

Transformación empresarial en la era digital: los retos de la industria 4.0 en los modelos de negocio y su significado en la Ingeniería Industrial

Business Transformation in the Digital Age: the Challenges of Industry 4.0 on Business Models and their Significance in the Industrial Engineering

Carlos Vázquez-Cid de León, Salvador Montesinos González, Ana Ramos Soto

Palabras clave: Industria 4.0, Ingeniería Industrial, modelo de negocios, habilidades digitales

Key words: Industry 4.0, Industrial Engineering, business model, digital skills

RESUMEN

La Industria 4.0 está transformando los procesos de producción en todo el mundo, y su impacto en la Ingeniería Industrial en México es relevante y está impulsando la modernización y la automatización de las fábricas y empresas, con el objetivo de mejorar la eficiencia, la calidad y la flexibilidad en la producción. El objetivo en este trabajo de investigación es describir la situación actual en México respecto a industria 4.0 e ingeniería industrial, para lo cual se sigue una Revisión Sistemática de Literatura. Los resultados se presentan en el contexto de las tendencias científicas actuales, destacando las ventajas y desventajas de la revolución 4.0 y su impacto en la industria en México. Se identificaron dos elementos clave y tres modelos significativos que ilustran la presencia y evolución de la Industria 4.0 en el país. Se enfatiza que la Industria 4.0 está transformando la producción y el trabajo en México, con la Ingeniería Industrial en el centro de esta transición tecnológica. Para los ingenieros industriales mexicanos, representa tanto un desafío como una oportunidad: deben actualizar sus conocimientos y habilidades para adaptarse a las nuevas tecnologías y procesos emergentes.

ABSTRACT

Industry 4.0 is transforming production processes worldwide, and its impact on Industrial Engineering in Mexico is significant, driving the modernization and automation of factories and businesses with the aim of improving efficiency, quality, and flexibility in production. The objective of this research is to describe the current situation in Mexico regarding Industry 4.0 and Industrial Engineering, following a Systematic Literature Review. The results are presented in the context of current scientific trends, highlighting the advantages and disadvantages of the 4.0 revolution and its impact on industry in Mexico. Two key elements and three significant models illustrating the presence and evolution of Industry 4.0 in the country were identified. It is emphasized that Industry 4.0 is transforming production and work in Mexico, with Industrial Engineering at the heart of this technological transition. For Mexican industrial engineers, this represents both a challenge and an opportunity: they must update their knowledge and skills to adapt to emerging technologies and processes.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día es cada vez más frecuente escuchar el tema de Industria 4.0; es un concepto revolucionario que ha ganado mucha atención tanto en círculos académicos como industriales y en la sociedad a nivel internacional. Este término se refiere a la próxima generación de tecnologías de fabricación que permiten el desarrollo de la cadena de valor, lo que da como resultado tiempos de entrega de fabricación reducidos y una mejor calidad producto personalizado y desempeño organizacional conectado en tiempo real con sus clientes (Belman et al., 2020; Cañas et al., 2021). La industria 4.0 se caracteriza por el uso de tecnologías de la información y la comunicación como robots colaborativos, Internet de las cosas, cómputo en la nube, big data, gemelo digital, realidad aumentada, (IA), manufactura aditiva y otras tecnologías disruptivas (Ávila y Moreno, 2023; Bajic et al., 2021; Roman, 2016;). En la tabla 1 se describe una definición de las principales tecnologías.

Esto, da origen a lo que se conoce como fábricas inteligentes, en la que la conectividad de diferentes recursos de producción permite la toma de decisiones predictiva y automatizada, misma que puede ser protagonizada por máquinas o sistemas inteligentes. Los sistemas ciberfísicos pueden monitorear procesos físicos y posibilitar decisiones descentralizadas o incluso, en última instancia, una adaptación auto-inteligente del sistema de producción (Corallo et al.,

2020), lo que permite actuar de manera inteligente al cambiar un sistema y podría tener un fuerte impacto en los paradigmas de manufactura y prestación de servicios actuales, incluso en los casos en que el factor humano es predominante (Castelo et al., 2022).

La Industria 4.0 también requiere de nuevas competencias para los ingenieros industriales, llamadas competencias digitales, que pueden ser proporcionadas por una fábrica de aprendizaje con sistemas del mundo real, por lo que los estudiantes de ingeniería industrial se verán en la necesidad de afrontar un reto en el aprendizaje tecnológico que está cambiando a una velocidad nunca antes vista. Las competencias requeridas en la Industria 4.0 se clasifican en competencias técnicas y sociales, y un sistema de producción ciberfísico integrado implica nuevas competencias y adaptación al teletrabajo, la programación, el uso de (IA), la generación de contenidos interactivos y digitales, por mencionar los principales (Sánchez, 2019).

El auge de la Industria 4.0 y de las fábricas inteligentes, junto con todas las tecnologías habilitadoras, transformará a los trabajadores de las fábricas en trabajadores del conocimiento, las máquinas y robots colaborativos podrán realizar las tareas que requieren de mayor precisión o que implican riesgos, mientras que la fabricación se convertirá en un negocio intensivo en software y ventas digitales.

Tabla 1. *Tecnologías disruptivas*

Tecnología	Definición Breve
Aprendizaje automático/Machine learning	Uso de algoritmos para mejorar la toma de decisiones basándose en datos y patrones.
Cadena de bloques/Blockchain	Registro descentralizado y seguro de transacciones que garantiza integridad y transparencia.
Ciberseguridad/Cybersecurity	Protección de sistemas, redes y datos contra amenazas cibernéticas.
Aplicación informática para móviles/App	Desarrollo de software específico para dispositivos móviles.
Computo en la nube/Cloud computing	Acceso a recursos de cómputo a través de internet, permitiendo almacenamiento y procesamiento remoto.
Datos masivos/Big data	Procesamiento y análisis de conjuntos de datos extremadamente grandes para extraer información.
Tecnologías disruptivas/Disruptive technologies	Innovaciones que transforman mercados y modelos de negocio.
Gemelo digital/Digital twin	Representación digital en tiempo real de un objeto, proceso o sistema físico.
Gestión inteligente de la energía/Intelligent energy management	Optimización del uso de energía mediante tecnologías digitales.
Cómputo cuántico/Quantum computers	Utilización de principios cuánticos para realizar cálculos complejos.
(IA)/Artificial intelligence	Desarrollo de sistemas capaces de realizar tareas que requieren inteligencia humana.
Internet de las cosas/Internet of things	Conexión y comunicación entre dispositivos para recopilar y compartir datos.
Manufactura aditiva/Additive manufacturing	Creación de objetos mediante la superposición de capas de material.
Modelado digital/Digital modeling	Representación digital de objetos o sistemas para análisis y simulación.
Monitoreo de procesos en tiempo real/Real-time process monitoring	Seguimiento y control continuo de procesos en tiempo real.
Realidad aumentada/Augmented reality	Integración de elementos virtuales en el mundo real a través de dispositivos tecnológicos.
Robotización de la producción/Cobots	Integración de robots colaborativos con humanos para realizar tareas.
Sistemas ciberfísicos/Cyberphysical systems	Integración de sistemas computacionales y físicos para controlar procesos.
Vehículos autónomos/Automated guided vehicles	Vehículos que pueden moverse sin intervención humana, guiados por tecnologías avanzadas.
Metaverso/Metaverse	Espacios virtuales en línea donde los usuarios pueden interactuar y compartir información.

Por su parte, las tareas que requieran experiencia, intuición, creatividad o decisiones basadas en la incertidumbre seguirán siendo responsabilidad de los humanos, por lo que es de esperarse la aparición de nuevos puestos de trabajo o nuevas funciones para los ingenieros industriales (Ghobakhloo, 2020).

Este cambio en la forma en que funciona la industria tiene enormes implicaciones en la ingeniería industrial, una imperante y necesaria actualización de sus planes y programas de estudio contemplando las tecnologías 4.0 ya que la tendencia digital ha cambiado la forma en que operan las fábricas. Al conectar objetos físicos a máquinas, recopilar datos del campo e integrar componentes de software, los principios de Industria 4.0 permiten una mejora notable en el diseño de productos; sin embargo, para el capital humano que trabaja en ese tipo de industrias representa un reto adquirir los conocimientos y llevarlos a la práctica en periodos de tiempo muy cortos. Aunado a que, el teletrabajo desplaza a los colaboradores de las oficinas o espacios de centros de trabajo o procesos y los lleva a una nueva ubicación que es el trabajo en casa; este fenómeno trae como consecuencia el no tener contacto físico con la producción, no obstante esta tecnología al ser disruptiva ha transformado la forma en que se hacen negocios y cómo se vive en estostiempos (Casarín, 2021) señala que la Industria 4.0 busca transformar a una empresa en una organización inteligente para conseguir los mejores resultados de negocio. Esta revolución está marcada por la aparición

de nuevas tecnologías como la robótica, la analítica, la (IA), las tecnologías cognitivas, la nanotecnología y el Internet of Things (IoT)

Desde la llegada del Internet hasta la Inteligencia Artificial (IA), la tecnología ha creado nuevas oportunidades y desafíos en casi todas las áreas de la vida, Los hallazgos muestran que la combinación de tecnologías puede crear una ventaja competitiva para los emprendedores tecnológicos, la rápida iteración e integración de la tecnología de la información general en la era de la economía digital ha contribuido significativamente a la estabilización del empleo y la promoción del crecimiento a nivel internacional (Haddock & O'Keefe, 1990; Kulkov et al., 2023; Padilla, 2019; Shen & Zhang, 2024). Las empresas y los trabajadores deben adaptarse a los cambios tecnológicos para mantenerse competitivos en un mercado global cada vez más saturado (Lira et al., 2023). Las habilidades digitales se han convertido en una necesidad para los trabajadores y las empresas que buscan prosperar en esta nueva era tecnológica. Otras consecuencias que por añadidura se vive, son los cambios de jornadas laborales, la desaparición y aparición de puestos de trabajo que demandan otros conocimientos y habilidades como es el caso de la ciencia de datos.

Por lo tanto, para aprovechar los beneficios potenciales de la fabricación inteligente y la Industria 4.0, es necesario reformar el proceso de realización del producto, haciendo posible almacenar y compartir los

datos recopilados en el campo entre humanos y máquinas que obedecen a otras máquinas (Hernández et al., 2020). Esto proporciona acceso a la información y los datos generados durante el uso del producto, lo que permite a los diseñadores observar el rendimiento del producto y la forma en que se utiliza. Con productos habilitados con sensores integrados en el Internet de las Cosas, se abren nuevas oportunidades en cada etapa del ciclo de vida del producto, desde el propio proceso de diseño (Aguirre-Flores, 2022).

La Industria 4.0 cambia toda la esfera de la producción industrial a través de la fusión de la tecnología digital e Internet con la industria convencional (Malik et al., 2021). Esta revolución está habilitada por tecnologías como Internet de las Cosas (IoT), big data, (IA) y computación en la nube (Malik et al., 2021; Munirathinam, 2020). Además, la Industria 4.0 se basa en los principios de descentralización, conectividad, interoperabilidad, transparencia de la información, modularidad y orientación al servicio (Kenett, 2021). La transformación digital de las organizaciones afecta no solo la forma en que se fabrican los productos, sino que también crea nuevas oportunidades para el diseño de productos, procesos, servicios y sistemas (Iszczuk et al., 2021). Esta transformación en las industrias manufactureras provocada por Industria 4.0 ha creado un marco a través del cual se pueden lograr mejoras sustanciales en la productividad, la calidad y la satisfacción del cliente (Orive et al., 2021). Sin embargo, muchos intentos de implementar este

marco han involucrado prácticas de diseño tradicionales basadas en conceptos centrados en los sistemas de almacenamiento (Lira et al., 2023).

Esta nueva era se caracteriza por la convergencia de tecnologías digitales, físicas y biológicas, y la creación de sistemas inteligentes que permiten la interconexión y la toma de decisiones autónomas en tiempo real. El surgimiento de la Industria 4.0 ha marcado el inicio de una nueva era de la tecnología, trayendo consigo cambios profundos en la forma en que operan las empresas (Patil et al., 2023). El advenimiento de tecnologías como (IoT), (AI), aprendizaje automático y blockchain está transformando la forma en que las empresas interactúan con sus clientes, proveedores y socios con conceptos como el de logística inteligente, aprendizaje automático y aprendizaje profundo aplicado al mantenimiento inteligente con el apoyo de redes de sensores, calidad 4.0 considerando productos personalizados e indicadores del desempeño en tiempo real, análisis de datos en tiempo real para la Industria inteligente y su conexión con el cliente, ciberseguridad industrial y trabajo en la nube, digitalización de las organizaciones y espacios en el metaverso para comercio electrónico de productos virtuales (Patil et al., 2023; Pererira & Romero, 2017; Tao et al., 2017;).

Estas tecnologías ofrecen a las empresas la oportunidad de simplificar sus modelos y procesos comerciales, mejorar la eficiencia del sistema y lograr reducciones significativas de costos al digitalizarse se disminuyen los costos de mantenimiento

de su infraestructura y consumos de energía eléctrica, agua, pago de predial o sea propiedades o terrenos, por mencionar algunos ejemplos (Javaid et al, 2021). Internet irrumpió en casi todos los sectores de la industria, con la tercera revolución industrial (Industria 3.0) viendo el primer auge comercial con la Web 1.0 o lo que se conoce como la “web de solo lectura”. La cuarta revolución industrial, o Industria 4.0, se refiere principalmente al concepto de fábricas en las que las máquinas se complementan con sistemas inteligentes y autónomos mejorados por (IoT), impresión 3D, (IA), aprendizaje automático, big data, realidad aumentada, estas máquinas pueden tomar decisiones respecto a la velocidad de la producción, horarios de mayor consumo de energía eléctrica de acuerdo con las tarifas de consumo o por la demanda y considerar inventarios virtuales (Jaidka et al., 2020; Javaid et al, 2021). Esta revolución se caracteriza por la convergencia de la computación, las redes y la integración de procesos ciberfísicos, lo que es testigo de una adopción exponencial de la automatización en los procesos de fabricación al tiempo que aumenta la productividad y reduce los costos de fabricación, el capital humano se ve en un nuevo contexto en el que debe aparecer en los organigramas institucionales una (IA) que toma decisiones o lidera al igual de equipos de colaboradores robots en líneas de procesos industriales (Goel y Gupta, 2020).

Se espera que las tecnologías digitales fomenten el intercambio de información y faciliten la colaboración en cuestiones de sostenibilidad entre empresas y consumo de recursos naturales y este tipo de temas demanda en las Universidades una educación 4.0 a la misma altura que la demanda de capital humano para estas organizaciones inteligentes, aprovechando para mejorar la competitividad de la industria manufacturera al convertirse en una tendencia destacada en todo el mundo, en donde el humano se le requiere un menor número de horas laborales y puede obtener un mejor salario, con miras al cumplimiento de la gerencia de la felicidad (Goyal et al., 2023). Sin embargo, existe evidencia empírica limitada que explica el papel de la Industria 4.0 en el contexto de la gestión sostenible de la cadena de suministro, la cual necesita de una especialización de ciencia de datos para incrementar el control de rutas, tiempos de entrega y clientes de cualquier parte del mundo haciendo pedidos sin importar su idioma ya que este tema es resuelto con aplicaciones (App) diseñadas para traducir idiomas, gestionar pedidos de compra o Sistema de Posicionamiento Global GPS para rutas y tráfico (Padilla, 2019). El objetivo en este trabajo de investigación es describir la situación actual en México respecto a industria 4.0 e ingeniería industrial mediante una revisión sistemática de literatura.

METODOLOGÍA

La metodología empleada consta de 6 fases y es una Revisión Sistemática de la Literatura en un periodo de revisión entre los años 2015 al 2022, se obtuvieron un total de 109 artículos, los criterios de inclusión fueron las palabras clave: Industria 4.0 para buscar en títulos, resumen y palabras clave en Scopus, la calidad seleccionada fue artículos indexados, Q1, Q2, Q3 y Q4 para identificar la situación actual respecto a la literatura sobre industria 4.0. También se

realizó una revisión de la literatura en otras bases de datos como Redalyc, Sciencedirect, Scimago y Google Scholar, para explorar la literatura sobre industria 4.0 e ingeniería industrial para poder describir su contexto en México considerando estudios de casos y los diferentes desafíos o barreras que representa esta nueva revolución industrial (Rozo, 2020). Lo anterior se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Metodología desarrollada en la RSL sobre Industria 4.0 en los modelos de negocio



Como parte del desarrollo del presente trabajo de investigación, se aplicó un método para llevar a cabo una evaluación de impactos que proponen los autores Donald & Lang (2001), Campbell D. (1996), Heckman et al., (1997), Banerjee et al., (2007), al aplicar estos métodos, se sigue un proceso sistemático que incluye dos etapas que se presentan a continuación:

Etapas de Evaluación de Impacto

En esta etapa, se sigue un proceso meticuloso para evaluar el impacto de un fenómeno social o una intervención específica. Primero, se debe identificar y definir claramente el fenómeno social que se quiere evaluar, como la aparición de la industria 4.0 en un país y su impacto en los ingenieros industriales.

1. Definición del fenómeno social: identificar y definir claramente el fenómeno social o la intervención que se

quiere evaluar, como la aparición de la industria 4.0 en un país y su impacto en los ingenieros industriales.

2. Selección de indicadores: identificar los indicadores clave que se utilizarán para medir el impacto del fenómeno social. Estos indicadores deben ser relevantes, medibles y representativos de los cambios esperados.

3. Recolección de datos: recolectar datos tanto antes como después de la implementación del fenómeno social. Los datos previos permiten establecer una línea base y los datos posteriores ayudan a medir el cambio.

4. Selección de grupos de comparación: para poder atribuir los cambios observados al fenómeno social en cuestión, se seleccionan grupos de comparación que no han sido afectados o expuestos al fenómeno. Esto permite aislar el impacto del fenómeno de otros factores que podrían estar influyendo.

5. Análisis de datos: comparar los datos recopilados antes y después de la intervención y entre los grupos de comparación para medir el impacto.

6. Interpretación de resultados: evaluar los resultados obtenidos y analizar las implicaciones del impacto del fenómeno social en el país.

7. Informe y recomendaciones: presentar los hallazgos en un informe y ofrecer recomendaciones basadas en los resultados obtenidos.

Etapas de Evaluación de Tecnologías

En esta etapa, se evalúan las tecnologías específicas a través de un proceso sistemático considerando cinco aspectos

clave. Primero, se identifican y enumeran las 20 tecnologías que se desean evaluar. Luego, se establecen los criterios de evaluación, dividiéndolos en tangibilidad (hardware físico e infraestructura física) e intangibilidad (software y algoritmos, datos e información) tal y como se muestra a continuación:

1. Identificación de Tecnologías:

Enumera las 20 tecnologías que desees evaluar.

2. Criterios de Evaluación:

Tangibilidad:

Hardware Físico: ¿La tecnología implica la presencia de hardware físico como sensores, robots, etc.?

Infraestructura física: ¿Requiere una infraestructura física para su implementación?

Intangibilidad:

Software y Algoritmos: ¿La tecnología depende principalmente de software, algoritmos o plataformas digitales?

Datos e Información: ¿La tecnología se basa en la manipulación y análisis de datos más que en elementos físicos?

3. Construcción de la Tabla de Evaluación:

Crea una tabla donde las filas representen cada tecnología y las columnas representen los criterios de tangibilidad e intangibilidad. Puedes usar una escala numérica (por ejemplo, de 1 a 5) para evaluar cada criterio para cada tecnología.

4. Evaluación y Análisis:

Suma los puntajes de tangibilidad e intangibilidad para cada tecnología.

Clasifica las tecnologías según sus puntajes totales.

5. Interpretación:

Las tecnologías con puntajes altos en tangibilidad son más físicas y palpables.

Las tecnologías con puntajes altos en intangibilidad dependen más de aspectos virtuales y digitales.

RESULTADOS y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan la revisión de la literatura en la que se clasifica mediante un gráfico su distribución en la base de datos de Scopus, posteriormente se obtuvo una clasificación de ventajas y desventajas de la industria 4.0 para la ingeniería industrial, tal y como se presenta a continuación en la figura 2.

A nivel internacional se desarrolla investigación enfocada a la I4.0, se han publicado un total de 109 artículos científicos entre los años 2015 y el 2022, en donde destaca el área de ingeniería con un 27% por lo que es muy importante el

conocimiento de dicha tendencia para los ingenieros industriales, ver figura 2.

La industria 4.0 es un término que se refiere a la cuarta revolución industrial, que se caracteriza por el uso de tecnologías avanzadas como la (IA), el (IoT) y la robótica para mejorar la eficiencia y la productividad de las operaciones industriales. Aunque esta nueva era de la tecnología ofrece muchos beneficios, también hay ventajas y desventajas importantes que se debe tener en cuenta al decidir si es o no adecuada para una empresa en particular, algunas se muestran en la tabla 2.

Figura 2. Distribución de publicaciones entre los años 2015 al 2022

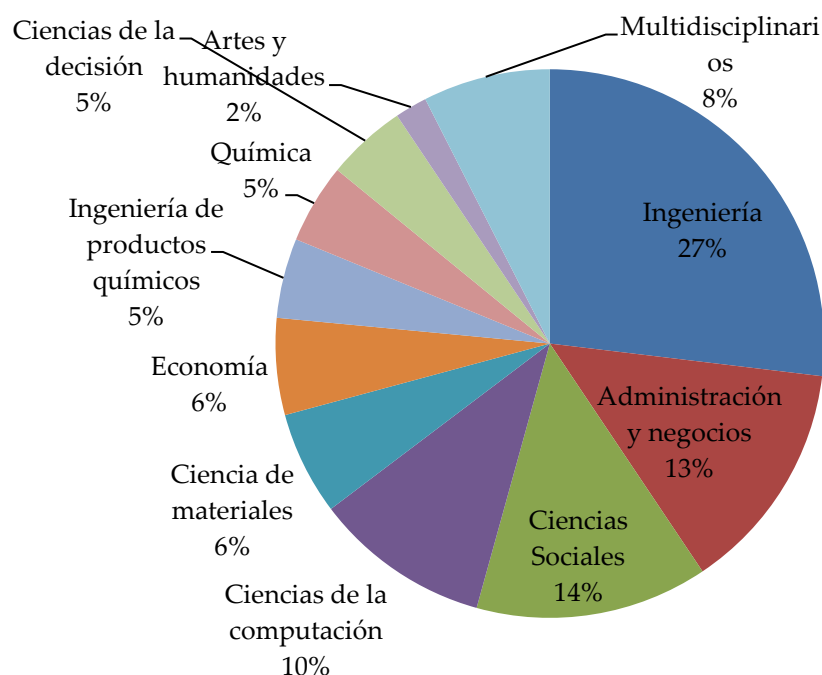


Tabla 2. *Ventajas y desventajas de las tecnologías emergentes en áreas funcionales de las empresas*

Área Funcional	Tecnologías Relevantes	Contenido de Capacitación	Importancia para el Departamento
Dirección	- Tecnologías Disruptivas, Gemelo Digital	- Visión estratégica de la Industria 4.0 y su impacto en los modelos de negocio.	La dirección debe liderar la adopción de tecnologías disruptivas para mantener la competitividad y la innovación.
Gerencia	- Cómputo Cuántico, Realidad Aumentada	- Desarrollo de estrategias para la adopción de tecnologías disruptivas.	La gerencia juega un papel clave en la implementación de tecnologías avanzadas para mejorar la eficiencia y productividad.
Producción	- Manufactura Aditiva, Modelado Digital	- Principios y aplicaciones de la manufactura aditiva y modelado digital.	Mejorar la producción a través de métodos avanzados y eficientes es crucial para la competitividad.
Ventas	- (IoT), Realidad Aumentada	- Estrategias de venta en un entorno digital.	La implementación de tecnologías digitales mejora la eficacia de las estrategias de venta y la experiencia del cliente.
Compras	- Cadena de Bloques, (IoT)	- Integración de cadena de bloques en procesos de compras.	La cadena de bloques puede garantizar transparencia y eficiencia en los procesos de compras.
Mantenimiento y Calidad	- Realidad Aumentada, Sistemas Ciberfísicos	- Aplicaciones de realidad aumentada en mantenimiento.	La realidad aumentada mejora la eficacia del mantenimiento y garantiza la calidad de los procesos.
Seguridad Industrial	- Ciberseguridad	- Principios básicos de ciberseguridad en entornos industriales.	La ciberseguridad es esencial para proteger los sistemas industriales y garantizar la continuidad operativa.
Logística y Operaciones	- (IoT), Robótica de Producción	- Optimización de procesos logísticos mediante IoT.	La implementación de IoT y robótica mejora la eficiencia operativa y la gestión logística.
Recursos Humanos	- Aprendizaje Automático, Gemelo Digital	- Desarrollo de habilidades para la era digital.	La adaptación a las nuevas tecnologías es crucial para el desarrollo de habilidades y retención del talento.
Investigación y Desarrollo	- (IA), Cómputo Cuántico	- Aplicaciones de (IA) en procesos de investigación y desarrollo.	La IA y el cómputo cuántico impulsan la innovación y aceleran los procesos de investigación.
Marketing	- (IoT), Realidad Aumentada	- Utilización de IoT para mejorar la experiencia del cliente.	Las tecnologías digitales mejoran la efectividad de las estrategias de marketing y la experiencia del cliente.
Calidad	- Realidad Aumentada, Sistemas Ciberfísicos	- Integración de sistemas ciberfísicos en procesos de calidad.	La integración de sistemas avanzados garantiza la calidad de los productos y procesos.
Operaciones	- Robótica de Producción	- Integración de la robótica en operaciones de producción.	La robótica mejora la eficiencia y la precisión en las operaciones de producción.

Luego, se seleccionan los indicadores clave que se utilizarán para medir el impacto, asegurándose de que sean relevantes, medibles y representativos de los cambios esperados. A continuación, se recolectan datos tanto antes como después de la implementación del fenómeno social, estableciendo una línea base con los datos previos y midiendo el cambio con los datos posteriores. Para atribuir los cambios

observados al fenómeno en cuestión, se seleccionan grupos de comparación que no hayan sido afectados por el fenómeno, permitiendo así aislar su impacto de otros factores. Los datos recopilados se comparan antes y después de la intervención y entre los grupos de comparación para medir el impacto, ver tabla 3.

Tabla 3. *Evaluación de Desempeño Organizacional*

Dimensión	Grado de Importancia	Línea de Mando Responsable	Fórmula Matemática
Eficiencia Operativa	Alta	Alta Dirección	Eficiencia Operativa (Producción Real/ Producción Planificada) x 100
Satisfacción del Cliente	Alta	Gerencia de Ventas	Satisfacción del Cliente (Clientes satisfechos/ Total de clientes) x 100
Innovación y Desarrollo	Moderada	Gerencia de I+D	Innovación y Desarrollo (Nuevos productos desarrollados/Total de productos) x 100
Rentabilidad Financiera	Alta	Alta Dirección Financiera	Rentabilidad Financiera (Utilidad neta/Ingresos totales) x 100
Calidad del Producto o servicio	Alta	Gerencia de Calidad	Calidad del Producto o Servicio (Productos o servicio cumpliendo estándares/Total de productos o servicios) x 100
Desempeño del Personal	Moderada	Departamento de Recursos Humanos	Desempeño del Personal (Evaluaciones positivas/Total de evaluaciones) x 100
Responsabilidad Social Corporativa	Moderada	Alta Dirección	Responsabilidad Social Corporativa (Actividades sociales realizadas/Total de actividades planificadas) x 100
Flexibilidad y Adaptabilidad	Moderada	Alta Dirección	Flexibilidad y Adaptabilidad (Proyectos adaptados exitosamente/Total de proyectos) x 100
Gestión del Conocimiento	Moderada	Alta Dirección de Tecnología	Gestión del Conocimiento (Conocimiento compartido y utilizado/Total del conocimiento disponible) x 100
Cultura Organizacional	Alta	Alta Dirección de Recursos Humanos	Cultura Organizacional (Adhesión a los valores organizacionales/Total de empleados) x 100
Gestión de Riesgos	Moderada	Departamento de Riesgos	Gestión de Riesgos (Riesgos mitigados exitosamente/Total de riesgos identificados) x 100
Colaboración y Comunicación	Moderada	Departamento de Comunicaciones	Colaboración y Comunicación (Comunicaciones efectivas/Total de comunicaciones) x 100
Tecnología y Transformación Digital	Alta	Alta Dirección de Tecnología	Tecnología y Transformación Digital (Tecnologías adoptadas con éxito/Total de tecnologías evaluadas) x 100
Ambiente Laboral	Moderada	Gerencia de Recursos Humanos	Ambiente Laboral (Encuestas de satisfacción laboral positivas/Total de encuestas) x 100
Cadena de Suministro y Logística	Alta	Departamento de Logística	Cadena de Suministro y Logística (Eficiencia logística/Total de operaciones logísticas) x 100

Para dar continuidad a la etapa 2 se debe cuantificar y analizar de manera efectiva las tecnologías evaluadas, se utiliza una fórmula parametrizada que permite calcular el grado de tangibilidad e intangibilidad de cada tecnología, la cual se presenta en la ecuación 1.

Fórmula parametrizada:

$$I = \Sigma AW + BX + CY + DZ \quad (1)$$

Dónde:

I es el grado de la intangibilidad cuando se acerca al valor más alto de los datos medidos y la tangibilidad cuando se acerca al valor más bajo.

A es el Puntaje de Hardware Físico.

B es el Puntaje de Infraestructura Física.

C es el Puntaje de Software/Algoritmos.

D es el Puntaje de Datos/Información.

Sumatoria=AMachine learning+BMachine learning+CMachine learning+DMachine learning

Sumatoria= Puntaje de Tangibilidad+ Puntaje de Intangibilidad

En la tabla proporcionada, los puntajes de tangibilidad e intangibilidad van desde 1 hasta 5. Se puede ajustar estos puntajes según la experiencia del evaluador.

Ejemplo de Cálculo: Tomar la primera tecnología, "Aprendizaje automático/Machine learning", teniendo lo siguiente: Sumatoria= (4 Puntaje de Hardware Físico) + (3 Puntaje de Infraestructura Física) + (5 Puntaje de Software/Algoritmos) + (4 Puntaje de Datos/Información) Sumatoria= (4Puntaje de Hardware Físico) + (3 Puntaje de Infraestructura Física) + (5 Puntaje de Software/Algoritmos) + (4Puntaje de

Datos/Información). Sustituyendo los valores la Sumatoria seria = (4)+(3)+(5)+(4) = 16

Este proceso se repite para cada tecnología en la tabla 4, utilizando los puntajes correspondientes para hardware físico, infraestructura física, software/algoritmos y datos/información.

Entonces una pregunta critica es si ¿Existe industria 4.0 en México?, y se puede responder que Sí, existen industrias 4.0 en México. La industria 4.0 se refiere a la aplicación de tecnologías digitales y de la información en la fabricación y producción de bienes y servicios. En México, hay una creciente adopción de tecnologías como la (IA), el (IoT), la robótica y la automatización en la industria manufacturera.

Algunos ejemplos de industrias 4.0 en México incluyen la fabricación de automóviles, la producción de dispositivos médicos, la industria aeroespacial y la industria de la electrónica. Además, algunas empresas mexicanas están invirtiendo en la transformación digital y la implementación de tecnologías avanzadas para mejorar la eficiencia y la productividad en sus operaciones como está sucediendo en la industria cervecera y refresquera.

También se están llevando a cabo iniciativas y proyectos gubernamentales para fomentar la adopción de tecnologías 4.0 en la industria mexicana, como el Programa Nacional de la Industria 4.0 lanzado en 2018.

Tabla 4. Evaluación de Tecnologías

	Tecnología	Hardware Físico	Infraestructura física	Software /Algoritmos	Datos/ Información	Sumatoria
1.	Aprendizaje automático/Machine learning	4	3	5	4	16
2.	Cadena de bloques/Blockchain	3	4	4	5	16
3.	Ciberseguridad/Cybersecurity	2	3	5	4	14
4.	Aplicación informática para móviles/App	3	2	5	4	14
5.	Computo en la nube/Cloud computing	2	4	5	4	15
6.	Datos masivos/Big data	1	2	5	5	13
7.	Tecnologías disruptivas/Disruptive technologies	3	3	4	4	14
8.	Gemelo digital/Digital twin	4	3	4	5	16
9.	Gestión inteligente de la energía/Intelligent energy management	3	3	4	4	14
10.	Cómputo cuántico/Quantum computers	5	4	5	3	17
11.	(IA)/Artificial intelligence	3	2	5	4	14
12.	Internet de las cosas/Internet of things	4	3	4	5	16
13.	Manufactura aditiva/Additive manufacturing	4	4	3	4	15
14.	Modelado digital/Digital modeling	3	2	4	5	14
15.	Monitoreo de procesos en tiempo real/Real-time process monitoring	3	3	4	4	14
16.	Realidad aumentada/Augmented reality	3	2	4	5	14
17.	Robotización de la producción/Cobots	4	3	4	4	15
18.	Sistemas ciberfísicos/Cyberphysical systems	4	4	3	4	15
19.	Vehículos autónomos/Automated guided vehicles	4	4	3	4	15
20.	Metaverso/Metaverse	3	2	4	5	14

En resumen, aunque la adopción de la industria 4.0 en México aún tiene un largo camino por recorrer, hay un creciente interés y esfuerzo en impulsar la transformación digital en la industria del país. Algunos de los ejemplos relacionados con la industria 4.0 son:

Manufactura inteligente: la industria manufacturera es uno de los sectores que más ha adoptado la tecnología 4.0 en México. Empresas como BMW, Audi, Volkswagen y Nissan han implementado soluciones de automatización, IoT y análisis de datos para mejorar la eficiencia en la producción.

Agricultura de precisión: la agricultura también se ha beneficiado de la tecnología 4.0 en México. Empresas como Grupo PISA, dedicada a la producción de alimentos, han implementado soluciones de IoT para monitorear y controlar el riego, la fertilización y otros procesos agrícolas.

Logística inteligente: empresas de logística como DHL y FedEx han implementado soluciones de IoT y análisis de datos para optimizar las rutas de entrega, monitorear el estado de los productos y mejorar la eficiencia en la gestión de inventarios.

Energía inteligente: empresas como Enel Green Power México han implementado soluciones de IoT y análisis de datos para optimizar la generación de energía renovable y mejorar la eficiencia en la gestión de la red eléctrica.

Ciudades inteligentes: la tecnología 4.0 también se ha utilizado para mejorar la gestión de las ciudades en México. Por ejemplo, en la Ciudad de México se ha implementado un sistema de monitoreo de

tráfico en tiempo real que utiliza IoT y análisis de datos para mejorar la movilidad urbana.

Estos son solo algunos ejemplos de cómo la tecnología 4.0 se ha implementado en México. Se espera que, en los próximos años, más empresas y sectores adopten estas soluciones para mejorar la eficiencia y la productividad, de acuerdo con las tendencias mostradas en la tabla 5.

Esta relación entre la industria 4.0 y la sustentabilidad se manifiesta en varios aspectos clave como lo son:

Eficiencia energética: la industria 4.0 permite un mejor control y optimización de los sistemas de producción, lo que conduce a una mayor eficiencia energética. La monitorización en tiempo real, la automatización y la analítica de datos ayudan a identificar y reducir el desperdicio de energía.

Reducción de residuos: la automatización y la digitalización de los procesos de fabricación pueden reducir la generación de residuos al minimizar errores y mejorar la precisión en la producción. Esto es fundamental para avanzar hacia una economía circular.

Uso sostenible de recursos: la industria 4.0 permite una gestión más precisa de los recursos naturales, como el agua y los materiales, a través de la monitorización y el control inteligente de los procesos.

Movilidad sostenible: la industria 4.0 también se relaciona con la movilidad sostenible mediante la promoción de la fabricación de vehículos eléctricos y la gestión inteligente del tráfico, lo que puede

reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Cadena de suministro sustentable: la digitalización y la trazabilidad en la cadena de suministro permiten una gestión más

eficiente y transparente, lo que facilita la identificación y mitigación de riesgos ambientales y sociales en la cadena de suministro global.

Tabla 5. *Tendencia de la ciencia respecto a las tecnologías empleadas en la industria 4.0*

Tecnología	Documentos publicados	Criterio de búsqueda	Nivel intangible	Cantidad de citas
Aprendizaje automático/Machine learning	446,816	"Machine learning"	17	5,327
Cadena de bloques/Blockchain	41,445	"Blockchain"	18	66,064
Ciberseguridad/Cybersecurity	21,064	"Cybersecurity"	12	112,154
Aplicación informática para móviles/App	99,852	"App"	13	40,842
Computo en la nube/Cloud computing	105,589	"Cloud computing"	14	52,235
Datos masivos/Big data	140,067	"Big data"	15	27,521
Tecnologías disruptivas/disruptive technologies	4,497	"Disruptive technologies"	4	82,286
Gemelo digital/Digital twin	11,654	"Digital twin"	19	97,997
Gestión inteligente de la energía/Intelligent energy management	636	"Intelligent energy management"	11	11,817
Computo cuantico/quantum computers	25,256	"quantum computers"	5	364,575
(IA)/Artificial intelligence	464,847	"Artificial intelligence"	16	20,441
Internet de las cosas/Internet of things	156,065	"Internet of things"	10	32,639
Manufactura aditiva/Additive manufacturing	52,250	"Additive manufacturing"	1	81,815
Modelado digital/Digital modeling	1,943	"Digital modeling"	8	9,311
Monitoreo de procesos en tiempo real/ Real time process monitoring	381	"Real time process monitoring"	3	5,516
Realidad aumentada/Augmented reality	42,709	"Augmented reality"	9	106,079
Robotización de la producción/Cobots	582	"Cobots"	6	5,803
Sistemas ciberfísicos/Cyberphysical systems	900	"Cyberphysical systems"	7	14,931
Vehículos autónomos/Automated guided vehicles	3,493	"Automated guided vehicles"	2	37,502
Metaverso/Metaverse	1,438	"Metaverse"	20	5,047

Fuente: Elaboración propia con datos de Scopus del 2019 al 2023.

Personalización y producción bajo demanda: la industria 4.0 permite la producción personalizada y la fabricación bajo demanda, lo que reduce el desperdicio de recursos al evitar la sobreproducción y el almacenamiento innecesario de productos.

Mantenimiento predictivo: la utilización de sensores y análisis de datos avanzados en la industria 4.0 permite el mantenimiento predictivo de maquinaria y equipos, reduciendo el tiempo de inactividad y prolongando la vida útil de los activos, lo que contribuye a la sostenibilidad.

Innovación y desarrollo sostenible: la industria 4.0 fomenta la innovación en productos y procesos que pueden tener un impacto positivo en la sostenibilidad, como la creación de productos más duraderos, la utilización de materiales reciclados y la búsqueda de soluciones más respetuosas con el medio ambiente.

Se debe tener en cuenta que cada empresa es diferente, y cada empresa existe a partir de una situación y de distintas condiciones del mercado. Esto hace que cada tipo de empresa se deba tratar de manera individualizada. Sin embargo, se pueden encontrar elementos comunes, principalmente, asociados a dos elementos de la producción: el tamaño típico de lote y el número de variantes de producto producido.

Con base en estos dos elementos, se pueden distinguir tres modelos de producción a los que se puede aplicar soluciones de industria 4.0. Dichos modelos son:

a) Modelo de producción basado en lotes pequeños. El reto de las empresas que

siguen este modelo es el de mantener niveles de eficiencia altos con lotes muy pequeños. Los productos suelen estar disponibles en muchas variantes y están diseñados específicamente para cada pedido. Aunque pueden tener soluciones estandarizadas, existen frecuentes cambios en el diseño de los productos.

Las áreas asociadas a la industria 4.0 bajo este modelo, son principalmente en empresas que se encargan de la administración del ciclo de vida del producto, es decir, las que integran todos los elementos e información desde el diseño 3D, la generación de planos para la fabricación, la programación de las máquinas y el control de calidad. También se encuentran las que desarrollan herramientas digitales que facilitan y automatizan los procesos administrativos y de toma de decisiones en operaciones, así como las que desarrollan sistemas que permiten a las empresas incrementar su eficiencia operativa incrementando la disponibilidad de las máquinas.

b) Modelo de producción personalizado en masa. El reto que enfrentan las empresas bajo este modelo, es que tienen que especializar el producto con volúmenes de producción altos, manteniendo una alta productividad y altos estándares de calidad.

Bajo este modelo, las soluciones de industria 4.0 tienen como objetivo la planeación de la producción, el balanceo de cargas de trabajo, la programación de la producción y la distribución flexible de planta. Otra área a la que se enfoca es al control de calidad automatizado o en línea,

y finalmente la automatización de las operaciones en las áreas de manufactura.

c) Modelo de producción a gran escala.

El objetivo principal de este modelo es alcanzar el más alto nivel de automatización con altos niveles de eficiencia operativa, y cierto grado de flexibilidad para adaptarse a la mezcla de producción. Se debe recordar que la eficiencia operativa implica la

disponibilidad de las máquinas, la calidad del producto, y la productividad.

Algo muy importante de las empresas bajo este modelo, es que buscan soluciones de una completa automatización, incrementar las opciones de ofrecer un control de calidad en línea con ajuste automático de parámetros de operación, y contar con un sistema de rastreabilidad o trazabilidad a lo largo de la cadena de suministro.

CONCLUSIONES

Para los ingenieros industriales mexicanos, la Transformación empresarial en la era digital representa tanto un desafío como una oportunidad. Es necesario actualizar sus conocimientos y habilidades para adaptarse a las nuevas tecnologías y procesos que trae consigo la Industria 4.0. Asimismo, deben prepararse para liderar la transformación digital en las empresas y aprovechar el potencial de esta revolución tecnológica. En México, la adopción de la Industria 4.0 se ha evidenciado en diversos sectores industriales, incluyendo la manufactura, agricultura, logística y energía. La implementación de tecnologías como el Aprendizaje Automático, el Cómputo en la Nube, el Internet de las Cosas, la Realidad Aumentada, los Sistemas Ciberfísicos, entre otras, ha contribuido a aumentar la eficiencia y productividad en estas áreas; por lo que se logra el objetivo general planteado el de describir la situación actual en México respecto a industria 4.0 e ingeniería industrial.

A pesar de los beneficios que ofrece la Industria 4.0, también existen desafíos a superar, tales como el costo de implementación, la competencia con la (IA) y la preocupación por la seguridad de datos. Es fundamental que las empresas evalúen cuidadosamente estos aspectos y encuentren el equilibrio adecuado entre la automatización y la colaboración humana en los procesos industriales. La Industria 4.0 brinda una oportunidad emocionante para mejorar la ingeniería industrial en México. Con una adecuada preparación y adaptación a las nuevas tecnologías, los ingenieros industriales tienen el potencial de liderar la transformación digital y promover el crecimiento y la competitividad en la industria del país. La adopción de competencias digitales y la comprensión de las diversas tecnologías de la Industria 4.0 son elementos clave para asegurar una posición relevante en el mercado laboral y lograr un futuro próspero y sostenible para la industria en México.

Por lo que es necesario la capacitación y estar actualizados ante los cambios de la industria 4.0; para estar al mismo nivel de

competencias de empresas que adoptan estos mecanismos; porque, no solo es adoptarlos, sino conocerlos y estar al margen de la economía mundial y tener una visión estratégica; que permite que todo el personal de las empresas participe

en el crecimiento y expansión de las mismas. Dado que al expandir el producto o los productos este debe de ser de calidad, no solo se trata de producir por producir; sino ser competitivos a través de la innovación.

REFERENCIAS

- Aguirre-Flores, J. (2022). *Riesgos del Internet de las Cosas y su Relación con los Usuarios* [Tesis de grado Ingeniería, Universidad Católica de San Pablo]. Repositorio Institucional UCSP. <https://repositorio.ucsp.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/c762a42b-17ef-4cf5-9c4c-7d2836a731e2/content>
- Ávila-Camacho, F. J., & Moreno-Villalba, L. M. (2023). Internet de las Cosas (IoT) Retos para las Empresas en la era de la Industria 4.0. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías Del ICBI*, 10(20), 10–16. <https://doi.org/10.29057/icbi.v10i20.9516>
- Bajic, B., Rikalovic, A., Suzic, N., & Piuri, V. (2021). Industry 4.0 Implementation Challenges and Opportunities: A Managerial Perspective. *IEEE Systems Journal*, 15(1), 546–559. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.3023041>
- Banerjee, A., Cole, S., Duflo, E., & Linden, L. (2007). Remedying Education: Evidence from Two Randomized Experiments in India. *The Quarterly Journal of Economics*, 122(3), 1235–1264. <https://doi.org/10.1162/qjec.122.3.1235>
- Belman-Lopez, C. E., Jiménez-García, J. A., & Hernández-González, S. (2020). Análisis exhaustivo de los principios de diseño en el contexto de Industria 4.0. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 17(4), 432–447. <https://doi.org/10.4995/riai.2020.12579>
- Campbell, D. T. (1969). Reforms as Experiments. *American Psychologist*, 24(4), 407–429. <https://www.sfu.ca/~palys/Campbell-1969-ReformsAsExperiments.pdf>
- Cañas, H., Mula, J., Díaz-Madroñero, M., & Campuzano-Bolarín, F. (2021). Implementing Industry 4.0 principles. *Computers and Industrial Engineering*, 158, 107379. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107379>
- Casarin, J. L. (2021, 23 de diciembre). La Industria 4.0 en la era de la transformación tecnológica. *Forbes*. <https://www.forbes.com.mx/red-forbes-la-industria-4-0-en-la-era-de-la-transformacion-digital/>
- Castelo-Branco, I., Oliveira, T., Simões-Coelho, P., Portugal, J., & Filipe, I. (2022). Measuring the fourth industrial revolution through the Industry 4.0 lens: The relevance of resources, capabilities and the value chain. *Computers in Industry*, 138, 103639. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103639>
- Corallo, A., Lazoi, M., & Lezzi, M. (2020). Cybersecurity in the context of industry 4.0: A structured classification of critical assets and business impacts. *Computers in Industry*, 114, 103165. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103165>
- Ghobakhloo, M. (2020). Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119869. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869>
- Goel, R., & Gupta, P. (2020). Robotics and Industry 4.0. En: Nayyar, A., Kumar, A. (eds) A

- Roadmap to Industry 4.0: Smart Production, Sharp Business and Sustainable Development. Advances in Science, Technology & Innovation*, pp 157–169. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14544-6_9
- Goyal, S., Jha, H., & Gupta, A. (2023). Prediction in Industry 4.0 with Lean Six Sigma. En: Gunjan, V.K., Zurada, J.M. (eds) *Proceedings of 3rd International Conference on Recent Trends in Machine Learning, IoT, Smart Cities and Applications. Lecture Notes in Networks and Systems*, 540, pp 569–575. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-6088-8_51
- Haddock, J., & O'Keefe, R. M. (1990). Using artificial intelligence to facilitate manufacturing systems simulation. *Computers & Industrial Engineering*, 18(3), 275–283. [https://doi.org/10.1016/0360-8352\(90\)90049-R](https://doi.org/10.1016/0360-8352(90)90049-R)
- Heckman, J., H. Ichimura, and P. Todd (1997). Matching as an Econometric Evaluation Estimator: Evidence from Evaluating a Job Training Programme. *Review of Economic Studies*, 64(4), 605–654. <https://doi.org/10.2307/2971733>
- Hernandez-de-Menendez, M., Morales-Menendez, R., Escobar, C. A., & McGovern, M. (2020). Competencies for Industry 4.0. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 14(4), 1511–1524. <https://doi.org/10.1007/s12008-020-00716-2>
- Iszczuk, A. C. D., Ventris, K. F. D., Pinto, G. B., Shirabayashi, J. V., dos Santos, M. A. R., de Souza, R. C. T., & Molin Filho, R. G. D. (2021). Evoluções das tecnologias da indústria 4.0: dificuldades e oportunidades para as micro e pequenas empresas. *Brazilian Journal of Development*, 7(5), 50614–50637. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n5-454>
- Jaidka, H., Sharma, N., & Singh, R. (2020). Evolution of IoT to IIoT: Applications & Challenges. *Proceedings of the International Conference on Innovative Computing & Communications (ICICC)* 2020, 1–6. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3603739>
- Javaid, M., Heem, A., Singh, R. P., & Suman, R. (2021). Significant Applications of Big Data in Industry 4.0. *Journal of Industrial Integration and Management*, 6(4), 429–447. <https://doi.org/10.1142/S2424862221500135>
- Kenett, R. S., & Vicario, G. (2021). Challenges and Opportunities in Simulations and Computer Experiments in Industrial Statistics: An Industry 4.0 Perspective. *Advanced Theory and Simulations*, 4(2), 2000254. <https://doi.org/10.1002/adts.202000254>
- Kulkov, I., Kulkova, J., Leone, D., Rohrbeck, R., & Menvielle, L. (2023). Artificial intelligence as an enabler for other technologies in healthcare. *International Journal of Entrepreneurial Behavior & Research*, 1–24. <https://doi.org/10.1108/IJEBR-02-2023-0169>
- Lira, L. A., Bernedo, J. O., Lingan, A. M., & León, E. G. (2023). Toma de decisiones estratégicas en empresas. *Revista Venezolana de Gerencia*, 28(9), 628–641. <https://doi.org/10.52080/rvgluz.28.e9.39>
- Malik, P. K., Sharma, R., Singh, R., Gehlot, A., Satapathy, S. C., Alnumay, W. S., ... Nayak, J. (2021). Industrial Internet of Things and its Applications in Industry 4.0: State of The Art. *Computer Communications*, 166, 125–139. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.11.016>
- Munirathinam, S. (2020). Industry 4.0: Industrial Internet of Things (IIOT). En *Advances in Computers* (1st ed., Vol. 117). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/bs.adcom.2019.10.010>
- Orive, D., López, A., Estévez Estévez, E., Orive, A., & Marcos, M. (2021). Desarrollo de gemelos digitales para la simulación e integración de activos de fabricación en la industria 4.0. *XlII Jornadas De Automática: Libro De Actas*, (August), 709–716.

<https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498043.709>

Padilla, R. D. (Julio-Diciembre de 2019). La llegada de la inteligencia artificial a la educación. *RITI*, 7(14), 261-270.

<https://doi.org/10.36825/RITI.07.14.022>

Patil, A., Dwivedi, A., Abdul Moktadir, M., & Lakshay. (2023). Big data-Industry 4.0 readiness factors for sustainable supply chain management: Towards circularity. *Computers & Industrial Engineering*, 178, 109109.

<https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109109>

Pereira, A. C., & 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>

Román, J. L. (2016). *Industria 4.0: la transformación digital de la industria*. CODDII.

<https://coddii.org/wp-content/uploads/2016/10/Informe-CODDII-Industria-4.0.pdf>

Rozo-García, F. (2020). Revisión de las tecnologías presentes en la industria 4.0. *UIS Ingenierías*, 2(19), 177-191.

<https://doi.org/10.18273/revuin.v19n2-2020019>

Sánchez, A. A. (2019). La industria 4.0 Análisis y estudio desde el derecho de la 4a. Revolución Industrial. *Advocatus*, 16(32), 103-131.

<https://doi.org/10.18041/0124-0102/a.32.5526>

Tao, F., Qi, Q., Wang, L., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison. *Engineering*, 5(4), 653-661.

<https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.01.014>

Autores

Carlos Vázquez-Cid de León. Ingeniero Industrial, Maestro en Ingeniería administrativa con Doctorado en Ciencias de la Administración. Profesor-Investigador en la Universidad Tecnológica de la Mixteca, Oaxaca, México. Adscrito al Instituto de Ingeniería Industrial y Mecánica Automotriz. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2067-0565>

Email: carlosvazquezc@mixteco.utm.mx

Salvador Montesinos González. Ingeniero Industrial, Maestro en Ciencias con especialidad en Sistemas de producción y Doctorado en Ciencias de la Administración. Profesor-Investigador en la Universidad Tecnológica de la Mixteca, Oaxaca, México. Adscrito al Instituto de Ingeniería Industrial y Mecánica Automotriz. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6006-7790>

Email: smontesinos@mixteco.utm.mx

Ana Luz Ramos Soto. Doctora en ciencias en planificación de empresas y desarrollo regional, Universidad Autónoma "Benito Juárez de Oaxaca", Oaxaca, México.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8167-2631>

Email: analuz_606@yahoo.com.mx

Recibido: 25-04-2024

Aceptado: 28-06-2024