

Estado del arte y perspectivas futuras de la Industria 4.0 en Latinoamérica y México

State-of-the-art and future perspectives of Industry 4.0 in Latin America and Mexico

Lorenzo Lázaró González Romeo*
Instituto Politécnico Nacional (México)

Juan Bory Reyes
Instituto Politécnico Nacional (México)

Jorge A. Rojas Ramírez
Instituto Politécnico Nacional (México)

Recibido: 29 de agosto de 2023

Aceptado: 03 de abril de 2024

Publicado: 11 de abril de 2025

Resumen

Desde la propuesta en la Feria de Hannover de 2011, de lo que hoy conoce como Cuarta Revolución Industrial, se ha desencadenado todo un nuevo paradigma tecnológico aplicable principalmente a la producción y los servicios. Actualmente, sigue suponiendo un reto su adopción y aplicación en cada uno de los sectores que mueven la economía de cada nación. Por esto el objetivo del presente trabajo fue establecer un marco de referencia de la Industria 4.0 a nivel internacional, así como, de un acercamiento a la forma en que se ha manifestado esta nueva revolución tecnológica a nivel internacional, con especial énfasis en México y la introducción paulatina de las tecnologías de la información y su transición hacia la Industria 4.0. Para dicho propósito se lleva a cabo un estudio sobre la temática en cuestión, desde sus orígenes, evolución y qué se ha hecho por parte de los gobiernos para facilitar y potenciar la implementación de sus componentes. Se ha de recalcar que se requiere una mayor accesibilidad en cuanto a la información disponible por parte de las empresas mexicanas, de manera que se

*Email: lgonzalezr2100@alumno.ipn.mx



puedan recabar y analizar datos más concretos sobre el alcance y el impacto de la implementación de tecnologías de la Industria 4.0 en las mismas. Luego de culminada la investigación, se puede afirmar que aún son insuficientes las estrategias de digitalización, la facilitación de recursos financieros y el desarrollo de los recursos humanos que permitan potenciar rápidamente la implementación de la Industria 4.0 en las empresas mexicanas.

Palabras clave: Modelos de madurez; arquitectura de referencia, normalización; sistemas de manufactura, revisión de literatura.

Abstract

Since the proposal at the Hannover Fair in 2011, of what is now known as the Fourth Industrial Revolution, a new technological paradigm has been unleashed. This paradigm is applicable mainly to production and services. Currently, its adoption and application in each of the sectors that drive the economy of each nation continue to be a challenge. For this reason, the objective of this work was to establish a reference framework for Industry 4.0 at an international level, as well as an approach to how this new technological revolution has manifested itself at an international level, with special emphasis on Mexico and the gradual introduction of information technologies and its transition towards Industry 4.0. For this purpose, a study is carried out on the subject in question, from its origins, evolution, and what has been done by governments to facilitate and enhance the implementation of its components. It must be emphasized that greater accessibility is required in terms of the information available by Mexican companies so that more specific data can be collected and analyzed on the scope and impact of implementing Industry 4.0 technologies in the same. After completing the investigation, it can be affirmed that digitization strategies, the provision of financial resources, and the development of human resources are still insufficient to promote the implementation of Industry 4.0 in Mexican companies quickly.

Keywords: Maturity models; reference architecture; standardization; manufacturing systems; literature review.

Introducción

La Cuarta Revolución Industrial, conocida como Industria 4.0 (I4.0), tuvo sus inicios durante la feria de Hannover, Alemania, en 2011, con la iniciativa “Industria 4.0” (Kagermann, Lukas y Wahlster, 2011). A pesar de que en la comunidad científica se ha tomado dicho acontecimiento como el punto de partida de la I4.0, existen evidencias de que años antes, varios autores ya habían empleado el término *Cuarta Revolución Industrial*, apuntándola a ramas específicas de la ciencia y la producción en lugar de la propuesta más general realizada en 2011. Los ejemplos se pueden encontrar desde 1985 en (Rostow, 1985), donde se le relaciona con un cambio en las inversiones relacionadas con la producción de alimentos y el estado de la economía mundial; en (Dai, 2006), se haría alusión al desarrollo de la nanotecnología como la próxima revolución industrial, obteniendo apoyo esa hipótesis en posteriores trabajos como (Parthasarathi y Thilagavathi, 2011, p. 1; Hung, Wang y Chang, 2012, p. 4).

Partiendo de la propuesta plasmada en la feria de Hannover, I4.0 significa la siguiente evolución en los sistemas de producción, esta vez teniendo como bases principales las tecnologías asociadas al internet y los Sistemas Ciberfísicos (CPS, por sus siglas en inglés: Cyber-Physical Systems), siendo estos últimos sistemas automatizados que se componen por una parte física, y otra digital conectada a la red que permite el control, monitoreo y coordinación de sus operaciones (Rajkumar *et al.*, 2010; Jazdi, 2014). En el reporte publicado al término de dicha feria, quedarían plasmadas como principales bondades de la nueva revolución industrial, la creación de nuevos modelos de negocio, la posible solución de problemas sociales mediante la vinculación de las cosas dentro y fuera de una fábrica, así como la mejora de servicios a través de las redes de comunicación basadas en CPS, el Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés: Internet of Things) y el Internet de los Servicios (IoS, por sus siglas en inglés: Internet of Services) (Kang *et al.*, 2016).

Desde ese entonces, muchas han sido las iniciativas y los programas desarrollados a nivel mundial para impulsar la implementación de este nuevo paradigma, estando a la vanguardia los países más desarrollados, y ejemplos de estos se pueden encontrar en la sección 3. Por otro lado, las naciones en vías de desarrollo presentan las principales dificultades que conlleva una transición a gran escala de la I4.0, como son la falta de recursos económicos, de infraestructura tecnológica, de capacitación de la fuerza laboral y el acceso insuficiente de los ciudadanos de estos países a las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TICs), así como una deficiente divulgación de las tecnologías relacionadas a la I4.0 y la carencia sobre todo, de políticas públicas que puedan dar el impulso necesario para llevar a cabo la transición hacia la nueva revolución industrial.

México no es la excepción en cuanto a países que enfrentan estas y otras problemáticas, y a pesar de poder presumir el primer mapa de ruta para I4.0 publicado en Latinoamérica de acuerdo a la Secretaría de Economía [SE](2016a), de haber creado programas e instituciones gubernamentales dedicadas a impulsar el desarrollo y la innovación, de que varias empresas nacionales han tomado iniciativas y desarrollado tecnologías para llevar a cabo la digitalización e interconexión de sus sistemas de producción, todavía existe rezago importante en los aspectos antes mencionados, por lo que se necesitan más acciones que potencien la implementación y el aprovechamiento de las tecnologías de la I4.0.

El objetivo de este trabajo fue establecer un marco de referencia de la I4.0 a nivel internacional, así como de un acercamiento sobre cómo se ha manifestado esta nueva revolución tecnológica en la región de Latinoamérica, con especial énfasis en México y la introducción paulatina de las tecnologías de la información y su transición hacia la I4.0. Para dicho propósito, la siguiente subsección aborda el procedimiento y método empleado para llevar a cabo la revisión del estado del arte; la sección 2 aborda los principales elementos que integran y caracterizan a la I4.0, así como diversas herramientas y temáticas asociadas; la sección 3 se enfoca en la implementación de la I4.0 en Latinoamérica y México, cerrando la sección 4 con las conclusiones pertinentes a la investigación desarrollada en este trabajo.

Revisión de la literatura

Son varios los procedimientos y metodologías desarrolladas hasta el momento, que pueden servir de guía al investigador para lograr una búsqueda y recopilación bibliográfica de manera organizada y eficiente (Gough, Oliver y Thomas, 2017; Hurtado, 2000; Hernandez-Aguilar *et al.*, 2020). Es por esto que la metodología empleada para realizar la revisión de literatura en este trabajo fue la descrita en (Hurtado, 2000), donde se menciona que un procedimiento organizado durante el proceso de revisión de literatura requiere el paso por diferentes fases o etapas como la *exploratoria*, donde el investigador debe plantearse preguntas relacionadas a dicho tema; la *analítica*, donde se procede al análisis de las teorías recopiladas durante la revisión de la literatura sobre el objeto de estudio; y la *explicativa*, donde se realiza el *marco teórico* y se incluyen investigaciones anteriores.

Para llevar a cabo dicho procedimiento de manera eficiente, se aplicó el método *RACEER* (Hurtado, 2000), el cual ayuda a organizar de manera lógica toda la información que se va encontrando durante el proceso de revisión del estado del arte. Las siglas que lo definen representan sus diferentes etapas, como son “la **R**ecopilación de la información, el **A**lmacenamiento en unidades informativas, la **C**ategorización de las fichas, la **E**laboración del esquema conceptual, el **E**nlace de las unidades informativas y la **R**edacción”, como se menciona en (Hurtado, 2000, p. 99-100).

Por tanto, partiendo de diferentes preguntas de investigación realizadas durante la fase exploratoria, se llevó a cabo la búsqueda de bibliografía a través del acceso remoto a diferentes bases de datos y editoriales, tales como SCOPUS, SCIENCE DIRECT, WEB OF SCIENCE, IEEE, TAYLOR & FRANCIS, SPRINGER y WILEY. Para llevar a cabo el proceso mencionado, se empleó la siguiente ecuación de búsqueda en los apartados *título*, *resumen* o *palabras claves*:

“Industria 4.0” OR “industry 4.0” OR “cuarta revolucion industrial” OR “fourth industrial revolution” OR “4ta revolucion industrial” OR “4th industrial revolution”.

Una primera búsqueda arrojó un total de **23 337** documentos, tomando en cuenta cada una de las bases de datos y editoriales mencionadas. Con la ayuda del gestor bibliográfico Mendeley, en una segunda etapa fueron recopilados el total de documentos encontrados en la 1ra etapa, para luego ser agrupados por año y poder descartar toda la literatura repetida, quedando una cantidad de **20 670** trabajos. En una 3ra etapa, una vez leído el título de cada documento, y tomando en cuenta el criterio de tomar los trabajos más abarcadores para la redacción del marco teórico y estado del arte, el total se redujo a **10256**. Para la

4ta etapa del proceso de revisión bibliográfica, tras una rápida lectura de los resúmenes y conclusiones, y aplicando el mismo criterio enunciado en el punto anterior, la cantidad de documentos fue reducida a **461**. La 5ta etapa consistió en una actualización de la bibliografía, en conjunto con una búsqueda específica sobre la temática de implementación de la I4.0, arrojando **359** documentos. Finalmente, con una lectura más profunda del contenido de los trabajos restantes, la bibliografía final empleada en este trabajo para presentar el estado del arte acerca de I4.0 fue de **86** documentos, de los que de los cuales más del 60 % han sido publicados en los últimos 5 años.

La recopilación del volumen de bibliografía mencionado permitió confeccionar un marco teórico amplio y actualizado desde los orígenes de la I4.0, su actualidad, y cómo ha transcurrido la implementación de dicho paradigma en la región, con especial énfasis en México.

1. Industria 4.0

La transición hacia la I4.0 en los sistemas de producción, persigue entre sus principales objetivos, una mayor eficiencia operacional y productividad, un mayor alcance de la automatización, personalización y flexibilidad en la producción, el aumento de la interacción hombre-máquina, así como la creación de puestos de trabajo más complejos, pero mejor remunerados y de nuevos modelos de negocio (Jazdi, 2014; Gilchrist, 2016).

1.1. Antecedentes

La Primera Revolución Industrial o Industria 1.0, también conocida como la Era del Vapor o de la Mecanización, tuvo su origen en Gran Bretaña a finales del siglo XVIII, y estuvo marcada por la masiva mecanización de los procesos productivos mediante la introducción de maquinaria de vapor e hidráulica, realizándose la transición de una economía agrícola a una economía industrial. Aproximadamente un siglo después se produce la Segunda Revolución Industrial o Industria 2.0, nombrada como la Era de la Electricidad, en la que se produce la electrificación de las líneas de producción y comienza la producción en serie mediante cintas transportadoras, comenzando en 1908 en la ciudad de Cincinnati, Ohio, en Estados Unidos con la fabricación del modelo T de Ford, siendo el primer automóvil de combustión interna (Rainer y Alexander, 2014; Dastbaz y Cochrane, 2019). Transcurrieron alrededor de otros 100 años para la Tercera Revolución Industrial o Industria 3.0, cuando en 1969 la empresa Modicon presentó el primer Controlador Lógico Programable (PLC, por sus siglas en inglés: Programmable Logic Controller) y con este, el comienzo de la automatización de los sistemas de producción (Rainer y Alexander, 2014).

1.2. Principales Características

La I4.0 destaca por 3 características fundamentales (Kagermann, Wahlster y Helbig, 2013; Gilchrist, 2016; Stock y Seliger, 2016), como son la *integración vertical de los sistemas de producción*, que se refiere a la completa digitalización e interconexión de todos los niveles jerárquicos que componen a una

empresa o industria; la *integración horizontal a través de redes de cadenas de valor globales*, que implica la digitalización e interconexión entre los módulos de creación de valor de las empresas involucradas en la cadena de valor, y a lo largo del ciclo de vida de un producto; y la *ingeniería completa (end-to-end)*, que significa la digitalización en cada fase del ciclo de vida de un producto, desde que se adquiere como materia prima, es procesado, llega al consumidor y termina su vida útil.

1.3. Principios de Diseño y Principales Componentes

En la I4.0 están presentes principalmente 6 principios de diseño que emplean las empresas o industrias que se encuentran en proceso de digitalización de sus procesos productivos (Gilchrist, 2016). Estos son la *interoperabilidad*, que es la capacidad de mantener una comunicación y conexión fluida, y a la vez flexible entre todos los componentes de un sistema; la *virtualización*, que se refiere a la posibilidad de monitorear procesos mediante modelos virtuales y la recepción de información con sensores inteligentes; la *descentralización*, que permite que los diferentes subsistemas en un sistema de producción inteligente sean capaces de tomar decisiones de manera autónoma; la *capacidad en tiempo real*, que busca que tanto la recolección de datos provenientes del proceso de producción, como el monitoreo y retroalimentación de los procesos puedan ser llevadas a cabo en tiempo real; la *orientación al servicio*, que conlleva a un alto nivel de personalización en los productos y servicios; así como la *modularidad*, que resulta en la manifestación de la flexibilidad en la producción.

A continuación, se describen los principales componentes de la I4.0 (Gilchrist, 2016; Kang *et al.*, 2016; Lu, 2017; Pereira y Romero, 2017; Ahuett-Garza y Kurfess, 2018; Moeuf *et al.*, 2018; Muriel-Pera *et al.*, 2018; Vaidya, Ambad y Bhosle, 2018; L. D. Xu, E. L. Xu y Li, 2018; Phuyal, D. Bista y R. Bista, 2020).

Destacan el *análisis de Big Data*, que consiste en la recopilación y evaluación integral de datos de muchas fuentes diferentes, equipos y sistemas de producción; el *IoT*, que es un término que combina diferentes tecnologías y enfoques, basados en la conexión entre elementos físicos y el Internet; la *computación en la nube*, que potencia la disponibilidad en tiempo real de datos y aplicaciones; la *realidad aumentada*, que permite la visualización de elementos digitales en el mundo físico a través de dispositivos móviles; la *manufactura aditiva*, que se emplea para la producción de productos personalizados mediante varios métodos de impresión, como capa a capa (impresión 3D), etc. También se pueden contar la inteligencia artificial (IA), que se refiere al desarrollo de técnicas y software que permitan a sistemas o máquinas imitar la inteligencia humana para realizar tareas y estos puedan mejorar iterativamente a partir de la información recopilada; la *ciberseguridad* y las *plataformas digitales*, que funcionan como vía principal de retroalimentación por parte de los usuarios a los sistemas de producción, lo que resulta esencial en el proceso de personalización.

2. Aspectos relacionados con la industria 4.0

Además de las características ya mencionadas sobre la I4.0, existen muchas otras temáticas, investigaciones y desarrollos tecnológicos que han ido evolucionando a la par, y que hoy en día pueden ser considerados casi de vital importancia en cualquier proceso de transición hacia la I4.0 de alguna empresa o sector productivo, y varios ejemplos se describen a continuación.

2.1. Modelos de Madurez

Una herramienta que permite evaluar el nivel y avance de implementación de la I4.0 en una empresa o institución, son los llamados Modelos de Madurez. Estos se definen como “*una estructura conceptual, compuesta de partes que definen la madurez o el estado de desarrollo de un área de estudio de interés determinada... Suelen contemplar dimensiones y niveles, y tienen como objetivo cuantificar las actividades realizadas y hacerlas medibles y maduras en el tiempo*” (Santos y Martinho, 2020, p. 4). Debido a la variedad de estos, se pueden encontrar destinados a su aplicación en cualquier sector industrial y en empresas sin importar el tamaño de estas, encontrándose evidencias desde el sector manufacturero, de servicios, logístico, extracción de petróleo y gas, entre otros (Santos y Martinho, 2020; Ramos, Loures y Deschamps, 2020; Onyeme y Liyanage, 2022; Rauch *et al.*, 2020; Facchini *et al.*, 2019). Algunos de los ejemplos más conocidos son *IMPULS - Industrie 4.0 Readiness*, que va dirigido a manufactura e ingeniería industrial y se considera de perfil técnico; *Industry 4.0 Maturity Model*, adecuado para evaluaciones más completas en cualquier tipo de empresa; *Modelo de madurez de integración de sistemas para I4.0*, centrado en el área de Tecnologías de la Información; *Maturity Model in SMEs toward Industry 4.0*, indicado para PyMEs; *Maturity Model for Digital Transformation*, que es un modelo genérico con elementos destinados a la fabricación y cadena de suministro, etc.

Otra herramienta que acompaña a la adopción de la I4.0 y que han llegado a ser consideradas como modelos de madurez de carácter técnico (Ramos, Loures y Deschamps, 2020), son las Arquitecturas de Referencia, que se detallan a continuación.

2.2. Arquitecturas de Referencia

Las arquitecturas de referencia son “*documentos que ofrecen estructuras e integraciones recomendadas de productos y servicios de Tecnologías de la Información (TI) para formar una solución, e incorporan las mejores prácticas aceptadas del sector o sectores, que normalmente sugieren el método de entrega o las tecnologías concretas óptimas*” (Nakagawa, *et al.*, 2021, p. 2). De acuerdo con su contenido, rango y facilidad de aplicación, las arquitecturas de referencia pueden ser clasificadas como **Abstractas**, en las que sus módulos pueden tener disímiles interpretaciones, lo que conlleva a un abanico amplio de posibilidades de uso; o **Detalladas**, donde el proceso de comprensión de estas es más sencillo, lo que se traduce en una reducción del esfuerzo y tiempo a emplear para su aplicación en la industria (Nakagawa *et al.*, 2021).

En sentido general, el empleo de arquitecturas de referencia como herramienta para la implementación de la I4.0, propicia la estandarización de dicho proceso, además del incremento de la interoperabilidad entre sistemas y subsistemas, la reducción de costos y tiempo de desarrollo, así como de riesgos en proyectos de software, mejoras en la comunicación, y la adopción de mejores prácticas (Nakagawa *et al.*, 2021). A continuación, algunas de las principales arquitecturas empleadas hoy en día en el contexto de la I4.0, tomadas de (Nakagawa *et al.*, 2021, p. 2-8):

El Modelo Arquitectura de Referencia Industria 4.0 (RAMI 4.0, por sus siglas en inglés: Reference Architectural Model Industry 4.0), desarrollada por la Asociación de Fabricantes Eléctricos y Electrónicos Alemanes en 2015, y tal vez la más conocida hasta el momento, que consiste en un mapa tridimensional para implementar las tecnologías de la I4.0 de forma escalonada y estructurada; la Arquitectura de Referencia de Internet Industrial (IIRA por sus siglas en inglés: Industrial Internet Reference Architecture), impulsada desde 2015 por diferentes organizaciones y empresas tecnológicas de los Estados Unidos y que consiste en diferentes puntos de vista que abarcan toda la concepción del proceso productivo hasta la adopción e interconexión de las nuevas tecnologías; la Arquitectura de Referencia de la Cadena de Valor Industrial (IVRA, por sus siglas en inglés: Industrial Value Chain Reference Architecture), concebida por la Iniciativa Cadena de Valor Industrial en Japón, 2016; así como Industria 4.0 IBM, comercializada y distribuida por dicha empresa desde 2017.

2.3. Normalización

Como en cualquier procedimiento o producción llevada a cabo en la actualidad, la implementación de la I4.0 ha ido complementándose con el empleo de diversas normas y estándares que permiten la uniformidad en el proceso de transición. Como no es de extrañar, Alemania se encuentra a la vanguardia en este ámbito, contando desde 2016 con la creación del Consejo de Normalización de Industria 4.0 en la feria de Hannover de ese año (SCI4.0, 2017), que se encarga de identificar las necesidades de normalización, organizar la implementación de estándares en la I4.0 y promover sus conceptos fundamentales, así como otras actividades. Entre sus resultados más notables se encuentra la Hoja de Ruta para la Estandarización de la Industria 4.0, que actualmente se encuentra en su quinta versión.

A nivel mundial es ampliamente conocida la Organización Mundial de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés: International Organization for Standardization), que igualmente ha tenido su acercamiento a la 4ta Revolución Industrial en la revista que bimensualmente publica dicha organización, llamada Focus, y donde el No. 131 de noviembre de 2018 fue dedicado enteramente a esta temática, exponiendo los principales resultados alcanzados para vincular la normalización con la I4.0, las áreas de oportunidad y opiniones de expertos.

Entre los resultados de ISO respecto a la I4.0 se encuentra la creación en 2017 Comité de Coordinación de la Fabricación Inteligente (SMCC, por sus siglas en inglés: *Smart Manufacturing Coordination Committee*), que busca el intercambio de información y la contrastación de normas de fabricación inteligentes. También destaca la creación del comité técnico ISO/TC 184/SC 4 para Sistemas de automatización e integración, junto con el subcomité SC 4 de Datos industriales. Del trabajo de dichos comité y subcomité se pueden encontrar varias normas relacionadas con tecnologías de la I4.0, como son la ISO 10303 (Representación e intercambio de datos de productos), comúnmente conocida como STEP; otro ejemplo es la ISO 14306 (Especificación de formato de archivo JT para visualización 3D); la ISO 32000 (Gestión de documentos - Formato de documento portátil); la ISO 8000 (Calidad de datos); y la ISO 22745 (Diccionarios técnicos abiertos y su aplicación a datos maestros) (ISO, 2018).

2.3.1. Normalización en México e Industria 4.0

En territorio nacional, el tema de la normalización puede encontrarse en 2 vertientes mayormente, las *normas oficiales mexicanas* y las *normas mexicanas*. En los últimos años son varias las normas desarrolladas en territorio nacional que presentan una relación directa con elementos de la I4.0, las cuales pueden ser de gran utilidad en la implementación de las nuevas tecnologías en cualquier empresa que tenga operaciones en el país, sin importar su tamaño o el sector al cual pertenezcan, ya que se centran en el contexto nacional.

Las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), “*son regulaciones técnicas de carácter obligatorio. Regulan los productos, procesos o servicios, cuando éstos puedan constituir un riesgo para las personas, animales y vegetales, así como el medio ambiente en general, entre otros*” (SE, 2010). Un ejemplo sería PROY-NOM-019-SE-2020 (Fabricación de equipos de tecnologías de la información y sus equipos asociados, así como equipo de uso en oficina-Requisitos de seguridad) (SINEC, 2022).

Las Normas Mexicanas (NMX), “*son elaboradas por un organismo nacional de normalización, en este caso Normalización y Certificación NYCE o la Secretaría de Economía. Establecen los requisitos mínimos de calidad de los productos y servicios, con el objetivo de proteger y orientar a los consumidores, y su aplicación es voluntaria*” (SE, 2010). Varios ejemplos pueden encontrarse en (NYCE, 2022).

En resumen, se puede afirmar que se encontró una cantidad razonable de NMX y muy pocas NOM relacionadas con el desarrollo y aplicación de tecnologías de la I4.0 a nivel nacional, y al no ser las primeras de carácter obligatorio su cumplimiento, no está garantizado el uso de estas por parte de las empresas.

2.4. Educación 4.0

Así como las herramientas y la necesidad de normalización antes expuestas en el entorno de la I4.0, el desarrollo e implementación de las nuevas tecnologías que componen la 4ta Revolución Industrial exige a su vez una mayor preparación y capacitación de los profesionistas y masa laboral en general. Los estudiantes requieren de nuevos medios de aprendizaje que impulsen la colaboración, comunicación y resolución de problemas, así como el pensamiento crítico, creativo e innovador. Es por esto que desde las universidades a nivel mundial se han impulsado diversas iniciativas con el objetivo de potenciar una mejor y más actualizada preparación de los egresados, combinando el aprendizaje a distancia con el presencial, priorizando cada vez el uso de las TICs, entre otras iniciativas (Costa y Azevedo, 2021, p 1-3).

En Canadá, la Escuela de Práctica de Ingeniería y Tecnología, perteneciente a la Facultad de Ingeniería de la Universidad McMaster, fundó el Centro de Aprendizaje de Sistemas Ciberfísicos con el propósito de proporcionar a los estudiantes nuevas habilidades técnicas complementarias, que enfatizan la naturaleza multidisciplinaria inherente de los sistemas inteligentes y de fabricación avanzada; igualmente crearon una fábrica de aprendizaje para la educación e investigación aplicada de la Industria 4.0, que incluye varias máquinas-herramientas y estaciones de trabajo especializadas con enfoque en Industria 4.0 (Elbestawi *et al.*, 2018). La Unión Europea, mediante sus programas educativos, ha financiado diferentes iniciativas destinadas a fomentar la educación de habilidades en el contexto de

la Industria 4.0; entre estos el proyecto In-Cloud, que persigue fomentar la cooperación entre las universidades y el sector empresarial en el marco de la Estrategia Europea de Computación en la Nube, y con esto preparar profesionales que impulsen la competitividad y el crecimiento en las empresas de la región (Assante *et al.*, 2019).

En la región asiática se pueden citar varias iniciativas como el proyecto Elsa-360° puesto en práctica por diferentes universidades de Malasia, que busca fomentar las experiencias educativas inmersivas mediante el empleo de la realidad virtual (Nadiah *et al.*, 2019). En la Universidad Tecnológica de Nanyang, Singapur, se desarrolló el portal MySkillsFuture, que reúne cursos modulares relacionados con la Industria 4.0 en una sola plataforma y cubre industrias como la aeroespacial, el análisis de datos y tecnologías como la robótica y el análisis predictivo; así como lanzaron en 2016 un Mapa de Transformación de la Industria de Capacitación y Educación de Adultos en colaboración con sindicatos y la industria. En Australia, la Universidad Deakin ha fomentado la Educación 4.0 mediante diferentes estrategias como la inauguración del programa *Smart Campus*, con el objetivo de utilizar tecnologías digitales para digitalizar los entornos físicos del campus universitario; además desarrollaron Genie, un asistente personal digital inteligente, que busca ayudar a los estudiantes en su día a día en la universidad (Bonfield *et al.*, 2020).

Otros ejemplos de iniciativas en materia educativa a nivel internacional para fomentar el desarrollo de nuevas habilidades y una mejor preparación de los estudiantes con vistas a afrontar los retos que supone la I4.0 se pueden encontrar en el reporte Escuelas del Futuro, publicado por el Foro Económico Mundial (Foro Económico Mundial, 2020).

3. Panorama Internacional

La iniciativa “Industria 4.0” en la feria de Hannover, fue formalmente complementada en 2013 por el Grupo de Trabajo Industria 4.0, establecido por la Academia Nacional de Ciencia e Ingeniería de Alemania, y patrocinado por el Ministerio Federal de Educación e Investigación de ese país, con el lanzamiento del mapa de ruta *Plataforma Industria 4.0*, primero de su tipo que trazaba las directrices para la implementación de la I4.0 en el territorio alemán (Kagermann, Wahlster y Helbig, 2013). La estrategia se encaminaba principalmente hacia la fabricación inteligente empleando los CPS, con el objetivo de descentralizar la producción, y así lograr una mayor personalización y participación de los usuarios (K. Zhou, Liu y L. Zhou, 2015).

Desde entonces muchos países siguieron la iniciativa del gobierno alemán, lanzando sus propios mapas de rutas e impulsando medidas que propiciaran una rápida implementación de la I4.0, teniendo en cuenta las características del sector productivo y empresarial de cada una de estas naciones. Ejemplo de estos planes son *Hecho en China 2025*, *Sociedad 5.0* en Japón, *Asociación de Fabricación Avanzada* en los Estados Unidos, *Industria Conectada 4.0* en España, entre muchos otros (Liao *et al.*, 2017, p.1-2; Aceto, Persico y Pescapé, 2019, p. 1; Majstorovic y Mitrovic, 2019, p. 6-17; Yang y Gu, 2021, p. 6-12).

3.1. Caso de Latinoamérica y México

La región de Latinoamérica, conformada por países en vías de desarrollo, enfrenta disímiles retos que provocan que la transición hacia la I4.0 sea más compleja que para las naciones más desarrolladas. A pesar de esto, se pueden constatar varios programas y mapas de rutas impulsados por los gobiernos de la región, como es el caso de *Industria 4.0 Argentina*, el *Plan de Ciencia, Tecnología e Innovación para la Manufactura Avanzada* en Brasil, *Manufactura Inteligente (N.E.X.T)* en Colombia, *Estrategia Industria 4.0: Diseñando el Chile Futuro*, entre otros (Majstorovic y Mitrovic, 2019, p. 6-17).

En México han sido varias las acciones e iniciativas que se han tomado, tanto en el sector público como el privado para impulsar la implementación de la I4.0. Comenzando en orden cronológico, en 2014 la Secretaría de Economía en colaboración con otras instituciones públicas y privadas, lanzaron el *Mapa de Ruta para Internet of Things (IoT)*, el cual mostraba un análisis del estado actual y lo que en un futuro se podía convertir el IoT, y trazaba como metas considerar a México como un país de referencia en el tema IoT para el año 2022, así como líder de soluciones digitales y manejo de Big Data en América Latina en 2025, (SE, 2014). En 2016 sería publicado *Elaborando el Futuro – Un Mapa de Ruta para la Industria 4.0 en México*, constituyendo el primero de su tipo en América Latina, el cual establece los lineamientos para el desarrollo de políticas para el impulso de la I4.0 en territorio nacional (SE, 2016a). En este se propusieron varias acciones, como promover la creación de clústers, potenciar la aplicación de las TICs, así como consolidar la oferta de recursos humanos calificados, entre otras iniciativas (Martínez-Martínez *et al.*, 2020, p. 108-113).

Como parte de la Agenda Sectorial para el Desarrollo de las Tecnologías de la Información en México (2014-2024), se creó el Programa para el Desarrollo de la Industria del Software (ProSoft 3.0) (SE, 2016b), que enfoca sus acciones en la formación general de capital humano especializado en TI, el financiamiento a empresas de sectores estratégicos para el desarrollo y adopción de las TI, entre otras. Entre sus resultados, se han creado en el país hasta el momento 41 Centros de Innovación Industrial, con el objetivo de desarrollar e implementar tecnologías de la I4.0 en diferentes sectores de la economía y la producción.

Hasta el momento, un amplio número de programas han sido impulsados por el sector público mexicano, con el objetivo de ir introduciendo de manera paulatina las diferentes tecnologías de la I4.0, ampliar el uso de las TICs en la población y mejorar la preparación académica de los estudiantes en las escuelas, universidades e institutos superiores politécnicos con relación a estas nuevas herramientas. Una muestra se cita a continuación (Huidobro, Vera y Aranda, 2020):

México Conectado, que promueve la apertura de sitios públicos con acceso a internet gratuito en todo el país; el *Programa de Inclusión y Alfabetización Digital Nacional*, que busca desarrollar habilidades digitales en las escuelas a través del empleo masivo de equipos de cómputo; la *Iniciativa Educativa Nacional Nuevo León 4.0*, con la que se han logrado modificar en ese estado, hasta 46 planes de estudio que no incluían temas relacionados a la digitalización, la Creación del *Laboratorio Nacional de Industria 4.0* en la Universidad Tecnológica de Querétaro, así como del *Mapa de Ruta del Ecosistema de Innovación iQ4.0* publicado por la misma casa de altos estudios; el lanzamiento del proyecto *Educación 4.0* en el Instituto Politécnico Nacional (2019), como parte de la Agenda Estratégica de Transformación del Insti-

tuto, que persigue formar Talento 4.0 basado en la enseñanza personalizada, acompañado de las nuevas tecnologías; la *Estrategia Digital Nacional*, que fomenta la adopción de las nuevas tecnologías con el apoyo del estado; el *Programa Internet Para Todos*, impulsado por el Gobierno de México (2019), el cual se desprende del Eje Economía del Programa Nacional de Desarrollo (2019-2024), y pretende hacer posible la integración de la población al internet y telefonía móvil.

En tanto, varias son las empresas del sector privado que han tomado la iniciativa de adoptar la I4.0 para evolucionar sus modelos de negocio y mejorar indicadores productivos. Algunas se mencionan a continuación (Riquelme, 2019; Cluster Industrial, 2020; Huidobro, Vera y Aranda, 2020).

Los productores de calzado en Guanajuato comenzaron el diseño de zapatos mediante procesos digitales, gracias al apoyo del Centro de Innovación y Diseño de la Cámara de la Industria del Calzado de Guanajuato (CICEG); la editorial “Para Los Médicos (PLM)”, llevó a cabo la implementación de la tecnología *Watson Content Analytics* de IBM basada en IA y máquinas de aprendizaje; el desarrollo de la plataforma en línea *PPAP Manager*, creada en Chihuahua, que permite administrar los Procesos de Aprobación de Producción de Partes (PPAPs) solicitados a proveedores y los emitidos a clientes en el mismo lugar; la interfaz para la adquisición y procesamiento de datos para la I4.0 creada por Maindsteel, empresa mexicana radicada en Aguascalientes; el sistema de telemetría *NoTe*, que permite a las empresas monitorear en tiempo real sus máquinas y procesos, desarrollado por NoMada, empresa mexicana fundada en 2008, entre otros ejemplos que pudieran citarse.

A pesar de los programas y tecnologías desarrolladas en los sectores público y privado, resultan insuficientes para lograr una transición de la sociedad y los sistemas productivos hacia la I4.0, y es palpable cuando se analizan estadísticas que reflejan cómo está posicionado el país respecto a las demás naciones de la región y del mundo. Por ejemplo, para 2022, apenas el 29% de las empresas del sector industrial nacional contaban con programas de transformación digital en su fase piloto (Computerworld México, 2022); por otro lado, un estudio realizado en 2022 por el Instituto Mexicano para la Competitividad (2022), compara las 43 economías más importantes del mundo mediante diferentes parámetros, y se trata del Índice de Competitividad Internacional (ICI), y estos son algunos de los resultados:

México ocupa el lugar **37** en el apartado de *Competitividad*, que mide la capacidad de las 43 economías más importantes del mundo para generar, atraer y retener talento e inversión; en el ranking de *Economía*, se encuentra en el lugar **34**; en el parámetro de *Innovación*, que mide la capacidad para competir en sectores de alto valor agregado intensivos en conocimiento y tecnología, México ocupa el lugar **29**; para el apartado *Precursores*, que mide la calidad y eficiencia de los sectores financiero, energético, de telecomunicaciones y de transporte, se encuentra hasta el lugar **39**; finalmente, en cuanto a *Gobierno*, donde se mide la capacidad de los gobiernos en incluir positivamente en la competitividad, México ocupa el puesto **26**.

Con los datos mostrados, se puede apreciar el largo trecho que le queda por recorrer a México, respecto a muchas otras naciones en cuanto al desarrollo en los principales indicadores registrados anualmente en el Índice de Competitividad Internacional. Luego, el panorama social doméstico respecto a la adopción de las nuevas tecnologías por parte de los y las mexicanas, puede ser analizado siguiendo los datos recopilados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2021), en la Encuesta Nacional sobre Disponibilidad y Uso de Tecnologías de la Información en los Hogares (ENDUTIH) 2021, donde entre otros muchos resultados, se pueden resaltar los siguientes:

La cantidad de usuarios de internet a nivel nacional representaba 76.1 % de la población, registrándose un crecimiento del 11.9 % respecto a 2017; tan solo 66.9 % de los hogares mexicanos disponen a internet, registrándose un aumento de 15.8 % respecto a 2017; para 2021, aún 21.7 % de las personas en el país no disponían de telefonía celular, siendo la principal causa la falta de recursos económicos. Adicionalmente, según datos de la Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo (2021), 85 de cada 100 mexicanos contaban con suscripciones de banda ancha móvil en México, y apenas 60.6 % de los hogares mexicanos tenían acceso a internet.

Todos estos datos muestran cómo a pesar del paulatino crecimiento que sigue presentando el acceso a internet a nivel nacional, todavía un gran número de personas no cuentan tan siquiera con el dispositivo más básico que se podría considerar para acceder a la red de redes, que sería el teléfono celular, por lo que el factor económico doméstico sigue resultando un impedimento para acelerar un proceso fundamental en la implementación I4.0, y es la masividad en el uso de las TICs por parte de la población.

4. Conclusiones

Este trabajo presenta una revisión organizada de la literatura, que refleja el desarrollo e impacto que ha tenido la I4.0 desde sus inicios hasta la actualidad y su implementación en diferentes sectores económicos y de la vida social, incluyendo el análisis de las estrategias gubernamentales impulsadas en diferentes países para el desarrollo de la 4ta Revolución Industrial. El estudio de la información disponible respecto a la implementación de la I4.0 en México, permite evidenciar algunas de las iniciativas llevadas a cabo por los sectores público y privado para favorecer la paulatina transición hacia la 4ta Revolución Industrial, así como un análisis de las estadísticas que muestran la posición que ocupa el país respecto a esta transición. A pesar de la existencia de algunos programas y subsidios como ProSoft 3.0, aún no tienen el suficiente impacto las políticas gubernamentales diseñadas para ayudar a las empresas y a los ciudadanos adoptar de manera más rápida la nueva revolución industrial; así como son insuficientes las estrategias de digitalización, la facilitación de recursos financieros y el desarrollo de los recursos humanos que permitan potenciar rápidamente la implementación de la I4.0 en las empresas del país. Se debe trabajar, además, en el desarrollo de metodologías y normas que permitan una más fácil, rápida, ordenada y completa transición hacia la I4.0 en cada uno de los sectores productivos del país, de manera que se reduzca el rezago en este aspecto respecto a países más desarrollados. Es por esto que, como recomendaciones y perspectivas a futuro, si existe una verdadera voluntad de ampliar la implementación de la Industria 4.0 en la industria mexicana, los políticos deberían promulgar leyes que favorezcan y faciliten su implementación, proporcionar apoyo económico a las empresas, así como incentivos fiscales si fuese necesario. Por su parte, los empresarios deben estar dispuestos a embarcarse en la gran inversión que implica involucrarse de lleno en la implementación de este paradigma tecnológico, que eventualmente les permitirá elevar sus modelos de negocio al siguiente nivel. Asimismo, las empresas y la academia deben trabajar juntas para encontrar nuevas estrategias y soluciones que favorezcan la implementación de la Industria 4.0 en la industria mexicana. Con estas iniciativas, definitivamente el país diese un paso hacia adelante en su desarrollo industrial y económico, poniéndose a la par de países más desarrollados con mayor avance económico, sueldos mejor pagados, mejores condiciones y una masa laboral mejor preparada para afrontar los retos que supone la introducción de todas estas nuevas tecnologías.

Declaratoria de conflicto de interés

No existe conflicto de interés con la publicación de este manuscrito.

Declaratoria de disponibilidad de datos

Los datos utilizados para reportar los resultados de investigación se encuentran disponibles y pueden ser accedidos en línea mediante cada uno de los enlaces proporcionados en la lista de referencias.

Referencias

- Aceto, G., Persico, V., and Pescapé, A. (2019). A survey on information and communication technologies for industry 4.0: State-of-the-art, taxonomies, perspectives, and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 21(4), 3467-3501. <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2938259>
- Acioli, C., Scavarda, A., and Reis, A. (2021). Applying Industry 4.0 technologies in the COVID-19 sustainable chains. *International Journal of Productivity and Performance Management*. 70(5), 988-1016. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-03-2020-0137>
- Ahuett-Garza, H. and Kurfess, T. (2018). A brief discussion on the trends of habilitating technologies for Industry 4.0 and smart manufacturing. *Manufacturing Letters*. 15, 60-63. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.02.011>
- Akundi, A., & Lopez, V. (2021). A review on application of model-based systems engineering to manufacturing and production engineering systems. *Procedia Computer Science*, 185, 101-108. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.05.011>
- Alabi, M. O., Telukdarie, A., and van-Rensburg, N. J. (2019). Water 4.0: An Integrated Business Model from an Industry 4.0 Approach. En M. Y. Wang (Ed.), *2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM CFP19IEI-POD)* (pp. 1364-1369). Macau: IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEM44572.2019.8978859>
- Azarmipour, M., Elfaham, H., Gries, C., and Epple, U. (2019). PLC 4.0: A control system for Industry 4.0. En F. Gao, C. M. Salin, M. Fu, R. Ma, M. Jasinski, W. He, S. Bayhan and P. Chaturvedi (Eds.), *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (CFP19IEI-POD)* (Vol. 1) (pp. 5513-5518). Lisbon: IEEE. <https://doi.org/10.1109/IECON.2019.8927026>
- Bafler, R., Clausnitzer, V., Vestner, R., Werner, U., and Ziemer, C. (2017). *WATER 4.0-An important element for the German water industry*. Berlin: German Water Partnership. 24 Pp.
- Computerworld México (2022). *La Industria 4.0 continúa firme en México*. Recuperado de <https://computerworldmexico.com.mx/la-industria-4-0-continua-firme-en-mexico/>

- C. Costa and G. Azevedo (2021). Industry 4.0 contributions to education 4.0. In *16th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)* (pages 1-6). IEEE.
- Christopher Alan Bonfield, Marie Salter, Alan Longmuir, Matthew Benson, and Chie Adachi (2020). Transformation or evolution?: Education 4.0, teaching and learning in the digital age. *Higher Education Pedagogies*, 5(1):223-246. <https://doi.org/10.1080/23752696.2020.1816847>
- Cluster Industrial (2020). *5 empresas mexicanas a seguir en 2020*. Recuperado de: <https://www.clusterindustrial.com.mx/noticia/1987/5-empresas-mexicanas-a-seguir-en-2020>.
- Dai, L. (2006). From conventional technology to carbon nanotechnology: The fourth industrial revolution and the discoveries of C₆₀, carbon nanotube and nanodiamond. En L. Dai (Ed.), *Carbon Nanotechnology. Recent Developments in Chemistry, Physics, Materials Science and Device Applications* (pp. 3-11). Dayton Dayton, EE. UU.: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-044451855-2/50004-8>
- Dario Assante, Alessandro Caforio, Marta Flamini, and Elpidio Romano (2019). Smart education in the context of industry 4.0. In *2019 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)* (1140-1145). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EDUCON.2019.8725057>.
- Dastbaz, M. and Cochrane, P. (2019). *Industry 4.0 and Engineering for a Sustainable Future*. Switzerland: Springer. 246 Pp. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-12953-8>
- Dimitris, M., Ekaterini, V., and Sophia, F. (2017). Quantification of Industry 4.0 Manufacturing Complexity based on Information Theory. *Manufacturing Systems*. 11(13).
- Dimitris, M., Sophia, F., Nikoletta, B., and Pietro, P. (2018). Product-service system (PSS) complexity metrics within mass customization and Industry 4.0 environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 97(1), 91-103. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1903-3>
- Efthymiou, K., Mourtzis, D., Pagoropoulos, A., Papakostas, N., and Chrysosolouris, G. (2016). Manufacturing systems complexity analysis methods review. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 29(9), 1025-1044. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2015.1130245>
- Facchini, F., Oleśków-Szłapka, J., Ranieri, L., & Urbinati, A. (2019). A maturity model for logistics 4.0: An empirical analysis and a roadmap for future research. *Sustainability*, 12(1), 86. <https://doi.org/10.3390/su12010086>
- Foro Económico Mundial (2020). *Schools of the future - Defining New Models of Education for the Fourth Industrial Revolution*. Recuperado de <https://es.weforum.org/reports/schools-of-the-future-defining-new-models-of-education-for-the-fourth-industrial-revolution/>
- Freund, L., Al-Majeed, S., & Millard, A. (2021a). Case study application of a strategic complexity management framework for complex industrial systems. *Industry 4.0*, 6(2), 41-45.
- Freund, L., Al-Majeed, S., & Millard, A. (2021b). Case Studies Key-Findings of a Strategic Complexity Management Framework for Industrial Manufacturing Systems. En *2021 16th International Conference of System of Systems Engineering (SoSE)* (pp. 55-60). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SoSE52739.2021.9497489>

- Gilchrist, A. (2016). *Industry 4.0: the industrial internet of things*. New York: Springer. 259 Pp. <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-2047-4>
- Gobierno de México (2019). *Internet para Tod@s*. Recuperado de <https://www.gob.mx/internetparatodos>
- Gough, D., Oliver, S., and Thomas, J. (2017). *An introduction to systematic reviews*. (Second edition). London: Sage. 323 Pp.
- Hasnan, N. and Yusoff, Y. (2018). Short review: Application areas of industry 4.0 technologies in food processing sector. *IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED)*, 1-6, IEEE. <https://doi.org/10.1109/SCORED.2018.8711184>
- Hernandez-Aguilar, C., Dominguez-Pacheco, A., Martínez-Ortiz, E., Ivanov, R., Bonilla, J. L. Cruz-Orea, A., and Ordonez-Miranda, J. (2020). Evolution and characteristics of the transdisciplinary perspective in research: a literature review. *Transdisciplinary Journal of Engineering & Science*. 11. <https://doi.org/10.22545/2020/00140>
- Huidobro-Mejía, M. A., Vera-Camacho, A. D., and Aranda Marcelino, M. (2020). Estrategias del sector público y privado para la implementación de la Industria 4.0 en México. *UPIICSA. Investigación Interdisciplinaria*. 6(1), 13-31.
- Hung, S. W., Wang, A. P., and Chang, C. C. (2012). Exploring the evolution of nano technology. En D. F. Kocaoglu, T. R. Anderson, and T. U. Daim (Eds.), *2012 Proceedings of PICMET'12: Technology Management for Emerging Technologies* (pp. 2598-2604). Portland: IEEE.
- Hurtado, J. (2000). *Metodología de la Investigación Holística*. (Tercera edición). Caracas, Venezuela: Fundación Sygal. 666 Pp.
- Instituto Mexicano para la Competitividad [IMCO] (2022). *Índice de Competitividad Internacional (ICI)* [archivo PDF]. Recuperado de <https://imco.org.mx/indices/indice-de-competitividad-internacional-2022/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI] (2021). *Encuesta Nacional sobre Disponibilidad y Uso de Tecnologías de la Información en los Hogares (ENDUTIH)*. <https://www.inegi.org.mx/programas/dutih/2021/#Tabulados>
- Instituto Politécnico Nacional [IPN] (2019). *EDUCACIÓN 4.0*. Recuperado de <https://e4-0.ipn.mx/educacion-4-0/>.
- International Standardization Organization [ISO] (2018). *Revista ISO FOCUS*. Recuperado de https://www.iso.org/isofocus_131.html.
- Javaid, M., Haleem, A., Vaishya, R., Bahl, S., Suman, R., and Vaish, A. (2020). Industry 4. technologies and their applications in fighting COVID-19 pandemic. *Diabetes & Metabolic Syndrome: Clinical Research & Reviews*. 14(4), 419-422. <https://doi.org/10.1016/j.dsx.2020.04.032>
- Jazdi, N. (2014). Cyber physical systems in the context of Industry 4.0. En L. Miclea and I. Stoian (Eds.), *2014 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics*, 1-4. Romania: IEEE. <https://doi.org/10.1109/AQTR.2014.6857843>

- Kagermann, H., Lukas, W. D., and Wahlster, W. (2011). Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution. [archivo PDF] *VDI Nachrichten*. Recuperado de https://www.live.dfki.de/fileadmin/user_upload/DFKI/Medien/News_Media/Presse/Presse-Highlights/vdinach2011a13-ind4.0-Internet-Dinge.pdf.
- Kang, H. S., Lee, J. Y., Choi, S., Kim, H., Park, J. H., Son, J. Y., ..., and Noh, S. D. (2016). Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 3(1), 111-128. <https://doi.org/10.1007/s40684-016-0015-5>
- Langmann, R. and Rojas-Peña, L. F. (2016). A PLC as an Industry 4.0 component. *2016 13th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV)*, 10-15, Madrid: IEEE. <https://doi.org/10.1109/REV.2016.7444433>
- Liao, Y., Deschamps, F., Loures, E. D., and Ramos, L. P. (2017). Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal. *International Journal of Production Research*. 55(12), 3609-3629. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1308576>
- Lopes, A. M., & Machado, J. A. T. (2020). A review of fractional order entropies. *Entropy*, 22(12), 1374. <https://doi.org/10.3390/e22121374>
- Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*. 6, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>
- Majstorovic, V. D. and Mitrovic, R. (2019). Industry 4.0 programs worldwide. En L. Monostori, V. Majstorovic, S. Hu, and D. Djurdjanovic (Eds.), *Proceedings of the 4th International Conference on the Industry 4.0 Model for Advanced Manufacturing. AMP 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering* (pp. 78-99). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18180-2_7
- Martínez-Martínez, A., García-Garnica, A., Carrillo, J. y Hualde, A. (2020). *Industria 4.0 en México. Elementos diagnósticos y puesta en práctica en sectores y empresas*. (Primera edición). Madrid: Plaza y Valdés Editores. 218 Pp.
- Martínez-Olvera, C. (2020a). An entropy-based formulation for assessing the complexity level of a mass customization industry 4.0 environment. *Mathematical Problems in Engineering*, 1-19. <https://doi.org/10.1155/2020/6376010>
- Martínez-Olvera, C. (2020b). An Entropy-Based Formulation for the Support of Sustainable Mass Customization 4.0. *Mathematical Problems in Engineering*, 1-21. <https://doi.org/10.1155/2020/3840426>
- Mo Elbestawi, Dan Centea, Ishwar Singh, and Tom Wanyama (2018). Sept learning factory for industry 4.0 education and applied research. *Procedia manufacturing*, 23. 249-254. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.04.025>
- Moeuf, A., Pellerin, R., Lamouri, S., Tamayo-Giraldo, S., and Barbaray, R. (2018). The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0. *International Journal of Production Research*. 56(3), 1118-1136. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1372647>

- Mourtzis, D., Fotia, S., and Boli, N. (2017). Metrics definition for the product-service system complexity within mass customization and industry 4.0 environment. En R. Jardim-Gonçalves, J. Pedro-Mendoça, M. Pallot, A. Zarli, J. Martins, and M. Marques (Eds.), *2017 International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)* (pp.1166-1172). Madeira Island: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICE.2017.8280013>
- Mourtzis, D., Fotia, S., Boli, N., and Vlachou, E. (2019). Modelling and quantification of industry 4.0 manufacturing complexity based on information theory: a robotics case study. *International Journal of Production Research*. 57(22), 6908-6921. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1571686>
- Muriel-Pera, Y. de J., Díaz-Piraquive, F. N., Rodríguez-Bernal, L. P., and Galeano-Camacho, E. G. (2018). Adoption of Strategies the Fourth Industrial Revolution by Micro, Small and Medium Enterprises in Bogota DC. En C. A. Lozano-Garzón (Ed.), *2018 Congreso Internacional de Innovación y Tendencias en Ingeniería CONIITI* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CONIITI.2018.8587071>
- Nakagawa, E. Y., Antonino, P. O., Schnicke, F., Capilla, R., Kuhn, T., and Liggesmeyer, P. (2021). Industry 4.0 reference architectures: State of the art and future trends. *Computers & Industrial Engineering*. 107241. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107241>
- Nurul Nadiah Mustafa Kamal, Airil Haimi Mohd Adnan, Ahmad Arifuddin Yusof, Muhamad Khairul Ahmad, and Muhammad Anwar Mohd Kamal (2019). Immersive interactive educational experiences adopting education 5.0, industry 4.0 learning technologies for malaysian universities. In *Proceedings of the International Invention, Innovative & Creative (InIIC) Conference, Series* (190-196). Recuperado de <https://ssrn.com/abstract=3511172>.
- Onyeme, C., & Liyanage, K. (2022). A systematic review of Industry 4.0 maturity models: applicability in the O&G upstream industry. *World Journal of Engineering*. Vol. ahead-of-print. <https://doi.org/10.1108/WJE-12-2021-0689>
- Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo [OECD] (2021). *OECD Data*. Recuperado de <https://data.oecd.org/>
- Ostroukh, A. V., Pronin, T. B., Volosova, A. V., Volkov, A. O., and Ptitsyn, D. A. (2021). Hyperautomation in the Auto Industry. *Russian Engineering Research*. 41(6), 532-535. <https://doi.org/10.3103/S1068798X21060162>
- Parthasarathi, V. and Thilagavathi, G. (2011). Synthesis and characterization of zinc oxide nanopartilce and its application on fabrics for microbe resistant defence clothing. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*. 3(4), 392-398.
- Pereira, A. C. and Romero, F. (2017). A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept. *Procedia Manufacturing*. 13, 1206-1214. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.032>
- Pérez-Miguel, Á. L., Piña-Badillo, I., and Álvarez-Vázquez, G. (2021). Diseño de una metodología de mantenimiento predictivo para asegurar procesos de producción de la industria 4.0. *South Florida Journal of Development*. 2(1), 1009-1017. <https://doi.org/10.46932/sfjdv2n1-074>

- Phuyal, S., Bista, D., and Bista, R. (2020). Challenges, opportunities and future directions of smart manufacturing: a state of art review. *Sustainable Futures*. 2, 100023. <https://doi.org/10.1016/j.sfsf.2020.100023>
- Rainer, D. and Alexander, H. (2014). Industrie 4.0: hit or hype. *Industrial Electronics Magazine*. 8(2), 56-58. <https://doi.org/10.1109/MIE.2014.2312079>
- Rajkumar, R., Lee, I., Sha, L., and Stankovic, J. (2010). Cyber-physical systems: the next computing revolution. *47th Design Automation Conference*. New York: IEEE. 731-736 Pp. <https://doi.org/10.1145/1837274.1837461>
- Ramírez-Arellano, A., Hernández-Simón, L. M., & Bory-Reyes, J. (2021). Two-parameter fractional Tsallis information dimensions of complex networks. *Chaos, Solitons & Fractals*, 150, 111113. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2021.111113>
- Ramírez-Arellano, A., Sigarreta Almira, J. M., & Bory-Reyes, J. (2020). Fractional information dimensions of complex networks. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 30(9), 093125. <https://doi.org/10.1063/5.0018268>
- Ramos, L. F. P., Loures, E. D. F. R., & Deschamps, F. (2020). An analysis of maturity models and current state assessment of organizations for industry 4.0 implementation. *Procedia manufacturing*, 51, 1098-1105. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.154>
- Rauch, E., Unterhofer, M., Rojas, R. A., Gualtieri, L., Woschank, M., & Matt, D. T. (2020). A maturity level-based assessment tool to enhance the implementation of industry 4.0 in small and medium-sized enterprises. *Sustainability*, 12(9), 3559. <https://doi.org/10.3390/su12093559>
- Riquelme, R. (2019). México llega con retraso a la Cuarta Revolución Industrial. Recuperado de <https://www.eleconomista.com.mx/tecnologia/Mexicollega-con-retraso-a-la-Cuarta-Revolucion-Industrial-20191009-0055.html>
- Rostow, W. W. (1985). The Fifth Kondratieff Upswing and the Fourth Industrial Revolution: their meaning for forestry. En R. A. Sedjo (Ed.), *Investments in forestry: resources, land use and public policy* (pp. 11-19). Nueva York: Westview.
- Santos, R. C., & Martinho, J. L. (2020). An Industry 4.0 maturity model proposal. *Journal of Manufacturing Technology Management*. <https://doi.org/10.1108/JMTM-09-2018-0284>
- SCI4.0. (2017). *Consejo de Normalización de Industria 4.0*. Recuperado de <https://www.sci40.com/>
- S.C. Normalización y Certificación [NYCE] (2022). *Catálogo de estándares NYCE*. Recuperado de <https://nyce.org.mx/catalogodeestandaresnyce/wp-content/uploads/2022/12/Acervo-Normativo-NYCE-30.11.2022.pdf>
- Secretaría de Economía [SE] (2014). *Mapa de Ruta para Internet of Things (IoT)*. [archivo PDF]. Recuperado de http://prosoft.economia.gob.mx/Imagenes/ImagenesMaster/Estudios%20Prosoft/GREF_25.pdf

- Secretaría de Economía [SE] (2016a). *Crafting the Future: A Roadmap for Industry 4.0 in Mexico*. [archivo PDF]. Recuperado de <https://amiti.org.mx/wp-content/uploads/2018/01/Crafting-the-future-10-agosto-2016.pdf>
- Secretaría de Economía [SE] (2016b). *Obtenido de Programa para el Desarrollo de la Industria del Software (ProSoft 3.0)*. Recuperado de <https://prosoft.economia.gob.mx>
- Secretaría de Economía [SE] (2010). *Catálogo Mexicano de Normas*. Recuperado de <http://www.2006-2012.economia.gob.mx/comunidad-negocios/normalizacion/catalogo-mexicano-de-normas>
- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*. 27(3), 379-423.
- Sistema Integral de Normas y Evaluación de la Conformidad [SINEC] (2022). *Consulta de catálogo de normas*. Recuperado de <https://www.sinec.gob.mx/SINEC/Vista/Normalizacion/BusquedaNormas.xhtml>.
- Spanaki, K., Karafili, E., and Despoudi, S. (2021a). AI applications of data sharing in agriculture 4.0: A framework for role-based data access control. *International Journal of Information Management*. 59: 102350. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2021.102350>
- Spanaki, K., Sivarajah, U., Fakhimi, M., Despoudi, S., and Irani, Z. (2021b). Disruptive technologies in agricultural operations: A systematic review of AI-driven AgriTech research. *Annals of Operations Research*, 1-34. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03922-z>
- Torres-Correa, C. M., Gomez-Valencia, J. F., Carvallho, J. J., Trujillo, E. L., and Tinjaca, N. B. (2020). Implementation of Industry 4.0 Technologies in Embedded Systems for Contagion Mitigation and COVID-19 Control in Work Areas. *Congreso Internacional de Innovación y Tendencias en Ingeniería (CONIITI)*. 1-6. <https://doi.org/10.1109/CONIITI51147.2020.9240341>
- Trovati, M., Zhang, H., Ray, J., and Xu, X. (2019). An entropy-based approach to real-time information extraction for industry 4.0. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 16(9), 6033-6041. <https://doi.org/10.1109/TII.2019.2962029>
- Vaidya, S., Ambad, P., and Bhosle, S. (2018). Industry 4.0 - a glimpse. *Procedia Manufacturing*. 20, 233-238. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.034>
- Valdés, R. A., Comendador-Gómez, V. F., Sanz, A. R., and Castán, J. P. (2018). Aviation 4.0: more safety through automation and digitization. En M. C. Kushan (Ed.), *Aircraft Technology*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.73688>
- Xu, L. D., Xu, E. L., and Li, L. (2018). Industry 4.0: state of the art and future trends. *International Journal of Production Research*. 56(8), 2941-2962. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806>
- Yang, F. and Gu, S. (2021). Industry 4.0, a revolution that requires technology and national strategies. *Complex & Intelligent Systems*. 7(3), 1311-1325. <https://doi.org/10.1007/s40747-020-00267-9>
- Zhou, K., Liu, T., and Zhou, L. (2015). Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges. En J. D. Zhuo-Tang, S., Yin, H. Ligang, and L. Renfa (Eds.), *12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)*, (pp. 2147-2152). New Jersey: IEEE. <https://doi.org/10.1109/FSKD.2015.7382284>