria 4.0, lo que refuerza la

orientación tecnológica de las investigaciones actuales en ingeniería del mantenimiento.

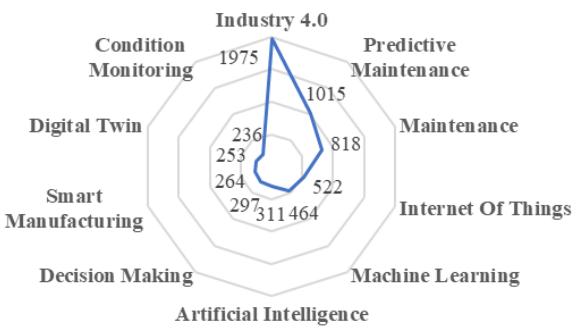


Fig 2. Principales palabras clave

Al identificar los documentos por áreas temáticas (Figura 3), la ingeniería se sitúa a la cabeza con 2.550 documentos (34,3 %), seguida de la informática con 2.163 documentos (29,1 %), y las ciencias medioambientales cierran este grupo con 162 documentos (2,2 %).

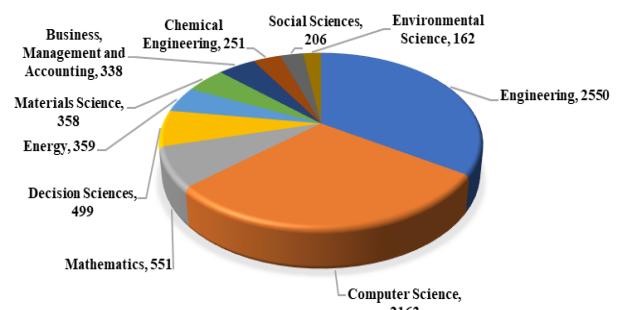


Fig 3. Documentos por área temática

Por otra parte, se identificaron un total de 161 organizaciones académicas y de investigación que contribuyeron con publicaciones durante el periodo analizado. La Tabla 3 presenta las diez instituciones más productivas, entre las cuales destacan cuatro universidades italianas que, en conjunto, suman 152 documentos publicados. Este dato es coherente con la posición de Italia como el país con mayor producción científica en el área de estudio.

Francia está representada por dos instituciones, mientras que las cuatro restantes provienen de Noruega, Sudáfrica, Inglaterra y Polonia, lo que evidencia el predominio de organizaciones europeas en el ranking. Cabe resaltar también la inclusión de una universidad afro-canadiense, lo cual aporta diversidad geográfica a la clasificación.

En el contexto latinoamericano, sobresalen dos países: Brasil, con cuatro universidades entre las más productivas, y México, con una. Estas cinco instituciones latinoamericanas acumulan un total de 76 publicaciones, lo que representa una

contribución significativa dentro del conjunto global de documentos analizados.

TABLA III
INSTITUCIONES MÁS PRODUCTIVAS

No.	Universidad	Documentos	País
1	Politecnico di Milano	67	Italy
2	CNRS Centre National de la Recherche Scientifique	45	France
3	Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet	33	Norway
4	Università degli Studi di Napoli Federico II	32	Italy
5	University of Johannesburg	29	South Africa
6	Politecnico di Torino	29	Italy
7	Cranfield University	25	England
8	Università Politecnica delle Marche	24	Italy
9	Université de Lorraine	24	France
10	Pontifícia Universidade Católica do Paraná	22	Brazil
11	Universidade Federal do Paraná	18	Brazil
12	Universidade Federal de Santa Catarina	18	Brazil
13	Tecnológico de Monterrey	9	Mexico
14	Universidade de São Paulo	9	Brazil

Los documentos analizados fueron publicados en un total de once idiomas (véase Figura 4). El idioma predominante fue el inglés, con una representación del 97,2 % del total de 3.613 publicaciones, lo que confirma su papel hegemónico en la difusión científica internacional. Le siguieron, a gran distancia, el alemán con un 1,24 % y el chino con un 0,50 %. Solo el 0,44 % de los documentos fueron publicados en español. El 0,62 % restante corresponde a publicaciones en siete idiomas adicionales.

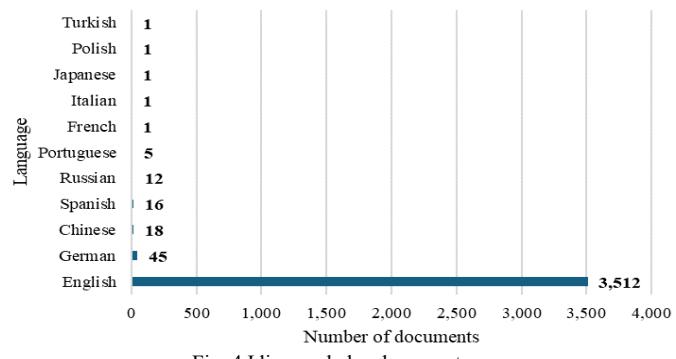


Fig. 4 Idiomas de los documentos.

La tabla 4 muestra las publicaciones más citadas. El documento con mayor número de citas (746) es un artículo científico titulado Predictive maintenance in Industry 4.0. A systematic literature review: A systematic literature review, escrito por cinco autores brasileños y uno estadounidense. El segundo artículo más citado (514) es Machine learning in predictive maintenance towards sustainable smart manufacturing in industry 4.0, escrito por autores de Turquía. Los 10

artículos más citados se publicaron entre 2016 y 2022. Todos los documentos más citados son artículos de revistas; no hay artículos de conferencias.

TABLA IV
DOCUMENTOS MÁS CITADOS.

No.	Title	Year	Authors	Journal	C	T
1	Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review	2020	Zonta, T., Da Costa, C. A., da Rosa Righi, R., de Lima, M. J., Da Trindade, E. S., Li, G. P.	Computers and Industrial Engineering	746	M.A
2	Machine learning in predictive maintenance towards sustainable smart manufacturing in industry 4.0	2020	Çınar, Z. M., Abdussalam Nuhu, A., Zeeshan, Q., Korhan, O., Asmael, M., Safaei, B.	Sustainability (Switzerland)	514	M.A
3	A Manufacturing Big Data Solution for Active Preventive Maintenance	2017	Wan, J., Tang, S., Li, D., Wang, S., Liu, C., Abbas, H., Vasilakos, A. V.	IEEE Transactions on Industrial Informatics	378	M.A
4	Industrial Big Data in an Industry 4.0 Environment: Challenges, Schemes, and Applications for Predictive Maintenance	2017	Yan, J., Meng, Y., Lu, L., Li, L.	IEEE Access	373	M.A
5	Machine learning and reasoning for predictive maintenance in Industry 4.0: Current status and challenges	2020	Dalzochio, J., Kunst, R., Pignaton, E., ... Favilla, J., Barbosa, J.	Computers in Industry	357	M.A
6	Predictive maintenance and intelligent sensors in smart factory: Review	2021	Pech, M., Vrchoťa, J., Bednář, J.	Sensors	282	M.A
7	Big data and stream processing platforms for Industry 4.0 requirements mapping for a predictive maintenance use case	2020	Sahal, R., Breslin, J.G., Ali, M.I.	Journal of Manufacturing Systems	278	M.A
8	Machine learning in predictive maintenance	2020	Çınar, Z.M., Nuhu, A.A., Zeeshan,	Sustainability (Switzerland)	268	M.A

	towards sustainable smart manufacturing in industry 4.0		Q., ...Asmael, M., Safaei, B.			
9	Continuous maintenance and the future – Foundations and technological challenges	2016	Roy, R., Stark, R., Tracht, K., Takata, S., Mori, M.	Cirp Annals	254	M.A
10	On Predictive Maintenance in Industry 4.0: Overview, Models, and Challenges	2022	Achouch, M., Dimitrova, M., Ziane, K., Sattarpanah Karganroudi, S., Dhouib, R., Ibrahim, H., Adda, M.	Applied Sciences (Switzerland)	246	M.A

C: Citations; T: Type; M.A: magazine article

La Tabla 5 presenta los autores con mayor número de publicaciones en el campo analizado. El autor con más documentos es Reich, afiliado a Hochschule Furtwangen, Alemania, con un total de 14 publicaciones indexadas en los algoritmos de búsqueda. Además, posee un índice h de 18, acumula 1.359 citas y presenta un Field-Weighted Citation Impact (FWCI) de 1,050. Le sigue Ansari, de la Technische Universität Wien, Austria, con 13 publicaciones, un índice h también de 18, un total de 644 citas y un FWCI notable de 3,226.

En términos de procedencia, los autores con mayor producción científica pertenecen principalmente a instituciones de Italia (5 autores), Alemania, Austria, Brasil, Reino Unido y España. El autor con el mayor índice h y número total de citas es Longo, de la Università della Calabria (Italia), con un índice h de 33 y 4.521 citas acumuladas en diversas líneas de investigación.

Respecto al impacto relativo de las publicaciones, el mayor valor de FWCI lo registra nuevamente Ansari. (FWCI = 3,226), lo que indica un rendimiento significativamente superior al promedio esperado en su campo. Siete de los diez autores principales presentan un FWCI mayor a 1, lo que sugiere que sus publicaciones han sido citadas por encima del promedio para autores similares; en contraste, tres autores tienen un FWCI inferior a 1, indicando una frecuencia de citación por debajo de lo esperado.

Dentro del grupo de los diez autores más productivos se destacan también Deschamps, de la Pontificia Universidad Católica de Paraná (Brasil), con 12 documentos, un FWCI de 0,233, un índice h de 20 y 2.800 citas; y Crespo, de la Universidad de Sevilla (España), con 11 documentos, un FWCI de 0,805, un índice h de 31 y 248 citas en total.

Finalmente, se observa que los diez primeros autores son hombres. La primera mujer en aparecer en el ranking es Zanni-Merk, C., del LITIS – Laboratoire d’Informatique, de Traitement de l’Information et des Systèmes, Saint-Etienne-du-Rouvray, Francia, quien

ocupa el puesto 20, con un FWCI de 0,176, un índice h de 10 y 1.185 citas en total.

TABLA V
AUTORES CON MÁS DOCUMENTOS PUBLICADOS

No.	Autor	S	N.D	Instituto	FWCI	h	T.C
1	Reich, C.	M	14	Hochschule Furtwangen, Furtwangen, Germany	1.05	18	1359
2	Ansari, F.	M	13	Technische Universität Wien, Vienna	3.226	18	1132
3	Macchi, M.	M	13	Politecnico di Milano, Milan. Italia	2.577	28	4925
4	Deschamps, F.	M	12	Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba. Brasil	0.233	20	2800
5	Bevilacqua, M.	M	11	Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italy	1.973	35	2144
6	Cao, Q.	M	11	Swansea University, Swansea, United Kingdom	2.467	8	331
7	Ciarapica, F.E.	M	11	Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italy	0.562	32	195
8	Crespo Márquez, A.	M	11	Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Sevilla, Spain	0.805	31	248
9	Fumagalli, L.	M	11	Politecnico di Milano, Milan, Italy	1.213	26	109
10	Longo, F.	M	11	Università della Calabria Rende, Italy	2.369	33	4521
20	Zanni-Merk, C.	F	9	LITIS - Laboratoire d’Informatique, de Traitement de l’Information et des Systèmes, Saint-Etienne-du-Rouvray, France	0.176	18	1185

S: sex; TC: Total number of citations

Los principales temas asociados al algoritmo de búsqueda se muestran en la Figura 5, donde pueden verse siete clústeres identificados por colores: Industria 4.0 (rojo), mantenimiento predictivo (verde), inteligencia artificial (azul), mantenimiento (amarillo), análisis de datos (morado), seguimiento (azul claro) y tecnología (naranja). La imagen resultante muestra diferentes patrones de relaciones entre los clústeres; sin embargo, estas relaciones no son excluyentes entre un clúster y otro, sino que existe una interacción entre ellos en general.

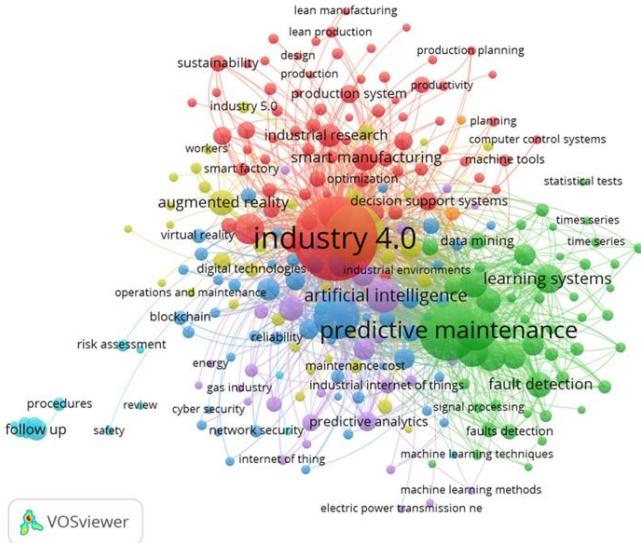


Fig 5. Principales temas asociados al algoritmo de búsqueda

IV. DISCUSIÓN

El panorama observado confirma que la gestión del mantenimiento ha transitado, en la última década, desde enfoques centrados en la programación y el control hacia una lógica decididamente data-driven, donde la confiabilidad, la disponibilidad y la seguridad (RAMS) se articulan con analítica avanzada y automatización. El crecimiento sostenido de la producción académica no sólo respalda esta inflexión [15], sino que también revela una maduración del campo a nivel de posgrado, con tesis y trabajos que intentan traducir el ideario de la Industria 4.0 a problemas concretos del ciclo de vida del activo [10], [22], [23]. En línea con tendencias globales de expansión científica [24], nuestros resultados muestran que la agenda del mantenimiento contemporáneo se ancla en tres vértices: (i) digitalización e interoperabilidad de datos (IIoT, gemelos digitales, integración CMMS/EAM); (ii) métodos de pronóstico y prescripción (PdM, estimación de vida remanente, optimización de planes); y (iii) gobernanza de decisiones basada en riesgo y costo del ciclo de vida.

El liderazgo de Italia en productividad, seguido por Alemania e importantes polos en India y Estados Unidos, contrasta con mapificaciones más amplias del término genérico “maintenance” que ubican a China y EE. UU. en posiciones dominantes. La diferencia es coherente con el filtro temático de este estudio (mantenimiento 4.0, gestión y fiabilidad), que privilegia dominios de automatización, mecatrónica y análisis de datos, donde el ecosistema italiano con el Politécnico de Milán a la cabeza exhibe una trayectoria particularmente consolidada. Las políticas de carrera académica y evaluación por métricas de publicación/citas [25] pueden actuar como incentivos a corto plazo; sin embargo, la persistencia del liderazgo sugiere también la existencia de redes colaborativas estables con la industria, plataformas compartidas de datos y una cultura de normalización técnica que favorece líneas de

investigación acumulativas. En América Latina, la presencia de Brasil entre los diez primeros dialoga con su histórica masa crítica en I+D y su capacidad para sostener proyectos de mediano plazo [26], lo que invita a explorar consorcios regionales que aceleren la validación cruzada de modelos en plantas de distintos sectores (minería, petróleo y gas, alimentos y bebidas, manufactura discreta).

El análisis bibliométrico confirma la hegemonía del inglés como lengua franca de la ciencia, con efectos directos en visibilidad y citación [27]–[29]. Este patrón, si bien facilita la diseminación global, introduce sesgos de cobertura (temas locales, terminología sectorial en otras lenguas) y refuerza la dependencia de bases que indexan preferentemente contenidos en inglés. De cara a la utilidad aplicada, ello sugiere promover repositorios bilingües, glosarios sectoriales armonizados y guías de reporte que permitan reproducibilidad (datos, código, protocolos) sin penalizar la diversidad lingüística.

En lo temático, la co-ocurrencia de mantenimiento 4.0, predictivo e inteligencia artificial perfila un campo que avanza con rapidez en modelización clasificadores de fallas, estimadores de RUL, segmentación de modos de falla pero que aún exhibe una brecha empírica: abundan evaluaciones en datasets acotados, bancos de pruebas o simulación, y escasean estudios longitudinales multi-sitio con métricas comparables (impacto en MTBF/MTTR, OEE, costo del ciclo de vida, riesgo operativo). Para cerrar esa brecha, se requieren diseños cuasi-experimentales en operación real, protocolos de A/B testing donde sea viable y reportes que incluyan incertidumbre, sensibilidad y robustez (p. ej., variabilidad por condiciones de carga, calidad del sensado, deriva de datos, *concept drift*). Asimismo, la integración sistemática del sensado al CMMS/EAM continúa siendo un cuello de botella: sin gobernanza de datos, taxonomías de falla normalizadas y trazabilidad (*digital thread*) a órdenes de trabajo y costos, los modelos de IA se quedan lejos de las decisiones tácticas y presupuestarias.

La evidencia sobre brechas de género en los estratos superiores de productividad exige cautela interpretativa y, a la vez, acción. Este patrón, ampliamente documentado como fenómeno multifactorial [30]–[32], no implica diferencias de competencia sino asimetrías de oportunidad (acceso a redes, financiamiento, liderazgo de grupos, cargas no investigativas). Trasladado a mantenimiento 4.0 un ámbito intensivo en ingeniería, cómputo y operaciones, el desafío es doble: (i) visibilizar la producción femenina y su impacto, y (ii) diseñar mecanismos (mentoría, convocatorias específicas, evaluación ciega de propuestas, cuotas en comités editoriales y técnicos) que mitiguen sesgos. La literatura sugiere que equipos diversos toman mejores decisiones bajo incertidumbre y generan soluciones más robustas; por ello, la inclusión no es sólo una exigencia ética, sino un acelerador de innovación con beneficios técnicos y económicos.

Desde el ángulo metodológico, los resultados deben leerse con restricciones explícitas. Primero, la volatilidad de las citas obliga a fijar fecha de corte y a contextualizar comparaciones

temporales. Segundo, la asignación múltiple de áreas temáticas en bases de datos puede inflar porcentajes si se interpretan como particiones exclusivas; la discusión debe aclarar si se usa conteo completo o fraccional. Tercero, la heterogeneidad de fuentes (revistas vs. series/proceedings) condiciona el uso de métricas como SJR o cuartiles; por rigor, conviene distinguir “fuentes de publicación” y aplicar indicadores acordes a su naturaleza. Por último, la dependencia de una única base sugiere, para trabajos futuros, triangulación con otras fuentes y auditorías de calidad de metadatos (desambiguación de autores/afiliaciones, normalización de instituciones y países).

En términos de implicancias prácticas, la ingeniería de mantenimiento ganará tracción si traduce la promesa 4.0 a un portafolio de decisiones verificables: (i) KPIs conectados RAMS/OEE y riesgo que permitan atribuir efectos de modelos PdM a resultados operativos; (ii) integración OT/IT segura (ciberseguridad industrial) que habilite despliegues escalables sin comprometer continuidad; (iii) economía del mantenimiento (TCO, payback, VaR operacional) para priorizar casos de uso con retorno claro; y (iv) desarrollo de competencias diagnóstico asistido por IA, interpretación de modelos, diseño de experimentos en planta, gobierno de datos en currículos y *upskilling* del personal técnico. Este itinerario, sustentado en evidencia replicable y estándares abiertos, es el puente real entre la pujante producción académica y la captura de valor en entornos industriales.

En síntesis, la discusión converge en que el campo avanza con vigor conceptual y metodológico, pero su consolidación depende de validaciones en contexto, interoperabilidad semántica, gobernanza de datos y políticas inclusivas que maximicen el talento disponible. La siguiente frontera no es sólo predecir fallas con mayor exactitud, sino institucionalizar un ciclo de mejora continua donde los modelos alimenten la planificación, la planificación modifique la operación y la operación regenere datos para modelos más precisos y justos. Esa espiral virtuosa es, en rigor, el núcleo de un Mantenimiento 4.0 que crea resiliencia, competitividad y sostenibilidad.

IV. CONCLUSIONES

Entre 2015 y 2025, la producción científica en ingeniería de mantenimiento creció de forma sostenida y notable, acompañando el paso de enfoques tradicionales hacia paradigmas claramente digitales. Este impulso no sólo responde al mayor interés académico, sino también a la presión de la industria por mejorar la confiabilidad, la disponibilidad y la seguridad de los activos (RAMS) mediante estrategias cada vez más predictivas y prescriptivas. Destaca, en particular, el liderazgo europeo —con Italia a la cabeza—, probablemente favorecido por políticas de I+D estables, esquemas competitivos de financiación y una coordinación efectiva entre universidades, centros de investigación y empresas. En paralelo, Brasil se consolida como referente en América Latina, una señal de que la agenda 4.0 también avanza en contextos productivos diversos.

Las fuentes de mayor impacto se concentran en editoriales europeas y publican, sobre todo, en inglés, lo que mejora la visibilidad y unifica el lenguaje técnico, aunque también puede limitar el acceso y la difusión en comunidades hispanohablantes. En lo temático, el mapa es claro: Industria 4.0, mantenimiento predictivo e inteligencia artificial estructuran la conversación, con la ingeniería y la informática como motores principales. Este foco ha impulsado una oleada de modelos y algoritmos de aprendizaje automático para pronosticar fallas, estimar la vida remanente y optimizar tareas. Aun así, buena parte de estos avances sigue anclada en validaciones acotadas: predominan simulaciones y datasets limitados frente a evaluaciones longitudinales en planta, comparaciones entre sitios o análisis de costo–beneficio completos. El reto, por tanto, es llevar esa promesa digital al terreno operativo, con evidencia robusta y medible en condiciones reales.

Aun cuando se constata la consolidación de escuelas y autores de alta productividad, persisten brechas de participación femenina en los estratos superiores de autoría. Este patrón, observando con cautela metodológica, parece obedecer a factores estructurales (trayectorias profesionales, redes de colaboración, sesgos de reconocimiento) más que a una diferencia de competencia, y constituye un desafío pendiente para las comunidades editoriales, los programas de posgrado y las políticas institucionales de carrera investigadora. Avanzar hacia una ciencia del mantenimiento más inclusiva y diversa no es solo una exigencia ética; también es una vía pragmática para ampliar enfoques, priorizar problemas de alto impacto y acelerar la transferencia tecnológica.

En conjunto, los hallazgos refuerzan que la “nueva” gestión del mantenimiento debe integrar, de forma explícita, tres vectores: (i) tecnologías digitales IA, analítica avanzada, gemelos digitales, IIoT, edge/cloud alineadas con estándares y taxonomías de datos interoperables; (ii) las personas competencias en diagnóstico, interpretación de modelos, ciberseguridad operativa y toma de decisiones basada en riesgo; y (iii) sostenibilidad eficiencia energética, huella de carbono, circularidad de repuestos y materiales, y criterios ESG. Para madurar este tránsito, se recomienda priorizar estudios aplicados con métricas RAMS/OEE comparables, diseños quasi-experimentales en entornos reales, y reportes replicables (datasets abiertos, protocolos, código) que permitan evaluar robustez, escalabilidad y retorno económico de las intervenciones de Mantenimiento 4.0.

Finalmente, el campo ganará tracción si consolida puentes entre investigación y práctica: bancos de datos multicéntricos y estandarizados; validaciones inter-planta de algoritmos; integración CMMS/EAM con pipelines de IA; y cuadros de mando que conecten indicadores técnicos (MTBF, MTTR, RUL) con objetivos de negocio y sostenibilidad. Este itinerario tecnológico, humano y ambiental perfila una agenda de innovación responsable donde el mantenimiento deja de ser un centro de costo para convertirse en un habilitador estratégico de competitividad y resiliencia industrial.

REFERENCIAS

- [1] L. Pincioli, P. Baraldi, and E. Zio, "Maintenance optimization in Industry 4.0," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 234, art. no. 109204, 2023, doi: 10.1016/j.ress.2023.109204.
- [2] I. ul Hassan, K. Panduru, and J. Walsh, "Predictive maintenance in Industry 4.0: A review of data processing methods," *Procedia Computer Science*, vol. 257, pp. 896–903, 2025, doi: 10.1016/j.procs.2025.03.115.
- [3] K.-D. Thoben, S. Wiesner, and T. Wuest, "Industrie 4.0 and smart manufacturing – a review of research issues and application examples," *International Journal of Automation Technology*, vol. 11, no. 1, pp. 4–19, 2017.
- [4] M. Jasulewicz-Kaczmarek, "The role and contribution of maintenance in sustainable manufacturing," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 46, no. 9, pp. 1146–1151, 2013.
- [5] V. Medaković and B. Marić, "A model of management information system for technical system maintenance," *Acta Technica Corvinensis – Bulletin of Engineering*, vol. 11, no. 3, pp. 85–90, 2018.
- [6] J. Cárcel-Carrasco and J. A. Cárcel-Carrasco, "Analysis for the knowledge management application in maintenance engineering: Perception from maintenance technicians," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 2, art. 703, 2021, doi: 10.3390/app11020703.
- [7] A. Mosyurchak, V. Veselkov, A. Turygin, and M. Hammer, "Prognosis of behaviour of machine tool spindles, their diagnostics and maintenance," *MM Science Journal*, pp. 2100–2104, Dec. 2017, doi: 10.17973/MMSJ.2017_12_201794.
- [8] C. Mafla, C. Castejon, and H. Rubio, "Mantenimiento predictivo en tractores agrícolas. Propuesta de metodología orientada al mantenimiento conectado," *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, vol. 25, no. 1, pp. 63–76, 2022.
- [9] B. Sevalho Nascimento, M. Albuquerque de Oliveira, V. de Melo Freires, G. de Mattos Veroneze, S. R. Gomes de Souza, and A. Martins Lucas, "Análise e diagnóstico do setor de manutenção baseado em modelo de maturidade para a gestão da manutenção: um estudo de múltiplos casos do polo industrial de Manaus," *Revista Foco (Interdisciplinary Studies Journal)*, vol. 16, no. 9, pp. 1–19, 2023.
- [10] R. F. Da Silva, "Estrutura de gerenciamento de manutenção para a gestão de ativos físicos," Ph.D. dissertation, Univ. de São Paulo, 2022.
- [11] M. Jasulewicz-Kaczmarek and A. Gola, "Maintenance 4.0 technologies for sustainable manufacturing—an overview," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 10, pp. 91–96, 2019, doi: 10.1016/j.ifacol.2019.10.005.
- [12] C. Franciosi, B. Iung, S. Miranda, and S. Riemma, "Maintenance for sustainability in the industry 4.0 context: A scoping literature review," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 11, pp. 903–908, 2018.
- [13] H. Li and C. G. Soares, "Assessment of failure rates and reliability of floating offshore wind turbines," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 228, art. 108777, 2022, doi: 10.1016/j.ress.2022.108777.
- [14] S. Ferreira, F. J. G. Silva, R. B. Casais, M. T. Pereira, and L. P. Ferreira, "KPI development and obsolescence management in industrial maintenance," *Procedia Manufacturing*, vol. 38, pp. 1427–1435, 2019.
- [15] S. Werbińska-Wojciechowska and K. Winiarska, "Maintenance performance in the age of Industry 4.0: A bibliometric performance analysis and a systematic literature review," *Sensors*, vol. 23, no. 3, art. 1409, 2023.
- [16] Y. Yuan, U. Gretzel, and Y. Tseng, "Revealing the nature of contemporary tourism research: extracting common subject areas through bibliographic coupling," *International Journal of ...*, vol. 17, pp. 417–431, 2015.
- [17] F. Romaní, C. Huamaní, and G. González-Alcaide, "Estudios bibliométricos como línea de investigación en las ciencias biomédicas: una aproximación para el pregrado," *Cimel*, vol. 14, no. 1, pp. 52–62, 2011.
- [18] M. B. Kalıpçı, E. K. Şimşek, and R. Eren, "Decoding the trends and emerging research directions of E-commerce and tourism in the light of Resource Dependence Theory: A bibliometric analysis," *Heliyon*, vol. 10, no. 6, art. e28076, 2024.
- [19] S. Ajibade *et al.*, "Biochar-based compost: a bibliometric and visualization analysis," *Bioengineered*, vol. 13, nos. 7–12, pp. 15013–15032, 2022.
- [20] N. O'Brien *et al.*, "Nuevo coronavirus (COVID-19). Un análisis bibliométrico," *Revista Chilena de Anestesia*, vol. 49, no. 3, 2020.
- [21] M. Y. L. Vázquez, J. E. Ricardo, and N. B. Hernández, "Investigación científica: perspectiva desde la neutrosofía y productividad," *Universidad y Sociedad*, vol. 14, no. S5, pp. 640–649, 2022.
- [22] M. Urbani, "Maintenance policies optimization in the Industry 4.0 paradigm," Ph.D. dissertation, Univ. di Trento, 2021.
- [23] J. M. Wakiru, "Development of Integrated Maintenance Strategies for Asset Performance Optimization," Ph.D. thesis, Katholieke Univ. te Leuven, 2021.
- [24] E. G. Galvez-Diaz, "Competencias investigadoras y producción científica en docentes de la Facultad de Ingeniería en Universidad Privada-Chiclayo," *Revista RedCA*, vol. 5, no. 14, pp. 141–156, 2022.
- [25] C. Demetrescu, I. Finocchi, A. Ribichini, and M. Schaerf, "On bibliometrics in academic promotions: A case study in computer science and engineering in Italy," *Scientometrics*, vol. 124, no. 3, pp. 2207–2228, 2020, doi: 10.1007/s11192-020-03548-9.
- [26] L. Cervantes Liñán, L. Bermúdez Díaz, and V. Pulido Capurro, "Situación de la investigación y su desarrollo en el Perú: reflejo del estado actual de la universidad peruana," *Pensamiento & Gestión*, no. 46, pp. 311–322, 2019.
- [27] D. Crystal, *The Stories of English*, Penguin, 2005.
- [28] M. Niño-Puello, "El inglés y su importancia en la investigación científica: algunas reflexiones," *Revista Colombiana de Ciencia Animal – RECIA*, vol. 5, no. 1, pp. 243–254, 2013.
- [29] Á. F. López, J. S. Valero, and J. M. Fernández, "Publicar en castellano, o en cualquier otro idioma que no sea inglés, negativo para el factor de impacto y citaciones," *Journal of Negative and No Positive Results (JONNPR)*, vol. 1, no. 2, pp. 65–70, 2016.
- [30] S. B. Figar, J. Vicens, and A. Dawidowski, "'Día Internacional de las Mujeres y las Niñas en la Ciencia': Reflexión crítica sobre el rol de la Mujer en la Investigación Científica," *Revista del Hospital Italiano de Buenos Aires*, vol. 45, no. 1, pp. e0000455–e0000455, 2025.
- [31] A. Burdano, "¿Qué carreras estudian las mujeres ecuatorianas?," *El Telégrafo*, 11 dic. 2016. [Online]. Available: https://www_eltelagrafo.com.ec/noticias/septimo/1/las-carreras-ligadas-con-la-salud-atraen-mas-a-las-mujeres-ecuatorianas.
- [32] J. C. Almenara, V. M. Díaz, and A. I. V. Martínez, "La mujer y la investigación en tecnología educativa: Análisis de su presencia en la autoría de artículos científicos," *Education in the Knowledge Society (EKS)*, vol. 12, no. 2, pp. 122–148, 2011.
- [33] K. Beg, S. N. Shajar, M. M. Ahmad, and A. G. Faiyyaz, "The bibliometric analysis of previous twenty-five years' literature: A microfinance review," *Heliyon*, vol. 10, no. 3, art. e24979, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e24979.
- [34] C. Wang *et al.*, "Farmland phytoremediation in bibliometric analysis," *Journal of Environmental Management*, vol. 351, art. 119971, 2024.
- [35] Y. Liu *et al.*, "Global research landscape and trends of cancer radiotherapy plus immunotherapy: A bibliometric analysis," *Heliyon*, vol. 10, art. e27103, 2024.
- [36] K. Beg, B. Padmapriya, S. N. Shajar, M. Ahmad, and A. G. Faiyyaz, "The bibliometric analysis of previous twenty-five years' literature: A microfinance review," *Heliyon*, vol. 10, no. 3, art. e24979, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e24979.
- [37] J. Xu *et al.*, "Research landscape of energy transition and green finance: A bibliometric analysis," *Heliyon*, vol. 10, no. 3, art. e24783, 2024.
- [38] S. Saleem, E. Dhuey, L. A. White, and M. Perlman, "Understanding 21st century skills needed in response to Industry 4.0: Exploring scholarly insights using bibliometric analysis," *Telematics and Informatics Reports*, vol. 13, art. 100124, 2024.
- [39] N. Fijačko *et al.*, "Using generative artificial intelligence in bibliometric analysis: 10 years of research trends from the European Resuscitation Congresses," *Resuscitation Plus*, vol. 18, art. 100584, 2024.
- [40] D. Dayal, B. M. Gupta, J. Bansal, and Y. Singh, "COVID-19 associated mucormycosis: A bibliometric analysis of Indian research based on Scopus," *Iberoamerican Journal of Science Measurement and Communication*, vol. 3, no. 2, pp. 1–11, 2023, doi: 10.47909/ijsmc.54.
- [41] R. Vaishya, B. M. Gupta, Y. Singh, and A. Vaish, "Covid-19 and Sarcopenia: A bibliometric analysis," *Iberoamerican Journal of Science Measurement and Communication*, vol. 3, no. 2, pp. 1–11, 2023.

- [42]G. Cáceres Castellanos, “La importancia de publicar los resultados de Investigación,” *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 23, no. 37, pp. 7–8, 2014.
- [43]M. Y. Leyva Vázquez et al., “Investigación científica. Pertinencia en la educación superior del siglo XXI,” *Conrado*, vol. 17, no. 82, pp. 130–135, 2021.
- [44]X. Han and R. P. Appelbaum, “China’s science, technology, engineering, and mathematics (STEM) research environment: A snapshot,” *PLoS One*, vol. 13, no. 4, art. e0195347, 2018.
- [45]F. Huang, “The Former Soviet Patterns Towards the U.S. Model? Changes in Chinese Doctoral Education,” Jan. 2017. [Online]. Available: file:///C:/Users/Usuario/Downloads/wp12.pdf