

Sensores inteligentes empleados en el mantenimiento predictivo de equipos y máquinas: una revisión sistemática de la literatura

Smart sensors used in predictive maintenance of equipment and machines: a systematic review of the literature.

Vicente Amirpasha Tirado Kulieva¹, Eliam Gabriel Gonzales Arévalo¹, Brayan Estiven Flores Castillo¹, Luis Alberto Juárez Calderón¹, Ethell Tatiana Rivera Gutiérrez¹, Roberto Simón Seminario Sanz¹, Wilson Castro Silupú¹
Universidad Nacional de Frontera, Sullana, Piura, Perú.

RESUMEN

La implementación de sensores inteligentes en la industria es crucial para monitorear a la máquina, detectar posibles fallas y poder prevenirlas. En este sentido, el objetivo de este estudio es realizar una revisión sistemática enfocada en el uso de sensores inteligentes en el mantenimiento predictivo de máquinas y equipos. Mediante la metodología PRISMA, se ejecutó una búsqueda de investigaciones desde el año 2000 al 2021 en la base de datos de Scopus y Science Direct. Después de analizar los estudios seleccionados, los principales resultados mostraron una tendencia positiva sobre la publicación de estudios sobre el tópico, las cuales se realizan de forma gradual en Asia y Europa. Por lo tanto, es fundamental informar sobre la importancia del empleo de sensores inteligentes, principalmente en países con déficit tecnológico para incrementar la competitividad de las industrias.

Palabras clave: Industria 4.0; era digital; mantenimiento predictivo; sensores inteligentes; automatización.

ABSTRACT

The implementation of smart sensors in the industry is crucial to monitor the machine, detect possible failures and prevent them. In this sense, the objective of this study is to perform a systematic review focused on the use of smart sensors in the predictive maintenance of machines and equipment. Using the PRISMA methodology, a search for research from 2000 to 2021 was carried out in the Scopus and Science Direct databases. After analyzing the selected studies, the main results showed a positive trend on the publication of studies on the topic, which are gradually taking place in Asia and Europe. Therefore, it is essential to inform about the importance of the use of smart sensors, mainly in countries with technological deficit to increase the competitiveness of industries.

Keywords: Industry 4.0; digital era; predictive maintenance; smart sensors; automation.

¹ Ingeniero de Industrias Alimentarias, Universidad Nacional de Frontera – UNF, Sullana, Piura, Perú.

Línea de Investigación: Desarrollo tecnológico, innovación, eficiencia y diversificación productiva, economías transformadoras, macro tendencias globales y mejora continua
<https://orcid.org/0000-0001-8534-9153> EMAIL: 2017103066@unf.edu.pe

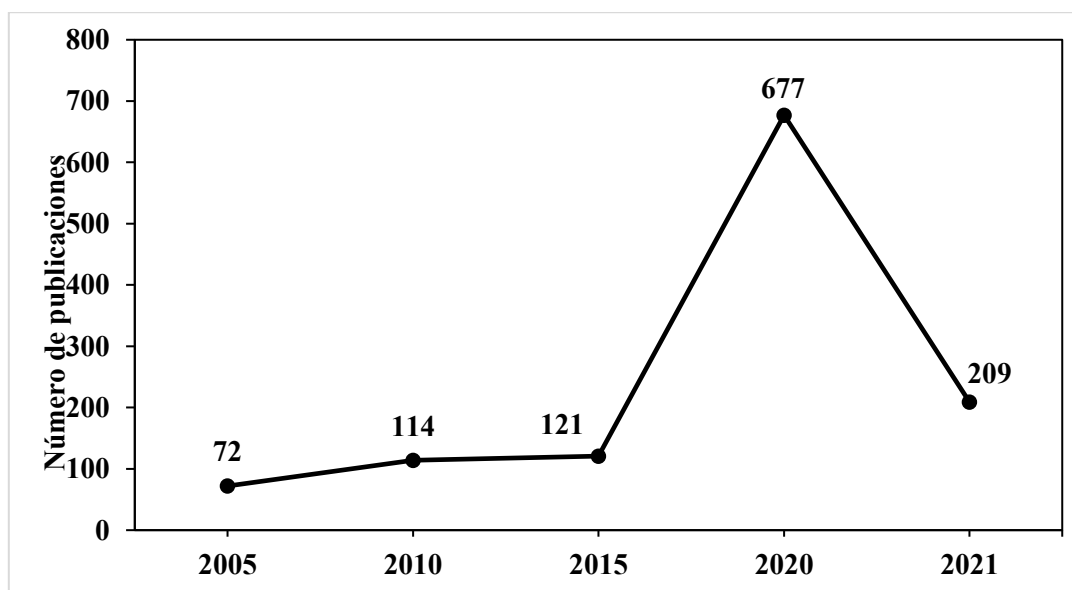
1. INTRODUCCIÓN

El mantenimiento en la industria es indispensable para, principalmente, incrementar la vida útil de los equipos/máquinas (E/M). El más destacado es el mantenimiento predictivo, cuya evolución fue favorable a lo largo de los años por su capacidad para detectar y predecir las fallas de los E/M en distintos campos industriales (Zonta et al., 2020). En este sentido, con el mantenimiento predictivo se logra una disminución significativa de tiempo y costos (Trotin et al., 2017), proporcionando mayor competitividad.

El mantenimiento predictivo se considera como el tipo de mantenimiento más actualizado y tecnológico y para su correcta implementación se requiere de medios técnicos/tecnológicos avanzados (de Jonge & Scarf, 2020). Estos ayudan con actividades que son naturalmente complejas para las capacidades del ser humano. Este requerimiento tecnológico se encuentra factible debido a la actual Cuarta Revolución Industrial o también denominada Industria 4.0. De acuerdo con lo previo, se puede llevar a cabo el uso de sensores inteligentes, dispositivos que permiten medir en tiempo real distintos parámetros (Lillstrang et al., 2021). Esto es crucial para saber la condición de los E/M, poder implementar las medidas pertinentes en pro de mejora e sus características y de los aspectos de los procesos industriales en general (Hommet et al., 2021).

Figura 1.

Número de documentos publicados según la búsqueda avanzada (sensor and “predictive maintenance”) realizada en Scopus.



Según Bravo et al. (2021); Herrera et al. (2020), prediciendo las posibles anomalías, se puede evitar las fallas y las reparaciones, mejorar la eficiencia de los E/M, incrementar el rendimiento y confiabilidad de la producción, entre otros beneficios. Asimismo, gracias a los avances tecnológicos e informáticos, la implementación de los sensores inteligentes le proporciona autonomía y decisión a los E/M, según el estado del proceso y a los intereses de la empresa (Kalsoom et al., 2020).

Por otro lado, existe una gran brecha tecnológica entre los países, lo cual fue corroborado en el estudio de Bal & Erkan (2019), quienes después de evaluar los cambios que han

experimentado los países después de la aparición de esta industria, concluyeron que existe mucha diferencia respecto a la competitividad.

Esto influye en un bajo empleo de los sensores en el mantenimiento predictivo de equipos y máquinas (MPEM), como se observa en la Figura 1, donde se evidencia que en lo que va del siglo 21, hay un aumento significativo de publicaciones.

Asimismo, se destaca que en el 2018 se superó la valla de las 100 publicaciones y en lo que va del año hay 209 documentos publicados, lo cual reafirma la tendencia positiva del aumento de investigaciones sobre empleo de sensores en el MPEM.

Considerando lo previo, existe la necesidad de informar acerca del poco uso de los sensores, a pesar de su importancia. En este sentido, el objetivo de este estudio es realizar una revisión sistemática de la literatura con enfoque en el empleo de sensores inteligentes en el MPEM.

2. MÉTODOS Y MATERIALES

Para la realización de esta investigación, se adaptó la metodología planteada por Carvalho et al. (2020), siguiendo la declaración de Elementos de Información Preferidos para Revisiones Sistemáticas y Meta-Análisis (PRISMA). Asimismo; para el desarrollo de la revisión también se siguió algunos lineamientos sugeridos por Ponce-Corona et al. (2020), los cuales se detallan a continuación:

2.1. Preguntas de interés

Con el objetivo de solucionar el problema de investigación, se estableció las siguientes preguntas:

- ¿Qué tanto ha aumentado el empleo de sensores inteligentes en el MPEM?
- ¿Cuáles son los países con mayor aplicación de sensores inteligentes en el MPEM?
- ¿En qué tipo de documento es principalmente publicado los estudios sobre el empleo de sensores inteligentes en el MPEM?
- ¿Cuáles son los sensores inteligentes más utilizados en el mantenimiento predictivo y en qué E/M?

2.2. Fuentes de literatura y estrategia de búsqueda

Las bases seleccionadas fueron Scopus y Science Direct, las cuales fueron consultadas mediante una búsqueda avanzada de literatura, empleando la siguiente cadena: (smart OR intelligent) AND sensor AND (industry OR company OR equipment OR machine) AND "predictive maintenance".

2.3. Criterios de elegibilidad

Para resolver las preguntas, se establecieron diversos criterios. Preliminarmente, como inclusión, se dejaron únicamente artículos originales y actas de conferencia en inglés, y publicados en lo que va del siglo XXI (2001 al presente) debido a que esta era está principalmente caracterizada por la digitalización y automatización.

En contraste, se excluyó otro tipo de documentos como artículos de revisión y capítulos de libros. Se extrajeron los artículos de las dos bases de datos y para una mejor gestión, además de eliminar los estudios duplicados, se empleó Mendeley como herramienta.

En la etapa de cribado se examinó el título, resumen y palabras clave de cada estudio, con el fin de excluir los que no se relacionaban con el tema de esta investigación.

Finalmente, se realizó un análisis del estudio completo para garantizar que eran los adecuados. Adicionalmente, se aplicó la técnica de snowballing que consta en examinar las referencias de los artículos seleccionados e incluir aquellos de interés.

2.4. Extracción de datos de los estudios seleccionados

Para responder las preguntas establecidas, se extrajeron los siguientes datos de los estudios: Año y país de publicación, tipo de documento y editorial publicadora, sensor (es) empleado (s) y equipo/máquina (s) evaluados.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

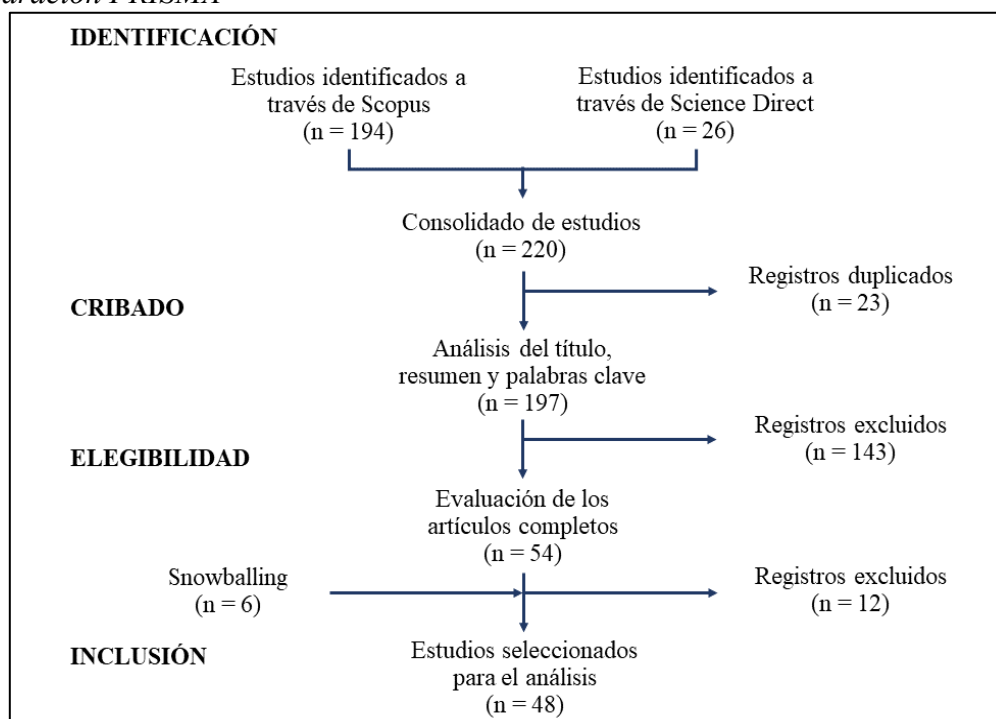
3.1. Análisis de los resultados de la declaración PRISMA

Producto de la estrategia de búsqueda, se encontraron 237 documentos en Scopus y 29 en Science Direct. Después de aplicar los criterios de elegibilidad preliminares, quedaron 194 y 26 documentos, respectivamente en cada fuente de datos. El consolidado de 220 artículos se redujo a 197 después de eliminar los 23 estudios duplicados. Luego, al realizar el cribado, se excluyeron 143 estudios, quedando únicamente 54 disponibles para la siguiente etapa.

En el análisis completo de los documentos, se excluyeron 12 debido a que no se relacionaban totalmente con el objetivo de este estudio; en contraste, se añadió 6 artículos producto del snowballing, dejando finalmente un total de 48 estudios listos para el análisis. Una síntesis más detallada de lo realizado se puede visualizar en la Figura 2.

Figura 2.

Flujograma de las etapas realizadas en la búsqueda sistemática, siguiendo la Declaración PRISMA



3.2. Hallazgos obtenidos

A partir de los datos extraídos de los estudios seleccionados, se ha resuelto cada pregunta de investigación planteada, las cuales se muestran a continuación.

¿Qué tanto ha aumentado el empleo de sensores inteligentes en el MPEM?

Como se muestra en la Tabla 1, el uso de sensores inteligentes en el mantenimiento predictivo de E/M ha tenido un relativo incremento en los últimos años. Esto puede estar relacionado a lo que mencionan Steurtewagen & Poel (2021), quienes argumentan que esto es debido a que las plantas industriales modernas ponen mayor énfasis en el uso de técnicas/tecnologías que ayuden a recopilar datos de forma automática en aplicaciones de mantenimiento.

Lo previo es corroborado por Drakaki et al. (2021), quienes indican que la recopilación automática de datos solo es posible a través de la inclusión de sensores inteligentes que en tiempo real informan acerca del estado de los E/M, ayudando a predecir y prevenir potenciales fallas y averías. Considerando esto, se ha evidenciado que en el periodo desde el 2010 al 2020 hubo un crecimiento en la tendencia de ventas de sensores, partiendo de 4 000 millones de dólares aproximadamente en el 2010 y estimándose ventas de hasta 30 000 millones en el 2020, por ende, también hay un aumento en desarrollo y uso de sensores (Trigona et al., 2020).

Los datos no solo reafirman el auge en el uso de sensores inteligentes, sino también su constante desarrollo para satisfacer las necesidades del mercado. En este contexto, a raíz de un nanogenerador triboeléctrico de interfaz líquido-sólido, Xu et al. (2019) desarrollaron con éxito un sensor inteligente de alta sensibilidad para monitorear las olas en un tanque de olas. Según los hallazgos obtenidos, los autores destacan la idoneidad de este sensor para futuros usos en equipos marinos.

Tabla 1.

Número de publicaciones por año.

Año	Publicaciones	Proporción (%)
2003	1	2,08
2004	1	2,08
2007	1	2,08
2009	2	4,17
2013	3	6,25
2015	2	4,17
2016	5	10,42
2017	3	6,25
2018	5	10,42
2019	5	10,42
2020	13	27,08
2021	7	14,58
Total	48	100

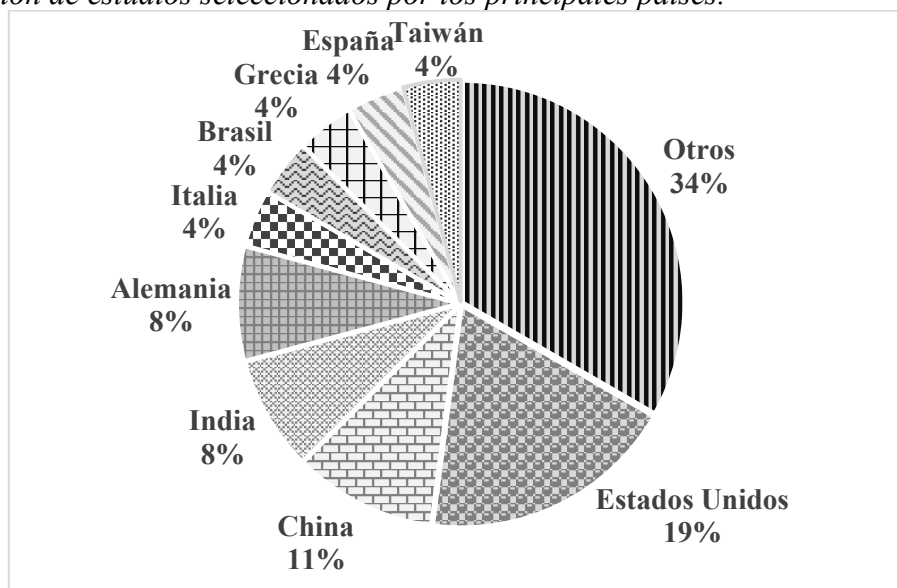
¿Cuáles son los países con mayor aplicación de sensores inteligentes en el MPEM?

En la Figura 3, se destaca que la mayoría de las investigaciones se llevaron a cabo en países como Estados Unidos, China, India y Alemania, representando casi el 50% del total de estudios. Esta proporción es muy alta considerando que la ejecución de los 48 estudios seleccionados se ha distribuido en 25 países. Asimismo, como se observa, casi la totalidad de países son los que demuestran su constante preocupación por la mejora y la automatización en sus sistemas y la transición hacia la modernidad, ya que, estas tecnologías industriales también le proporcionan enormes beneficios a la sociedad (Nagano, 2018).

En contraste, de los 48 estudios, solo dos países son de Sudamérica, representada por Brasil con 2 estudios y seguido de Chile con solo 1. Estos países, en general, se encuentran en una fase naciente con respecto al estudio y uso de estas tecnologías (Sibrian & Amaya, 2019), justificando los resultados obtenidos. Esto se corrobora en la investigación de Cimoli et al. (2019), quienes, a partir de datos entre el periodo 1970-2013, definieron una amplia brecha tecnológica entre países de América Latina (Argentina y Brasil) y Asia (Corea). Los autores destacaron que los países asiáticos se actualizan constantemente para afrontar los nuevos desafíos tecnológicos y, por ello, suelen estar a la vanguardia.

Figura 3.

Proporción de estudios seleccionados por los principales países.



¿Qué tipo de documento sobre el empleo de sensores inteligentes en el MPEM es principalmente publicado y en qué editoriales?

Según la tabla 2, el mayor número de documentos en el uso de sensores inteligentes ha sido publicado en IEEE (35,4 %), superando a la gran editorial Elsevier. Esto se debe a que, IEEE es una importante sociedad técnico-profesional dedicada a incentivar y publicar avances de carácter científicos en las disciplinas de las ingenierías, Informática, Electrónica, Energética y afines (Universidad de Ingeniería y Tecnología [UTEC], 2018), lo cual se encuentra ligado al tema de esta revisión con respecto al uso de sensores inteligentes en máquinas y equipos.

Por otro lado, aunque haya poca diferencia, la mayoría de los documentos se encuentran como actas de conferencia (54,1 %), pudiendo relacionarse con los congresos de ciencia y tecnología cibernética que realiza principalmente IEEE, en donde se informan acerca de los hallazgos obtenidos en estudios de este ámbito (Zhao et al., 2017).

Tabla 2.

Tipo de documento publicado y principales bases de datos

Editorial	Tipo de artículo publicado		Total de documentos
	Acta de conferencia	Artículo de investigación	
IEEE	15	2	17
Elsevier	0	13	13
Springer	0	3	3
Sage Publications	0	2	2
Otros	11	2	13
Total	26	22	48

¿Cuáles son los sensores inteligentes más utilizados en el mantenimiento predictivo y en qué E/M?

Como se ve en la Figura 4, existe una amplia variedad de sensores, siendo los sensores de temperatura, sensores de vibración y los acelerómetros los más empleados.

Según la Figura 5, existe una gran diversidad de E/M de distintos ámbitos industriales, abarcando sistemas de transporte terrestre, marítimo y aéreo, herramientas de manufactura, equipos para el procesamiento alimentarios, entre otros, principalmente en motores, los cuales se emplean en todos los sectores. Esto demuestra la extensa versatilidad que tienen los sensores inteligentes, lo cual es apoyado por Javaid et al. (2021), quienes indican que es debido a sus variadas capacidades y/o características.

Figura 4.

Tipo de sensores comúnmente empleados.

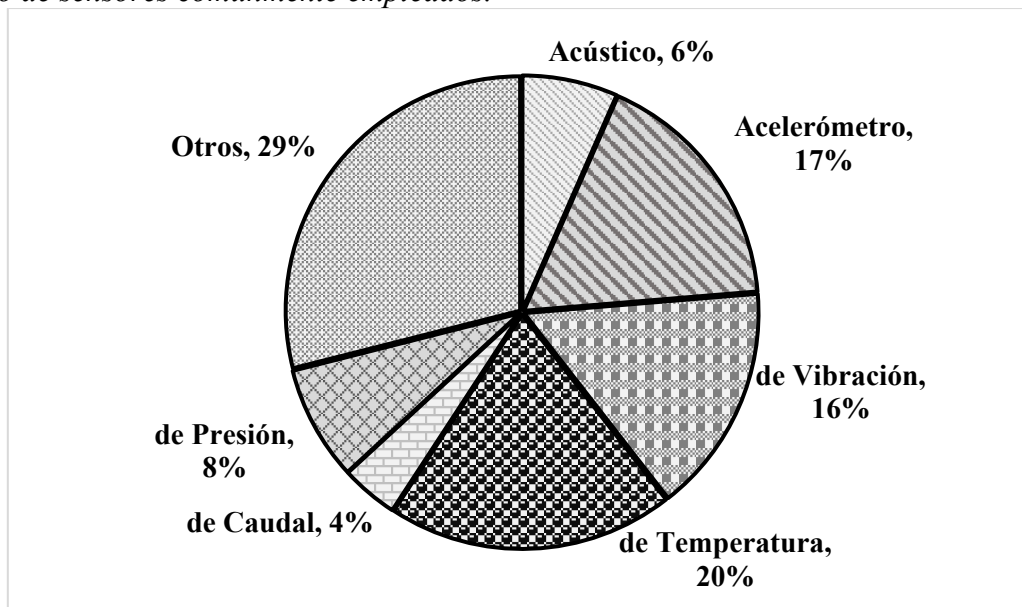
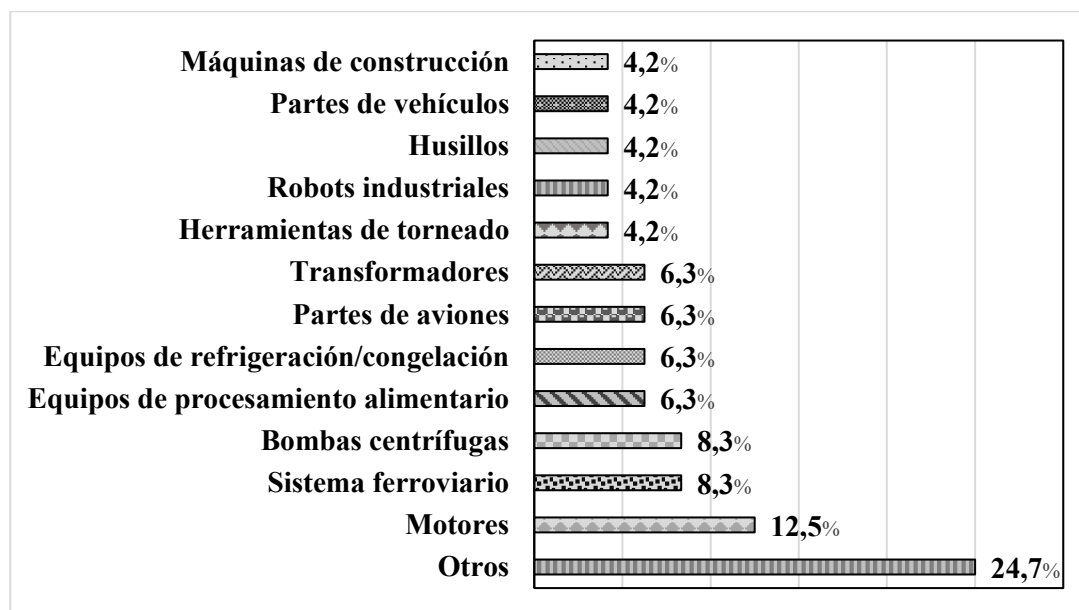


Figura 5.
Principales Equipos y Maquinarias evaluadas.



4. CONCLUSIONES

Aunque hay pocos estudios relacionados al ámbito del empleo de sensores inteligentes en el MPEM, existe una tendencia positiva a lo largo de los años, lo cual fue determinado con los resultados obtenidos en esta revisión sistemática de estudios publicados en lo que va del siglo XXI. También se observó que la mayoría de los estudios se han realizado en Estados Unidos (19%) y en otros países principalmente asiáticos y europeos, representados por China (11) y Alemania (8%), respectivamente, los cuales tienen mayor avance tecnológico a comparación de países sudamericanos como Brasil (4%).

Este tipo de estudios suelen ser publicados como actas de conferencia (35,4%) cuyo publicador principal es IEEE (54,1 %), debido a ser una asociación enfocada en ámbitos como la electrónica y las tecnologías de la información, las cuales tienen relación con el tema de estudio. Asimismo, se determinó que los sensores inteligentes más empleados son el de temperatura (20%), el de vibración (16%) y el acelerómetro (17%), los cuales son usados mayormente para monitorear el estado de los motores, piezas clave en distintos campos industriales. De acuerdo con los resultados mostrados, se concluye que el empleo de los sensores inteligentes en el MPEM es de suma importancia, más aún, considerando su factibilidad por la actual Industria 4.0. Por otro lado, debe tenerse en cuenta que la adopción de los sensores inteligentes es limitante para muchos países por su déficit técnico y tecnológico. Este estudio es de utilidad para informar sobre ello y así poder tomar las medidas pertinentes para solucionar dicha problemática.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bal, H. Ç., & Erkan, Ç. (2019). Industry 4.0 and Competitiveness. *Procedia Computer Science*, 158, 625-631.
- Bravo M, D. A., Alvarez Q, L. I., & Lozano M, C. A. (2021). Dataset of distribution transformers for predictive maintenance. *Data in Brief*, 38, 107454.
- Carvalho, A. P. A., & Junior, C. A. C. (2020). Green strategies for active food packagings: A systematic review on active properties of graphene-based nanomaterials and biodegradable polymers. *Trends in Food Science & Technology*, 103, 130-43.
- Cimoli, M., Pereima, J. B., & Porcile, G. (2019). A technology gap interpretation of growth paths in Asia and Latin America. *Research Policy*, 48(1), 125-136.
- De Jonge, B., & Scarf, P. A. (2020). A review on maintenance optimization. *European Journal of Operational Research*, 285(3), 805–824.
- Drakaki, M., Karnavas, Y. L., Tzionas, P., & Chasiotis, I. D. (2021). Recent Developments Towards Industry 4.0 Oriented Predictive Maintenance in Induction Motors. *Procedia computer Science*, 180, 943-949.
- Herrera-Sánchez, G., Morán-Bravo, L., Gallardo-Navarro, J.L. & Silva-Juárez, A. (2020). Gestión del mantenimiento y la industria 4.0. *Revista de Ingeniería Innovativa*, 4(15), 18-28.
- Hommel, M., Knab, H., & Yousef, S. G. (2021). Reliability of automotive and consumer MEMS sensors - An overview. *Microelectronics Reliability*, 114252.
- Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., Rab, S., & Suman, R. (2021). Significance of sensors for Industry 4.0: Roles, capabilities, and applications. *Sensors International*, 2, 100110.
- Kalsoom, T., Ramzan, N., Ahmed, S., & Ur-Rehman, M. (2020). Advances in Sensor Technologies in the Era of Smart Factory and Industry 4.0. *Sensors*, 20(23), 6783.
- Lillstrang, M., Harju, M., del Campo, G., Calderon, G., Röning, J., & Tamminen, S. (2021). Implications of properties and quality of indoor sensor data for building machine learning applications: Two case studies in smart campuses. *Building and Environment*. (Prevision screen – November/2021).
- Nagano, A. (2018). Economic Growth and Automation Risks in Developing Countries Due to the Transition Toward Digital Modernity. ICEGOV'18: *In Proceedings of the 11th International Conference on Theory and Practice of Electronic Governance*, Ireland (pp. 42-49). Association for Computing Machinery.
- Ponce-Corona, E., Sánchez, M. G., Fajardo-Delgado, D., Acevedo-Juárez, B., De-la-Torre, M., Avila-George, H., & Castro, W. (2020). Una revisión sistemática de la literatura enfocada al uso de vehículos aéreos no tripulados durante el proceso de detección de vegetación. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação*, 36, 8-101.

- Sibrian, K. A., & Amaya, K. V. (2019). Desafíos de la Industria 4.0 y Oportunidades de Desarrollo sostenible para América Latina y el Caribe. XII Congreso de Economistas de América Latina y el Caribe. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.26772.86404>
- Stewart, B., & Poel, D. V. D. (2021). Adding interpretability to predictive maintenance by machine learning on sensor data. *Computers & Chemical Engineering*, 152, 107381.
- Trigona, C., Graziani, S., & Baglio, S. (2020). Changes in sensors technologies during the last ten years: Evolution or revolution? *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 23(6), 18-22.
- Trota, N., Sánchez de Prado, J., Ladret, P., & Vilchez Motino, P. (2017). Mantenimiento y rehabilitación de sistemas de atirantamiento: tecnologías, patologías tipo, inspección, monitorización y reparaciones. Hormigón y Acero.
- UTEC – Universidad de Ingeniería y Tecnología. (2018). ¿Qué significa ser parte de la IEEE en UTEC? <https://www.utec.edu.pe/blog-de-carreras/ingenieria-de-la-energia/que-significa-ser-parte-de-la-ieee-en-utec>
- Xu, M., Wang, S., Zhang, S. L., Ding, W., Kien, P. T., Wang, C., Li, Z., Pan, X., & Wang, Z. L. (2019). A highly sensitive wave sensor based on liquid-solid interfacing triboelectric nanogenerator for smart marine equipment. *Nano Energy*, 57, 574-580.
- Zhao, W., Ma, J., Wang, K. I-K. & Wang, J. (2017). Report of the 2017 IEEE Cyber Science and Technology Congress. MPDI. <https://www.mdpi.com/2076-3417/7/12/1299/pdf>
- Zonta, T., da Costa, C. A., da Rosa Righi, R., de Lima, M. J., da Trindade, E. S., & Li, G. P. (2020). Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*, 150, 106889.