

Transition from Industry 4.0 to Industry 5.0 in the manufacturing sector: a systematic review

Ramirez Guija Oskart Teodoro¹; Alva Layza Mirian Aracelly²; Pimentel Apaico Linda Jazmin³

¹Magister, Universidad Privada del Norte, Perú, oskart.ramirez@upn.pe

²⁻³Students, Universidad Privada del Norte, Perú, N00315909@upn.pe, N00328006@upn.pe

Abstract—Industrial revolutions have traditionally prioritized operational efficiency and automation. However, Industry 4.0 (I4.0), centered on automation and digitalization, has imposed constant challenges on operators who must adapt to increasingly complex technological environments. Industry 5.0 (I5.0) emerges as a new paradigm in which workers adapt to environments featuring new technological systems and artificial intelligence. The objective of this study is to understand the transition from I4.0 to I5.0 in the manufacturing sector. To this end, a Systematic Literature Review (SLR) was conducted, following PRISMA guidelines and the PICO methodology. The search was limited to the Scopus database, selecting high-quality scientific articles from Quartile-ranked journals published between 2022 and 2026. Following a rigorous screening process of 406 articles and applying exclusion and inclusion criteria, 40 articles meeting the eligibility criteria were included. The analysis was complemented using bibliometric tools such as VOSviewer and Bibliometrix. The findings reveal that I5.0 does not replace I4.0, but rather extends its technological foundation (IoT, AI, Big Data). The results highlight an evolution toward I5.0, marking the shift from automated systems to sociotechnical systems. It is concluded that technology must serve as an ally that strengthens human creative capabilities and resilience.

Keywords-- Industry 4.0, smart manufacturing, Industry 5.0, human-robot collaboration.

Transición de la Industria 4.0 a la Industria 5.0 en el sector manufacturero: una revisión sistemática

Ramirez Guija Oskart Teodoro¹; Alva Layza Mirian Aracelly²; Pimentel Apaico Linda Jazmin³

¹Magister, Universidad Privada del Norte, Perú, oskart.ramirez@upn.pe

²⁻³Students, Universidad Privada del Norte, Perú, N00315909@upn.pe, N00328006@upn.pe

Resumen—Las revoluciones industriales han transformado han priorizado la eficiencia operativa y la automatización. No obstante, la Industria 4.0, se centraba en la automatización y digitalización, lo cual ha impuesto retos constantes a los operarios, quienes deben adaptarse a entornos tecnológicos cada vez más complejos, y surge la Industria 5.0 como un nuevo paradigma que adaptarse a un ambiente tiene nuevos sistemas tecnológicos y la inteligencia artificial. El objetivo de este estudio es comprender la transición de la Industria 4.0 hacia la Industria 5.0 en el sector manufacturero. Para ello, se realizó una revisión sistemática de la literatura (RSL), sustentada con un PRISMA y la metodología PICO. La búsqueda se limitó únicamente a la base de datos de Scopus y seleccionando artículos de alta calidad científica del Cuartil publicados entre el 2022 y 2026. Tras un riguroso proceso de cribado de 406 artículos, luego de aplicar los criterios de exclusión e inclusión, se incluyó 40 artículos que cumplían los criterios. El análisis se complementó con herramientas como VOSviewer y Bibliometrix. Los hallazgos revelan que la Industria 5.0 no reemplaza a la Industria 4.0, sino que amplía su base tecnológica (IoT, IA, Big Data). Los resultados destacan una evolución de la Industria 5.0, lo cual marca el paso de sistemas automatizados a sistemas sociotécnicos. Se concluye que la tecnología tiene que ser un aliado que fortalezca las capacidades creativas y la resiliencia del ser humano

Palabras clave—Industria 4.0, manufactura inteligente, industria 5.0, colaboración humano-robot

I. INTRODUCCIÓN

Las revoluciones industriales han representado momentos importantes y decisivos en la historia de la humanidad, transformando totalmente el estilo de vida que llevamos, dinámicas laborales y nuestras formas de interacción [3]. La primera revolución industrial marcó una era de mecanización potenciada por el aprovechamiento de los combustibles fósiles. Luego, la segunda revolución, consolidó el uso de electricidad como fuente de energía primaria e introdujo la fabricación a gran escala. La tercera revolución, se distinguió por la implementación de sistemas automatizados y uso de las tecnologías digitales. En la actualidad, la cuarta revolución industrial, todavía está en desarrollo y expansión, siendo impulsada por la inteligencia artificial, la robótica, sistemas de fabricación inteligentes, el análisis de big data y otras tecnologías emergentes, este campo integra tecnologías digitales para crear una industria más automatizada y conectada [2], [3], [4], [5], [6]. Mientras estas herramientas continúan transformando la manufactura, ya se vislumbra un nuevo paradigma: la Industria 5.0 (I5.0) o quinta revolución industrial, la cual se centra en la colaboración entre humanos y máquinas inteligentes, con énfasis de mejorar la sostenibilidad, el

bienestar social, la resiliencia y la compatibilidad ambiental en los procesos [7], [8], [9], [10], [11].

La Industria 4.0 o también conocida como la cuarta revolución o “I4.0”, proviene de un proyecto estratégico alemán que tenía como objetivo impulsar la digitalización de la fabricación y mediante ello ayudar a las pequeñas y medianas empresas, también se enfoca en la optimización de procesos y la eficiencia operacional [11]. Lo cual marcó el inicio de una nueva era en las empresas manufactureras, mediante la adopción de nuevas tecnologías digitales y automatizadas para los procesos industriales, lo que la establece como una alternativa clave para enfrentar problemas críticos [1], [7]. Este sector manufacturero es importante porque se encarga de transformar materias primas en productos terminados, promoviendo así el desarrollo económico y la innovación, pero también enfrenta diferentes problemas como; como el procesamiento de pedidos en tiempo real, la personalización masiva, la minimización del impacto de las fluctuaciones de la demanda y la reducción de las vulnerabilidades de los procesos [13]. Sin embargo, la aplicación de Industria 4.0 y la Industria 5.0 genera un impacto directo en el desempeño laboral de los empleados, dado que las industrias deben incorporar nuevas tecnologías emergentes para preservar su eficacia y competitividad en el mercado laboral, asimismo, los operarios tienen que adaptarse a las nuevas tecnologías, lo que viene siendo un reto constante para ellos, porque conforme va avanzando la tecnología, ellos deben estar en constante desarrollo de nuevas competencias y capacidades en sus roles operativos [8], [9], [10], [13].

La transición de I4.0 a I5.0 marca una evolución significativa en las organizaciones y como estas conciben la tecnología y producción; esta nueva etapa no se limita solamente a la automatización y digitalización, sino que, pretende reformular las prioridades industriales armonizando la eficiencia con la sostenibilidad, y fomentando la resiliencia y los valores centrados en el ser humano [1], [14]. Por otro lado, de la I4.0 a la I5.0 presenta desafíos continuos referente a la integración hombre-máquina, teniendo dificultad por parte de los operarios, por lo cual en la I5.0 se ve avances impulsando la adopción del diseño que este centrado en el ser humano [16]. La I5.0 surge a raíz de la perspectiva de I4.0, teniendo énfasis en la digitalización y la eficiencia productiva que es impulsada por la IA. [17]. La I5.0 constituye una oportunidad significativa para aportar de manera activa al sector industrial y consolidar un progreso sustentable. En este escenario, los sistemas de manufactura inteligentes y colaborativos asumen un rol

importante al incorporar los principios del Triple Bottom Line (TBL), al considerar simultáneamente los aspectos económicos, sociales y ambientales para garantizar la viabilidad a largo plazo [18].

Asimismo, la Industria 5.0 se caracteriza por la fabricación inteligente, sostenible y centrada en el ser humano a través de la adopción de tecnologías como robótica colaborativa (cobots), los gemelos digitales humanos (HDT) y la inteligencia colaborativa. Estas herramientas fortalecen la adaptabilidad, la sostenibilidad y el bienestar laboral mediante la colaboración humano-máquina [18].

A pesar del avance en publicaciones sobre Industria 5.0, subsisten lagunas significativas en el conocimiento científico. Es así como, distintos estudios abarcan la temática sin ofrecer una visión integral de la evolución de la industria 4.0 hacia la 5.0 en las empresas manufactureras, de igual forma, existen diferencias en metodologías y perspectivas que dificultan tener un consenso sobre los principales factores que propician esta transición. Por lo tanto, se considera oportuno llevar a cabo una revisión sistemática de la literatura (RSL), con el motivo de garantizar un enfoque estructurado del análisis de la literatura que sintetice los avances más relevantes sobre la evolución de la Industria 4.0 a la 5.0 en los últimos años, permitiendo detectar las tendencias emergentes, las brechas de conocimiento, los enfoques tecnológicos prevalentes y las oportunidades de optimización hacia una producción más sostenible y humanizada. A partir de lo expuesto, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es la transición de la industria 4.0 a 5.0 en empresas manufactureras?

El objetivo principal de la presente investigación es analizar de manera sistemática la transición de la industria 4.0 a la Industria 5.0 en empresas manufactureras, con el propósito de identificar las principales tecnologías, el rol del factor humano y los desafíos que surgen durante el proceso de transformación. Para alcanzar este objetivo, se establecieron objetivos específicos: Realizar un análisis exhaustivo de las investigaciones científicas entre el año 2022 al año 2025, de una sola base de datos (Scopus), con la finalidad de recopilar y profundizar los aportes más relevantes de la transición de la Industria 4.0 a la 5.0 e investigar las diferencias y el impacto en empresas manufactureras en la adopción de la Industria 4.0 a 5.0.

II. METODOLOGÍA

La presente investigación adopta un enfoque de revisión sistemática de la literatura (RSL), referente a la Transición de la Industria 4.0 hacia la Industria 5.0 en el sector manufacturero, lo cual se elabora a partir de un estudio riguroso que analiza y evalúa críticamente las diferentes metodologías y herramientas utilizadas en el artículo. Una revisión sistemática es un estudio de investigación que recopila, sintetiza y evalúa críticamente la información de múltiples artículos sobre un tema específico orientado a responder una pregunta en específico y las

diferentes informaciones proporcionadas por los artículos [15], [19].

A. Método PICO y protocolo PRISMA

La presente investigación se desarrolla bajo el enfoque mixto (cualitativo y cuantitativo) de nivel descriptivo, orientado a proporcionar una visión integral sobre la evolución tecnológica en el sector manufacturero. Para garantizar la rigurosidad científica del estudio, el proceso se estructuró siguiendo los lineamientos metodológicos del protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses), permitió el análisis sistemático de las evidencias existentes relativas a la transición entre la Industria 4.0 y la Industria 5.0. Con el propósito de delimitar el alcance del estudio, se estableció la siguiente interrogante ¿Cuál es la transición de la industria 4.0 a 5.0 en empresas manufactureras?

a) Preguntas de investigación

La pregunta de investigación se formuló y estructuró según los componentes de Problema, Intervención, Contexto y Resultado (PICO), se establecieron términos y palabras clave específicos para cada componente: la población (P) se delimito al sector manufacturero, la intervención (I) contempló el ecosistema de la Industria 4.0, la comparación (C) se enfocó en el proceso de transición y evolución y los resultados esperados (O) se centraron en identificar sinergias, sostenibilidad y centralidad humana. Para abordar la pregunta principal, se definieron las preguntas complementarias estructuradas bajo el mismo marco, que se pueden ver en la tabla I.

TABLA I
 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN SEGÚN MÉTODO PICO.

Q°	Pregunta de investigación	Motivación
P(1):	¿Cuál es la diferencia en la eficiencia operativa de las empresas manufactureras entre la implementación de la Industria 4.0 y la integración de la Industria 5.0?	Evaluar si la transición realmente mejora la eficiencia productiva
I(2):	¿Cómo la evolución tecnológica de la Industria 4.0 se alinea con la visión de la Industria 5.0 en el entorno manufacturero?	Analizar cómo las tecnologías de 14.0 sirven como base para la 15.0
C(3):	¿De qué manera la transición de la Industria 4.0 a la Industria 5.0 impacta a las empresas manufactureras?	Comprender los cambios y efectos que genera la adopción de 15.0 en las empresas
O(4):	¿Qué tecnologías habilitadoras resultan más relevantes en la transición desde la Industria 4.0 hacia la Industria 5.0 en la manufactura?	Determinar las tecnologías clave que impulsan realmente el paso a 15.0.

B. Estrategia de búsqueda y bases de datos

La recolección de datos se realizó mediante una búsqueda sistemática en la base de datos SCOPUS, seleccionada por su rigurosidad. La cadena de búsqueda principal utilizada fue: ("Industry 4.0" AND "Industry 5.0") AND (transition OR evolution OR transformation) AND manufacturing), en español sería ("Industria 4.0" Y "Industria 5.0") Y (transición O evolución O transformación) Y manufactura).

TABLA II
BÚSQUEDA DE PALABRAS CLAVE.

Combinaciones de cadenas de búsqueda	Base de Datos
(("Industry 4.0" AND "Industry 5.0") AND (transition OR evolution OR transformation) AND manufacturing) AND PUBYEAR > 2021 AND PUBYEAR < 2027 AND (LIMIT-TO (LANGUAGE, "English")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "cp") OR LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE, "ch") OR LIMIT-TO (DOCTYPE, "re") OR LIMIT-TO (DOCTYPE, "cr") OR LIMIT-TO (DOCTYPE, "ed"))	SCOPUS
	Cantidad de artículos encontrados
	Ecuación de búsqueda general (406 artículos de investigación en total)
	Tipo de documento
	Artículo de conferencia, Artículo, Review (Revisión)

a) Criterios de inclusión y exclusión (PRISMA)

El estudio abordó la pregunta de investigación utilizando la metodología PRISMA, la selección se rigió por criterios de inclusión y exclusión para asegurar la pertinencia técnica y la excelencia científica. Estos criterios, esenciales para la metodología, se exponen en la tabla III. Se incluyeron artículos originales y de revisión indexados en Scopus dentro del periodo 2022 – 2026, garantizando así la actualidad de los hallazgos respecto a la transición industrial. Con el fin de salvaguardar el rigor del análisis, la muestra se limitó a artículos cuyo indicador perteneciera al Cuartil I (Q1).

El proceso de cribado se ejecutó mediante la revisión sistemática de títulos, textos completos, resúmenes, excluyendo aquellos registros con acceso limitado o cuya línea de investigación fuera diferente, dado que no tendría coherencia ni mucho menos el alcance del estudio.

TABLA III
CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN EN LA BÚSQUEDA.

Criterios	Razones
Criterios de inclusión	
Publicaciones en inglés o español	Garantizar un acceso a investigaciones a nivel global de alta calidad.
Artículos publicados entre 2022 y 2026.	Asegurar la vigencia y la actualidad de las investigaciones para que los avances sean actuales.
Publicaciones cuyo indicador sea únicamente de Cuartil I	Garantizar la máxima calidad y rigor científico de la evidencia.
Estudios que presenten resultados cuantitativos y cualitativos.	Lograr una visión más profunda y completa.
Criterios de exclusión	
Artículos que solo muestren el abstract / resumen	No permite validar la metodología ni extraer datos completos.
Estudios que no estén enfocados en la Industria 4.0 y 5.0	Asegurar la pertinencia temática del estudio.
Investigaciones que no presenten datos o resultados aplicables a la Industria 4.0 y 5.0	No ofrecen evidencia empírica ni hallazgos concretos que contribuyan al estudio.
Estudios que sean diferentes a la línea de investigación	Garantizar la coherencia y el alcance del estudio.

En la Figura 1, basado en la metodología PRISMA. Este diagrama ilustra el flujo de registros a través de las diferentes fases de identificación, selección, elegibilidad e inclusión. En la fase inicial se identificaron 406 artículos de los cuales 215

artículos fueron descartados durante el cribado preliminar, resultando en 191 artículos. Tras la aplicación rigurosa de los criterios de elegibilidad, se excluyeron 151 documentos por diversas razones técnicas: 86 por carecer de datos aplicables a la industria 4.0 y 5.0, 50 por falta del enfoque al tema y 15 por pertenecer a líneas de investigación diferente al estudio. Finalmente, la revisión se consolida con 40 artículos incluidos, de los cuales cumplen estrictamente todos los criterios de rigor y pertinencia para el estudio.

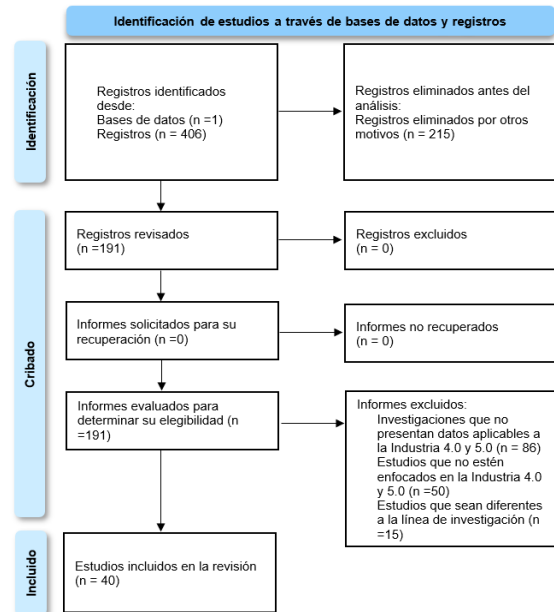


Fig. 1 Diagrama PRISMA

La figura 2 presenta el mapa de densidad basado en el análisis de co-ocurrencia de palabras clave obtenido del programa VOSviewer. Esta visualización permite identificar los clústeres temáticos predominantes. Las áreas con mayor intensidad cromática (tonalidades amarillas) representan una densidad mayor de términos con una interrelación significativa, mientras que las zonas en verde y azul evidencian temas con menor aparición. Se observa que los núcleos conceptuales “Industry 4.0” e “Industry 5.0” constituyen los ejes centrales de la red, lo que confirma su relevancia en la agenda científica actual sobre la evolución de los sistemas manufactureros. En el entorno de la Industria 4.0, predomina una infraestructura tecnológica basada en el internet de las cosas (IoT), gemelos digitales, manufactura inteligente e Inteligencia Artificial (IA). Por el contrario, el clúster de la Industria 5.0, evidencia una transición hacia dimensiones axiológicas vinculándose con el enfoque humano, resiliencia y colaboración humano-máquina. La cercanía de ambos núcleos muestra una integración evolutiva tecnológica que evoluciona hacia uno más sostenible y centrado en el ser humano, respaldado por nociones transversales como la manufactura sostenible, la economía circular y el Triple Bottom Line.

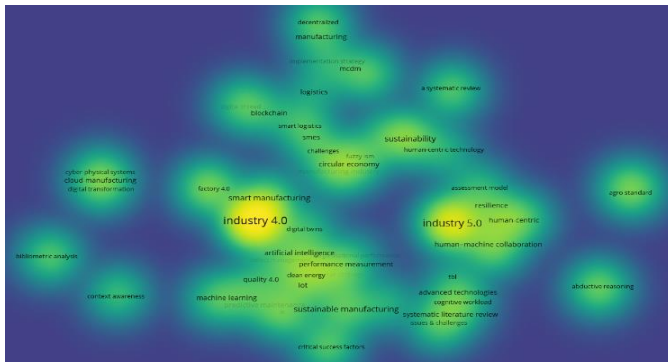


Fig. 2 Mapa de densidad de palabras clave

Se realizó la construcción de la red bibliométrica, incluyendo 153 palabras clave, elegidas a partir de un umbral mínimo de aparición de 3, obtenido de Scopus, esto facilitó que se genere una red estructurada con distintos clústeres temáticos (fig.3), las más reconocidas reflejan las líneas de investigación predominantes resaltando aspectos tecnológicos, organizacionales, sostenibles y centrados en el ser humano. Entre los términos más frecuentes destacan: “*Industria 4.0*”, “*Industria 5.0*”, “*Smart manufacturing*”, “*Sustainability*”, “*Human centric*”, “*Human-machine collaboration*”, “*Digital twins*”, “*Artificial intelligence*” y “*Circular economy*”.

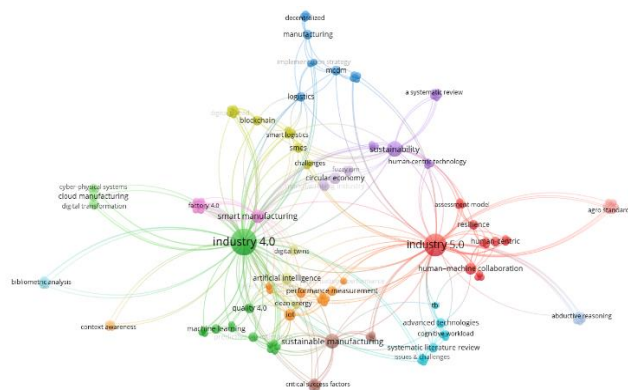


Fig. 3 Redes de coocurencia de palabras clave

III. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Análisis bibliométrico

a) Publicaciones por año

El análisis bibliométrico basado en la base de datos SCOPUS revela un crecimiento exponencial en la transición de la industria 4.0 a la 5.0 en el sector manufacturero ha cobrado relevancia. La Figura 4 ilustra la evolución cronológica de la producción de literatura académica sobre este tema a lo largo del tiempo desde principios del siglo XXI hasta la actualidad. El análisis cronológico revela dos fases distintivas. Entre 2001 y 2010, la producción mantuvo una estabilidad con un

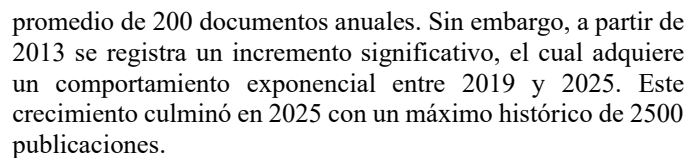


Fig. 4 Producción de literatura académica.

b) Publicaciones por país

En la Figura 5, presenta una comparativa de los 10 países con mayor producción científica entre los años 2022 y 2025. Mediante este análisis nos permite identificar la concentración de la literatura acerca de la transición de la Industria 4.0 hacia la 5.0.

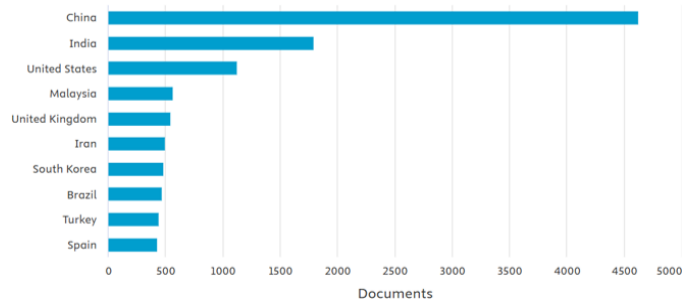


Fig. 5 Documentos por país.

Como se muestra en la Figura 5, revela un panorama de contrastes en la producción científica mundial. China lidera el ranking con más de 4500 documentos, cifra que triplica la producción de sus seguidores inmediatos: India (1800) y Estados Unidos (1100). A partir del cuarto lugar, el ranking se estabiliza y muestra cifras mucho más parejas: Malasia y Reino Unido con cifras cercanas a los 550 artículos, seguidos por Irán, Corea del Sur, Brasil, Turquía y España, cuyas contribuciones mantienen un ritmo constante entre los 500 y 420 documentos. Esta concentración evidencia el dominio de las economías asiáticas y occidentales en la carrera hacia la Industria 5.0.

c) Mapa mundial de colaboración entre países

El panorama mundial muestra publicaciones distribuidas en aproximadamente 60 países, consolidando un total de 235 colaboraciones internacionales, Teniendo a ponencias como Estados Unidos, China, India, Alemania y el Reino Unido actuando como los nodos principales de esta estructura científica. Destacan sólidas colaboraciones bilaterales entre

Estados Unidos, India, China y países europeos, lo que confirma la consolidación de un ecosistema de investigación.

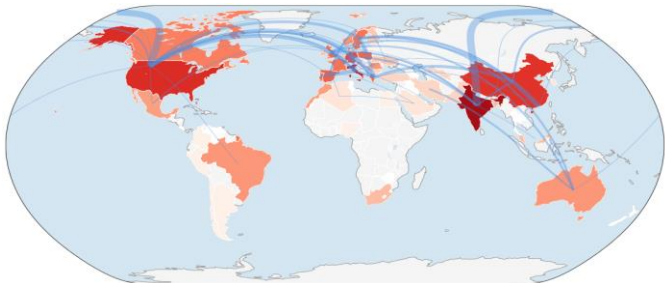


Fig. 6 Colaboración de países en la producción de la literatura

En la Figura 6, el trazado y grosor de las líneas azules evidencian la fuerza de los vínculos internacionales, a mayor espesor, mayor es la producción conjunta entre naciones. Este patrón no solo refleja una creciente internalización de la investigación, sino que se ha convertido en un diálogo abierto y colaborativo entre países.

d) Evolución anual de documentos por revista (2022–2026)

La Figura 7, detalla el dinamismo de las editoriales más influyentes entre 2022 y 2026. El volumen principal concentra en IFIP Advanced in Information and Communication Technology, con 21 publicaciones, seguido por Applied Sciences (Switzerland) (20) y Procedia Computer Science (17). Otras fuentes con participación relevante incluyen Lecture Notes in Networks and Systems (13) y Lecture Notes in Mechanical Engineering (12). La tendencia refleja un aumento continuo en la literatura científica, enfocado en áreas relacionadas con tecnologías digitales, manufactura inteligente e ingeniería industrial.

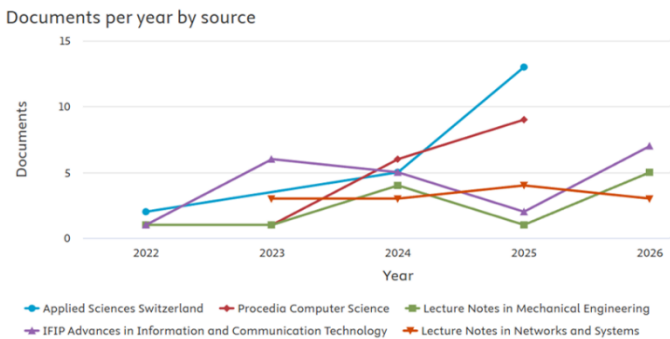


Fig. 7 Número de documentos por revista y año

e) Mapa temático

El mapa temático revela la arquitectura del conocimiento en la transición hacia la Industria 5.0, clasificando los conceptos según su centralidad (relevancia) y densidad (desarrollo técnico). La figura 8 visualiza cuatro cuadrantes, en el primero, el superior izquierdo están los temas nichos que están bien desarrollados, pero cuentan con menor conexión.

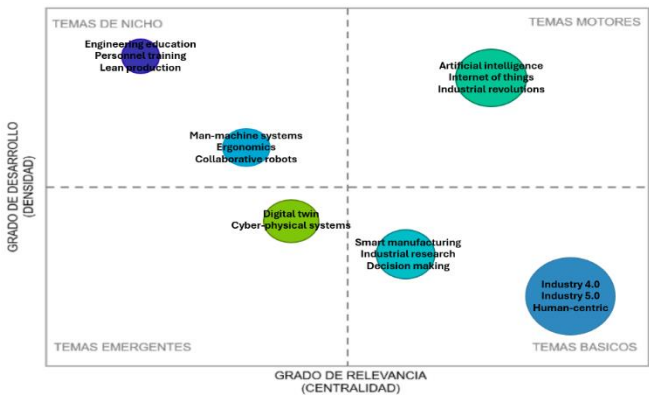


Fig. 8. Mapa temático a partir de los artículos seleccionados

Dentro se identificaron dos burbujas, conteniendo la más pequeña, temas de engineering education, personnel training y lean production, mientras que la mediana contiene temas como man machine systems, ergonomics, collaborative robots. Respecto a la Educación en Ingeniería y Formación de Personal, existe una necesidad crítica de programas de reskilling (reciclaje) y upskilling (mejora de habilidades) [20], [21]. Las fuentes señalan que el éxito de la transición industrial precisa en formar trabajadores capaces de colaborar con sistemas inteligentes y manejar la carga de trabajo cognitiva [5], [16], [20]. Además, menciona el Lean Production, que, a pesar de ser una metodología madura, su evolución hacia la “Lean 4.0” es vital para eliminar desperdicios a través de herramientas digitales, incorporándose ahora con prácticas de Economía Circular para mejorar el desempeño sostenible [19],[22],[23]. Asimismo, los Robots Colaborativos (cobots) y Sistemas Hombre-máquina aparecen como tecnologías clave para la simbiosis industrial [21], [24]. En contraste a los robots tradicionales, estos han sido creados para colaborar de manera segura con el personal, potenciando la precisión operativa y mitigando la fatiga ergonómica [18], [21].

En el segundo cuadrante superior derecho, se ubican los temas motores siendo de mayor impacto, ya que son los pilares que impulsan el campo de estudio. Cuenta con una burbuja con temas como “artificial intelligence” y “internet of things”, estas tecnologías se consolidan como habilitadores del cambio [18]: la IA se proyecta como un nuevo factor de producción en modelos económicos globales [4], y el IoT habilita la conectividad masiva para monitoreos en tiempo real [25]. Paralelamente, la idea de “industrial revolutions” se desempeña como un motor de impulso; en Latinoamérica, se adopta como un mecanismo para reducir la desigualdad tecnológica y potenciar la competitividad a nivel global.

En el tercer cuadrante inferior izquierdo están los temas emergentes, los cuales cuentan con menor desarrollo, debido a que las áreas están comenzando a nacer o puede que estén perdiendo relevancia en la industria. Asimismo, la burbuja contiene temas como: digital twin y cyber-physical systems. Los Gemelos Digitales (Digital Twin) y Sistemas Ciberfísicos

(CPS) facilitan la integración del mundo físico y virtual [5], [25]. En la transición hacia la 5.0, evolucionan a Gemelos Digitales Humanos (HDT). Estos sistemas permiten simular tanto el funcionamiento de las máquinas como las condiciones físicas y cognitivas de los trabajadores, situando la seguridad como un valor central del diseño industrial [1], [18], [23].

El cuarto cuadrante inferior derecho, agrupa los pilares transversales del campo. Las burbujas más grandes representan mayor concentración de investigación en los temas de Industry 4.0, Industria 5.0 y human-centric. Mientras que la 14.0 se enfoca en la optimización técnico-económica y la automatización, la 15.0 surge como una evolución que integra valores sociales y ambientales [18], [21], [27], edificando sobre la base tecnológica previa para alcanzar objetivos de sostenibilidad y resiliencia [21], [24], [28]. Asimismo, Human-Centric (Centricidad Humana), es el corazón de la industria 5.0 [21], [24], planteando que la tecnología debe ajustarse a las necesidades del trabajador, fomentando el bienestar, seguridad, e inclusión, en vez de la sustitución de personal por máquinas [21], [28]. Finalmente, la toma de decisiones y el Smart

Manufacturing aplican la analítica de datos para desarrollar cadenas de suministro resilientes y adaptables ante crisis globales [9], [26], [27].

El mapa temático refleja que la industria está desplazando sus motores técnicos hacia una base ética y social, para que la transición sea eficaz, las empresas deben vencer paradojas como la de “automatización vs. aumento”, garantizando que las tecnologías emergentes fomenten la creatividad humana en vez de marginarla [21]. Es primordial este equilibrio para lograr una manufactura eficiente, sostenible y resiliente a lo largo del tiempo [12].

B. Análisis de la transición de la Industria 4.0 a la Industria 5.0

a) Síntesis General de la Literatura seleccionada

Para sintetizar los hallazgos de la revisión, la Tabla IV presenta una comparación de los estudios más relevantes según sus hallazgos, herramientas clave de la transición a la industria 5.0 y aportes al sector manufacturero.

TABLA IV
TABLA COMPARATIVA DE SÍNTESIS DE ESTUDIOS

Ref.	País/ Sector	Metodología	Herramientas clave	Hallazgos Principales	Brecha identificada	Contribución a la transición
[29]	India / Fundición	Modelo de Ensamble Ponderado Dinámico (DWE)	Machine Learning Sensores IoT, IA adaptativa	El modelo DWE logra un 93% de precisión, superando en un 2.3% a los modelos estáticos individuales	Los modelos individuales no capturan bien las fluctuaciones no lineales no se adaptan a la variabilidad del taller	Mejora la toma de decisiones autónoma y resiliente, contribuyendo a la reducción de desperdicios.
[30]	México / Manufactura	Empírico: PLS-SEM (338 empresas)	IA, Big Data, 5G, Sensores	El desempeño sostenible aumenta sustancialmente cuando la 14.0 y la Economía circular (EC) se adoptan.	Falta de evidencia sobre la EC como mediadora en economías emergentes	Cuantifica la urgencia del cambio ante un impacto ambiental del 15% del PBI.
[1]	Latinoamérica /General	RSL y análisis de datos secundarios	IoT, IA, Cloud Computing	Existe una brecha digital crítica en Latam respecto a Europa y Asia debido a la falta de políticas de infraestructura	Necesidad de un análisis regional de barreras específicas para PYMES manufactureras	Propone una hoja de ruta para cerrar la brecha tecnológica y potenciar la competitividad regional
[31]	España / General	Revisión sistemática de literatura y panel de expertos	Teoría sociotécnica (STT)	Propone un modelo holístico para evaluar la preparación hacia la Industria 5.0	Ausencia de marcos integrados que articulen simultáneamente dimensiones humanas y ambientales	Define la transición como una evolución axiológica y propone métricas de madurez organizacional
[32]	Rumania- Portugal / Vitivinícola	Enfoque cuantitativo: ANOVA y SEM	Robótica y enfoque TBL (Triple Bottom Line)	El volumen de producción y la fortaleza del mercado interno influyen significativamente en la competitividad exportadora	Limitada aplicación de modelos de sostenibilidad en sectores industriales tradicionales	Extiende el enfoque TBL como herramienta para integrar sostenibilidad en la transición hacia Industry 5.0
[28]	Omán / Automotriz	Enfoque cualitativo abductivo y MCDM	Capacidades dinámicas (DCs)	El liderazgo transformacional y la empatía digital fortalecen la resiliencia organizacional	Escasa investigación sobre capacidades dinámicas en el sector de repuestos automotrices	Transforma fábricas inteligentes en fábricas sociales inteligentes
[25]	Arabia Saudita / Manufactura	Cuantitativo: Cross- sectional (300 empresas)	XG Boost, Random Forest, Blockchain	El Blockchain es la tecnología más importante (0.395) para la trazabilidad ética	Los beneficios de las tecnologías 4.0 suelen analizarse de forma individual, no sinérgica	Evidencia el efecto multiplicador de la IA, IoT y BC en la sostenibilidad
[12]	España /Gestión de la cadena de suministro	Enfoque cualitativo: 25 entrevistas a directivos	Cobots, Human Digital Twin (HDT), Blockchain	El liderazgo proactivo y la EC actúan como principales impulsores de la resiliencia en la cadena de suministro	Limitada evidencia empírica sobre la operacionalización de los principios de Industry 5.0 en entornos de SCM	La colaboración humano- máquina es como un catalizador clave para la competitividad y resiliencia
[10]	Global / Energía	Modelo híbrido (FDM, BWM, DEMATEL)	Exosqueletos, Mixed Reality	Colaboración humano-máquina impacta más en sostenibilidad energética	Falta claridad sobre cómo 15.0 cumple promesas en sectores críticos	Vincula tecnología con descarbonización industrial (ODS 7 y 13)
[33]	Global / Programación	RSL y Framework conceptual	Algoritmos de despacho, IA	Programación debe considerar fatiga humana para ser sostenible	Modelos actuales ignoran factor humano en el taller	Transforma eficiencia técnica en eficiencia centrada en el humano
[34]	Global / Manufactura General	Survey del Estado del Arte	IA colaborativa, Cobots	IA en 15.0 debe ser ética y evitar desplazamiento masivo	Necesidad de arquitecturas de IA que respeten privacidad y autonomía	Define Inteligencia Colaborativa como motor humano de la fábrica
[35]	Global / PYMES	RSL y Análisis Bibliométrico	Tecnologías núcleo 14.0/15.0	PYMEs enfrentan tensiones entre ambición política y recursos	Carencia de marcos unificados para los 6 pilares 15.0	Provee recomendaciones para políticas públicas inclusivas

[6]	Global / Mantenimiento	RSL (86 artículos seleccionados)	IA Híbrida, Machine Learning	El 49% de los fallos se deben a herramientas	Fallos solo mitigable con analítica híbrida	Propone la IA Explicable para mejorar la toma de decisiones
[36]	Global / Multi-sector	Survey tecnológico extensivo	Edge, 6G, Cobots, IoT	La I5.0 trae de vuelta el "toque humano" y la personalización masiva a escala	Falta de marcos de integración que pongan en práctica las tecnologías emergentes	Clasifica las tecnologías de frontera para la centricidad humana
[17]	Italia / Mantenimiento	RSL siguiendo directrices PRISMA	Realidad Aumentada (AR)	La sobrecarga cognitiva es un riesgo crítico del "Operario 5.0" que la I4.0 no ha resuelto	Falta de metodología industrial que considere el bienestar psicológico del trabajador	Define el bienestar del operario como el núcleo de la eficiencia operativa en la I5.0

La síntesis comparativa (Tabla IV) revela que una gran proporción de los estudios aún se centra en las tecnologías de la Industria 4.0, en particular la automatización, la inteligencia artificial y la optimización de procesos. Sin embargo, un número considerable de estudios se sitúa en la etapa de transición, integrando capacidades tecnológicas con la sostenibilidad y los enfoques centrados en el ser humano. Solo un subconjunto menor de estudios aborda explícitamente la Industria 5.0, haciendo hincapié en el diseño centrado en el ser humano, la resiliencia y la sostenibilidad social. Esta distribución sugiere que la transición hacia la Industria 5.0 aún está en desarrollo y no se ha consolidado completamente en el sector manufacturero.

b) Respuestas a las preguntas PICO planteadas

El análisis de los 40 artículos incluidos en esta revisión permitió abordar las interrogantes de la metodología PICO y contribuir a la delimitación de conceptos clave relacionados con la transición tecnológica y organizacional de la industria 4.0 a la industria 5.0 en el sector manufacturero.

P(1): ¿Cuál es la diferencia en la eficiencia operativa de las empresas manufactureras entre la implementación de la Industria 4.0 y la integración de la Industria 5.0?

La industria 4.0 describe la eficiencia operativa mediante la optimización técnica-económica, primando la automatización masiva, la digitalización y el empleo de sistemas ciberfísicos (CPS), para minimizar costes y tiempos de producción a través de decisiones autónomas de las maquinarias [2], [12], [30]. Así, el desempeño es medido por el retorno de inversión (ROI) y la facultad de los sistemas para funcionar sin depender de la presencia humana [2], [12], [37]. Por otro lado, la industria 5.0 trasciende la eficiencia técnica para incluir el modelo Triple Bottom Line (TBL), donde el éxito operativo se evalúa por el balance entre el desempeño de la economía, el bienestar social y la sostenibilidad ambiental [12], [18], [24], [30], [32]. A diferencia de la 4.0, centrada en la autonomía de los sistemas, la 5.0 apuesta por la colaboración estratégica y sinérgica hombre-robot, facilitando que la creatividad del humano sea el motor que permita adaptar la producción masiva a las demandas individuales, garantizando operaciones que puedan resistir crisis globales mediante una gestión sostenible y resiliente [2], [12], [18], [24]. Incluso el estudio de [5], llamado "Harnessing AI for smart manufacturing: insights from Industry 4.0" sugiere que la Industria 5.0 no reemplaza las mejoras en la eficiencia operativa

obtenidas en la I4.0, sino que profundiza y extiende su alcance. La industria 5.0 amplía el enfoque, integrando sostenibilidad, resiliencia organizacional y el bienestar de los trabajadores.

I(2): ¿Cómo la evolución tecnológica de la Industria 4.0 se alinea con la visión de la Industria 5.0 en el entorno manufacturero?

La industria 5.0 no es un reemplazo de la 4.0, sino una extensión evolutiva, la cual usa su base infraestructural [12], [18], [24]. Las tecnologías de la fase 4.0, como el Internet de las Cosas (IoT), la Inteligencia Artificial (IA) y el Big Data, se comportan como el soporte imprescindible para que la visión de la 5.0 se materialice [20]. La alineación surge al redirigir la hiperconectividad y la analítica hacia un paradigma de valor humano, es decir, centrado en las personas. Así, el IoT evoluciona hacia sistemas capaces de monitorear también del bienestar del personal y deja de limitarse al control de las máquinas, siendo capaz ahora de lograr la eficiencia energética sostenible y logrando que la innovación tecnológica se integre con la responsabilidad social, ética y ambiental [12], [18], [24].

En añadidura, la industria 4.0 en los últimos años se está fortaleciendo en varios países industrializados renovando la fuerza laboral del mundo. Las tecnologías de la I4.0 aplicadas en países desarrollados son de gran relevancia para la I5.0, puesto que busca producir fábricas sociales inteligentes y una sociedad en la que se exploten las ventajas del espacio virtual, siendo articularlas con las dinámicas del mundo físico [3]. La I5.0 vuelve a orientar la utilización de estas tecnologías hacia objetivos más complejos, integrando principios de colaboración humano-máquina, y el enfoque centrado en el ser humano. En el sector manufacturero, se traduce en pasar de sistemas muy automatizados a sistemas sociotécnicos, buscando que estas tecnologías no los reemplacen, sino que fortalezcan las capacidades del humano [5].

C(3): ¿De qué manera la transición de la Industria 4.0 a la Industria 5.0 impacta a las empresas manufactureras?

La transición impacta a las empresas, pues esta implica la exigencia de transformaciones culturales y estratégicas profundas, que van más allá de solo una actualización técnica [12]. Es más, para lograr la transición, los países involucrados deben resolver primero sus conflictos globales y locales. Resultando imprescindible a la vez entender cada situación que atraviese cada país [3]. Asimismo, si bien las transformaciones digitales son complejas de replicar en escala en las fábricas, la exigencia por lograr resultados es significativa [38].

Dentro de los impactos, podemos encontrar algunos críticos como ocurre en la fuerza laboral, donde se genera una presión crítica en la gestión del talento para implementar programas de reskilling y upskilling, convirtiendo al personal en operarios expertos en colaboración con sistemas inteligentes pues está estimado que muchas de las tareas actuales podrían cambiar debido a la automatización. Es así, que el trabajador deja de verse como un costo para ser una inversión estratégica. Del mismo modo, las empresas enfrentan presión por moverse hacia el modelo Triple Línea de Base (TBL) [32], para el equilibrio de su comportamiento económico, social y ambiental. También, la adopción de prácticas de Economía Circular en las empresas manufactureras deja de ser opcional para transformarse en un motor de competitividad a largo plazo, donde, además, tecnologías como la fabricación aditiva (3D) y el blockchain se usan para minimizar el desperdicio de material, garantizando una trazabilidad ética de suministros e impulsar el reciclaje en ciclos cerrados [1], [22], [35]. En Latinoamérica, las pequeñas empresas (pymes), enfrentan barreras representativas como la falta de recursos financieros, inadecuada infraestructura y brechas en habilidades del mundo digital.

Asimismo, la transición obliga a las empresas a construir Capacidades Dinámicas (DCs) para adelantar y recuperarse de crisis globales, como pandemias o interrupciones en la cadena de suministro; su impacto se muestra en la utilización de los Gemelos Digitales para simular escenarios de riesgo y optimizar la toma de decisiones en tiempo real lo que permite una manufactura más ágil y moldeable a las fluctuaciones del mercado. En contraste con la I4.0, la I5.0 pone énfasis en la salud física y mental del personal, lo que impacta el diseño de los sistemas industriales, donde se busca ahora disminuir la carga de trabajo cognitiva (CWL) para prevenir el agotamiento y estrés, permitiendo que las interfaces ayuden al operario en lugar de abrumarlo [1], [12], [18], [21], [22], [30], [35].

En la Tabla V, se presentan ejemplos de los impactos de la transición de la industria 4.0 a la I5.0 en la literatura estudiada.

TABLA V
MÉTRICAS DE IMPACTO EN LA TRANSICIÓN INDUSTRIAL

Categoría de Impacto	Magnitud (%)	Contexto del Impacto Analizado	Fuente
Seguridad Laboral	32% de reducción	Reducción de daños ocupacionales mediante la integración IoT y Responsabilidad (I5.0)	[3]
Carga cognitiva	73.2% del personal	Los trabajadores de mantenimiento reportan niveles críticos de estrés mental en escenarios complejos.	[17]
Disponibilidad de Equipo	Mejora del 30% a 50%	La aplicación de mantenimiento predictivo basado en IA reduce los tiempos de inactividad de los equipos.	[36]
Precisión de Pronósticos	85% de incremento	El uso de Big Data y algoritmos de IA eleva la exactitud de las predicciones de demanda.	[38]
Transformación de tareas	33.3% (1/3)	Parte de las actividades laborales experimentará cambios sustanciales debido a la automatización inteligente.	[39]

O(4): ¿Qué tecnologías habilitadoras resultan más relevantes en la transición desde la Industria 4.0 hacia la Industria 5.0 en la manufactura?

La transición hacia la Industria 5.0 en la manufactura no invalida las bases tecnológicas de la Industria 4.0, en cambio, las reorienta desde un enfoque de optimización técnico-económica hacia un diseño centrado en el ser humano, sostenible y resiliente [34], [39], [20]. En la tabla VI, se presentan algunas de las tecnologías habilitadoras más críticas en este proceso de transformación industrial:

TABLA VI
TABLA COMPARATIVA: TECNOLOGÍAS HABILITADORAS (PC4)

Tecnología Habilitadora	Función en Industria 4.0 (Eficiencia)	Evolución en Industria 5.0 (Sostenibilidad y Resiliencia)	Ref.
EL INTERNET DE LAS COSAS (IoT)	- Recolección masiva de datos y trazabilidad de activos, coordinación de la demanda y procesamiento de máquinas [22].	- IoT centrado en el ser humano - Internet de todas las cosas (IoE) - Soporte para la seguridad del trabajador [18], [36] - Productividad de activos [25]	[22], [40], [24], [36], [25]
INTELIGENCIA ARTIFICIAL (IA) Y MACHINE LEARNING	- Optimización de procesos, toma de decisiones autónoma de máquinas [29] - Predicción analítica precisa [22]	- Toma de decisiones socio-ambientales e inteligente - Apoyo a la creatividad humana - IA ética y explicable (XAI) [17], [31], [41]	[21], [18], [25], [28]
SISTEMAS CIBERFÍSICOS (CPS/SFC)	- Integración de procesos físicos con computación para autonomía de máquinas [42]	- Sistemas Ciberfísicos Humanos (H-CPS) se adapta a necesidades. - Simbiosis hombre máquina para decisiones éticas [18], [36]	[1], [4], [38], [5], [42]
GEMELOS DIGITALES (DIGITAL TWINS)	- Optimización y simulación de procesos físicos - Réplicas virtuales de activos físicos para monitoreo, [22]	- Gemelos Digitales Humanos (HDT) - Simulación de la interacción humano-máquina. - Personalización del diseño [43]	[26], [12], [18], [20], [43]
ROBÓTICA COLABORATIVA (COBOTS)	- Automatización de tareas repetitivas en entornos aislados para maximizar velocidad [11].	- Coworking humano-máquina - Seguros, aumentan destreza humana y reducen la fatiga ergonómica [36].	[5], [11], [32], [5], [18]
REALIDAD EXTENDIDA (AR/VR) Y METAVERSO	- Visualización de diseños y asistencia técnica remota básica [11], [17], [38]	- Empoderamiento del trabajador - Entornos inmersivos para capacitación avanzada y diseño ergonómico [26]	[11], [26], [38], [26]
COMPUTACIÓN EN LA NUBE (CLOUD Y EDGE COMPUTING)	- Acceso a red bajo demanda a grupos compartidos de recursos y servicios de TI configurables [30]	- Cloud Manufacturing orientado al servicio y acertado - Resiliencia operativa y conectividad de ultra-baja latencia (6G)	[42], [11], [13], [42]
BLOCKCHAIN (CADENA DE BLOQUES)	- Seguridad de datos - Transparencia operativa en redes industriales descentralizadas [8], [45].	- Trazabilidad ética y Economía Circular [17], [19] - Certificación de energía limpia - Enfoque compartimentado [45]	[8], [24], [32], [45]

Mientras que la I4.0 se centró en la digitalización, la automatización masiva y la interconexión de sistemas ciberfísicos para aumentar ganancias, la 5.0 usa las mismas herramientas para impulsar la creatividad humana y avalar el bienestar humano [27], [33], [36]. Estas tecnologías funcionan como puentes para pasar de fábricas inteligentes a ambientes socio-técnicos, donde la tecnología sirve a la Sociedad [24], [28], [39]. Respecto a la IA ética y los HDTs, en la I5.0 esta se convierte en inteligencia colaborativa que respeta la privacidad y usa HDTs para mantener segura la interacción humana [29],

[37], [6]. En la manufactura 5.0, el blockchain es el habilitador clave para la resiliencia de la cadena de suministro, permitiendo una trazabilidad que garantiza que los productos sean reciclables y procedan de fuentes éticas, ahilándose con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS)[13], [27], [45]. Además, la conectividad de ultra-fibilidad (6G) y el Edge Computing aseguran que los sistemas monitoreen el bienestar social y contesten a la necesidad humana e interrupción del entorno, enriqueciendo la resiliencia sistemática [36], [12].

c) Propuesta de Marco Conceptual para la Transición I4.0 - I5.0

Como resultado de la síntesis de la literatura, se propone un marco conceptual representado en una estructura piramidal (Fig. 9), que describe la transición progresiva hacia la Industria 5.0. En la base, se sitúa la infraestructura tecnológica de la Industria 4.0 (IoT, IA, CPS), que constituye el soporte indispensable para el desarrollo posterior. Sobre este cimiento, se articulan las capacidades organizacionales y el enfoque centrado en el ser humano, orientado a que la tecnología no solo aumente la eficiencia de los procesos, sino que potencie el talento operativo. Por último, la cúspide refleja el nivel de madurez alcanzado, donde la sostenibilidad y la resiliencia se convierten en los resultados estratégicos del sistema, logrando un equilibrio entre la productividad empresarial y el bienestar social.



Fig. 9. Marco conceptual propuesto para la transición hacia la Industria 5.0

La estructura piramidal permite a las PYMEs visualizar una ruta de inversión lógica, asegurando la estabilidad tecnológica y operativa antes de avanzar hacia objetivos estratégicos de sostenibilidad. Esto facilita una hoja de ruta clara para alcanzar la madurez digital de forma incremental.

VI. CONCLUSIONES

El presente estudio, evidenció que el proceso analizado de transición de la Industria 4.0 a la 5.0 en el sector manufacturero, presenta una evolución progresiva y no una sustitución tecnológica. La industria 5.0 se construye sobre la infraestructura digital de la I4.0, redirigiendo sus competencias hacia una perspectiva centrada en el hombre, sostenible y resiliente. Los resultados exponen que, si bien la industria 4.0

permitió importantes avances en la eficiencia operativa con ayuda de la automatización, la digitalización, entre otros, la industria 5.0 expande el paradigma al adicionar el modelo Triple Bottom Line, adhiriendo objetivos económicos, sociales y ambientales. En ese escenario, la eficiencia ya no estaría medida solo por la productividad y el retorno de inversión, sino también por la resiliencia organizacional, la adaptabilidad ante entornos dinámicos y el bienestar de los trabajadores. En adición, se identificaron que las tecnologías habilitadoras mencionadas siguen siendo esenciales, pero evolucionan promoviendo la colaboración humano-máquina para la transición hacia entornos manufactureros más inclusivos y sostenibles. Desde el ámbito organizacional, la transición hacia la Industria 5.0 involucra un cambio en la cultura corporativa, ya que no se trata de instalar la tecnología para reemplazar al personal si no que desarrollar el potencial de las personas.

REFERENCIAS

- [1] G. D. Rueda-Carvajal, O. A. Tobar-Rosero, G. J. Sánchez-Zuluaga, J. E. Candelo-Becerra, and H. A. Flórez-Celis, "Opportunities and Challenges of Industries 4.0 and 5.0 in Latin America," *Sci* 2025, Vol. 7, Page 68, vol. 7, no. 2, p. 68, May 2025, doi: 10.3390/SCI7020068.
- [2] E. Salatiello, S. Vespoli, G. Guizzi, and A. Grassi, "Long-sighted dispatching rules for manufacturing scheduling problem in Industry 4.0 hybrid approach," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 190, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.cie.2024.110006.
- [3] A. P. Ihimbazwe Ndanguza, "Managerial Competence in Integrating Industry 4.0 with Corporate Social Responsibility for Enhanced Safety Culture in Manufacturing," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 17, no. 10, May 2025, doi: 10.3390/su17104678.
- [4] D. G. Lindberg, "Harnessing AI for smart manufacturing: insights from Industry 4.0," *Discover Artificial Intelligence*, vol. 5, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1007/s44163-025-00363-0.
- [5] Z. Shakeri, K. Benfriha, M. Varmazyar, E. Talhi, and A. Quenehen, "Production scheduling with multi-robot task allocation in a real industry 4.0 setting," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1038/s41598-024-84240-3.
- [6] M. Mokhtarzadeh, J. Rodríguez-Echeverría, I. Semanski, and S. Gautama, "Hybrid intelligence failure analysis for industry 4.0: a literature review and future perspective," *J. Intell. Manuf.*, vol. 36, no. 4, pp. 2309–2334, Apr. 2025, doi: 10.1007/s10845-024-02376-5.
- [7] B. Tanane, M. L. Bentaha, B. Dafflon, and N. Moalla, "Bridging the gap between Industry 4.0 and manufacturing SMEs: A framework for an end-to-end Total Manufacturing Quality 4.0's implementation and adoption," *J. Ind. Inf. Integr.*, vol. 45, May 2025, doi: 10.1016/j.jii.2025.100833.
- [8] A. Zahid, P. Leclaire, L. Hammadi, R. Costa-Affonso, and A. El Ballout, "Exploring the potential of industry 4.0 in manufacturing and supply chain systems: Insights and emerging trends from bibliometric analysis," *Supply Chain Analytics*, vol. 10, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.sca.2025.100108.
- [9] W. Ochoa, J. Cuenca, F. Larrinaga, and A. Pérez, "I40GO: A global ontology for industry 4.0," *Expert Syst. Appl.*, vol. 294, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.eswa.2025.128792.
- [10] B. Masoomi, I. G. Sahebi, A. Kumar, M. Ghobakhloo, and M. Iranmanesh, "Industry 5.0 and opportunities for promoting supply chain sustainability: A study of the renewable energy industry," *Technol. Soc.*, vol. 83, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.techsoc.2025.103023.
- [11] 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.
- [12] C. Castillo, T. Otero-Romero, and E. J. Alvarez-Palau, "Navigating the transition to industry 5.0: advancing sustainability, resilience, and human-centricity in Spanish supply chain management," *Discover Sustainability*,

- vol. 6, no. 1, pp. 1–20, Dec. 2025, doi: 10.1007/S43621-025-01190-0/TABLES/4.
- [13] H. M. M. Taqi, I. Nayeem, A. B. M. M. Bari, M. Z. Anam, and S. M. Ali, “Addressing challenges to cloud manufacturing in industry 4.0 environment using an integrated approach: Implications for sustainability,” *Green Technologies and Sustainability*, vol. 3, no. 3, Jul. 2025, doi: 10.1016/j.grets.2024.100166.
 - [14] I. Serbinenko and I. Ludviga, “Operationalising Organisational Performance in the Scope of Industry 4.0 and Industry 5.0 in Manufacturing Companies,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 17, no. 14, Jul. 2025, doi: 10.3390/su17146314.
 - [15] K. Aravindaraj and P. Rajan Chinna, “A systematic literature review of integration of industry 4.0 and warehouse management to achieve Sustainable Development Goals (SDGs),” Dec. 01, 2022, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.clscn.2022.100072.
 - [16] S. Zhang, H. He, and X. Yang, “Human-centric proactive integrated design paradigm of intelligent manufacturing system towards Industry 5.0,” *J. Manuf. Syst.*, vol. 83, pp. 65–81, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.jmsy.2025.09.002.
 - [17] M. Vitti, A. Padovano, and F. Facchini, “A review on cognitive workload for industry 5.0,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 207, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.cie.2025.111350.
 - [18] M. A. Shabur, A. Shahriar, and M. A. Ara, “From automation to collaboration: exploring the impact of industry 5.0 on sustainable manufacturing,” *Discover Sustainability*, vol. 6, no. 1, pp. 1–23, Dec. 2025, doi: 10.1007/S43621-025-01201-0/FIGURES/4.
 - [19] M. Al-Okaily, H. Younis, and A. Al-Okaily, “The impact of management practices and industry 4.0 technologies on supply chain sustainability: A systematic review,” Sep. 15, 2024, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e36421.
 - [20] S. K. Nemomsa, N. D. Dejene, D. A. Efa, D. T. Negari, D. A. Ifa, and D. H. Kumar, “Clean energy demand in industry 4.0: Trends, challenges, and opportunities,” *Results in Engineering*, vol. 28, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.107260.
 - [21] T. C. Callari, Y. Curzi, and N. Lohse, “Realising human-robot collaboration in manufacturing? A journey towards industry 5.0 amid organisational paradoxical tensions,” *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 219, Oct. 2025, doi: 10.1016/j.techfore.2025.124249.
 - [22] R. Kumar and V. Kandpal, “Factors affecting the adoption of industry 4.0 technologies in circular economy: interpretive structure modelling (ISM) approach for future sustainability,” *Discover Sustainability*, vol. 6, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1007/s43621-025-01066-3.
 - [23] A. Ibrahim and G. Kumar, “Identification and Prioritization of Critical Success Factors of a Lean Six Sigma–Industry 4.0 Integrated Framework for Sustainable Manufacturing Using TOPSIS,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 17, no. 3, Feb. 2025, doi: 10.3390/su17031331.
 - [24] M. Saunila, M. Nasiri, J. Ukko, and L. Gastaldi, “Managing Social Sustainability With IoT Implementation: An Industry 5.0 Perspective,” *Sustainable Development*, vol. 33, no. 4, pp. 5327–5335, Aug. 2025, doi: 10.1002/sd.3398.
 - [25] M. Alkhodair and H. Alkhudhayr, “Harnessing Industry 4.0 for SMEs: Advancing Smart Manufacturing and Logistics for Sustainable Supply Chains,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 17, no. 3, Feb. 2025, doi: 10.3390/su17030813.
 - [26] H. Zhang, Y. Li, S. Zhang, L. Song, and F. Tao, “Artificial Intelligence-Enhanced Digital Twin Systems Engineering Towards the Industrial Metaverse in the Era of Industry 5.0,” *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, vol. 38, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1186/s10033-025-01210-0.
 - [27] P. Jourabchi Amirkhizi, S. Pedrammehr, and S. Pakzad, “A system-based approach to value prioritization in industry 5.0 for sustainable value creation,” *Discover Sustainability*, vol. 6, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1007/s43621-025-01134-8.
 - [28] A. Mohammed, F. A. Z. Al Balushi, N. Zubairu, and K. Govindan, “Dynamics capabilities 5.0 toward inner business resiliency: A conceptual and evaluation panacea,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 206, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.cie.2025.111223.
 - [29] L. J. Cuevas-Pichardo, G. Maldonado-Guzmán, A. D. Gómez-Guillamón, and J. A. Garza-Reyes, “The Mediating Role of Circular Economy in the Relationship Between Industry 4.0 and Sustainable Performance in the Manufacturing Industry,” *Bus. Strategy Environ.*, vol. 34, no. 2, pp. 1735–1750, Feb. 2025, doi: 10.1002/bse.4075.
 - [30] S. Javed and U. Al-Mulali, “Navigating the Innovation–Sustainability Paradox: The Strategic Role of Leadership and Industry 4.0 in Oman’s Manufacturing Sector,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 17, no. 6, Mar. 2025, doi: 10.3390/su17062595.
 - [31] S. C. Dobre Gudei, L. Tancelov, R. Bucea-Manea-Toniş, D. Manolache, and N. Ionescu, “Sustainable Competitiveness and Applicative Comparative Analysis of Wine Production Through the Lens of Triple Bottom Line, Robotics, and Industry 5.0 Strategies,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 17, no. 9, May 2025, doi: 10.3390/su17093767.
 - [32] R. K. F. L. and P. P. Ewelina Gregolinska, “Capturing the true value of Industry 4.0,” London, Apr. 2022.
 - [33] L. Zare, M. Ben Ali, E. Rauch, and D. T. Matt, “Navigating challenges of small and medium-sized enterprises in the Era of Industry 5.0,” *Results in Engineering*, vol. 27, p. 106457, Sep. 2025, doi: 10.1016/J.RINENG.2025.106457.
 - [34] M. Khosravy, N. Gupta, A. Pasquali, N. Dey, R. G. Crespo, and O. Witkowski, “Human-Collaborative Artificial Intelligence Along With Social Values in Industry 5.0: A Survey of the State-of-the-Art,” *IEEE Trans. Cogn. Dev. Syst.*, vol. 16, no. 1, pp. 165–176, Feb. 2024, doi: 10.1109/TCDS.2023.3326192.
 - [35] C. Cuevas-Lopez-de-Baro, I. Mira-Solves, and A. Verdú-Jover, “Assessment model for Industry 5.0: A holistic approach to readiness and integration,” *J. Ind. Inf. Integr.*, vol. 46, p. 100855, Jul. 2025, doi: 10.1016/J.JII.2025.100855.
 - [36] P. Kumar et al., “Industry 5.0: A Survey on Enabling Technologies and Potential Applications.”
 - [37] F. Alkhatib, M. Allam, V. Swarnakar, J. Alsadi, and M. Maalouf, “Implementing and evaluating the quality 4.0 PMQ framework for process monitoring in automotive manufacturing,” *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-10226-4.
 - [38] R. V. Rajkolhe, D. S. S. Bhagwat, and D. P. V. Deshmukh, “Dynamic weighted ensemble model for predictive optimization in green sand casting: Advancing industry 4.0 manufacturing,” *MethodsX*, vol. 14, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.mex.2025.103393.
 - [39] M. Khosravy, N. Gupta, A. Pasquali, N. Dey, R. G. Crespo, and O. Witkowski, “Human-Collaborative Artificial Intelligence Along With Social Values in Industry 5.0: A Survey of the State-of-the-Art,” *IEEE Trans. Cogn. Dev. Syst.*, vol. 16, no. 1, pp. 165–176, Feb. 2024, doi: 10.1109/TCDS.2023.3326192.
 - [40] T. Ji and X. Xu, “Exploring the Integration of cloud manufacturing and cyber-physical systems in the era of industry 4.0 – An OPC UA approach,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 93, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.rcim.2024.102927.
 - [41] W. Torbacki, “Towards Sustainable Industry 4.0: An MCDA-Based Assessment Framework for Manufacturing and Logistics,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 17, no. 11, Jun. 2025, doi: 10.3390/su17115082.
 - [42] A. S. George, “The Fourth Industrial Revolution: A Primer on Industry 4.0 and its Transformative Impact,” 2024, doi: 10.5281/zenodo.10671872.
 - [43] C. Te Lin, “Blockchain-based shop floor control system for small and medium-sized enterprise evolution to industry 4.0,” *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-13809-3.
 - [44] H. Hudaifah, H. Saleh, A. Alghazi, A. Kolus, U. Alturki, and S. Elferik, “Human-aware scheduling for sustainable manufacturing: A review of dynamic job shop scheduling in the era of Industry 5.0,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 98, p. 103143, Apr. 2026, doi: 10.1016/J.RCIM.2025.103143.