



Herramientas 4.0 y su implementación en la mejora del desempeño en la gestión de mantenimiento.

Tools 4.0 and their implementation to improve performance in maintenance management.

Gabriel Anthony Regalado-Carhuapoma¹, Roy Ali Chavez-Sempertegui²,
 Zaida Brenilda Chávez-Romero³, Jorge Luis Leiva-Piedra⁴
^{1,2,3,4}Universidad Tecnológica del Perú, Chiclayo - Perú

Recibido: 22 de febrero de 2025.

Aceptado: 23 de julio de 2025.

Publicado: 01 de septiembre de 2025.

Resumen- El progreso tecnológico y la aplicación de herramientas cada vez más precisas en las empresas manufactureras, viene generando un cambio notable en el desarrollo de sus actividades, buscando hacerlas más eficientes. La presente revisión de literatura tuvo como objetivo identificar las herramientas de la industria 4.0 y cómo su aplicación mejora el seguimiento y control de la gestión de mantenimiento. Para ello, se analizaron 57 artículos científicos, obtenidos de las bases de datos Scopus y ScienceDirect, que cumplieron con los criterios de inclusión. Los resultados obtenidos del análisis permitieron identificar cuatro desafíos que afectan el OEE, asimismo, se determinaron las siete herramientas de la industria 4.0 que contribuyen a la mejora del mantenimiento, del mismo modo, se reconocieron las cinco diferencias entre los métodos convencionales y las herramientas 4.0 destacando la inspección remota, predicción de fallas, registro digital, mayor disponibilidad de tecnologías y mejora en la toma de decisiones. Se concluyó que la incorporación de estas herramientas ha evidenciado mejoras, ya sea de formas aisladas o conjuntas en el monitoreo y diagnóstico de máquinas.

Palabras clave: mantenimiento productivo total, industria 4.0, efectividad global del equipo, productividad.

Abstract— Technological progress and the application of increasingly more precise tools in manufacturing companies have generated a notable change in the development of their activities, seeking to make them more efficient. This literature review aimed to identify Industry 4.0 tools and how their application improves the monitoring and control of maintenance management. For this purpose, 57 scientific articles were analyzed, obtained from the Scopus and ScienceDirect databases, which met the inclusion criteria. The results obtained from the analysis allowed the identification of four challenges that affect OEE, as well as the seven Industry 4.0 tools that contribute to improving maintenance. Likewise, the five differences between conventional methods and 4.0 tools were recognized, highlighting remote inspection, failure prediction, digital recording, greater availability of technologies, and improved decision-making. It was concluded that incorporating these tools has shown improvements, either in isolation or in the monitoring and diagnosis of machines.

Keywords: total productive maintenance, industry 4.0, overall equipment effectiveness, productivity.

*Autor para correspondencia.

Correo electrónico: u20201223@utp.edu.pe (Gabriel Anthony Regalado Carhuapoma).

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad de Santander.

Este es un artículo bajo la licencia CC BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Como citar este artículo: G. A. Regalado-Carhuapoma, R. A. Chavez-Sempertegui, Z. B. Chávez-Romero y J. L. Leiva-Piedra, "Herramientas 4.0 y su implementación en la mejora del desempeño en la gestión de mantenimiento", Aibi revista de investigación, administración e ingeniería, vol. 13, no. 3, pp. 01-10 2025, doi: [10.15649/2346030X.4541](https://doi.org/10.15649/2346030X.4541)



I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, las máquinas se han vuelto más sofisticadas debido al progreso tecnológico y adquiriendo una mayor importancia en cuanto a confiabilidad y disponibilidad [1]; esto debido a que los métodos convencionales han demostrado no ser eficientes en la recolección, procesamiento y análisis de datos [2]. Diversos estudios han evidenciado que la problemática más común en el sector manufacturero es la mala gestión del mantenimiento, lo que genera fallas en las máquinas llegando a representar el 80% de los costos totales [3], deficientes planes de mantenimiento, desencadenando paradas no planificadas (19.61%) afectando la efectividad global del equipo (OEE) en hasta un 49.44% [4], al cual se le suma la falta de apoyo de la alta dirección y poca comprensión de las tecnologías 4.0 [5]. Todo esto genera que su implementación sea limitada sobre todo en los países en desarrollo; dependiendo, además, del nivel tecnológico de los productos, tamaño de la empresa y si cuenta con un área de Investigación y Desarrollo (I+D) [6].

Son nueve los pilares de la Industria 4.0: internet de las cosas (IoT), computación en la nube, big data y analítica, simulación, realidad aumentada (AR), integración de sistemas horizontales y verticales, robots, fabricación aditiva y ciberseguridad [7] [8], los que han influenciado a que las empresas digitalicen sus procesos, provocando cambios disruptivos sobre todo en el sector manufacturero [5] [9]. Siendo las tecnologías 4.0 con mayor utilidad: analítica (43%), inteligencia artificial (IA) (35%), sensores (23%) y big data (19%) [10]. En este contexto, el mantenimiento productivo total (TPM) es la herramienta de lean manufacturing que más convergencia tiene con estas nuevas tecnologías [9], habiéndose demostrado que su combinación permite anticipar fallas, detectar errores y mejorar la toma de decisiones en los equipos de trabajo en la gestión de mantenimiento [2] [9]. Tal es así que en Brasil, cuatro empresas manufactureras integraron estas tecnologías a sus procedimientos de TPM, habiendo tenido limitaciones en el costo elevado, la poca compatibilidad de sus sistemas y la falta de apoyo de la alta dirección, siendo estos indicadores los que no permitieron el retorno inmediato de la inversión, por lo que antes de implementarlas se hace necesario crear contramedidas [5].

La integración de la Industria 4.0 en TPM garantizará que los especialistas de mantenimiento centren sus esfuerzos en controlar y contribuir con la competitividad de las empresas, teniendo así una relación positiva con el mantenimiento planificado y enfocado (13%) y con el ambiente, salud y seguridad (21%), permitiendo así un mayor rendimiento [9] [11]. Es así como las tecnologías de la industria 4.0 se han convertido en piezas claves para optimizar la gestión y potenciar sus estrategias de mantenimiento remoto, auto-mantenimiento y el rol del operador, contribuyendo a la mejora de sus indicadores [7]. Tal es así que la integración en conjunto de las tecnologías 4.0 (sensores, la nube e IoT) en una cinta transportadora dieron como resultado la disminución del tiempo medio entre reparación (MTTR) en un 46.5%, aumento del tiempo medio entre fallas (MTBF) en un 31.7% y aumento de la disponibilidad en 78.3% debido a la identificación rápida de estas [2]. En ese sentido, la presente investigación tiene como objetivo identificar las herramientas de la industria 4.0 y como su aplicación ha permitido mejorar el seguimiento y control en la gestión del mantenimiento en el sector manufacturero.

II. METODOLOGÍA O PROCEDIMIENTOS

La metodología que se empleó en la investigación se basó en una "Revisión Sistemática de Literatura" para lo cual se utilizó la estrategia PICOC y se formuló la pregunta de investigación: ¿Qué herramientas 4.0 permiten mejorar el seguimiento y control en la gestión de mantenimiento en el sector manufacturero? En la tabla 1 se desagregó la pregunta de revisión y se determinó las palabras claves por cada componente.

Tabla 1: Estructura Picoc.

Componente	Preguntas	Palabras claves
P	¿Qué problemas afectan la gestión de mantenimiento?	Failure, overall equipment effectiveness, maintenance, availability, total productive maintenance.
I	¿Cuáles son las herramientas de la Industria 4.0?	Industry 4.0, technologies, integration, automation, big data, simulation, analytics, the cloud, internet of things, IA, augmented reality, sensors, cloud computing, robots.
C	¿Qué tan eficaces han resultado en comparación a los métodos convencionales?	Traditional, corrective, preventive, predictive, industry 4.0, maintenance.
O	¿Qué mejoras se han obtenido al implementar estas nuevas tecnologías a los procedimientos de TPM?	Performance, productivity, monitoring, control, decision making.
C	¿En qué empresas del sector manufacturero se han aplicado?	Manufacturing sector, manufacturing industry, manufacturing company, manufacturing enterprise.

Fuente: Elaboración propia.

Las bases de datos empleadas para la búsqueda de literatura científica fueron Scopus y ScienceDirect. La ecuación de búsqueda empleada en Scopus fue: (TITLE-ABS-KEY (failure OR "overall equipment effectiveness" OR maintenance OR availability OR "total productive maintenance") AND TITLE-ABS-KEY ("industry 4.0" OR technologies OR integration OR automation OR "big data" OR simulation OR analytics OR "the cloud" OR "internet of things" OR IA OR "augmented reality" OR sensors OR "cloud computing" OR robots) AND TITLE-ABS-KEY (traditional OR corrective OR preventive OR predictive OR "industry 4.0" OR maintenance) AND TITLE-ABS-KEY (performance OR productivity OR monitoring OR control OR "decision making")) AND TITLE-ABS-KEY ("manufacturing sector" OR "manufacturing industry" OR "manufacturing company" OR "manufacturing enterprise")) AND (LIMIT-TO (OA, "all")) AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE, "final")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, "ENGI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA, "COMP")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR, 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2022) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2023) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2024)).

Para ScienceDirect fue: ("Industry 4.0" OR "total productive maintenance" OR "technologies" OR performance OR productivity OR availability OR control OR "decision making" OR monitoring), en el apartado de título ("Industry 4.0" OR "total productive maintenance" OR "maintenance") y se consideró artículos desde 2019 hasta 2024. Al realizar la búsqueda se obtuvieron 1064 documentos en Scopus y 6742 en ScienceDirect. Además, se identificaron veintidós documentos potenciales para la revisión sistemática. Se cribaron 1004 artículos, de los cuales

79 fueron seleccionados para revisión a texto completo. Luego, se determinó que 57 artículos cumplen con los criterios de inclusión y exclusión. La figura 1 muestra el proceso de selección de artículos bajo la metodología PRISMA.

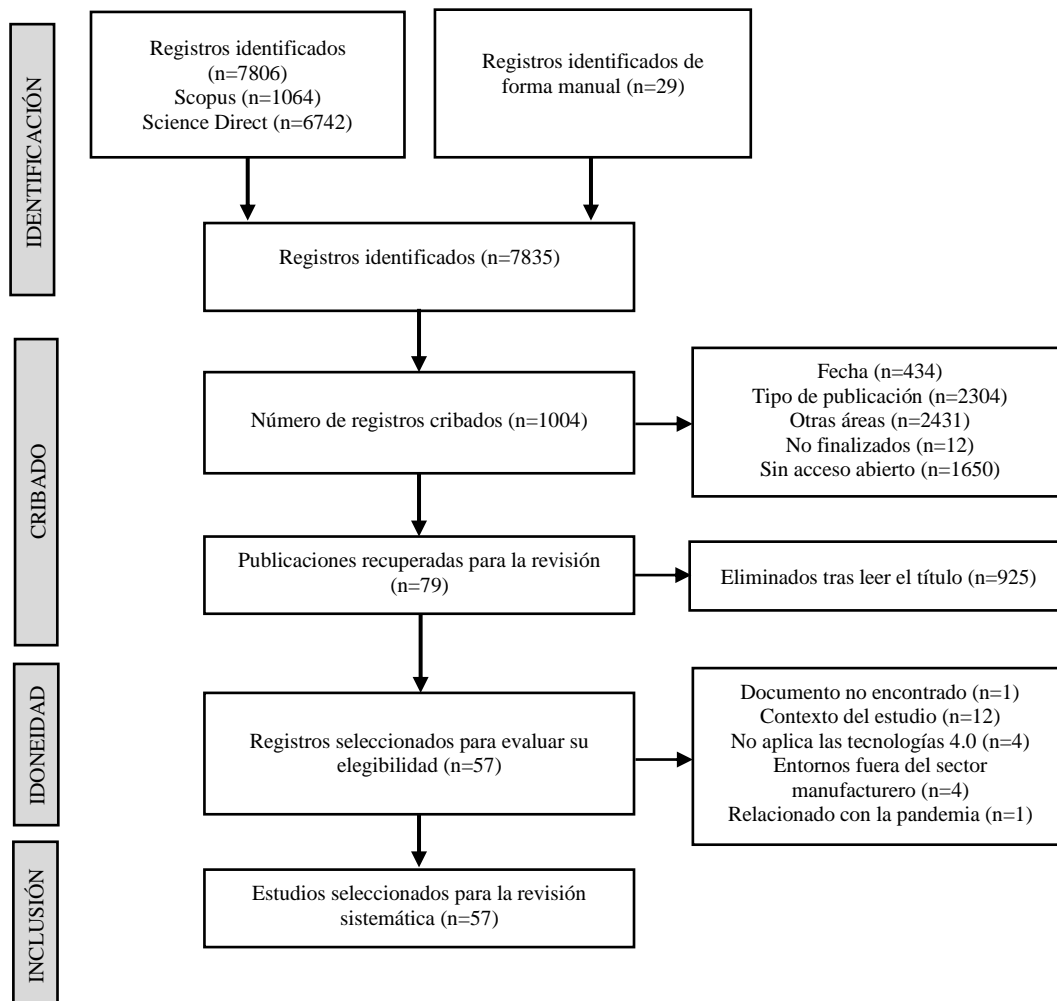


Figura 1: Diagrama de flujo PRISMA.
Fuente: Elaboración propia.

III. RESULTADOS, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

a. Desafíos que afectan la gestión de mantenimiento en el sector manufacturero

El mantenimiento es uno de los problemas más recurrentes en el sector manufacturero. En ese sentido, el TPM busca maximizar el ciclo de vida y la productividad del equipo, involucrando a todo el personal relevante, incluidos supervisores, equipo de mantenimiento, ingenieros y operadores [12]. Asimismo, el OEE es un indicador que permite a las empresas medir y mejorar su productividad, eficiencia y rendimiento global del equipo [13]. Sin embargo, un deficiente TPM desencadena cuatro desafíos que afectan el OEE. A continuación, se describirán como perjudican en distintos sectores de la industria manufacturera.

El primer desafío son las seis grandes pérdidas que se agrupan en fallas inesperadas (por avería y por preparación y ajuste), pérdidas por velocidad reducida (por velocidad reducida y por inactividad y/o pérdidas menores) y pérdidas de calidad (por retrabajo y por puesta en marcha) [14] [15]. En relación con eso, se evidenció que dos empresas automotrices presentaron deficiencias en el TPM, desencadenando pérdidas por avería en un rango entre 5.52% - 19.61%, por preparación y ajuste 5.06% - 5.38%, por velocidad reducida 10.82% - 21.98%, por inactividad y pérdidas menores 16.21% - 21.98%, por retrabajo 0.36% - 3.67% y por puesta en marcha de 0.78% - 10.82%, afectando el OEE entre 49.44% y 67.42% [4] [16].

La disponibilidad y productividad de los equipos pueden verse afectadas por un inadecuado cronograma de actividades de mantenimiento, ocasionando interrupciones, averías y paradas no planificadas [17] [18]. Tal es el caso de una empresa metalúrgica, donde este tipo de pérdidas desencadenaron una baja en el OEE de 16.17% para laminación, 12.73% para el área de doblado, 46.06% en la estación de trabajo de corte y 14.50% en la estación de trabajo de punzado [19].

Por otro lado, la falta de apoyo por parte de la alta dirección y los trabajadores también afectan el OEE; así pues, una empresa manufacturera en China ha mostrado un OEE de 54.23% debido a la resistencia al cambio y la escasa planificación de las tareas de mantenimiento; de la misma manera, el poco énfasis en el mantenimiento de las empresas en Nigeria dio como resultado que las fallas en máquinas representen el 80% de los costos totales [3] [20].

Otros desafíos que afectan la gestión son el alto costo y complejidad de mantenimiento de los equipos, el costo de la mano de obra y que los gerentes del área no cuentan con las herramientas y modelos de toma de decisiones para optimizar los recursos de manera efectiva y eficiente [21] [22].

b. Herramientas de la industria 4.0

El concepto de industria 4.0 ha evolucionado a lo largo del tiempo, empezó como industria 1.0, que empleó el vapor en la producción mecánica con la introducción del primer telar mecánico; posteriormente, evolucionó a industria 2.0, la cual se caracterizó por la producción en masa impulsada por electricidad y la creación de la primera línea de ensamblaje [23]. Tiempo después, surgió la industria 3.0 que tuvo como pilares la automatización, informática y electrónica mediante controladores programables [24]. Actualmente, la Industria 4.0 se distingue por el uso de IoT, big data, computación en la nube, IA y tecnologías de comunicación, permitiendo así la transformación hacia fábricas inteligentes [25].

Las tecnologías de la industria 4.0 se pueden clasificar en herramientas que recopilan datos (big data y analítica, computación en la nube, IoT, sensores, ciberseguridad) y aquellas que procesan y analizan la información (robots, AR, simulación, fabricación aditiva y gemelos digitales) [11] [26]. Se considera que IoT, big data y analítica son las herramientas base que las empresas manufactureras deben tener en cuenta para implementar el resto [27]. En tal sentido, la implementación de estas tecnologías en las tareas de mantenimiento ofrece mejoras en los equipos, tanto en precisión, eficacia como reducción de ineficiencias [22] [28].

Tabla 2: Herramientas de la industria 4.0 y su aplicación en el mantenimiento.

Herramientas	Características	Aplicación	Referencias
IoT	Funciona como un sistema de monitoreo a tiempo real que conecta un objetivo físico con un virtual.	Desarrollo de sistemas de monitoreo de fallas en husillos y análisis de datos de tiempo de parada y ciclo en cintas transportadoras.	[2] [29] [30] [31]
Computación en la nube	Permite cargar a una nube todos los datos recopilados de sensores, big data y analítica para su posterior análisis.	Almacenamiento de datos de tiempo de parada y ciclo de cintas transportadoras y registro de retrasos e intervenciones de mantenimiento.	[2] [5] [8]
Big data y analítica	Gestionan grandes volúmenes de datos.	Gestión y procesamiento de datos provenientes de máquinas prensadoras.	[32]
Simulación	Es una representación computacional que imita el comportamiento de un sistema real o imaginario para analizar distintos escenarios que permitan mejorar la toma de decisiones.	Simulaciones de demoras en el proceso evidenciaron efectos negativos en el mantenimiento.	[33] [34] [35] [36]
AR	Crea entornos reales en espacios virtuales.	Capacitación en actividades de mantenimiento.	[5] [35] [37]
Robots	Son máquinas automatizadas que colaboran en tareas de soporte.	Su aplicación en el mantenimiento aún es limitada por su poco uso.	[7]
Fabricación aditiva	Optimiza los procesos y la expansión de oportunidades en el diseño e ingeniería de materiales.	Su aplicación en el mantenimiento todavía es limitada.	[7] [38]
Ciberseguridad	Gestiona de manera eficiente los recursos, relaciones y el entorno industrial.	Su aplicación en el mantenimiento todavía es limitada.	[23]
Sensores	Recopilan datos y a la vez realizan un seguimiento a tiempo real sobre la disponibilidad del sistema.	Recopilación de parámetros de medición (temperatura, presión, vibraciones y nivel de flujo), múltiples datos de máquinas (desequilibrio, desalineación y holgura), crear alertas de posibles fallas, interrupciones y anomalías.	[32] [35] [39] [40]
Gemelos digitales	Es un modelo basado en datos que diagnostica y monitorea las operaciones.	En estudio: Diagnóstico del desgaste en herramientas de mecanizado y en máquinas de control numérico por computadora (CNC).	[41] [42]

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 2 se muestran características y aplicación de 10 tecnologías de la industria 4.0 en el mantenimiento. Para la recopilación de datos tenemos los sensores, pero también pueden ser usados para crear alertas de posibles fallas, como sucedió en una empresa manufacturera, que de igual modo lograron simplificar en 6 actividades el trabajo del técnico [43]. Luego estos datos los podemos gestionar con big data y analítica para posteriormente ser cargados a una nube donde se almacenarán. Para el análisis y procesamiento de los datos, tenemos el IoT; en el caso de los robots y fabricación aditiva, aún no se han evidenciado aplicaciones, lo que deja como una oportunidad para futuras investigaciones. La AR y simulación mayormente son empleadas para capacitar al personal de mantenimiento y, en algunos casos, para el diagnóstico de fallas en máquinas [37]. Por último, los gemelos digitales aún están siendo estudiados para diagnosticar el desgaste de herramientas de mecanizado y evitar que se materialice en una falla y en máquinas CNC ha tenido una precisión del 97.5% para el diagnóstico de fallas [41] [42].

Las tecnologías aplicadas de manera desagregada contribuyen a un mayor control y seguimiento del mantenimiento, pero se ha evidenciado que la integración en conjunto de estas herramientas tiene un mayor impacto. Como menciona [27], las tecnologías de la industria 4.0 se pueden agrupar por paquetes, de tal modo que su aplicación mejora el desempeño.

Tabla 3: Agrupamiento de tecnologías por paquetes para su aplicación en mantenimiento.

Paquetes	Contenido	Impacto
P1	IoT + Computación en la nube IoT + Ciberseguridad	<ul style="list-style-type: none"> • Recopila, transmite y almacena datos. • Mejora de la eficiencia de las actividades de mantenimiento. • Aumento de la efectividad global del equipo. • Costo de mantenimiento reducido. • Reducción de accidentes.
P2	IoT + IA Computación en la nube + IA IoT + Big data y analítica IoT + Computación en la nube + Big data y analítica IoT + Computación en la nube + IA IoT + Computación en la nube + Big data y analítica + IA Computación en la nube + big data y analítica + IA	<ul style="list-style-type: none"> • Conecta todas las máquinas. • Aumento de la efectividad global del equipo. • Servicio de mantenimiento personalizado.
P3	Fabricación aditiva + IoT Robot + IoT	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de tiempos y costos de mantenimiento. • Mejora de la eficacia en el servicio de mantenimiento.
P4	AR + IA AR + Big data y analítica	<ul style="list-style-type: none"> • Ayuda en la formación de los especialistas de mantenimiento.
P5	AR + IoT + IA AR + Computación en la nube + Big data y analítica	
P6	Gemelos digitales + IA Simulación + IA Gemelos digitales + Simulación + IA	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de la efectividad global del equipo. • Mejora de la seguridad de los trabajadores.
P7	Gemelos digitales + IoT + IA Gemelos digitales + IoT + Big data y analítica	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción del tiempo de inactividad de máquinas.

Fuente: Elaboración propia con base en aportes de [27].

En la tabla 3 se muestra el agrupamiento de tecnologías por paquetes donde podemos observar que el primer paquete permite recopilar, procesar y analizar la información para tomar una decisión; en ese aspecto, una manufacturera ha logrado un aumento de 20% de productividad y reducción de costos de mantenimiento en un 12% [27]. El segundo paquete nos facilita conectar todas las máquinas por medio de IoT de tal modo que podamos personalizar el servicio de mantenimiento. El tercer paquete hace posible la reducción de tiempos y costos de mantenimiento gracias al uso de robots y fabricación aditiva, ya que al reducir los errores por mano de obra se mejora la eficacia del servicio. El cuarto y quinto paquete va orientado a colaborar en la formación de los técnicos a través de la AR. En el sexto y séptimo paquete, lo que sobresale son los gemelos digitales, pues a través del diagnóstico y monitoreo de fallas se reduce el tiempo de inactividad de las máquinas. Se resalta que el primer, segundo y sexto paquete mejoran el OEE.

En la tabla 4 se resumen las principales ventajas y desventajas de estas herramientas en torno al mantenimiento.

Tabla 4: Ventajas y desventajas de las herramientas de la industria 4.0.

Herramientas	Ventajas	Desventajas	Referencias
IoT	<ul style="list-style-type: none"> • Descripción de los indicios de fallos. • Aumento de la seguridad en las intervenciones del equipo de mantenimiento. • Visualización a tiempo real del estado de herramientas de mecanizado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Las máquinas no están diseñadas para integrar datos con otras plataformas. • No se puede predecir en qué momento ocurrirá el fallo. 	[31]
Computación en la nube	<ul style="list-style-type: none"> • El usuario puede escoger entre una conexión pública, privada, híbrida o compartida. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere de una alta velocidad de conexión a internet. • Los datos que son cargados se ven limitados por la capacidad de almacenamiento. • Existen riesgos en cuanto a seguridad de los datos. 	[7] [8] [44]
Big data y analítica	<ul style="list-style-type: none"> • Permite monitorear las anomalías en máquinas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Los sistemas de arquitectura de big data deben ser capaces de gestionar miles de datos, ser escalables como también monitorear y controlar eventos inesperados. 	[32] [45]
Simulación	<ul style="list-style-type: none"> • Apoyo en la toma de decisiones. • Predicción y análisis de posibles resultados. 	<ul style="list-style-type: none"> • No presenta desventajas. 	[17] [35]
Realidad aumentada	<ul style="list-style-type: none"> • Ahorro de tiempo, reducción de costos, mejora en el diagnóstico de fallas y facilita la capacitación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Su alto costo limita que algunas empresas manufactureras las adquieran. 	[5] [37] [46]
Ciberseguridad	<ul style="list-style-type: none"> • Identificación, evaluación y minimización de posibles riesgos de seguridad relacionado a datos. 	<ul style="list-style-type: none"> • No presenta desventajas. 	[23]
Sensores	<ul style="list-style-type: none"> • Seguimiento en tiempo real. • Recopilación de datos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Incapacidad para gestionar todos los datos recolectados. 	[35] [47]
Gemelos digitales	<ul style="list-style-type: none"> • Detección de fallas, análisis y monitoreo de máquinas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Los métodos de prueba actualmente son costosos. • No existen modelos que hayan aplicado dos o más mediciones (temperatura, vibraciones, etc). 	[41]

Fuente: Elaboración propia.

Si bien las tecnologías de la industria 4.0 han presentado resultados notorios para la mejora del mantenimiento, aún se ven limitadas debido a la escasa infraestructura de las empresas y a que estas no cuentan con la información ni recursos necesarios.

Por un lado, para implementar con éxito las tecnologías de la industria 4.0, las empresas deben tener una infraestructura tecnológica sólida [48]. Una encuesta reciente ha revelado que empresas manufactureras multinacionales que aspiran a integrar estas nuevas tecnologías a sus procedimientos de TPM, el 50.3% son baja y media-baja intensidad tecnológica; esto imposibilita la adopción de estas herramientas [11].

Por otro lado, las pequeñas y medianas empresas manufactureras no disponen de la información y recursos para actualizar sus equipos a las nuevas tecnologías [30] [32]. Ante esto, se ha propuesto un análisis de datos colaborativos (CDA) con la finalidad de que este tipo de empresas puedan continuar siendo competitivas y puedan sumarse de a poco a los avances tecnológicos, pero han enfrentado desafíos como la equidad, privacidad y competencia sana en el manejo de los datos, lo cual hace más compleja la integración de las tecnologías [26].

c. Métodos convencionales vs Herramientas 4.0

La industria y el mantenimiento han evolucionado paralelamente; la estrategia inició como una actividad correctiva donde solo se reparaban las averías o fallas de los equipos conforme ocurrían, lo que resultó ser costoso porque el tiempo de inactividad de las máquinas era mayor [49]. Luego, con la finalidad de disminuir la aparición de fallas, se comenzó a utilizar el mantenimiento preventivo, pero representó un aumento en los costos operativos [28]. Después, con el avance de la tecnología, nació el mantenimiento predictivo que se enfocó en predecir fallas y evaluar la vida útil restante de las máquinas, este método se basa en datos y técnicas de IA [50], las cuales conducen a tomar decisiones óptimas; además, su planificación permite ahorrar costos [51]. En el tiempo actual, la industria 4.0 ha permitido mejorar la estrategia de mantenimiento hacia una mayor efectividad, control y seguimiento de las máquinas de manera remota, puesto que se busca integrar y digitalizar los procesos de mantenimiento [18].

Tabla 5: Comparación entre los métodos convencionales y las herramientas de la industria 4.0.

Convencionales	Industria 4.0	Referencias
Las inspecciones se realizaban periódicamente y de forma física.	La inspección se realiza de forma remota a través de sistemas de monitoreo a tiempo real.	[17] [32] [35] [40] [41] [42] [52] [53]
El registro era por medio de hojas de verificación.	El registro se maneja de forma digital.	
Predicción de fallas bajo opinión de expertos.	Predicción de fallas por medio de modelos basados en algoritmos de big data, gemelos digitales, arquitectura de IoT, entre otros.	
Uso de tecnología limitada.	Uso de sensores, computación en la nube, big data y analítica, IoT, simulación, AR y gemelos digitales.	
Escasa data para una toma de decisiones óptima.	Toma de decisiones apoyada por información procesada a tiempo real.	

Fuente: Elaboración propia.

Las metodologías de mantenimiento tradicionales están siendo reevaluadas para aprovechar las tecnologías de la industria 4.0 que ofrecen mejores oportunidades de intervención, de tal modo que pasemos de estrategias de mantenimiento convencionales a soluciones más potentes y atractivas [28] [54]. En este aspecto, las industrias están cambiando sus estrategias usando el IoT para una toma de decisiones más rápida, en lugar de un análisis largo que ha demostrado ser costoso [49]. Sin embargo, no solo las estrategias están cambiando, sino también el papel de los técnicos; ellos vienen trabajando de la misma manera durante años, lo cual no es coherente con la industria digitalizada, por ende, las actividades de mantenimiento no solo deben estar conectadas con las tecnologías, sino también con los operadores [55]. De tal forma, la digitalización en el TPM permite un mayor seguimiento y control de la gestión a comparación del mantenimiento convencional; en relación con eso, una empresa manufacturera de Polonia ha logrado una mejora de un 15% en su eficiencia y a la vez les ha permitido monitorear las tareas para anticiparse a las fallas y planificar un mejor mantenimiento [56].

d. Evidencias de la mejora en el mantenimiento

Las tecnologías de la industria 4.0 aplicadas de forma desagregada o conjunta han evidenciado mejoras en el seguimiento y control del mantenimiento en el sector manufacturero.

En el caso de tecnologías desagregadas como la AR, el 50% de empresas manufactureras de Eslovaquia la consideran útil para el montaje y desmontaje, un 40% para facilitar la reparación, inspección y diagnóstico de fallas y un 10% para formación de actividades de mantenimiento [46]. Si bien el 69% ha destacado su integración por medio de teléfonos y tabletas inteligentes, un 22% de empresas han señalado el uso de gafas inteligentes, lo cual representa una mejora de eficiencia, calidad y seguridad para el usuario; el resto utiliza otro tipo de dispositivos [37] [46]. Con respecto a los algoritmos basados en big data, en España se ha desarrollado un sistema de monitoreo en máquinas prensadoras; este sistema permitió detectar anomalías, mejorar el OEE y procesar los datos de forma estable y escalable, teniendo un tiempo de 1.71 segundos para procesar y mostrar el estado de la máquina [32].

Asimismo, en Suecia se han empleado algoritmos de big data para monitorear y predecir fallas en máquinas CNC, como resultado se tuvo que el sistema fue capaz de procesar, analizar los datos y detectó anomalías en los husillos de dos máquinas [40]. Además, en Grecia se exploró un sistema a base de IA para monitorear las máquinas de moldeo por inyección, detectar anomalías y minimizar las pérdidas, este modelo tiene una precisión entre 80-90% [57]. También, es posible capturar, procesar, almacenar y visualizar datos a través de un procesamiento de sensores (SPP) para detectar anomalías y reducir los tiempos de inactividad en las máquinas, el modelo tuvo una media de procesamiento de 162 segundos y una capacidad de entrada de 15.8 MB/s [47]. De igual forma, un sistema de monitoreo de vibraciones en máquinas CNC con sensores para visualizar su estado a tiempo real; su aplicación permite dar un seguimiento al desgaste de las herramientas de mecanizado [58].

Por otro lado, múltiples investigaciones han demostrado la incorporación de tecnologías de forma conjunta; sobre este punto, una automotriz de Brasil ha incorporado en conjunto sensores, IoT y computación en la nube para monitorear a tiempo real los husillos de sus máquinas, esto permitió minimizar las fallas a través del seguimiento del comportamiento de los husillos [31]. Igualmente, se ha estudiado la integración de IoT e IA para la creación de un sistema de monitoreo que pueda detectar fallas en máquinas, el modelo tuvo una precisión del 95% en el diagnóstico para pronosticar cuándo se debe realizar el mantenimiento [53]. En cambio, existe la posibilidad de emplear algoritmos de aprendizaje automático (ML), IA y sensores para diagnosticar y clasificar las fallas en motores de inducción; dicho modelo tuvo una precisión del 97.32% y una respuesta de 0.22 segundos en el diagnóstico [59]. Del mismo modo, otro modelo utilizó sensores, IoT y ML para la detección y diagnóstico de fallas en motores de turbina de gas con una precisión de hasta 97% de las anomalías [60].

A su vez, en una fábrica textil, la implementación de gestión de datos de productos en un módulo ML basado en la nube ha obtenido resultados positivos, debido a que sus herramientas permiten analizar los datos de sus equipos y a la vez desarrollar estrategias que facilitan las actividades de mantenimiento [21]. Por último, una investigación ha realizado 4 experimentos para analizar el índice de mantenimiento en diferentes escenarios: el primero no usó ninguna tecnología 4.0, el segundo examinó la implementación parcial de estas herramientas, el tercero utilizó el 50% y el cuarto se evaluó con el 100% de estas, donde los resultados han mostrado un rendimiento de 68.05%, 78.92%, 85.79% y 95.51% respectivamente [22].

IV. DISCUSIÓN

Del análisis realizado, se identificaron cuatro desafíos que afectan el OEE de las empresas manufactureras, siendo el primero las seis grandes pérdidas donde las fallas inesperadas, pérdidas por velocidad y de calidad son causantes de la disminución del OEE. A diferencia de lo reportado, una investigación ha resaltado que existe otro componente que afecta la productividad de los equipos y está relacionado con el rendimiento de la utilización de los materiales que son procesados en las máquinas; esta inclusión permite observar factores ocultos como la mala limpieza y deficiencias tanto en mano de obra como en prácticas de mantenimiento [14]. Por otra parte, un inadecuado cronograma de mantenimiento daña la productividad y disponibilidad por la aparición de fallas, interrupciones y paradas no planificadas; para superar esta limitación, un estudio señaló la importancia de crear un sistema que sea capaz de recopilar datos de máquinas que permita prevenir fallas y planificar actividades que eliminen estos desperdicios [61]. Como menciona Munir et al. (2019), no solo la falta de apoyo organizacional genera un deficiente TPM, sino también existen limitaciones financieras, estratégicas, departamentales, sociales y falta de capacitación que generan una mentalidad rígida ante el cambio [62]. Adicionalmente, existen otros desafíos como el alto costo y complejidad del mantenimiento, el costo de la mano de obra y falta de tecnologías modernas.

Como segundo punto a resaltar, se tiene que las herramientas de la industria 4.0 aplicadas en el mantenimiento permiten recopilar datos en tiempo real, como también procesar y analizar dicha información que permita tomar decisiones para la mejora del seguimiento y control de las máquinas. No obstante, los gemelos digitales aún se encuentran siendo estudiados y su aplicación aún se ve limitada debido a que las pruebas actualmente son costosas [41]. Por lo cual, se recomienda para futuras investigaciones estudiar robots y fabricación aditiva en tareas de mantenimiento, dado que solo se ha evidenciado su aplicación para mejorar procesos productivos [27]. En cuanto a la adopción de estas tecnologías existen limitaciones que van desde la escasa infraestructura tecnológica de las empresas hasta la falta de recursos; sumado a esto, se encontraron 23 desafíos gerenciales, de los cuales un 77% representan problemas relacionados a lo tecnológico, datos, recursos humanos, seguridad y financieros. Paralelamente, se identificaron 32 desafíos tecnológicos, de los cuales el IoT y big data representaron un 53% de las barreras en su implementación [63].

Mientras tanto, la transición de la Industria 4.0 ha mejorado la gestión del mantenimiento respecto al uso de los métodos convencionales que resultaban ser muy costosos y generaban mayor tiempo de inactividad en las máquinas; por ello, las empresas buscan introducir las tecnologías 4.0 para digitalizar sus procesos, puesto que estas herramientas ofrecen mejores oportunidades de intervención y un mejor seguimiento a los equipos en tiempo real; del mismo modo, ahorran costos y reducen las demoras en sus actividades. De acorde a lo dicho, el avance de herramientas 4.0 están generando mucho interés en el sector debido a la consistencia para resolver problemas complejos durante las actividades de mantenimiento; por consiguiente, la investigación ha mencionado que la utilización de las últimas tecnologías como los gemelos digitales dan solución a los problemas que se presentaron, mejorando así sus procesos [64]. Por ende, la transformación digital es beneficiosa para el mantenimiento, dado que la integración de nuevas tecnologías busca minimizar el tiempo de inactividad y aumentar la disponibilidad de las máquinas; en ese marco, han analizado una empresa industrial, en la cual digitalizaron sus tareas y, como resultado, ha obtenido un incremento en la confiabilidad de los equipos, lo que condujo a una mejora en el OEE [65].

En cuanto a las evidencias que se obtuvieron al usar tecnologías de forma individual, se tienen que asisten en actividades propias al mantenimiento como inspección y reparación, monitorear anomalías y reducir tiempos de inactividad. En efecto, el mantenimiento con IA tiene potencial para simplificar la inspección visual automatizada, eliminando errores y reduciendo costos asociados a las inspecciones manuales [66]. A pesar de las oportunidades que ofrece, las industrias más tradicionales encuentran dificultades para aprovechar la IA debido a cinco factores interrelacionados: experimentación, creación e integración de conocimientos, gestión de datos, ansiedad e inspiración; como resultado, estas organizaciones no pueden implementar eficazmente los sistemas habilitados por IA, quedándose en una fase experimental, o peor aún, ni siquiera alcanzando dicha fase [67]. En tanto que la combinación de tecnologías se ha orientado al monitoreo, diagnóstico, detección, clasificación de fallas y desarrollo de estrategias que faciliten el mantenimiento. A pesar de que estas herramientas se enfocan en optimizar las actividades de mantenimiento, aún faltan por explorarse a sistema completo, en vista de que la mayoría de los casos de aplicación se centran en componentes aislados [68].

V. CONCLUSIONES

Esta investigación identificó 7 herramientas 4.0 que permiten mejorar el seguimiento y control en la gestión del mantenimiento a través de sistemas de monitoreo en tiempo real que tienen la capacidad de recolectar datos y luego procesarlos para mejorar la toma de decisiones, permitiendo así optimizar los niveles de OEE, MTTR y MTBF.

Se resaltan cuatro desafíos que afectan la gestión de mantenimiento, estos están relacionados con las seis grandes pérdidas que generan fallas inesperadas, pérdidas de velocidad reducida y de calidad. Asimismo, un inadecuado cronograma afecta la disponibilidad y productividad de los equipos dejándolos vulnerables. Con respecto a la falta de apoyo organizacional, se evidenció que la resistencia al cambio imposibilita buenas prácticas de mantenimiento y las limitaciones financieras no permiten que los técnicos puedan usar nuevas herramientas para sus actividades.

Las herramientas de la industria 4.0 han permitido digitalizar los procesos de mantenimiento; es así como el IoT hace posible conectar las máquinas virtualmente para intercambiar información, la computación en la nube sirve para almacenar los datos que se recopilan en sensores u otras tecnologías (big data y analítica, IoT), la big data y analítica funcionan como grandes sistemas para procesar datos que permitan monitorear y predecir fallas, la simulación y AR asisten a los trabajadores para potenciar su formación en actividades de mantenimiento y los gemelos digitales diagnostican y evalúan el comportamiento de la máquina. Entre las desventajas se tiene que las empresas manufactureras no presentan la infraestructura tecnológica suficiente y no cuentan con los recursos necesarios para que adopten estas nuevas tecnologías.

Al comparar las tecnologías 4.0 con los métodos convencionales, se encontraron mejoras en la inspección que ahora es remota, manejo de registros digitales, predicción de fallas por medio de algoritmos de big data, gemelos digitales y sistemas de IoT, dando así una mejora en la toma de decisiones.

En función de potenciar las actividades se pueden obtener mejoras aisladas (solo una tecnología) o de forma conjunta (dos o más tecnologías). Si se busca una mejora a nivel de reducción de tiempos de inactividad y dar seguimiento a las máquinas, entonces se puede optar por un procesamiento de sensores; en cambio, si se quiere monitorear y predecir fallas, se puede hacer uso de algoritmos de big data e IA. En el caso de la AR es propio para la inspección, reparación, diagnóstico de fallas y capacitación al equipo de mantenimiento. A escala de combinación de herramientas, la IA, sensores, IoT y computación en la nube se han visto complementarias con algoritmos de aprendizaje automático y han representado una mejora en la detección, diagnóstico, clasificación de fallas y planteamiento de estrategias que faciliten el mantenimiento. De igual forma, el IoT junto a sensores, IA y computación en la nube contribuyen al monitoreo, reducción de fallas e indica cuando se debe intervenir en la máquina.

VI. REFERENCIAS

- [1] M. Jasiulewicz-Kaczmarek, S. Legutko, y P. Kluk, «Maintenance 4.0 technologies - new opportunities for sustainability driven maintenance», *Manag. Prod. Eng. Rev.*, vol. 11, n.o 2, pp. 74-87, 2020, doi: [10.24425/mper.2020.133730](https://doi.org/10.24425/mper.2020.133730).
- [2] D. Mendes, P. D. Gaspar, F. Charrua-Santos, y H. Navas, «Enhanced Real-Time Maintenance Management Model—A Step toward Industry 4.0 through Lean: Conveyor Belt Operation Case Study», *Electron. Switz.*, vol. 12, n.o 18, 2023, doi: [10.3390/electronics12183872](https://doi.org/10.3390/electronics12183872).
- [3] I. P. Okokpujie, L. K. Tartibu, y B. H. Omietimi, «Improving the Maintainability and Reliability in Nigerian Industry 4.0: Its Challenges and the Way Forward from the Manufacturing Sector», *Int. J. Sustain. Dev. Plan.*, vol. 18, n.o 8, pp. 2489-2502, 2023, doi: [10.18280/IJSDP.180820](https://doi.org/10.18280/IJSDP.180820).
- [4] N. Gwangwava, G. A. Baile, P. Dikgale, y K. Kefhilwe, «FRAMEWORK FOR TOTAL PRODUCTIVE MAINTENANCE FOR AN SME», *J. Eng. Technol. Ind. Appl.*, vol. 7, n.o 29, pp. 52-61, 2021, doi: [10.5935/jetia.v7i29.740](https://doi.org/10.5935/jetia.v7i29.740).
- [5] G. L. Tortorella, F. S. Fogliatto, P. A. Cauchick-Miguel, S. Kurnia, y D. Jurburg, «Integration of Industry 4.0 technologies into Total Productive Maintenance practices», *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 240, p. 108224, oct. 2021, doi: [10.1016/j.ijpe.2021.108224](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108224).
- [6] H. Yüksel, «An empirical evaluation of industry 4.0 applications of companies in Turkey: The case of a developing country», *Technol. Soc.*, vol. 63, p. 101364, nov. 2020, doi: [10.1016/j.techsoc.2020.101364](https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2020.101364).
- [7] L. Silvestri, A. Forcina, V. Intronza, A. Santolamazza, y V. Cesarotti, «Maintenance transformation through Industry 4.0 technologies: A systematic literature review», *Comput. Ind.*, vol. 123, p. 103335, dic. 2020, doi: [10.1016/j.compind.2020.103335](https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103335).
- [8] V. Alcácer y V. Cruz-Machado, «Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems», *Eng. Sci. Technol. Int. J.*, vol. 22, n.o 3, pp. 899-919, jun. 2019, doi: [10.1016/j.jestech.2019.01.006](https://doi.org/10.1016/j.jestech.2019.01.006).
- [9] L. S. Valamede y A. C. S. Akkari, «Lean 4.0: A new holistic approach for the integration of lean manufacturing tools and digital technologies», *Int. J. Math. Eng. Manag. Sci.*, vol. 5, n.o 5, pp. 854-868, 2020, doi: [10.33889/IJMEMS.2020.5.5.066](https://doi.org/10.33889/IJMEMS.2020.5.5.066).
- [10] A. L. A. C. Venâncio, E. de Freitas Rocha Loures, F. Deschamps, A. dos Santos Justus, A. F. Lumikoski, y G. L. Brezinski, «Technology prioritization framework to adapt maintenance legacy systems for Industry 4.0 requirement: An interoperability approach», *Production*, vol. 32, 2022, doi: [10.1590/0103-6513.20210035](https://doi.org/10.1590/0103-6513.20210035).
- [11] G. Tortorella et al., «The impact of Industry 4.0 on the relationship between TPM and maintenance performance», *J. Manuf. Technol. Manag.*, vol. 33, n.o 3, pp. 489-520, 2022, doi: [10.1108/JMTM-10-2021-0399](https://doi.org/10.1108/JMTM-10-2021-0399).
- [12] V. Pascal, A. Toufik, A. Manuel, D. Florent, y K. Frédéric, «Improvement indicators for Total Productive Maintenance policy», *Control Eng. Pract.*, vol. 82, pp. 86-96, ene. 2019, doi: [10.1016/j.conengprac.2018.09.019](https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2018.09.019).
- [13] Z. Mouhib, M. Gallab, S. Merzouk, A. Soulihi, y B. Elbhiri, «Towards a generic framework of OEE monitoring for driving effectiveness in digitalization era», *Procedia Comput. Sci.*, vol. 232, pp. 2508-2520, ene. 2024, doi: [10.1016/j.procs.2024.02.069](https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.02.069).
- [14] S. Annamalai y D. Suresh, «Implementation of total productive maintenance for overall equipment effectiveness improvement in machine shop», *Int. J. Recent Technol. Eng.*, vol. 8, n.o 3, pp. 7686-7691, 2019, doi: [10.35940/ijrte.C6212.098319](https://doi.org/10.35940/ijrte.C6212.098319).
- [15] M. Zlatić, «TPM – TOTAL PRODUCTIVE MAINTENANCE», *Proc. Eng. Sci.*, vol. 1, n.o 2, pp. 581-590, 2019, doi: [10.24874/PES01.02.057](https://doi.org/10.24874/PES01.02.057).
- [16] F. Sumasto et al., «Enhancing Overall Equipment Effectiveness in Indonesian Automotive SMEs: A TPM Approach», *J. Eur. Syst. Autom.*, vol. 57, n.o 2, pp. 383-396, 2024, doi: [10.18280/jesa.570208](https://doi.org/10.18280/jesa.570208).
- [17] N. N. Hien, G. Lasa, I. Iriarte, y G. Unamuno, «An overview of Industry 4.0 Applications for Advanced Maintenance Services», *Procedia Comput. Sci.*, vol. 200, pp. 803-810, ene. 2022, doi: [10.1016/j.procs.2022.01.277](https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.277).
- [18] A. Sahli, R. Evans, y A. Manohar, «Predictive Maintenance in Industry 4.0: Current Themes», *Procedia CIRP*, vol. 104, pp. 1948-1953, ene. 2021, doi: [10.1016/j.procir.2021.11.329](https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.329).
- [19] S. Singh, A. Agrawal, D. Sharma, V. Saini, A. Kumar, y S. Praveenkumar, «Implementation of Total Productive Maintenance Approach: Improving Overall Equipment Efficiency of a Metal Industry», *Inventions*, vol. 7, n.o 4, 2022, doi: [10.3390/inventions7040119](https://doi.org/10.3390/inventions7040119).

- [20] Z. T. Xiang y C. J. Feng, «Implementing total productive maintenance in a manufacturing small or medium-sized enterprise», *J. Ind. Eng. Manag.*, vol. 14, n.o 2, pp. 152-175, 2021, doi: [10.3926/jiem.3286](https://doi.org/10.3926/jiem.3286).
- [21] R.-I. Chang, C.-Y. Lee, y Y.-H. Hung, «Cloud-based analytics module for predictive maintenance of the textile manufacturing process», *Appl. Sci. Switz.*, vol. 11, n.o 21, 2021, doi: [10.3390/app11219945](https://doi.org/10.3390/app11219945).
- [22] M. T. Manenzhe, A. Telukdarie, y M. Munsamy, «Maintenance work management process model: incorporating system dynamics and 4IR technologies», *J. Qual. Maint. Eng.*, vol. 29, n.o 5, pp. 88-119, 2023, doi: [10.1108/JQME-10-2022-0063](https://doi.org/10.1108/JQME-10-2022-0063).
- [23] S. Werbińska-Wojciechowska y K. Winiarska, «Maintenance Performance in the Age of Industry 4.0: A Bibliometric Performance Analysis and a Systematic Literature Review», *Sensors*, vol. 23, n.o 3, 2023, doi: [10.3390/s23031409](https://doi.org/10.3390/s23031409).
- [24] A. Zarreh, H. Wan, Y. Lee, C. Saygin, y R. A. Janahi, «Cybersecurity Concerns for Total Productive Maintenance in Smart Manufacturing Systems», *Procedia Manuf.*, vol. 38, pp. 532-539, ene. 2019, doi: [10.1016/j.promfg.2020.01.067](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.067).
- [25] M. Rupp, M. Schneckenburger, M. Merkel, R. Börret, y D. K. Harrison, «Industry 4.0: A Technological-Oriented Definition Based on Bibliometric Analysis and Literature Review», *J. Open Innov. Technol. Mark. Complex.*, vol. 7, n.o 1, p. 68, mar. 2021, doi: [10.3390/joitmc7010068](https://doi.org/10.3390/joitmc7010068).
- [26] S. Lazarova-Molnar, N. Mohamed, y J. Al-Jaroodi, «Data analytics framework for Industry 4.0: Enabling collaboration for added benefits», *IET Collab. Intell. Manuf.*, vol. 1, n.o 4, pp. 117-125, 2019, doi: [10.1049/IET-CIM.2019.0012](https://doi.org/10.1049/IET-CIM.2019.0012).
- [27] D. Battaglia, F. Galati, M. Molinaro, y E. Pessot, «Full, hybrid and platform complementarity: Exploring the industry 4.0 technology-performance link», *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 263, p. 108949, sep. 2023, doi: [10.1016/j.ijpe.2023.108949](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108949).
- [28] A. Postiglione y M. Monteleone, «Predictive Maintenance with Linguistic Text Mining», *Mathematics*, vol. 12, n.o 7, 2024, doi: [10.3390/math12071089](https://doi.org/10.3390/math12071089).
- [29] S. Gawde, S. Patil, S. Kumar, P. Kamat, K. Kotecha, y S. Alfarhood, «Explainable Predictive Maintenance of Rotating Machines Using LIME, SHAP, PDP, ICE», *IEEE Access*, vol. 12, pp. 29345-29361, 2024, doi: [10.1109/ACCESS.2024.3367110](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3367110).
- [30] I. Vilches, F. Juárez Durán, A. Gómez-Espinosa, M. C. García Carrillo, y J. A. Escobedo Cabello, «Automation of a PCB Reflow Oven for Industry 4.0», *Automation*, vol. 4, n.o 1, pp. 78-93, 2023, doi: [10.3390/automation4010006](https://doi.org/10.3390/automation4010006).
- [31] T. Bachim, M. L. Martens, R. F. Gonçalves, F. S. Bizarrias, y M. C. Machado, «An IoT system for managing machine tool spindles in operation», *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 128, n.o 3-4, pp. 1689-1707, 2023, doi: [10.1007/s00170-023-11936-7](https://doi.org/10.1007/s00170-023-11936-7).
- [32] M. Canizo, A. Conde, S. Charramendieta, R. Minon, R. G. Cid-Fuentes, y E. Onieva, «Implementation of a large-scale platform for cyber-physical system real-time monitoring», *IEEE Access*, vol. 7, pp. 52455-52466, 2019, doi: [10.1109/ACCESS.2019.2911979](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2911979).
- [33] P. Goodall, R. Sharpe, y A. West, «A data-driven simulation to support remanufacturing operations», *Comput. Ind.*, vol. 105, pp. 48-60, 2019, doi: [10.1016/j.compind.2018.11.001](https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.11.001).
- [34] A. Cimino, F. Longo, L. Nicoletti, y P. Veltri, «Automated simulation modeling: ensuring resilience and flexibility in Industry 4.0 manufacturing systems», *Procedia Comput. Sci.*, vol. 232, pp. 1011-1024, ene. 2024, doi: [10.1016/j.procs.2024.01.100](https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.01.100).
- [35] S. G. García y M. G. García, «Industry 4.0 implications in production and maintenance management: An overview», *Procedia Manuf.*, vol. 41, pp. 415-422, ene. 2019, doi: [10.1016/j.promfg.2019.09.027](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.09.027).
- [36] H. Corrotea et al., «Maintenance Process Analysis in a Port Cargo Company through Discrete Event Simulation», *Procedia Comput. Sci.*, vol. 231, pp. 415-420, ene. 2024, doi: [10.1016/j.procs.2023.12.227](https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.12.227).
- [37] A. K. Etonam, G. Di Gravio, P. W. Kuloba, y J. G. Njiri, «Augmented reality (AR) application in manufacturing encompassing quality control and maintenance», *Int. J. Eng. Adv. Technol.*, vol. 9, n.o 1, pp. 197-204, 2019, doi: [10.35940/ijeat.A1120.109119](https://doi.org/10.35940/ijeat.A1120.109119).
- [38] M. A. Islam et al., «Additive manufacturing in polymer research: Advances, synthesis, and applications», *Polym. Test.*, vol. 132, p. 108364, mar. 2024, doi: [10.1016/j.polymertesting.2024.108364](https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2024.108364).
- [39] M. Rivas Pellicer, M. Y. Tungekar, y S. Carpitella, «Where to Place Monitoring Sensors for Improving Complex Manufacturing Systems? Discussing a Real Case in the Food Industry», *Sensors*, vol. 23, n.o 7, 2023, doi: [10.3390/s23073768](https://doi.org/10.3390/s23073768).
- [40] E. T. Bekar, P. Nyqvist, y A. Skoogh, «An intelligent approach for data pre-processing and analysis in predictive maintenance with an industrial case study», *Adv. Mech. Eng.*, vol. 12, n.o 5, 2020, doi: [10.1177/1687814020919207](https://doi.org/10.1177/1687814020919207).
- [41] U. Awasthi, Z. Wang, N. Mannan, K. R. Pattipati, y G. M. Bollas, «Physics-based modeling and information-theoretic sensor and settings selection for tool wear detection in precision machining», *J. Manuf. Process.*, vol. 81, pp. 127-140, 2022, doi: [10.1016/j.jmapro.2022.06.027](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.06.027).
- [42] J. Liu, D. Yu, Y. Hu, H. Yu, W. He, y L. Zhang, «CNC Machine Tool Fault Diagnosis Integrated Rescheduling Approach Supported by Digital Twin-Driven Interaction and Cooperation Framework», *IEEE Access*, vol. 9, pp. 118801-118814, 2021, doi: [10.1109/ACCESS.2021.3106797](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3106797).
- [43] P. Fantini, M. Pinzone, y M. Taisch, «Placing the operator at the centre of Industry 4.0 design: Modelling and assessing human activities within cyber-physical systems», *Comput. Ind. Eng.*, vol. 139, 2020, doi: [10.1016/j.cie.2018.01.025](https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.01.025).
- [44] S. K. Bhoi et al., «Intelligent data-driven condition monitoring of power electronics systems using smart edge-cloud framework», *Internet Things*, vol. 26, p. 101158, jul. 2024, doi: [10.1016/j.iot.2024.101158](https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101158).
- [45] M. Faheem, R. A. Butt, R. Ali, B. Raza, Md. A. Ngadi, y V. C. Gungor, «CBI4.0: A cross-layer approach for big data gathering for active monitoring and maintenance in the manufacturing industry 4.0», *J. Ind. Inf. Integr.*, vol. 24, p. 100236, dic. 2021, doi: [10.1016/j.jii.2021.100236](https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100236).
- [46] L. Grajzova, S. Janik, M. Cambal, y M. Mlkva, «ANALYSIS OF THE CURRENT APPLICATION OF AR IN THE CONTEXT OF TPM IN SLOVAKIA ORGANIZATIONS», presentado en *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*, 2021, pp. 546-554. doi: [10.2507/32nd.daaam.proceedings.079](https://doi.org/10.2507/32nd.daaam.proceedings.079).
- [47] K. Kammerer, R. Pryss, B. Hoppenstedt, K. Sommer, y M. Reichert, «Process-driven and flow-based processing of industrial sensor data», *Sens. Switz.*, vol. 20, n.o 18, pp. 1-41, 2020, doi: [10.3390/s20185245](https://doi.org/10.3390/s20185245).
- [48] P. Kumar, J. Bhamu, y K. S. Sangwan, «Analysis of Barriers to Industry 4.0 adoption in Manufacturing Organizations: an ISM Approach», *Procedia CIRP*, vol. 98, pp. 85-90, ene. 2021, doi: [10.1016/j.procir.2021.01.010](https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.010).
- [49] S. Sundaram y A. Zeid, «Smart prognostics and health management (SPHM) in smart manufacturing: An interoperable framework», *Sensors*, vol. 21, n.o 18, 2021, doi: [10.3390/s21185994](https://doi.org/10.3390/s21185994).
- [50] N. Surantha y I. D. Gozali, «Evaluation of the Improved Extreme Learning Machine for Machine Failure Multiclass Classification», *Electron. Switz.*, vol. 12, n.o 16, 2023, doi: [10.3390/electronics12163501](https://doi.org/10.3390/electronics12163501).
- [51] C. Jittawiriyankoon y V. Srisarkun, «Simulation for predictive maintenance using weighted training algorithms in machine learning», *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 12, n.o 3, pp. 2839-2846, 2022, doi: [10.11591/ijece.v12i3.pp2839-2846](https://doi.org/10.11591/ijece.v12i3.pp2839-2846).

- [52] T. Kalsoom, N. Ramzan, S. Ahmed, y M. Ur-Rehman, «Advances in sensor technologies in the era of smart factory and industry 4.0», *Sens. Switz.*, vol. 20, n.o 23, Art. n.o 23, 2020, doi: [10.3390/s20236783](https://doi.org/10.3390/s20236783).
- [53] B. Farahani y A. K. Monsefi, «Smart and collaborative industrial IoT: A federated learning and data space approach», *Digit. Commun. Netw.*, vol. 9, n.o 2, pp. 436-447, 2023, doi: [10.1016/j.dcan.2023.01.022](https://doi.org/10.1016/j.dcan.2023.01.022).
- [54] G. D. Bona, V. Cesarotti, G. Arcese, y T. Gallo, «Implementation of Industry 4.0 technology: New opportunities and challenges for maintenance strategy», *Procedia Comput. Sci.*, vol. 180, pp. 424-429, ene. 2021, doi: [10.1016/j.procs.2021.01.258](https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.258).
- [55] C. Lundgren, C. Berlin, A. Skoogh, y A. Källström, «How industrial maintenance managers perceive socio-technical changes in leadership in the Industry 4.0 context», *Int. J. Prod. Res.*, vol. 61, n.o 15, pp. 5282-5301, 2023, doi: [10.1080/00207543.2022.2101031](https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2101031).
- [56] D. Medyński et al., «Digital Standardization of Lean Manufacturing Tools According to Industry 4.0 Concept», *Appl. Sci. Switz.*, vol. 13, n.o 10, 2023, doi: [10.3390/app13106259](https://doi.org/10.3390/app13106259).
- [57] V. Rousopoulou et al., «Cognitive analytics platform with AI solutions for anomaly detection», *Comput. Ind.*, vol. 134, 2022, doi: [10.1016/j.compind.2021.103555](https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103555).
- [58] G. Wszolek, P. Czop, J. Słoniewski, y H. Dogrusoz, «Vibration monitoring of CNC machinery using mems sensors», *J. Vibroengineering*, vol. 22, n.o 3, pp. 735-750, 2020, doi: [10.21595/jve.2019.20788](https://doi.org/10.21595/jve.2019.20788).
- [59] C. N. Okwuosa y J.-W. Hur, «A Filter-Based Feature-Engineering-Assisted SVC Fault Classification for SCIM at Minor-Load Conditions», *Energies*, vol. 15, n.o 20, 2022, doi: [10.3390/en15207597](https://doi.org/10.3390/en15207597).
- [60] J. M. Barrera, A. Reina, A. Mate, y J. C. Trujillo, «Fault detection and diagnosis for industrial processes based on clustering and autoencoders: a case of gas turbines», *Int. J. Mach. Learn. Cybern.*, vol. 13, n.o 10, pp. 3113-3129, 2022, doi: [10.1007/s13042-022-01583-x](https://doi.org/10.1007/s13042-022-01583-x).
- [61] R. Sala, F. Pirola, G. Pezzotta, y S. Cavalieri, «Data-Driven Decision Making in Maintenance Service Delivery Process: A Case Study», *Appl. Sci. Switz.*, vol. 12, n.o 15, 2022, doi: [10.3390/app12157395](https://doi.org/10.3390/app12157395).
- [62] M. A. Munir, M. A. Zaheer, M. Haider, M. Z. Rafique, M. A. Rasool, y M. S. Amjad, «Problems and Barriers Affecting Total Productive Maintenance Implementation», *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 9, n.o 5, pp. 4818-4823, 2019, doi: [10.48084/etasr.3082](https://doi.org/10.48084/etasr.3082).
- [63] B. Bajic, A. Rikalovic, N. Suzic, y V. Piuri, «Industry 4.0 Implementation Challenges and Opportunities: A Managerial Perspective», *IEEE Syst. J.*, vol. 15, n.o 1, pp. 546-559, 2021, doi: [10.1109/JSYST.2020.3023041](https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.3023041).
- [64] S. M. R. Naqvi, M. Ghufuran, S. Meraghni, C. Varnier, J.-M. Nicod, y N. Zerhouni, «Human knowledge centered maintenance decision support in digital twin environment», *J. Manuf. Syst.*, vol. 65, pp. 528-537, oct. 2022, doi: [10.1016/j.jmsy.2022.10.003](https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.10.003).
- [65] Y. El kihel, A. El kihel, y E. M. Bouyahrouzi, «Contribution of Maintenance 4.0 in Sustainable Development with an Industrial Case Study», *Sustainability*, vol. 14, n.o 17, Art. n.o 17, ene. 2022, doi: [10.3390/su141711090](https://doi.org/10.3390/su141711090).
- [66] N. Hütten, M. Alves Gomes, F. Hölken, K. Andricevic, R. Meyes, y T. Meisen, «Deep Learning for Automated Visual Inspection in Manufacturing and Maintenance: A Survey of Open- Access Papers», *Appl. Syst. Innov.*, vol. 7, n.o 1, Art. n.o 1, feb. 2024, doi: [10.3390/asi7010011](https://doi.org/10.3390/asi7010011).
- [67] A. Stohr, P. Ollig, R. Keller, y A. Rieger, «Generative mechanisms of AI implementation: A critical realist perspective on predictive maintenance», *Inf. Organ.*, vol. 34, n.o 2, p. 100503, jun. 2024, doi: [10.1016/j.infoandorg.2024.100503](https://doi.org/10.1016/j.infoandorg.2024.100503).
- [68] L. Pinciroli, P. Baraldi, y E. Zio, «Maintenance optimization in industry 4.0», *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 234, p. 109204, jun. 2023, doi: [10.1016/j.res.2023.109204](https://doi.org/10.1016/j.res.2023.109204).