

Tecnologías de la cuarta revolución industrial utilizadas en la manufactura para mejorar los indicadores de productividad: Una revisión¹

Technologies of the fourth industrial revolution used in manufacturing to improve productivity indicators: A review

L. Y. Becerra, J. E. Herrera, L. H. Morris, A. Toro

Recibido: diciembre 30 de 2023 – Aceptado: junio 30 de 2024.

Resumen— Las tecnologías de la cuarta revolución industrial han impactado y beneficiado a todos los procesos industriales en diferentes sectores, esto permite la optimización de los recursos en las organizaciones y a su vez, una mejora en su productividad. La adopción e implementación de tecnologías 4.0 ha crecido rápidamente en algunos países; en otros, sigue siendo

un desafío. Este artículo presenta una revisión de la literatura sobre el uso de tecnologías 4.0 en las industrias, orientada a identificar las tecnologías más utilizadas, los sectores impactados y los indicadores de productividad beneficiados. Este estudio se realizó utilizando la plataforma Core of Science y la metodología PRISMA con la información proporcionada por las bases de datos Scopus y Web of Science. Los hallazgos indican que las tecnologías más utilizadas son el Internet de las cosas, la computación en la nube y big data. Por otro lado, la manufactura es la actividad del sector industrial con mayor influencia en estas tecnologías, seguida de la industria automotriz. Finalmente, hay evidencia de una cobertura deficiente del uso de tecnologías 4.0 en los países latinoamericanos y, más significativamente, en los países europeos.

Palabras Clave— Industria 4.0, IoT, Computación en la Nube, Manufactura, Gestión, Productividad, Indicadores.

¹ Este artículo es producto del Proyecto de investigación “Implementación de un sistema para la articulación de las capacidades técnicas y productivas del sector metalmeccánico del Departamento Risaralda, facilitando la identificación de acciones específicas para el desarrollo de procesos de innovación y el aumento de la productividad, propendiendo a la reactivación económica del sector” apoyado por Minciencias Colombia y la Gobernación de Risaralda y ejecutado por la Universidad Católica de Pereira y Cindetemm a partir de la convocatoria Convocatoria 893 de 2020: Convocatoria regional de investigación aplicada y desarrollo tecnológico para fomentar la integración de los actores del ecosistema CTeI de Risaralda.

L. Y. Becerra, Universidad Católica de Pereira, Pereira-Risaralda, Colombia, email: line.becerra@ucp.edu.co.

J. E. Herrera, Universidad Católica de Pereira, Pereira-Risaralda, Colombia, email: jorge1.herrera@ucp.edu.co.

L. H. Morris, Universidad Tecnológica de Pereira, Universidad Católica de Pereira, Pereira-Risaralda, Colombia, email: l.morris@utp.edu.co.

A. Toro, Universidad Católica de Pereira, Pereira-Risaralda, Colombia, email: alonso.toro@ucp.edu.co.

Como citar este artículo: Becerra, L. Y., Herrera, J. E., Morris, L.H, y Toro, A. Tecnologías de la cuarta revolución industrial utilizadas en la manufactura para mejorar los indicadores de productividad: Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, vol. 18, no. 35, pp. 46-58, enero-junio 2024. DOI: <https://doi.org/10.31908/19098367.3149>.

Abstract— The technologies of the fourth industrial revolution have impacted and benefited all industrial processes in different sectors; this allows the optimization of resources in organizations and turn, an improvement in their productivity. The adoption and implementation of 4.0 technologies have grown rapidly in some countries; in others, it remains a challenge. This article presents a literature review on the use of 4.0 technologies in industries, aimed at identifying the most used technologies, the impacted sectors, and the benefited productivity indicators. This study was carried out using the Core of Science platform and the PRISMA methodology with the information provided from the Scopus and Web of Science databases. The findings indicate that the most used technologies are the Internet of Things, cloud computing, and big data. On the other hand, manufacturing is the activity of the industrial sector with the most influence on these technologies, followed by the automotive industry. Finally, there is evidence of deficient coverage of the use of 4.0 technologies in Latin American countries and, more significantly, European countries.

Keywords— Industry 4.0, IoT, Cloud Computing Manufacturing, Management, Productivity, Indicators.



I. INTRODUCTION

Las tecnologías de la industria 4.0 ha impactado los sistemas de producción integrando inteligencia aportando valor a una era tecnológica que transforma principalmente cadenas productivas, de valor y los modelos de negocios. En este contexto, la manufactura inteligente aprovecha todas las bondades de las tecnologías avanzadas de información y fabricación para alcanzar procesos de fabricación flexibles, inteligentes y reconfigurables [1]. Pero, a pesar de todas las bondades de las tecnologías emergentes, para algunos países la adopción de tecnología y la transformación digital sigue siendo un reto[2], [3].

Por otro lado, los indicadores de gestión son medidas cuantitativas que permiten evaluar el desempeño de la empresa en distintos aspectos, como la eficiencia, los costos, la productividad, los ingresos, el rendimiento, el tiempo y la seguridad, que pueden finalmente impactar en la satisfacción del cliente. Las tecnologías 4.0 permiten la automatización de procesos y la integración de sistemas, lo que reduce los errores y los tiempos de respuesta[4], [5], [6]. Varios autores han aportado estudios relevantes asociados con la definición y desarrollo de los indicadores de gestión como[7], [8], [9], [10]. De acuerdo con esas perspectivas existe un objetivo común hacia la medición de indicadores de gestión con el fin de mejorar la productividad y competitividad de las organizaciones. Un indicador clave de desempeño introducido por [11] es el OEE (*Overall Equipment Effectiveness*, en inglés), se describe como una medida de la efectividad del equipo de producción. Otros autores en [12], [13] y [14], proponen que el OEE se utilice como un indicador clave de la eficiencia de la producción y que se mida regularmente para identificar oportunidades de mejora y aumentar la productividad.,

La revisión de literatura presentada en este artículo está enfocada al uso de las tecnologías 4.0 en las industrias, orientada a identificar el uso de estas tecnologías, los sectores donde se están usando y también los indicadores de productividad beneficiados.

Este artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección II se describe la metodología de la revisión de la literatura, en la sección III se describen los hallazgos generales encontrados, en la sección IV se proporcionan los conceptos de mayor relevancia en este estudio, en la sección V se presenta los trabajos relacionados de acuerdo con la caracterización por grupos de tecnologías, en la sección VI se expone la discusión por parte de los autores de este artículo sobre los resultados encontrados y finalmente, en la sección VII las conclusiones y trabajos futuros.

II. METODOLOGÍA

El estudio para el análisis de la literatura encontrada fue diseñado para obtener una revisión general sobre el uso de las tecnologías de la cuarta revolución industrial en manufactura para mejorar los indicadores de productividad en un contexto globalizado. Fue elaborado a través de un método mixto bajo un enfoque combinado, para lo cual se parte desde la

recolección de datos, realizando la búsqueda de estos en las bases Scopus y Web of Science (WOS).

Con el soporte tecnológico de *Core of Science*, se incorporan los resultados de las búsquedas realizadas, usando la combinación booleana de palabras clave descritas a continuación.

IoT OR "Internet of Things" AND "Cloud computing" AND "Manufacturing industry" AND productivity AND "Industry 4.0" AND management

Core of Science es una plataforma digital de divulgación científica que tiene como objetivo acercar la ciencia a la sociedad y fomentar el interés por la investigación científica. Como se describe en [15] "Core of Science es un espacio en el que se abordan temas científicos de actualidad de una manera rigurosa, pero accesible para todo tipo de público".

Los parámetros de búsqueda tanto en Scopus como en WOS se resumen en la Tabla I.

TABLA I
PARÁMETROS DE BÚSQUEDA

Bases de datos	SCOPUS and Web of Science
Periodo	2019-2023
Fecha	May 3, 2023
Tipo de Documento	Artículos, y conferencias
Tipo de artículo	Todos los tipos
Campos de búsqueda	Título, resumen y palabras clave.
Términos de búsqueda	IoT OR "Internet of Things" AND "Cloud computing" AND "Manufacturing industry" AND productivity AND "Industry 4.0" AND management"
Resultados	176 SCOPUS, 370 WOS
Resultados Totales	546

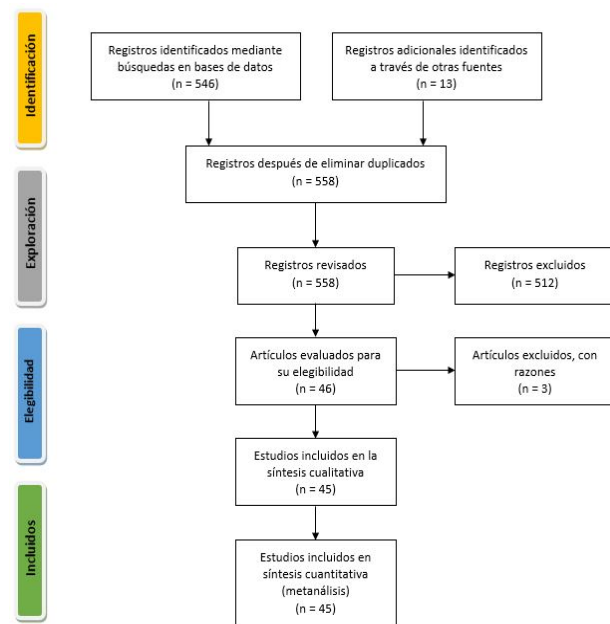


Fig. 1. Diagrama de la Metodología Prisma para la revisión sistemática utilizada[16].

Con el fin de asegurar una revisión sistemática, realizar la caracterización y selección final de los artículos a analizar con enfoque hacia el objetivo de este artículo, se utilizó la metodología PRISMA[16], la cual se resume en el diagrama de la Fig. 1.

En la Fig. 1, se observa que se obtuvieron 558 registros luego de remover los duplicados, finalmente, luego de revisar su estructura general y contenido 512 fueron excluidos, incluyendo 10 sin acceso abierto, esto debido a que, si coincidían con los términos de búsqueda, pero el enfoque se refería a temas diferentes al objeto estudio de este artículo.

III. HALLAZGOS GENERALES

En esta sección se describen los hallazgos significativos encontrados con la totalidad de artículos encontrados a partir de la combinación booleana de palabras descrita en la sección anterior. Estos hallazgos se determinaron con el soporte tecnológico Core of Science[15] y con la base de datos resultante luego de una exhaustiva revisión del contenido de los artículos y su caracterización.

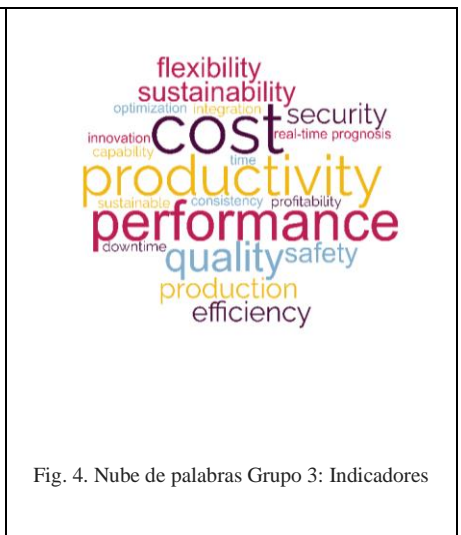
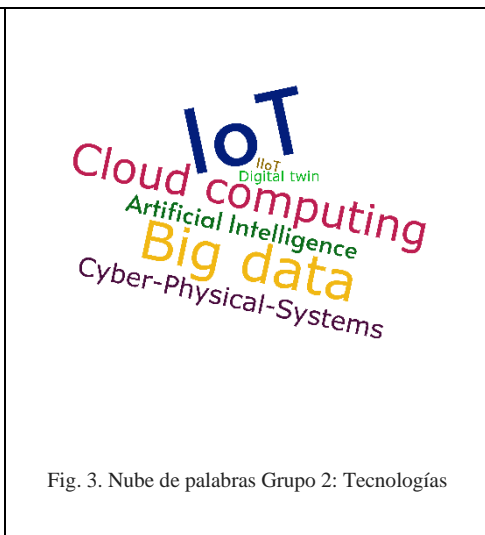
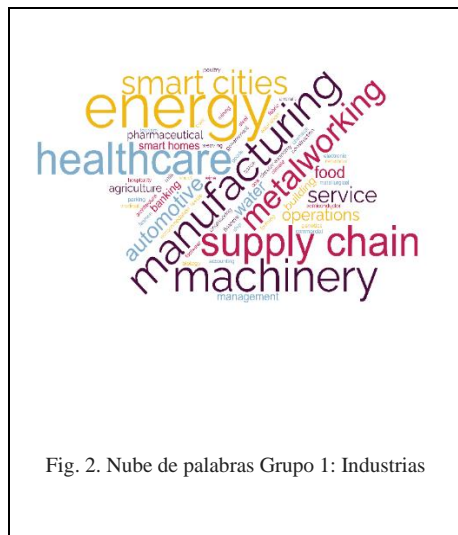
A. Identificación de palabras más relevantes mediante nube de palabras: Industrias, tecnologías e indicadores.

La Fig.2 muestra la nube de palabras del grupo relacionada con las industrias, totalizó 58 palabras que representan las diferentes industrias en las que han sido aplicadas las tecnologías incluidas en los términos de búsqueda, generando escenarios de estudio en parametrización simulada sujetas a una frecuencia mínima en base datos (FMBD) de diez palabras. Este proceso permitió generar escenarios en los que exigir una mayor frecuencia de aparición de palabras en FMBD, se pudo identificar que las palabras más relevantes (en orden de importancia) son: *Manufacturing, supply chain, energy,*

healthcare y machinery. Esta información es relevante para el estudio, puesto que permite determinar aquellas industrias y sectores industriales en los cuales las tecnologías de la industria 4.0 han logrado una mayor penetración. Se evidencia entonces que las industrias de la manufactura, energía y salud son las más relevantes, mientras que la cadena de suministro y la maquinaria son campos específicos fuertemente impactados por la implementación de la tecnología.

De igual forma, la Fig. 3 la nube de palabras del grupo 2 es relacionada con las tecnologías, totalizó un total de 25 palabras en escenarios de estudio en parametrización simulada con una frecuencia mínima en base datos (FMBD) de diez palabras. En este caso, las palabras con mayor número de apariciones son las siguientes (en orden de importancia): *IoT, Cloud, Big data, Artificial intelligence;* mientras que tecnologías como *CPS, DT e IIoT* aparecen con mucha menos frecuencia respecto a las primeras. Se logra determinar entonces que las tecnologías 4RI más usadas en las industrias relacionadas en la Fig. 2, son principalmente IoT, Cloud y Big data, lo cual entrega información importante respecto a la integración de estas.

Finalmente, la Fig. 4 presenta el Word Cloud 3 relacionado con los indicadores de gestión, arrojó un total de 20 palabras, generadas a partir de un escenario de estudio en parametrización simulada con frecuencia mínima en base datos (FMBD) de diez palabras. Este proceso indicó que las palabras con mayor frecuencia de aparición son, en orden de importancia, las siguientes: *performance, cost, productivity, quality y efficiency.* Sin embargo, al reducir la frecuencia mínima en base datos (FMBD) a cinco palabras, aparecen también indicadores como *production, flexibility, safety, downtime e innovation.* De acuerdo con esta información, se puede inferir que existe una correlación entre las tecnologías adoptadas por la industria (Fig. 3) y los indicadores de gestión de la productividad relacionados en la Fig. 4, en particular, para las industrias y sectores de la Fig. 2.



B. Revistas más representativas.

A partir de la búsqueda de referencias, el tratamiento de datos para las revistas más representativas puede realizarse a través del procesamiento de la información en Core of Science[15], obteniendo una visual de la representatividad de las principales revistas en indicadores de gestión para la industria con tecnologías 4.0. Este análisis se ilustra en la Fig. 5, que muestra los bloques de las revistas más importantes en los constructos investigados, allí se define un primer grupo de revistas con una cantidad de entre 55 y 88 artículos publicados, luego tenemos un segundo grupo de revistas con una publicación entre 31 y 32 artículos, y en tercer lugar un conjunto de revistas con un nivel de publicación entre 19 y 25 artículos. Entonces, el primer grupo posee una representatividad del 54% de la publicación total de artículos en revistas representativas, el segundo grupo posee una representación del 24%, mientras que el tercer grupo representa aproximadamente el 22% de la publicación en artículos para las revistas con mayor representatividad.

C. Autores más representativos.

A partir de la búsqueda de autores en las referencias citadas, el tratamiento de datos puede realizarse a través del procesamiento de la información en Core of Science[15], obteniendo una visual de la representatividad de los principales autores en indicadores de gestión para la industria con tecnologías 4.0. Este análisis se ilustra en la Fig. 6, que muestra los bloques de autores más relevantes en los constructos investigados, allí se define un primer grupo de 3 investigadores con una cantidad de entre 9 y 12 artículos producidos, luego tenemos un segundo grupo de investigadores con una producción de 7 artículos cada uno para cerrar con un tercer grupo de investigadores con una producción de artículos entre 5 y 6 artículos cada uno. Por tanto, el primer grupo posee una representatividad del 41% de la producción total de artículos en autores representativos, el segundo grupo posee una representación del 36,8%, mientras que el tercer grupo representa aproximadamente el 22% de la producción en artículos para los autores con mayor representatividad.

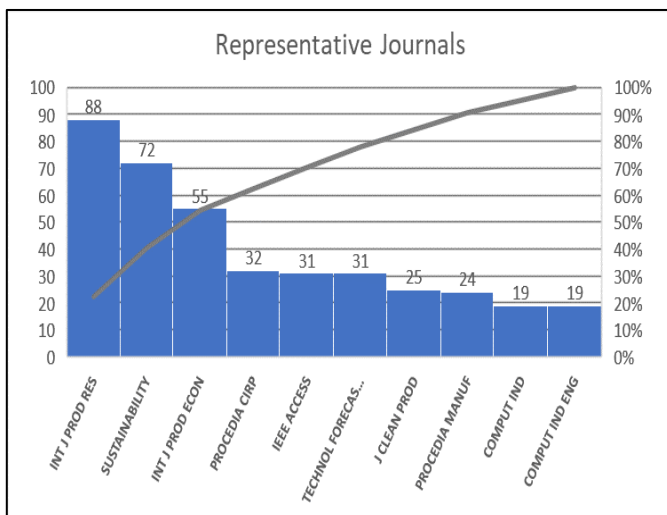


Fig. 5. Revistas representativas.

D. Red de términos asociados a la búsqueda

En la red de la Fig. 7, se pueden apreciar 3 comunidades importantes: la comunidad 1 la cual se presenta en color naranja y las palabras con mayor grado de importancia son *Industria 4.0* y su relación con las tecnologías 4.0 con la transformación digital, el desarrollo sostenible y la toma de decisiones. En la comunidad 2 (color verde), relaciona la palabra de principal importancia a Internet la cual se relaciona con indicadores y retos, y la comunidad 3 (color azul) relaciona todo lo que tiene que ver con adopción de tecnología para la manufactura, la innovación y la sustentabilidad.

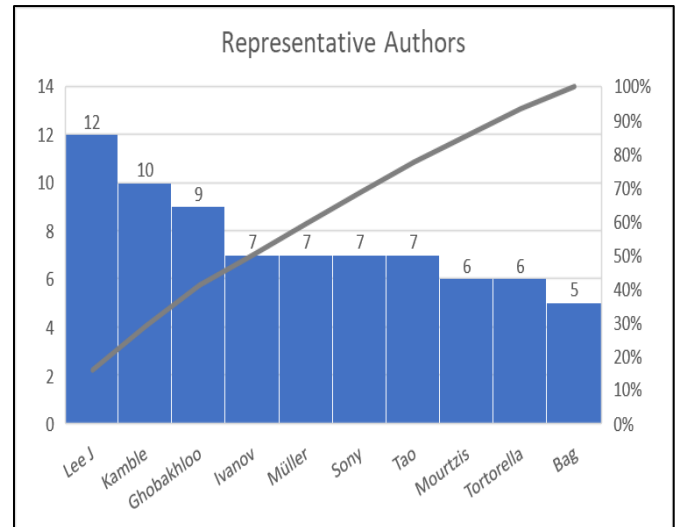


Fig. 6. Autores representativos

E. Red de países en colaboración

En la Fig. 8 se puede apreciar las 3 comunidades de países en colaboración respecto al tratamiento de la información y la implementación de tecnologías inteligentes, la primera representada por el Reino Unido y China el cual concentra la mayor fuerza de colaboración y coautorías en investigaciones vinculadas con la industria 4.0. La segunda comunidad visualiza la red de colaboración en donde los países como Arabia Saudita, Usa y India poseen los mayores grados de consultas en tópicos que relaciona a Internet de las Cosas. Por último, la tercera comunidad en donde Australia y Pakistán contribuyen en mayor proporción a coautorías asociadas a la sostenibilidad, la innovación y la adopción de tecnologías para la manufactura. Lo anterior demuestra que los países latinoamericanos no cuentan aún con un soporte sólido en el tratamiento y la implementación de estas tecnologías que permita fortalecer la eficiencia en los procesos productivos, por lo que la industria queda condicionada a la dependencia extranjera.

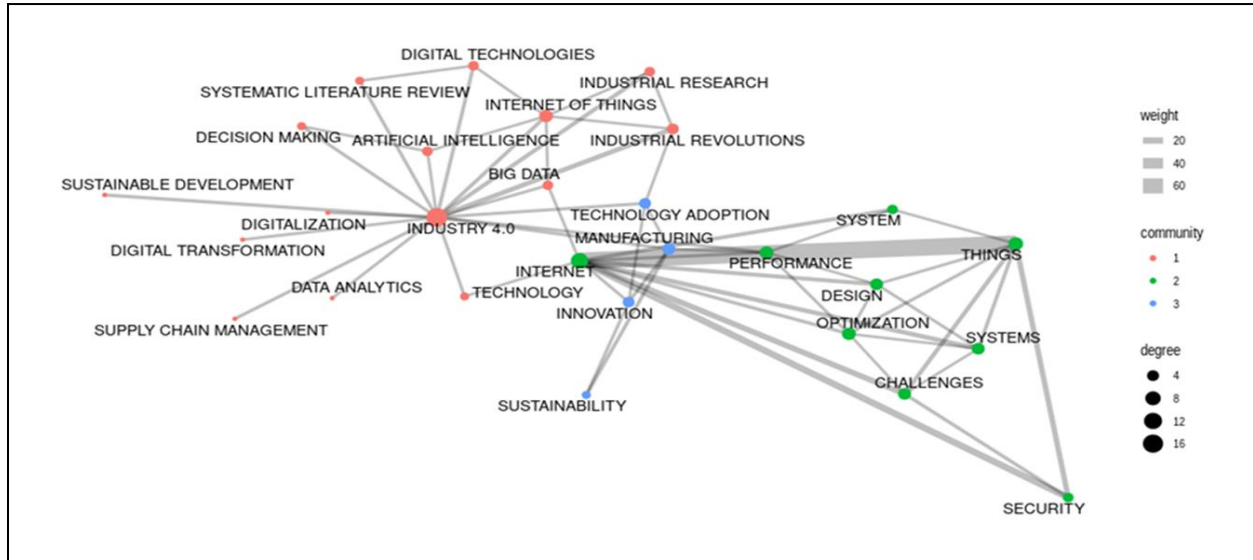


Fig. 7. Red de términos asociados a palabras claves

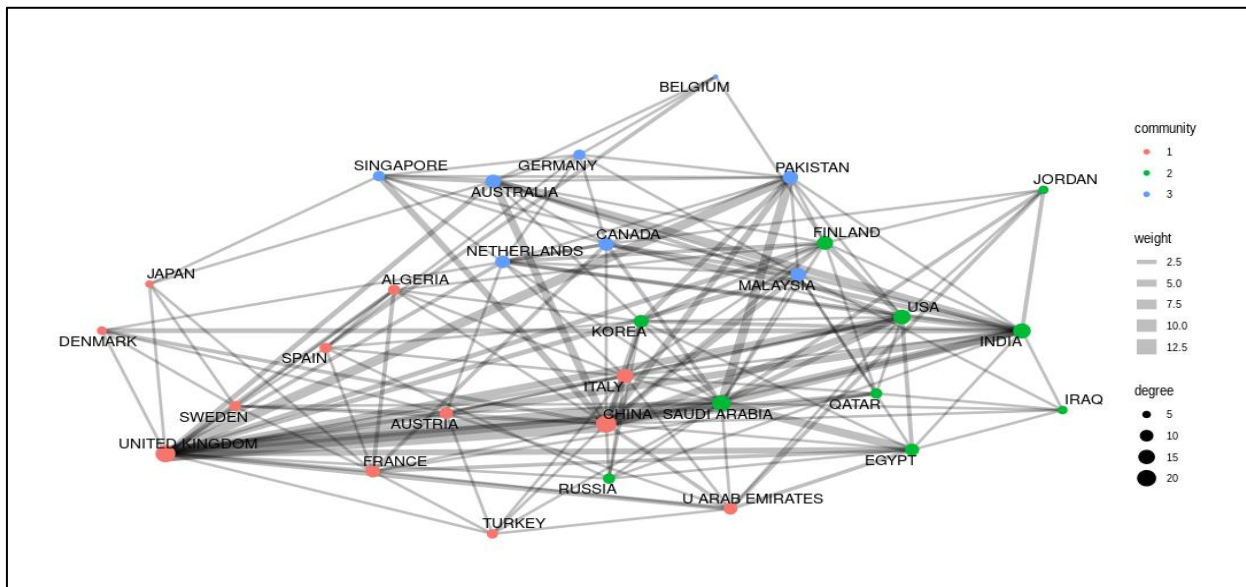


Fig. 8. Red de países en colaboración

IV. CONCEPTOS PRINCIPALES

Las tecnologías 4.0 tienen un gran impacto en los procesos industriales y por tanto cambian el juego en los modelos de fabricación, los enfoques, los conceptos, la productividad y los negocios. En esta sección se proporcionan los conceptos principales en cuanto a las tecnologías 4.0 más identificadas en este estudio, la manufactura y los indicadores de gestión.

A. Tecnologías 4.0

La industria 4.0 surgió en Alemania en 2011[17], [18]de acuerdo con una política económica de gobierno determinada en estrategias de alta tecnología [19], estas tecnologías se enfocan hacia, la digitalización de procesos, la automatización

el uso de tecnologías emergentes y tecnologías de la información y las comunicaciones [20][21], [18]

Las tecnologías de la industria 4.0 se basan en Internet de las cosas (Internet of thing, IoT) [22] e Internet de personas y servicios [23],[24] computación en la nube, big data y analítica e inteligencia artificial, impresión 3D, fabricación aditiva, ingeniería inversa, simulación y realidad aumentada. Estas tecnologías han generado cambios importantes en la industria manufacturera, en el comportamiento del consumidor y en la forma de hacer negocios[25].

El paradigma de Internet de las cosas (IoT) es una de las tendencias más importantes de la cuarta revolución industrial. El término “Internet de las Cosas (IoT)” fue acuñado por

primera vez por Kevin Ashton en 1999. Usa IoT para delinear un sistema donde los sensores se usan para conectar el mundo físico con Internet [26].

Actualmente en la industria también se está usando IIoT (Industrial IoT). IIoT es un subconjunto de la revolución de Internet de las cosas (IoT) que se refiere a la aplicación de los principios, la tecnología y los enfoques de IoT, específicamente en la industria, la fabricación, la energía y sectores similares[27]. Para todas las industrias, IIoT en última instancia tiene como objetivo primero recopilar y analizar datos de sensores y dispositivos de fábrica y, en segundo lugar, generar respuestas inteligentes basadas en información basada en datos[28]

Otra tecnología que está siendo integrada junto con IoT e IIoT es la computación en la nube. En general, computación en la nube se refiere al concepto de entregar una colección de centro de datos, infraestructura, computación software y servicios a través de Internet, basados en la demanda específica de los clientes. En la industria manufacturera, el concepto de “fabricación como servicio” ha sido expandido basado en el concepto de computación en la nube, que es ‘todo se ve como un servicio’ (XaaS)[20].

Big data se introdujo en 2005 en el mundo de la computación para referirse a una gran cantidad de datos que los mecanismos tradicionales de datos no pueden gestionar ni procesar debido a la complejidad y el tamaño de estos[28]. Big data son las características de los activos de información, como un alto volumen, velocidad, veracidad y variedad, que requieren tecnología y métodos analíticos específicos para su transformación en valor. Esta tecnología se combina actualmente para el análisis de los datos proporcionados de las aplicaciones de IoT/IIoT.

Otras tecnologías como inteligencia artificial [29] y [30] gemelos digitales [31] y sistemas ciber-físicos fueron identificadas en la literatura. La inteligencia artificial (IA), ha sido una promesa para la sociedad durante mucho tiempo. Desde 1950[32] es el primero en mencionar la inteligencia en una máquina informática, que más tarde se conoció como IA. La inteligencia artificial industrial (IAI) es referido específicamente para AI cuyos objetivos particulares están en la industria manufacturera[33].

Por otro lado, el origen de los gemelos digitales se atribuye a [31] presentó el concepto en una conferencia sobre la gestión del ciclo de vida del producto en 2003, luego en [34] amplía esta definición al describir el gemelo digital como compuesto por tres componentes, un producto físico, una representación virtual de ese producto y las conexiones de datos bidireccionales que alimentan los datos desde lo físico a lo virtual.

Los sistemas ciber-físicos (*Cyber-Physical Systems*, en inglés) son un mecanismo a través del cual los objetos físicos y el software están estrechamente entrelazados, lo que permite que diferentes componentes interactúen entre sí en una miríada de formas de intercambiar información [35][36].

B. Manufactura

El concepto general de manufactura es el proceso de convertir materia prima en un producto teniendo en cuenta que incluye el diseño, la selección de la materia prima, la secuencia

de procesos a través de los cuales es fabricado un producto. Con la integración de tecnologías el concepto de manufactura ha trascendido o es conocido como fabricación inteligente o *Smart Manufacturing* (en inglés) el cual incluye un contexto más extenso de fabricación cuyo objetivo es optimizar la producción y las transacciones de productos usando las tecnologías avanzadas de información y fabricación[37] [38]. En este contexto, se considera un nuevo modelo de fabricación basado en ciencia y tecnología inteligente que mejora en gran medida el diseño, la producción, la gestión y la integración de todo el ciclo de vida de un producto típico. Todo el ciclo de vida del producto se puede facilitar utilizando varios sensores inteligentes, modelos de toma de decisiones adaptables, materiales avanzados, dispositivos inteligentes y análisis de datos. Se mejorará la eficiencia de producción, la calidad del producto y el nivel de servicio [29] [39].

C. Indicadores de gestión y productividad

En el ámbito de los indicadores de gestión, existen diversos autores y estudios relevantes asociados con su definición y desarrollo. En [7] desarrollaron una herramienta para la medición y gestión del desempeño organizacional denominada Cuadro de Mando Integral (Balanced Scorecard), que incluye la definición de objetivos estratégicos y la selección de indicadores de gestión en diferentes perspectivas, como la financiera, la del cliente, la de los procesos internos y la de aprendizaje y crecimiento. En [8] se introduce el concepto de la cadena de suministro Triple-A, que se basa en la agilidad, la adaptabilidad y la alineación, donde propone un conjunto de indicadores de gestión en cada una de estas áreas, como la velocidad de respuesta, la variabilidad de la demanda, la flexibilidad del proceso y la coordinación interfuncional. En [9] describe un enfoque de gestión de operaciones centrado en la simplificación y la eliminación de desperdicios, sugiriendo el uso de indicadores de gestión como el tiempo de ciclo, la tasa de defectos, el nivel de inventario y el costo unitario de producción. Y en [10], [40], [41], [42] analizan la importancia de la estrategia empresarial para el logro de ventajas competitivas, donde el uso de indicadores de gestión como el margen operativo, la participación de mercado y el retorno sobre la inversión para evaluar el desempeño empresarial y compararlo con el de los competidores. Ahora bien, tomando en consideración la esencia de las diversas perspectivas analizadas se ubica como objetivo común la medición de indicadores de gestión para la identificación de mejoras en pro de la productividad [43] y competitividad de las organizaciones.

Dentro de los indicadores de gestión en operaciones de clase mundial se encuentra el indicador OEE (*Overall Equipment Effectiveness*, en inglés), que representa una medida de la eficiencia en la producción. Dentro de los autores relevantes en el estado del arte de este indicador y su relación con la productividad tenemos en primera instancia en [11], quien es considerado el creador del OEE en la década de 1960, dentro de la filosofía TPM, (*Total Productive Maintenance*), describe el OEE como una medida de la efectividad del equipo de producción, que se calcula como el producto de tres factores: la disponibilidad, el rendimiento y la calidad, e indica que el OEE se debe utilizar para identificar las áreas de mejora en el proceso de producción y como indicador de la eficacia de las acciones

de mejora implementadas. En esta dirección en [12],[13], [44],[14] [44] proponen que el OEE se utilice como un indicador clave de la eficiencia de la producción y que se mida regularmente para identificar oportunidades de mejora y aumentar la productividad, indican que el OEE es una medida de la eficiencia global del equipo de producción con relación directa con la productividad de las operaciones. También, sugieren el uso del OEE como indicador clave para medir la eficiencia en la producción y aumentar la productividad mediante la mejora de los procesos de producción y la reducción de las pérdidas de producción[45], [46], [47].

V. TRABAJOS RELACIONADOS

De acuerdo con los hallazgos encontrados se puede apreciar que la aplicación de tecnologías I4.0 tales como IoT, Cloud Computing (CC) e Inteligencia Artificial (IA), puede tener un impacto significativo en la productividad de las operaciones industriales [48],[49], pues su introducción permite a las empresas manufactureras mejorar, innovar y crear valor estratégico [50], [51]. La combinación de estas tecnologías puede mejorar la productividad en la industria [52] al proporcionar datos en tiempo real sobre la operación, permitiendo un proceso más eficiente y eficaz de toma de decisiones y facilitando adaptar las operaciones para cumplir mejor con los objetivos de producción.

TABLA II
ARTÍCULOS POR AGRUPACIÓN DE INDUSTRIAS E INDICADORES

Grupos	Industrias	Indicadores
Grupo A	Manufactura: [50], [52], [53], [54], [55], [56], [57]	Eficiencia, Consistencia, Rendimiento, Flexibilidad de producción, Costo operativo, Costo de producción, Productividad, Seguridad, Vida útil restante (RUL), Calidad de procesamiento Rendimiento.
	Automotriz: [58], [59]	
	Materiales, energía, alimentos: [49], [60]	
Grupo B	Manufactura: [61], [62], [63], [64], [65]	Productividad, Ingresos de la empresa, Desempeño Laboral, Rentabilidad, Crecimiento de las ventas, Rendimiento, Aumento de la producción, Utilización de activos, Calidad, Reducción del tiempo de inactividad de la máquina, Eficiencia
	Otras (incluidas Metalurgia, Electrónica, maquinaria, química, textil): [58], [66]	
Grupo C	Manufactura: [67], [68], [69], [70], [71], [72], [73], [74]	Rendimiento Tiempo, Productividad Eficiencia, Carga de trabajo Tiempos de ciclo, Tiempo de inactividad
	Automotriz: [75], [76]	
	Otras industrias (incluidas farmacéutica y Agua, Gestión de Redes, Metalurgia: [66], [77], [78], [79].	

En esta sección, se presenta una breve visión de cómo estas tecnologías están siendo usadas para mejorar la productividad en la industria, con énfasis particular en la industria manufacturera. Una vez caracterizada la búsqueda de la literatura y tomando los 45 artículos finales, se realizó una clasificación de acuerdo con la mezcla de tecnologías en tres grupos: a) aplicación de IoT, Cloud Computing (CC), Big Data (BD) e IA en la industria; b) aplicación de IoT, Cloud Computing y Big Data; c) aplicación de IoT y Cloud Computing.

En la Fig. 9 se muestran las tecnologías 4.0 identificadas en la revisión de la literatura. Y en la Tabla II se presentan los trabajos encontrados que implementan de forma combinada varias de las tecnologías identificadas y que abordan indicadores de productividad, clasificados por tipo de industria. Esta clasificación se obtuvo luego de afinar el número de resultados de búsqueda al eliminar duplicados y excluir artículos que solo mencionaban las tecnologías de interés, pero no profundizaban en su uso o no hacían referencia a las industrias/sectores de interés para el estudio.

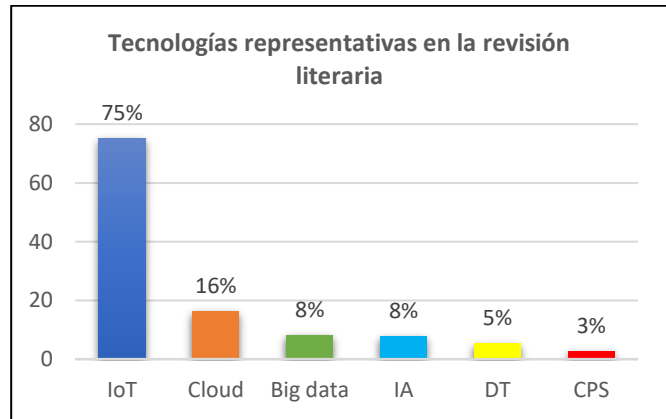


Fig. 9. Tecnologías representativas encontradas en la literatura.

A continuación, se presentan las principales aplicaciones de las tecnologías identificadas de acuerdo con las agrupaciones realizadas.

A. Aplicación de IoT, CC, BD e IA

Es alto el número de artículos enfocados a realizar revisiones de la literatura y relativamente pocos en los que presentan casos de aplicación de estas cuatro tecnologías combinadas en la industria. En primer lugar, en [52] estudia las diferentes dimensiones de aplicar tecnologías IoT, BD, IA, CC y otras como manufactura aditiva (AM, Additive Manufacturing), robótica avanzada, realidad virtual (VR, virtual reality), simulación; para mejorar el rendimiento de los Sistemas de fabricación flexible (FMS), la flexibilidad de la producción y reducir los costos de la misma. En la misma línea, [50] se analiza los beneficios de la adopción de BD, IA, CC, IoT y Blockchain para la gestión de riesgos en la industria de la manufactura; mientras que [55] explica los beneficios que ofrece para las empresas la implementación de estas tecnologías en sus procesos de producción.

Por otro lado, [49] presentan un modelo completo de una fábrica que se apoya en tecnologías CPS, IoT, IA, BD, robots y

drones, CC, redes 5G y 6G, impresión 3D, realidad virtual y aumentada, y tecnología blockchain; ilustrando la confluencia de todas estas tecnologías en un único modelo de fábrica con altos indicadores de productividad, eficiencia y seguridad.

En [60] describe un sistema de control de producción inteligente que ha sido desarrollado utilizando IA, aprendizaje automático (*ML, Machine Learning*), IoT, BD, CPS y tecnologías de CC para un fabricante de alimentos tradicional, con la intención de mejorar la eficiencia y la consistencia, reduciendo los costos operativos.

En [54] presentan un Sistema de soporte de decisiones (DSS) para el mantenimiento predictivo en la industria manufacturera basado en IoT, Big Data, CC y ML, mediante el cual es posible incrementar la vida útil restante de la maquinaria, mejorar la calidad del procesamiento y el rendimiento.

Respecto al uso de tecnologías IoT especializadas en la industria, [56] proporciona una descripción general de veintinueve aplicaciones significativas de IIoT en el campo de la fabricación y las tecnologías que lo sustentan, determinando los principales beneficios y características de su implementación, entre los que se destacan el aumento en la productividad, seguridad, rendimiento, disminución tiempos de inactividad y costos, en sectores industriales, automotrices, farmacéuticas, eléctricas, de alta tecnología y de cadenas de suministro de petróleo y alimentos y bebidas. Por su parte, [17], se presentan el desarrollo de un sistema de adquisición de datos basado en IIoT robusto y de bajo costo centrado en las industrias manufactureras nacionales. Se ha utilizado un algoritmo de aprendizaje automático para clasificar los datos confidenciales y no confidenciales para mejorar la seguridad en la nube.

En [57] presentan una plataforma de análisis de BD basada en IoT, CC e IA que consta de varios componentes para fines de adquisición, integración, almacenamiento, análisis y visualización de datos. La solución desarrollada demuestra cómo se puede orquestar una amplia variedad de herramientas y métodos para que trabajen juntos con el fin de respaldar la toma de decisiones y mejorar las calidades del proceso y del producto en entornos de fabricación inteligente.

Finalmente, en [59] presentan una metodología de investigación para medir el desempeño de la cadena de suministro al implementar tecnologías de la industria 4.0 tales como IoT, CC, BD, IA, CPS y otras; construyendo indicadores clave de desempeño (KPI) confiables. La metodología se demuestra utilizando datos de un fabricante de automóviles relacionados con indicadores de control y KPIs para la gestión de la cadena de suministro.

B. Aplicación de IoT, CC y BD en la industria

Las combinaciones de IoT, CC y BD se presentan de forma más amplia en la industria que en el caso anterior. Autores como [54], [64] han estudiado su aplicación en diversos ámbitos industriales como el mantenimiento de la maquinaria y su impacto en el aumento de la producción, la calidad, la reducción del tiempo de inactividad de la máquina y su eficiencia.

En [58] investigan los niveles de adopción de las tecnologías IoT, CC, BD y CPS en las empresas manufactureras de Turquía. Encuentra que existe una correlación entre la importancia y la implementación de las tecnologías, y que el grado de

implementación aumenta con el tamaño de la empresa. Las tres principales industrias que utilizan las tecnologías son la automotriz, la eléctrica y electrónica, y la de maquinaria.

Un análisis del nivel de adopción de de adopción de Cloud Computing, Sistemas de Integración Horizontal y Vertical, Big Data e Internet Industrial de las Cosas en 30 pequeñas y medianas empresas del sector metalúrgico en el estado de São Paulo, encontrando que los adoptantes tienen una mayor percepción de ventaja competitiva y compatibilidad de estas tecnologías, está en [80].

En [61] estudian si las inversiones en Industria 4.0 mejoran el rendimiento de las PYMEs. Los resultados muestran mejores efectos al implementar tecnologías como BD, CC e IoT, dando a la compañía de manufactura ventajas competitivas.

Por otro lado, en [62] investigan las interrelaciones entre las tecnologías de la Industria 4.0 (IoT, simulación avanzada, CC y BD), la servitización y el desempeño de las pequeñas y medianas empresas (PYME) manufactureras, encontrando que la implementación de estas tecnologías modera positivamente la relación entre la servitización y el rendimiento productivo.

Una propuesta de un marco teórico que integra la fabricación Lean (LM, Lean Manufacturing), la analítica de datos y el Internet de las Cosas (IoT) para mejorar los sistemas de apoyo a la toma de decisiones en la mejora de procesos se encuentra en [63]. Los autores utilizan simulaciones con analítica de datos habilitada por IoT para mejorar los problemas de cuellos de botella. También tienen en cuenta otras herramientas significativas sugeridas por LM dentro de la categoría proceso y equipo, tales como el flujo continuo de la producción (*Just inTime*, JIT) y el rendimiento de la maquinaria (OEE), manteniendo el principio de LM de aumentar la productividad y reducir los desperdicios en la fabricación.

C. Aplicación de IoT y CC en la industria

Diversos artículos científicos sugieren que IoT y la computación en la nube tienen numerosas aplicaciones en la industria manufacturera. En [69] se destaca el papel de IoT en las industrias de materiales y fabricación, y señala que puede ser usado para implementar sistemas de monitoreo computarizados y para conectar dispositivos y sistemas a través de internet, mientras que en [70],[81] analizan cómo las tecnologías y los sistemas de IoT están impulsando las innovaciones en la manufactura basadas en datos en la fabricación inteligente. Por otro lado, [71] enfatiza en que IoT y la computación en la nube pueden automatizar el trabajo y almacenar grandes cantidades de datos, lo que los convierte en recursos importantes para la investigación y las aplicaciones industriales.

De igual forma, [72] [82] explican que el Internet industrial de las cosas (IIoT) puede hacer que los procesos de fabricación sean más eficientes, productivos e inteligentes; [73] analiza el potencial de la computación en la nube para almacenar y procesar el gran volumen de datos producidos por los dispositivos IIoT, destacando la necesidad de técnicas de computación compatibles con la nube para promover la transición estable de los programas de IoT a la nube; mientras que [74] presentan el desarrollo de la plataforma FASTEN IIoT, una solución flexible, configurable y abierta que tiene como objetivo proporcionar una interfaz entre el taller y soluciones

avanzadas de la industria 4.0 mediante tecnologías IIoT, CC y CPS. Al respecto, en [83] se presenta un análisis detallado de cómo se desarrollan y mantienen las plataformas IoT desde la perspectiva del ciclo de vida del proceso de desarrollo del sistema de información, para asegurar su calidad.

En [84] se analiza el uso de tecnologías de trazabilidad digital para mejorar el seguimiento de productos y la eficiencia de la producción en una empresa de fabricación de metales. Para ello, implementan una herramienta que hace uso de IoT y Cloud computing para hacer un seguimiento de sus productos en tiempo real durante el proceso de producción (Work in Process, WIP), permitiendo mejorar la planificación de la producción, reducir el tiempo de espera innecesario y los cuellos de botella, contribuyendo a tomar decisiones sobre cuándo empezar a producir productos específicos y minimizar los retrasos.

Una arquitectura que usa IoT, Cloud, DT para optimizar el corte fino en la industria manufacturera automatizada, permitiendo el uso totalmente automatizado de la simulación de elementos finitos como un servicio, mejorando indicadores de tiempo de proceso y rendimiento es propuesta en [75].

En [67] investigan los efectos de los factores tecnológicos y no tecnológicos de la implementación de la Industria 4.0 como IoT y CC sobre la productividad en las empresas manufactureras. Encuentran que los factores relacionados con estas tecnologías tienen efectos positivos en la productividad.

Un marco de evaluación comparativa para evaluar el rendimiento de Edge-Cloud computing para el monitoreo de vibraciones de maquinaria basada en IoT, concluyendo que efectivamente dichas tecnologías pueden mejorar el rendimiento es propuesto en [68].

Finalmente, en [76] presenta el uso de tecnologías y sistemas de fabricación avanzados entre los que se encuentran IoT y CC, para lograr ganancias de productividad, sostenibilidad y reducción de costos de producción en la fabricación de aviones, analizando eficiencia y la carga de trabajo de los Vehículos Autoguiados (AGV) que transportan materiales desde el almacén hasta las estaciones de montaje. De forma similar, [65] proporciona una descripción general sobre las aplicaciones de las tecnologías de la Industria 4.0 entre las que se encuentran IoT, CC e IA, entre otras, para aumentar la productividad, la repetibilidad, la estandarización y la innovación de procesos en el sector de fabricación de aeronaves.

VI. DISCUSIÓN

A partir de la revisión de la literatura y los hallazgos encontrados se puede apreciar que las tecnologías con más porcentaje de utilización son: Internet de las cosas, seguida de computación en la nube, big data e inteligencia artificial y en menor proporción gemelos digitales y sistemas ciber-físicos. De acuerdo con los avances acelerados con la inteligencia artificial se espera que esta tenga más influencia sobre los procesos de manufactura en todos los sectores en un futuro cercano. El análisis de la literatura sugiere además que IoT y la computación en la nube pueden mejorar significativamente la eficiencia, la calidad, el rendimiento de la producción y la competitividad de la industria manufacturera[85], así como aumentar la visibilidad de la información y brindar ventajas competitivas en el mercado global. La automatización y optimización de los procesos de fabricación, facilitar la

colaboración entre las partes interesadas y permitir productos personalizados son otras de las ventajas identificadas[86] [87] [88]

En la industria de la metalmecánica, los principales usos de las tecnologías estudiadas pueden resumirse en: monitoreo de procesos automatizado, mantenimiento predictivo, seguimiento en tiempo real, supervisión y análisis basados en la nube y programación y planificación automatizadas.

También se pudo evidenciar la baja participación y colaboración entre países de Iberoamérica, esto trae un reto importante en el avance de uso de tecnologías en industrias y colaboración entre estos países. En este contexto, se puede determinar que, aunque ya se está hablando de industria 5.0 [89] la adopción de las tecnologías de la industria 4.0 para algunos países es aún incipiente [90], [91], [92], [93], [94]

La industria metalmecánica es un sector clave para el desarrollo económico y tecnológico de muchos países. En la actualidad, la implementación de tecnologías 4.0 en este y otros sectores ha generado una transformación en los procesos productivos y en la forma en que se gestionan las operaciones. En este contexto, los indicadores de gestión se convierten en una herramienta clave para medir y controlar el rendimiento de la empresa en tiempo real y tomar decisiones estratégicas. En este sector también se evidencia falta de fortalecimiento en cuanto a la adopción de tecnologías 4.0.

La introducción de los indicadores de gestión en la industria con tecnologías 4.0 permite monitorear en tiempo real el funcionamiento de la empresa, identificar oportunidades de mejora y tomar decisiones informadas y eficaces[95], [96]. Como se había mencionado en secciones anteriores los indicadores de gestión son medidas cuantitativas que permiten evaluar el desempeño de la empresa en distintos aspectos, como la eficiencia, los costos, la productividad, los ingresos, el rendimiento, el tiempo y la seguridad, que pueden finalmente impactar en la satisfacción del cliente. Estos y otros indicadores se relacionaron en la literatura encontrada (en la tabla II). Sin embargo, en el análisis de contenido de los artículos citados no se encontró relacionado en específico el OEE, por tanto, esto evidencia otro reto de investigación y de integración de este indicador en la industria de la manufactura que combine métodos estándar como el OEE [97] [98] con la implementación de tecnologías I4.0 para mejorar de la productividad.

VII. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Los resultados evidenciados en este artículo permitieron visualizar la importancia de la evolución de la industria 4.0 y de sus tecnologías en los procesos industriales específicamente en la manufactura. La fabricación inteligente [99], [100], [101], [102] se vuelve cada vez más importante en el avance de la industria y la economía modernas y es evidente que esta es una perspectiva clave para investigación y aplicación en todos los sectores a nivel mundial, ya que la adopción de tecnologías en los procesos de manufactura proporciona valor añadido a los productos. En este documento se trataron los conceptos claves de las principales tecnologías 4.0 identificadas en los procesos de manufactura, los sectores beneficiados y los indicadores de gestión relacionados. Estos resultados son claves para investigadores y profesionales industriales sobre todo

pertencientes a los sectores con menor uso de estas tecnologías a contribuir con nuevos avances en la industria manufacturera. Por tanto, los trabajos futuros deben estar enfocados al desarrollo de sistemas de información que integren las tecnologías a los procesos productivos, esto sería un gran aporte a la industria, pues contribuye a cerrar la brecha identificada con relación a la adopción de tecnologías 4.0 en países de América Latina.

AGRADECIMIENTOS

Al trabajo colaborativo entre investigadores y profesionales de la Universidad Católica de Pereira y el Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico de la Manufactura y la Metalmecánica – CINDETEM (Colombia) que participaron en la ejecución del proyecto de investigación del cual hace parte este estudio y de igual manera se extienden los agradecimientos al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación – Minciencias y la Alcaldía de Pereira quienes fueron los cofinanciantes del proyecto.

REFERENCES

- [1] S. T. N. Ray, Y. Zhong, Xun Xu, Eberhard Klotz, "Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review," *Engineering, Elsevier*, vol. 3, pp. 616–630, 2017.
- [2] X. T. Nguyen and Q. K. Luu, "Factors affecting adoption of industry 4.0 by small-and medium-sized enterprises: A case in Ho Chi Minh city, Vietnam," *Journal of Asian Finance, Economics and Business*, vol. 7, no. 6, 2020, doi: 10.13106/JAFEB.2020.VOL7.NO6.255.
- [3] D. Cordero, K. L. Altamirano, J. O. Parra, and W. S. Espinoza, "Intention to Adopt Industry 4.0 by Organizations in Colombia, Ecuador, Mexico, Panama, and Peru," *IEEE Access*, vol. 11, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3238384.
- [4] V. Alcácer and V. Cruz-Machado, "Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 22, no. 3, pp. 899–919, Jun. 2019, doi: 10.1016/J.JESTCH.2019.01.006.
- [5] B. Gajdzik, "Frameworks of the Maturity Model for Industry 4.0 with Assessment of Maturity Levels on the Example of the Segment of Steel Enterprises in Poland," *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity* 2022, Vol. 8, Page 77, vol. 8, no. 2, p. 77, Apr. 2022, doi: 10.3390/JOITMC8020077.
- [6] J. Chigwada, F. Mazunga, C. Nyamhere, V. Mazheke, and N. Taruvinga, "Remote poultry management system for small to medium scale producers using IoT," *Sci Afr*, vol. 18, 2022, doi: 10.1016/j.sciaf.2022.e01398.
- [7] R. S. Kaplan and D. P. Norton, "The balanced scorecard: Measures That drive performance," *Harvard Business Review*, vol. 83, no. 7–8, 2005.
- [8] H. L. Lee, "The triple-A supply chain," *Harv Bus Rev*, vol. 82, no. 10, pp. 102–114, 2004.
- [9] R. J. Schonberger, "World-class manufacturing: The next decade," *Ind Week*, vol. 245, no. 6, 1996, doi: 10.2307/259415.
- [10] P. Belton, *Competitive Strategy: Techniques for Analyzing Industries and Competitors*. 2017. doi: 10.4324/9781912281060.
- [11] S. Nakajima, "Introduction to TPM: Total Productive Maintenance.pdf," *Productivity Press, Cambridge*, 1988, doi: http://www.plant-maintenance.com/articles/tpm_intro.shtml.
- [12] J. Kumar and V. K. Soni, "An Exploratory Study of OEE Implementation in Indian Manufacturing Companies," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, vol. 96, no. 2, 2015, doi: 10.1007/s40032-014-0153-x.
- [13] P. Gupta and S. Vardhan, "Optimizing OEE, productivity and production cost for improving sales volume in an automobile industry through TPM: A case study," *Int J Prod Res*, vol. 54, no. 10, 2016, doi: 10.1080/00207543.2016.1145817.
- [14] P. G. Yazdi, A. Azizi, and M. Hashemipour, "An empirical investigation of the relationship between overall equipment efficiency (OEE) and manufacturing sustainability in industry 4.0 with time study approach," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 10, no. 9, 2018, doi: 10.3390/su10093031.
- [15] S. Robledo, M. Zuluaga, L.-A. Valencia-Hernandez, O. A.-E. Arbelaez-Echeverri, P. Duque, and J.-D. Alzate-Cardona, "Tree of Science with Scopus: A Shiny Application," *Issues in Science and Technology Librarianship*, no. 100, Aug. 2022, doi: 10.29173/istl2698.
- [16] A. Liberati et al., "The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: explanation and elaboration," *J Clin Epidemiol*, vol. 62, no. 10, pp. e1–e34, Oct. 2009, doi: 10.1016/J.JCLINEPI.2009.06.006/ATTACHMENT/14E482F6-F614-46AB-A470-68ACBBC119FA/MMC2.DOC.
- [17] M. Baygin; H. Yetis; M. Karakose and E. Akin;, "An Effect Analysis of Industry 4.0 to Higher Education," in *15th International Conference on Information Technology Based Higher Education and Training (ITHET)*, 2016. doi: 10.1109/ITHET.2016.7760744.
- [18] Becerra, L.Y., "Tecnologías de la información y las Comunicaciones en la era de la cuarta revolución industrial: Tendencias Tecnológicas y desafíos en la educación en Ingeniería," *Entre Ciencia e Ingeniería*, vol. 14, no. 28, pp. 76–81, 2020.
- [19] F. Mosconi, *The new European industrial policy: Global competitiveness and the manufacturing renaissance*. London, England: Routledge., 2015.
- [20] L. Sommer, "Industrial revolution—Industry 4.0: Are German manufacturing SMEs the first victims of this revolution?," *Journal of Industrial Engineering and Management*, vol. 8, pp. 1512-1532., 2015.
- [21] C. B. Ynzunza Cortés, J. M. Izar Landeta, J. Bocarando Chacón, Guadalupe;, F. Aguilar Pereyra, and M. Larios Osorio, "El Entorno de la Industria 4.0: Implicaciones y Perspectivas Futuras," *Conciencia Tecnológica*, no. 54, 2017.
- [22] H.-D. Ma, "Internet of Things: Objectives and scientific challenges," *J. Comput. Sci. Technol.*, vol. 26, no. 6, pp. 919–924, 2011.
- [23] A. J. J. Cooper, "Challenges for Database Management in the Internet of Things," *IETE Technical Review*, vol. 26, no. 5, pp. 320–329, 2015.
- [24] T. and H. M. Lasi, H., Fettke, P., Feld, "Industry 4.0," *Business & Information Systems Engineering*, vol. 6, no. 4, pp. 239-242., 2014.
- [25] A. M. Ghaithan, Y. Alshammakhi, A. Mohammed, and K. M. Mazher, "Integrated Impact of Circular Economy, Industry 4.0, and Lean Manufacturing on Sustainability Performance of Manufacturing Firms," *Int J Environ Res Public Health*, vol. 20, no. 6, 2023, doi: 10.3390/ijerph20065119.
- [26] S. I. M. and M. N. A.-K. Mostafa Al-Emran, *A Survey of Internet of Things (IoT) in Education: Opportunities and Challenges*, vol. 846. 2020. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-24513-9_1.
- [27] S. Nižetić, P. Šolić, D. López-de-Ipiña González-de-Artaza, and L. Patrono, "Internet of Things (IoT): Opportunities, issues and challenges towards a smart and sustainable future," *J Clean Prod*, vol. 274, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122877.
- [28] E. Alaru, F. Puican, A. Apostu, and M. Velicanu, "Perspectives on Big Data and Big Data Analytics," *Database Systems Journal*, vol. III, no. 4, 2012.
- [29] P. Trakadas et al., "An artificial intelligence-based collaboration approach in industrial iot manufacturing: Key concepts, architectural extensions and potential applications," *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 19, 2020, doi: 10.3390/s20195480.
- [30] B. hu Li, B. cun Hou, W. tao Yu, X. bing Lu, and C. wei Yang, "Applications of artificial intelligence in intelligent manufacturing: a review," *Frontiers of Information Technology and Electronic Engineering*, vol. 18, no. 1. 2017. doi: 10.1631/FITEE.1601885.
- [31] D. Jones, C. Snider, A. Nassehi, J. Yon, and B. Hicks, "Characterising the Digital Twin: A systematic literature review," *CIRP J Manuf Sci Technol*, vol. 29, 2020, doi: 10.1016/j.cirpj.2020.02.002.
- [32] A. M. Turing, "Computing machinery and intelligence," in *Machine Intelligence: Perspectives on the Computational Model*, 2012. doi: 10.1525/9780520318267-013.
- [33] S. W. Kim, J. H. Kong, S. W. Lee, and S. Lee, "Recent Advances of Artificial Intelligence in Manufacturing Industrial Sectors: A Review," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 23, no. 1. 2022. doi: 10.1007/s12541-021-00600-3.
- [34] M. Grieves, "Digital Twin : Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication," *White Paper*, no. March, 2014.
- [35] E. a Lee, "Cyber Physical Systems : Design Challenges University of California , Berkeley," *Distrib Comput*, 2008, doi: 10.1109/ISORC.2008.25.

- [36] A. A. Letichevsky, O. O. Letychevskiy, V. G. Skobelev, and V. A. Volkov, "Cyber-Physical Systems," *Cybern Syst Anal*, vol. 53, no. 6, 2017, doi: 10.1007/s10559-017-9984-9.
- [37] A. Kusiak, "Service manufacturing: Basic concepts and technologies," *J Manuf Syst*, vol. 52, 2019, doi: 10.1016/j.jmsy.2019.07.002.
- [38] A. Kusiak, "Smart manufacturing," *Int J Prod Res*, vol. 56, no. 1–2, 2018, doi: 10.1080/00207543.2017.1351644.
- [39] S. Liang, M. Rajora, X. Liu, C. Yue, P. Zou, and L. Wang, "Intelligent manufacturing systems: A review," *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, vol. 7, no. 3, 2018. doi: 10.18178/ijmerr.7.3.324-330.
- [40] S. M. Párraga Franco, N. F. Pinargote Vázquez, C. M. García Álava, and J. C. Zamora Sornoza, "Indicadores de gestión financiera en pequeñas y medianas empresas en Iberoamérica: una revisión sistemática," *Dilemas contemporáneos: Educación, Política y Valores*, 2021, doi: 10.46377/dilemas.v8i.2610.
- [41] M. E. Porter, *Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance*, vol. Fir Free P, no. 1, 1998. doi: 10.1016/j.neubiorev.2009.11.015.
- [42] H. Ore, "Planeamiento estratégico como instrumento de gestión en las empresas: Revisión bibliográfica," *Revista Científica Pakamuros*, vol. 8, no. 4, 2020, doi: 10.37787/pakamuros-unj.v8i4.147.
- [43] L. H. Morris Molina, "Entre Ingeniería, Tecnología y Productividad," *Entre ciencia e ingeniería*, vol. 14, no. 28, 2020, doi: 10.31908/19098367.1849.
- [44] F. Hernández Centeno and W. Sifuentes Huayanay, "Lean Manufacturing: Literature review and implementation analysis," *Journal of Scientific and Technological Research Industrial*, vol. 3, no. 2, 2022, doi: 10.47422/jstri.v3i2.29.
- [45] K. Foit, G. Golda, and A. Kampa, "Integration and Evaluation of Intra-Logistics Processes in Flexible Production Systems Based on OEE Metrics, with the Use of Computer Modelling and Simulation of AGVs," *Processes 2020*, Vol. 8, Page 1648, vol. 8, no. 12, p. 1648, Dec. 2020, doi: 10.3390/PR8121648.
- [46] Z. F. Hunusalela *et al.*, "Productivity tool for automated guided vehicles: OEE indicator perspective," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 1193, no. 1, p. 012113, Oct. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1193/1/012113.
- [47] J. Zhou, Y. Wang, and Y. Q. Chua, "Real-Time OEE for Industry 4.0 Learning and Practice Training," *SSRN Electronic Journal*, Jun. 2021, doi: 10.2139/SSRN.3864886.
- [48] T. C. Ng, S. Y. Lau, M. Ghobakhloo, M. Fathi, and M. S. Liang, "The Application of Industry 4.0 Technological Constituents for Sustainable Manufacturing: A Content-Centric Review," *Sustainability 2022*, Vol. 14, Page 4327, vol. 14, no. 7, p. 4327, Apr. 2022, doi: 10.3390/SU14074327.
- [49] G. Tsaramirsis *et al.*, "A Modern Approach towards an Industry 4.0 Model: From Driving Technologies to Management," *J Sens*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/5023011.
- [50] O. Rodríguez-Espíndola, S. Chowdhury, P. K. Dey, P. Albores, and A. Emrouznejad, "Analysis of the adoption of emergent technologies for risk management in the era of digital manufacturing," *Technol Forecast Soc Change*, vol. 178, May 2022, doi: 10.1016/J.TECHFORE.2022.121562.
- [51] A. Reiman, J. Kaivo-oja, E. Parviainen, E. P. Takala, and T. Lauraeus, "Human factors and ergonomics in manufacturing in the industry 4.0 context – A scoping review," *Technol Soc*, vol. 65, p. 101572, May 2021, doi: 10.1016/J.TECHSOC.2021.101572.
- [52] M. Javaid, A. Haleem, R. P. Singh, and R. Suman, "Enabling flexible manufacturing system (FMS) through the applications of industry 4.0 technologies," *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, vol. 2, pp. 49–62, 2022, doi: 10.1016/J.IOTCPS.2022.05.005.
- [53] Muhammad Imran Majid, Ejaz Malik, Tahniyat Aslam, Osama Mahfooz, and Fatima Maqbool, "Design and Implementation of Low-Cost Data Acquisition System for Small and Medium Enterprises (SMEs) of Pakistan," *Proceedings of the Pakistan Academy of Sciences: A. Physical and Computational Sciences*, vol. 59, no. 4, pp. 13–23, Nov. 2022, doi: 10.53560/PPASA(59-4)784.
- [54] R. Rosati *et al.*, "From knowledge-based to big data analytic model: a novel IoT and machine learning based decision support system for predictive maintenance in Industry 4.0," *J Intell Manuf*, vol. 34, no. 1, pp. 107–121, Jan. 2023, doi: 10.1007/S10845-022-01960-X.
- [55] İ. Gerekli, T. Z. Çelik, and İ. Bozkurt, "Industry 4.0 and Smart Production," *TEM Journal*, vol. 10, no. 2, pp. 799–805, May 2021, doi: 10.18421/TEM102-37.
- [56] M. Javaid, Abid Haleem, R. Pratap Singh, S. Rab, and R. Suman, "Upgrading the manufacturing sector via applications of Industrial Internet of Things (IIoT)," *Sensors International*, vol. 2, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.SINTL.2021.100129.
- [57] S. Kahveci, B. Alkan, M. H. Ahmad, B. Ahmad, and R. Harrison, "An end-to-end big data analytics platform for IoT-enabled smart factories: A case study of battery module assembly system for electric vehicles," *J Manuf Syst*, vol. 63, pp. 214–223, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.JMSY.2022.03.010.
- [58] T. Sarı, H. K. Güleş, and B. Yiğitöl, "Awareness and readiness of Industry 4.0: The case of Turkish manufacturing industry," *Advances in Production Engineering And Management*, vol. 15, no. 1, pp. 57–68, Mar. 2020, doi: 10.14743/APEM2020.1.349.
- [59] Y. El Kihel, A. Zouggar Amrani, Y. Ducq, D. Amegouz, and A. Lfakir, "Methodology combining industry 4.0 technologies and KPI's reliability for supply chain performance," *Int J Comput Integr Manuf*, 2023, doi: 10.1080/0951192X.2022.2162605.
- [60] S. Konur, Y. Lan, D. Thakker, G. Morkyani, N. Polovina, and J. Sharp, "Towards design and implementation of Industry 4.0 for food manufacturing," *Neural Comput Appl*, 2021, doi: 10.1007/S00521-021-05726-Z.
- [61] F. M. Somohano-Rodríguez and A. Madrid-Guijarro, "Do industry 4.0 technologies improve Cantabrian manufacturing smes performance? The role played by industry competition," *Technol Soc*, vol. 70, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.TECHSOC.2022.102019.
- [62] G. Bortoluzzi, M. Chiarvesio, R. Romano, R. Tabacco, and V. Veglio, "Servitisation and performance in the business-to-business context: the moderating role of Industry 4.0 technologies," *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 33, no. 9, pp. 108–128, 2022, doi: 10.1108/JMTM-08-2021-0317.
- [63] M. S. B. Abd Rahman, E. Mohamad, and A. A. B. Abdul Rahman, "Development of IoT-enabled data analytics enhance decision support system for lean manufacturing process improvement," *Concurr Eng Res Appl*, vol. 29, no. 3, pp. 208–220, 2021, doi: 10.1177/1063293X20987911.
- [64] F. Khan Fasuludeen Kunju, N. Naveed, M. N. Anwar, and M. I. Ul Haq, "Production and maintenance in industries: impact of industry 4.0," *Industrial Robot*, vol. 49, no. 3, pp. 461–475, Apr. 2022, doi: 10.1108/IR-09-2021-0211.
- [65] G. C. Zutin, G. F. Barbosa, P. C. de Barros, E. B. Tiburtino, F. L. F. Kawano, and S. B. Shiki, "Readiness levels of Industry 4.0 technologies applied to aircraft manufacturing—a review, challenges and trends," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 120, no. 1–2, pp. 927–943, May 2022, doi: 10.1007/S00170-022-08769-1.
- [66] S. Hamdan, S. Almajali, M. Ayyash, H. Bany Salameh, and Y. Jararweh, "An intelligent edge-enabled distributed multi-task learning architecture for large-scale IoT-based cyber-physical systems," *Simul Model Pract Theory*, vol. 122, p. 102685, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.SIMPAT.2022.102685.
- [67] R. Črešnar, M. Dabić, N. Stojčić, and Z. Nedelko, "It takes two to tango: technological and non-technological factors of Industry 4.0 implementation in manufacturing firms," *Review of Managerial Science*, Apr. 2022, doi: 10.1007/S11846-022-00543-7.
- [68] A. Verma, A. Goyal, S. Kumara, and T. Kurfess, "Edge-cloud computing performance benchmarking for IoT based machinery vibration monitoring," *Manuf Lett*, vol. 27, pp. 39–41, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.MFGLET.2020.12.004.
- [69] S. V. Lakshmi, J. Janet, P. K. Rani, K. Sujatha, K. Satyamoorthy, and S. Marichamy, "Role and applications of IoT in materials and manufacturing industries – Review," *Mater Today Proc*, vol. 45, pp. 2925–2928, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.MATPR.2020.11.939.
- [70] H. Yang, S. Kumara, S. T. S. Bukkapatnam, and F. Tsung, "The internet of things for smart manufacturing: A review," *IIEE Trans*, vol. 51, no. 11, pp. 1190–1216, Nov. 2019, doi: 10.1080/24725854.2018.1555383.
- [71] S. Wadhwa, S. Rani, Kavita, S. Verma, J. Shafi, and M. Wozniak, "Energy Efficient Consensus Approach of Blockchain for IoT Networks with Edge Computing," *Sensors 2022*, Vol. 22, Page 3733, vol. 22, no. 10, p. 3733, May 2022, doi: 10.3390/S22103733.
- [72] M. Ammar, A. Haleem, M. Javaid, S. Bahl, and A. S. Verma, "Implementing Industry 4.0 technologies in self-healing materials and digitally managing the quality of manufacturing," *Mater Today Proc*, vol. 52, pp. 2285–2294, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2021.09.248.
- [73] M. M. Sadeeq, N. M. Abdulkareem, S. R. M. Zeebaree, D. M. Ahmed, A. S. Sami, and R. R. Zebari, "IoT and Cloud Computing Issues,

- Challenges and Opportunities: A Review,” *Qubahan Academic Journal*, vol. 1, no. 2, pp. 1–7, Mar. 2021, doi: 10.48161/QAJ.V1N2A36.
- [74] F. S. Costa *et al.*, “Fasten iiot: An open real-time platform for vertical, horizontal and end-to-end integration,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 19, pp. 1–25, Oct. 2020, doi: 10.3390/S20195499.
- [75] J. Stanke, M. Unterberg, D. Trauth, and T. Bergs, “Development of a hybrid DLT cloud architecture for the automated use of finite element simulation as a service for fine blanking,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 108, no. 11–12, pp. 3717–3724, Jun. 2020, doi: 10.1007/S00170-020-05567-5.
- [76] V. A. Nunes and G. F. Barbosa, “Simulation-based analysis of AGV workload used on aircraft manufacturing system: A theoretical approach,” *Acta Scientiarum - Technology*, vol. 42, no. 1, 2020, doi: 10.4025/ACTASCITECHNOL.V42I1.47034.
- [77] T. Coito *et al.*, “Integration of industrial IoT architectures for dynamic scheduling,” *Comput Ind Eng*, vol. 171, p. 108387, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.CIE.2022.108387.
- [78] S. Pasika and S. T. Gandla, “Smart water quality monitoring system with cost-effective using IoT,” *Heliyon*, vol. 6, no. 7, p. e04096, Jul. 2020, doi: 10.1016/J.HELIYON.2020.E04096.
- [79] P. Pop *et al.*, “The FORA Fog Computing Platform for Industrial IoT,” *Inf Syst*, vol. 98, p. 101727, May 2021, doi: 10.1016/J.IS.2021.101727.
- [80] A. A. B. Junior and M. J. Carrer, “Adoption of Industry 4.0 technologies: an analysis of small and medium-sized companies in the state of São Paulo, Brazil,” *Gestão & Produção*, vol. 29, p. e122, Nov. 2022, doi: 10.1590/1806-9649-2022V29E122.
- [81] T. Sutikno and D. Thalmann, “Insights on the internet of things: past, present, and future directions,” *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 20, no. 6, 2022, doi: 10.12928/TELKOMNIKA.v20i6.22028.
- [82] R. Contreras-Masse, A. Ochoa-Zezzatti, V. García, L. Pérez-Dominguez, and M. Elizondo-Cortés, “Implementing a novel use of multicriteria decision analysis to select iiot platforms for smart manufacturing,” *Symmetry (Basel)*, vol. 12, no. 3, Mar. 2020, doi: 10.3390/SYM12030368.
- [83] M. Fahmideh and D. Zowghi, “An Exploration of IoT Platform Development,” *Inf Syst*, vol. 87, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.is.2019.06.005.
- [84] M. J. Beliatas, K. Jensen, L. Ellegaard, A. Aagaard, and M. Presser, “Next Generation Industrial IoT Digitalization for Traceability in Metal Manufacturing Industry: A Case Study of Industry 4.0,” *Electronics 2021, Vol. 10, Page 628*, vol. 10, no. 5, p. 628, Mar. 2021, doi: 10.3390/ELECTRONICS10050628.
- [85] R. Gadekar, B. Sarkar, and A. Gadekar, “Key performance indicator based dynamic decision-making framework for sustainable Industry 4.0 implementation risks evaluation: reference to the Indian manufacturing industries,” *Ann Oper Res*, vol. 318, no. 1, pp. 189–249, Nov. 2022, doi: 10.1007/S10479-022-04828-8.
- [86] A. Aljinović, N. Gjeldum, B. Bilić, and M. Mladineo, “Optimization of industry 4.0 implementation selection process towards enhancement of a manual assembly line,” *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 1, Jan. 2022, doi: 10.3390/EN15010030.
- [87] A. Martikkala, B. Mayanti, P. Helo, A. Lobov, and I. F. Ituarte, “Smart textile waste collection system - Dynamic route optimization with IoT,” *J Environ Manage*, vol. 335, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2023.117548.
- [88] V. Pandey, A. Sircar, N. Bist, K. Solanki, and K. Yadav, “Accelerating the renewable energy sector through Industry 4.0: Optimization opportunities in the digital revolution,” *International Journal of Innovation Studies*, vol. 7, no. 2, pp. 171–188, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.IJIS.2023.03.003.
- [89] S. Nahavandi, “INDUSTRY 5 . 0 definition,” *Sustainability*, vol. 11, 2019.
- [90] P. Kumar, J. Bhamu, and K. S. Sangwan, “Analysis of Barriers to Industry 4.0 adoption in Manufacturing Organizations: An ISM Approach,” *Procedia CIRP*, vol. 98, pp. 85–90, 2021, doi: 10.1016/J.PROCIR.2021.01.010.
- [91] Y. Fernando, I. S. Ika, A. Gui, R. B. Ikhsan, F. Mergeresa, and Y. Ganesan, “A mixed-method study on the barriers of industry 4.0 adoption in the Indonesian SMEs manufacturing supply chains,” *Journal of Science and Technology Policy Management*, vol. ahead-of-print, no. ahead-of-print, 2022, doi: 10.1108/JSTPM-10-2021-0155/FULL/XML.
- [92] A. Raj, G. Dwivedi, A. Sharma, A. B. Lopes de Sousa Jabbour, and S. Rajak, “Barriers to the adoption of industry 4.0 technologies in the manufacturing sector: An inter-country comparative perspective,” *Int J Prod Econ*, vol. 224, p. 107546, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.ijpe.2019.107546.
- [93] S. Kumar, R. D. Raut, E. Aktas, B. E. Narkhede, and V. V. Gedam, “Barriers to adoption of industry 4.0 and sustainability: a case study with SMEs,” *Int J Comput Integr Manuf*, 2022, doi: 10.1080/0951192X.2022.2128217/SUPPL_FILE/TCIM_A_2128217_S M1706.DOCX.
- [94] X. T. Nguyen and Q. K. Luu, “Factors affecting adoption of industry 4.0 by small-and medium-sized enterprises: A case in Ho Chi Minh city, Vietnam,” *Journal of Asian Finance, Economics and Business*, vol. 7, no. 6, pp. 255–264, 2020, doi: 10.13106/JAFEB.2020.VOL7.NO6.255.
- [95] F. Rosin, P. Forget, S. Lamouri, and R. Pellerin, “Enhancing the Decision-Making Process through Industry 4.0 Technologies,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 1, Jan. 2022, doi: 10.3390/SU14010461.
- [96] N. Pappas, A. Caputo, M. M. Pellegrini, G. Marzi, and E. Michopoulou, “The complexity of decision-making processes and IoT adoption in accommodation SMEs,” *J Bus Res*, vol. 131, pp. 573–583, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.JBUSRES.2021.01.010.
- [97] G. Nota, F. D. Nota, D. Peluso, and A. T. Lazo, “Energy efficiency in Industry 4.0: The case of batch production processes,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 16, 2020, doi: 10.3390/su12166631.
- [98] L. Morris, A. Toro, L. Becerra, M. Granda, and M. Cardona, “MAPPING FOR THE STRENGTHENING OF PRODUCTIVE CAPACITIES IN TERMS OF PRODUCTIVITY INDICATORS OF THE METALWORKING SECTOR IN RISARALDA, COLOMBIA,” in *Proceedings from the International Congress on Project Management and Engineering*, 2022.
- [99] Z. M. Çınar, Q. Zeeshan, and O. Korhan, “A framework for industry 4.0 readiness and maturity of smart manufacturing enterprises: A case study,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 12, Jun. 2021, doi: 10.3390/SU13126659.
- [100] F. M. Abdullah, A. M. Al-Ahmari, and S. Anwar, “Analyzing Interdependencies among Influencing Factors in Smart Manufacturing,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 4, Feb. 2023, doi: 10.3390/SU15043864.
- [101] S. R. Bin Rahamaddulla, Z. Leman, B. T. H. T. Bin Baharudin, and S. A. Ahmad, “Conceptualizing smart manufacturing readiness-maturity model for small and medium enterprise (Sme) in malaysia,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 17, Sep. 2021, doi: 10.3390/SU13179793.
- [102] G. S. Kim and Y. H. Lee, “Transformation towards a smart maintenance factory: The case of a vessel maintenance depot,” *Machines*, vol. 9, no. 11, Nov. 2021, doi: 10.3390/MACHINES9110267.



Line Yasmín Becerra Sánchez. Es Ingeniera Electrónica, Especialista en Telecomunicaciones. Magíster en Ingeniería (Área Telecomunicaciones). Doctora en Ingeniería, en el área Telecomunicaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana. Actualmente es profesora asociada de tiempo completo de la Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Católica de Pereira e investigadora Asociada según Minciencias-Colombia del grupo de investigación Entre Ciencia e Ingeniería de la misma universidad. Sus áreas de interés son:

Telecomunicaciones, Ingeniería de tráfico, Enrutamiento, Redes Móviles, Internet, IPv6, Tecnologías 4.0. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0514-3919>.



Jorge Enrique Herrera Arroyave. Nació en Pereira, Risaralda- Colombia, el 06 de julio de 1980. Obtuvo el título de Ingeniero Mecánico en la Universidad Tecnológica de Pereira, Risaralda - Colombia, en 2010, su Maestría en Ingeniería Aeronáutica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, Monterrey, México, en 2015. Actualmente es estudiante de doctorado en Ciencias Físicas de la Universidad Tecnológica de Pereira, desde 2016 es profesor vinculado a la Facultad de Ciencias

Básicas e Ingeniería de la Universidad Católica de Pereira, Risaralda - Colombia. Su investigación ha estado relacionada con el diseño de máquinas, la dinámica estructural, las energías renovables y la manufactura. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6253-2593>.



Lloyd Herberth Morris Molina. Es ingeniero y magíster de la Universidad Nacional Experimental del Táchira en Venezuela, magíster de la Universidad de Alcalá y doctor en Ciencias Gerenciales de la Universidad de las Fuerzas Armadas. Antes de venir a Colombia, fue profesor de ingeniería industrial en la Universidad Nacional Experimental del Táchira en Venezuela, donde impartía cursos de producción.

Además, ocupó diferentes cargos administrativos como jefe de Tesorería y director de la Maestría en Dirección de Empresas, y presidente de la Caja de Ahorros UNET. Morris tiene 22 años de experiencia en educación superior en Colombia y Venezuela. Además, el Dr. Morris tiene varios años de experiencia en la industria de la ingeniería de fabricación, por ejemplo, en LAFARGE como director de fabricación. Actualmente es profesor de la Universidad Tecnológica de Pereira. El objetivo del Dr. Morris es mejorar los procesos en las operaciones de ingeniería mediante la incorporación de técnicas o herramientas matemáticas en los procesos de toma de decisiones para aumentar la productividad de los procesos operativos en entornos organizacionales. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5115-6855>.



Alonso Toro Lazo. Ingeniero de Sistemas y Telecomunicaciones por la Universidad Católica de Pereira (Colombia), Magíster en Gestión y Desarrollo de Proyectos de Software por la Universidad Autónoma de Manizales (Colombia), Ph.D en Big Data Management en la Universidad de Salerno (Italia). Actualmente es profesor auxiliar de tiempo completo de la Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería en la Universidad Católica de Pereira e investigador Asociado del grupo de investigación

Entre Ciencia e Ingeniería de la misma universidad. Entre sus principales áreas de investigación se encuentran la ingeniería de software, el aseguramiento de la calidad del software (SQA), el testing automatizado, Big data y tecnologías de la industria 4.0 (principalmente Inteligencia Artificial y Analítica de datos, Internet de las cosas para la industria –IIoT y Sistemas Ciber-físicos -CPS). El Prof. Toro es autor de más de 25 artículos en revistas indexadas y miembro de comités académicos internacionales como el CICCSI (Argentina), PMI capítulo Italia e IEEE Latinoamérica. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7593-8026>.