

El internet de las cosas y la industria 4.0- Aplicaciones en el campo de la ingeniería industrial

The internet of things and industry 4.0- Applications in the field of industrial engineering

Reina Verónica Román-Salinas ^{1a}, Marco Antonio Díaz-Martínez ^{1b}, Santos Ruíz-Hernández ^{1c}, Gabriela Cervantes-Zubirías ^{2a}, Mario Alberto Morales-Rodríguez ^{2a}

¹ Ingeniería Industrial, TecNM- Instituto Tecnológico Superior de Pánuco, México. Orcid: 0000-0001-9287-4298 ^a, 0000-0003-1054-7088 ^b, 0000-0002-4300-8526 ^c. Correos electrónicos: reina.roman@itspanuco.edu.mx ^a, marco.dm@panuco.tecnm.mx ^b, santos.ruiz@itspanuco.edu.mx ^c.

² Unidad Académica Multidisciplinaria, Universidad Autónoma de Tamaulipas Reynosa-Aztlán, México. Orcid: 0000-0002-9912-5035 ^a, 0000-0002-1342-297X ^b. Correos electrónicos: gabriela.cervantes@docentes.uat.edu.mx ^a, mmorales@docentes.uat.edu.mx ^b.

Recibido: 21 septiembre, 2023. Aceptado: 5 mayo, 2024. Versión final: 20 mayo, 2024.

Resumen

Esta investigación tiene por objetivo realizar una revisión sistemática de la literatura para conocer las aplicaciones del Internet de las cosas y la industria 4.0 en la ingeniería industrial. Se hizo una revisión de la literatura en artículos científicos, obtenidos de bases de datos de EBSCO Essential, MDPI, ScienceDirect incluyendo IEEE Xplore. A partir de esta revisión se puede conocer la importancia del internet de las cosas asociada a la industria 4.0 y su relación con la ingeniería industrial. El presente artículo recopila diferentes aportes científicos en campos como machine learning, robótica, manufactura, simulación, etc., para describir la relevancia y hallazgos en el campo de la ingeniería industrial.

Palabras clave: internet de las cosas; industria 4.0; ingeniería industrial; Big Data; aprendizaje automático; simulación de procesos, computación en la nube.

Abstract

This research aims to carry out a systematic review of the literature to know the applications of the Internet of Things and industry 4.0 in industrial engineering. A literature review was made in scientific articles, obtained from databases of EBSCO Essential, MDPI, ScienceDirect including IEEE Xplore. From this review it was possible to know the importance of the internet of things associated with industry 4.0 and its relationship with industrial engineering. This article compiles different scientific contributions in fields such as machine learning, robotics, manufacturing, simulation, etc., to describe the relevance and findings in the field of industrial engineering.

Keywords: internet of things; industry 4.0; industrial engineering; Big Data; Machine learning; process simulation; cloud computing.

1. Introducción

La ingeniería industrial ha tomado un nuevo enfoque en la denominada industria 4.0, con la intervención de machine learning (ML), internet de las cosas (IoT), Big Data, impresión 3D, entre otras [1], [2]. Las tecnologías hoy en día (Figura 1), siguen evolucionando de manera exponencial originando desafíos y cambios en el sector industrial [3].

Con la intervención de la industria 4.0 se han mejorado varios aspectos de la vida diaria de las personas, así como también en los niveles de calidad de los procesos de fabricación, control de la información para los usuarios finales, maximización de la cadena de suministro además de automatización inteligente [4].

En la industria moderna, las tecnologías de inteligencia artificial, robótica, automatización, IoT al igual que machine learning, juegan un papel importante en las organizaciones para completar sus tareas de manera inteligente [5]. La identificación de anomalías más las fallas en los procesos industriales en tiempo real presenta un obstáculo al tratar de cubrir de manera óptima la complejidad de un sistema o proceso industrial. La industria 4.0 ha hecho posible poder enfrentar estos problemas a través de la intervención de tecnologías emergentes como el internet de las cosas y machine learning [6], [7].

A medida que las tecnologías se convierten en una parte natural del entorno industrial al igual que organizacional, la influencia de estas tecnologías se está expandiendo cada vez más (Figura 1). La industria 4.0 lo mismo que Lean Six Sigma son metodologías implementadas para el mejoramiento de los procesos industriales que ha traído beneficios sustanciales a las organizaciones [8]. La cuarta revolución industrial se refiere a la industria del futuro con las nuevas tendencias que apuntan a la mejora de los procesos industriales. La ingeniería inteligente y la integración digital han supuesto una transformación 4.0 general en tecnología del futuro con beneficios a las organizaciones [9].

La industria 4.0 es una iniciativa clave que puede generar competencias en la ingeniería industrial para poder lograr una manufactura inteligente (SMS), basado en la creación de productos inteligentes, fabricas inteligentes, lo mismo que logística inteligente que puedan funcionar de forma dinámica [10]. La presente investigación tiene como objetivo analizar la importancia del Internet de las cosas (IoT), la industria 4.0 por sí misma más su aplicación en ingeniería industrial; para lo cual se hizo una revisión sistemática

de las investigaciones más relevantes donde se haya aplicado la IoT en diferentes áreas de la ingeniería industrial.

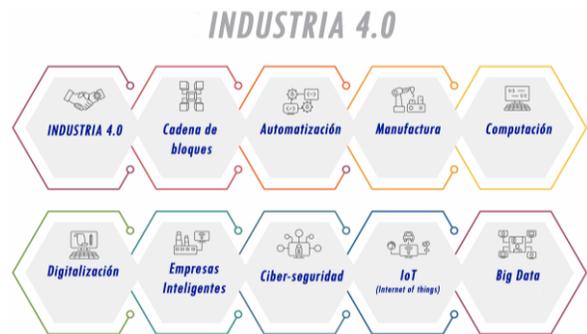


Figura 1. Tecnologías de la industria 4.0.

Fuente: elaboración propia.

2. Revisión de la literatura

2.1. El internet de las cosas (IoT), machine learning (ML) y la industria 4.0 en la detección de anomalías en los sistemas industriales

Los mantenimientos predictivos (PdM), la intervención del IoT, ML junto con la industria 4.0 han tenido un impacto positivo en la detección, así como en el diagnóstico de fallas de motores de inducción que han venido a mejorar el rendimiento y confiabilidad del aprendizaje automático [11]. Existen algoritmos de aprendizaje automático, tecnologías industria 4.0 y sistemas de detección de intrusiones (IDS) capaces de detectar anomalías en los sistemas industriales además de sistemas de control industrial basado en la medición de la información que han dado como resultado la seguridad de los trabajadores que laboran en plantas industriales [7], [12], [13].

Con la intervención de la industria 4.0 el mantenimiento de los sistemas industriales se ha convertido en una de las actividades importantes que ha requerido de mucha atención. La intervención de métodos inteligentes que tienen el objetivo de limpiar y normalizar datos, seleccionar las características adecuadas, predecir durante la toma de decisiones, generar algoritmos Jaya y Sea Lion Optimization (SLnO) junto con máquinas de vectores de soporte (SVM), han dado soluciones a las condiciones futuras de los sistemas industriales y generar mejores planificaciones del mantenimiento mediante la intervención del ML, IoT y la industria 4.0 [14].

En diversos sectores industriales, los equipos y maquinaria desempeñan un papel crucial. Los fallos en los rodamientos son una de las principales razones

detrás de los problemas operativos, representando entre el 41% y el 44% de todas las averías. Sin embargo, mediante el uso de una red neuronal liviana basada en matrices de puertas programables, se logra un ahorro significativo de memoria del 63.49% en comparación con métodos convencionales. Esta tecnología permite la detección en tiempo real del estado de los rodamientos con una precisión impresionante del 95.12%, lo que mejora sustancialmente la eficacia del mantenimiento predictivo y preventivo [15].

El machine learning es una de las tecnologías que involucra la industria 4.0 (Figura 2), ésta juega un papel importante a la hora de la operación eficiente de una máquina, aunado al mantenimiento del sistema de monitoreo. Existen modelos como los árboles de decisión binaria mediante el método de segmentación de la información CART, que busca tener la mejor precisión de la máquina en un momento dado, controlando los tiempos de lectura de la información, producción en funcionamiento del equipo y advertencia del rendimiento de la máquina [16]. En las industrias modernas, la detección de defectos juega un papel crucial en el control de calidad. Este proceso implica la integración de métodos automatizados, como el uso de sensores de imagen, para identificar cualquier posible defecto que pueda surgir durante la fabricación [17], [18].



Figura 2. Elementos que involucra el machine learning.
Fuente: elaboración propia.

La inteligencia artificial (IA) y el machine learning (ML) han conseguido ser el foco principal de las máquinas inteligentes en esta revolución industrial 4.0; con capacidad para comunicarse entre sí, dando también espacio al internet de las cosas (IoT) mediante el desarrollo de las tecnologías y aprendizaje automático [19].

La ciberseguridad se ha vuelto aún más fundamental en el contexto del Internet de las Cosas (IoT), donde detectar anomalías tempranamente es fundamental para proteger la planta y mantener la producción sin contratiempos. Identificar estas anomalías permite reaccionar rápidamente, evitando interrupciones no

previstas y reduciendo los gastos de mantenimiento. Además, la seguridad en el IoT es vital para salvaguardar la integridad de las instalaciones de fabricación inteligente, ya que la interconexión de dispositivos y sistemas puede exponerlas a posibles ataques cibernéticos. Por ello, garantizar la seguridad de los datos de producción y prevenir intrusiones maliciosas se convierte en una prioridad esencial [20], [21].

Por otra parte, el proceso de estampación en empresas automotrices se destaca como una de las fases más desafiantes en la fabricación de vehículos. Aquí, se vislumbran numerosas oportunidades de potenciación mediante el aprovechamiento de tecnologías de vanguardia propuestas en el marco de la Industria 4.0, tales como sensores virtuales, el Internet de las Cosas (IoT) y la manufactura inteligente. Entre las averías más críticas se encuentran las rupturas en el sistema de transmisión cinemática excéntrica y sus componentes, como tornillos, bielas, rodamientos y engranajes, dado su considerable impacto económico para las empresas [22].

Los algoritmos de aprendizaje automático, como las redes neuronales (NNs), las máquinas de vectores de soporte (SVMs) y los árboles de decisión (DTs), están liderando el camino hacia la consecución de diversas aplicaciones en sistemas de producción. Estas aplicaciones incluyen la clasificación, la agrupación en clústeres, la regresión, la predicción y la detección de anomalías [23].

La inteligencia artificial lo mismo que el ML, han demostrado tener la capacidad para automatizar sistema de tratamiento de aguas residuales, aplicándose en el campo de la agricultura como la hidroponía aparte de la acuaponía, para resolver problemas mediante la asistencia por computadora [24], [25], [26], [27].

2.2. El internet de las cosas y la industria 4.0: cadena de suministro

La intervención del internet de las cosas ha ayudado a mejorar las prácticas de gestión de la cadena de suministro verde (GSCM) así como el rendimiento de las organizaciones, mejorando especialmente la cadena de suministro en petróleo y gas [28]. La cuarta revolución industrial ha transformado radicalmente el panorama del sistema de fabricación y la gestión de la cadena de suministro (SCM). La evolución de la Industria 4.0 ha introducido una serie de tecnologías innovadoras, como la computación en la nube (CC), la blockchain, el Internet de las cosas (IoT), los sistemas ciberfísicos (CPS), entre otras. Estas tecnologías han

revolucionado el sector manufacturero y su cadena de suministro, generando cambios significativos en términos de tiempos de entrega, reducción de costos, agilidad, flexibilidad y capacidad de respuesta a las demandas del mercado en todos los ámbitos de la fabricación [29], [30], [31], [32].

En [33], se presenta un estudio donde se construyen cadenas de suministro inteligentes mediante la intervención del internet de las cosas y blockchain. Se utilizó el método Delphi para una fácil selección de componentes además de características autóctonas adecuados para el patrón estudiado, también el método Dematel para evaluar las relaciones como acceso a la estructura de la red. Dentro de los resultados, la intervención de la IoT y los métodos aplicados traen buena interconexión entre los componentes, mejora en la toma de decisiones, innovación y aprendizaje que hacen obtener una cadena de suministro inteligente de calidad.

La implementación de un modelo de organización virtual basado en industria 4.0 en la cadena de suministro, ha ayudado a mejorar la transparencia de la información, despliegue de los recursos, reducción de desperdicios, y mejor eficiencia en los costos. Este tipo de modelos basado en industria 4.0 y el IoT logra una mejor sostenibilidad que con los mecanismos tradicionales [34].

La entrada de la industria 4.0 ha obligado a las organizaciones a reformar el funcionamiento de las cadenas de suministro utilizando el principio de sostenibilidad, dirigido a satisfacer las necesidades de hoy en día sin comprometer las generaciones futuras, trayendo beneficios muy satisfactorios a las empresas [35], [36]. La adecuada implementación de la industria 4.0 mantiene una ventaja competitiva en toda la cadena de suministro siendo evidentes los beneficios que viene con ella como: la optimización de costos, flexibilidad de los procesos aparte de la mejora en la satisfacción de los clientes [37] (Figura 3). El IoT es la próxima generación de sistemas integrados en un entorno digital que se integrará de una manera estable a la cadena de suministro, los procesos logísticos además del desempeño organizacional [38]. También ha revolucionado el campo de la gestión de la cadena de suministro, permitiendo a las empresas optimizar sus operaciones y lograr mayores niveles de eficiencia y responsabilidad ambiental [39].

En el ámbito del aprendizaje automático, se recurre a diversas técnicas como las redes neuronales artificiales (RNA), el aprendizaje bayesiano, el análisis de Big Data y las máquinas de vectores de soporte (SVM). Entre

estas, las RNA destacan por su aplicación en la investigación de los factores que determinan la peligrosidad de la cadena de suministro.

Los modelos de redes neuronales, como el perceptrón multicapa (BPNN), son especialmente útiles debido a su capacidad para abordar problemas altamente no lineales o complejos. Estos modelos permiten establecer un enfoque basado en indicadores para evaluar los riesgos, brindando a las organizaciones una herramienta sólida para la toma de decisiones en la gestión de riesgos relacionados con la cadena de suministro [40].



Figura 3. Elementos de gestión de la cadena de suministro. Fuente: elaboración propia.

La implementación de la Industria 4.0 da lugar a la formación de patrones innovadores en las cadenas de suministro, caracterizados por redes interconectadas y sofisticadas de fabricación. En este nuevo paradigma, los diseñadores, proveedores, expertos en logística y clientes desempeñarán roles distintos, lo que permitirá la trazabilidad completa de un producto a lo largo de su ciclo de vida [41], [42].

Según investigaciones recientes, la Gestión de la Cadena de Suministro Verde (GSCM) se configura como un enfoque de gestión que promueve la sostenibilidad ambiental en todas las etapas de la fabricación, distribución, adquisiciones y logística. Este conjunto de prácticas busca reducir el impacto ambiental, disminuyendo la contaminación y el consumo de energía. Más que simplemente cumplir con objetivos medioambientales, la implementación de estas prácticas proporciona una ventaja competitiva al integrar la sostenibilidad en todas las áreas de la cadena de suministro [43].

En el ámbito manufacturero, la digitalización está transformando las fábricas y los procesos asociados a la cadena de suministro. Este cambio ha dado lugar al surgimiento de la 'fabricación inteligente'. Esta innovación redefine la coordinación de los componentes de fabricación al aprovechar un sistema integrado de intercambio de datos a través de Internet, lo que representa una mejora significativa en la gestión estratégica de la cadena de suministro. Se reconoce que las adquisiciones desempeñan un papel crítico en esta cadena, ya que impactan directamente en el rendimiento general de todo el proceso [39], [44], [45].

Con la creciente dependencia de la tecnología, las organizaciones deben modernizar sus infraestructuras y operaciones de cadena de suministro para impulsar una mayor integración tecnológica. Aquellas empresas que adoptan estrategias de cadena de suministro digital, mediante la inversión en hardware, software y talento humano necesarios para tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial (IA), la computación en la nube y el Internet de las Cosas (IoT), pueden mejorar su competitividad a través de un retorno de inversión a largo plazo, generando así mayores ingresos y valor empresarial [46].

2.3. El internet de las cosas y la industria 4.0: la organización y la manufactura

La intervención de la IoT en la manufactura ha llevado a las empresas a tener una producción más eficiente y ágil, trabajando bajo el concepto 4.0 [47]. Para las organizaciones, la aplicación de nuevas tecnologías de fabricación en conjunto con la manufactura basado en internet de las cosas representa un desarrollo industrial al país; sin embargo, la aplicación de estas tecnologías no muestra resultados de manera automática, ya que, debe interactuar con una estructura organizacional adecuada para aprovechar todo el potencial del IoT [48].

El desarrollo de la industria manufacturera tradicional en las organizaciones enfrenta varios cuellos de botella, que requieren de la intervención de IoT para ayudar a las empresas a realizar el diseño, control de producción de sus productos, así como la inspección, alerta de posibles riesgos y control de postventa logrando visualizar los beneficios de IoT sumando a ello el fortalecimiento organizacional [49] (Figura 4).



Figura 4. Intervención de la IoT para control de la producción. Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, la gestión del ciclo de vida del producto (PLM) ha ayudado al desarrollo de la ingeniería de producción acelerando los procesos de manufactura mediante la intervención de la IoT [50]. Otro de los campos de la manufactura donde se ha involucrado la industria 4.0 y la IoT es en la fabricación cognitiva que se basa en la fusión de sensores, además de análisis de tecnologías avanzadas generando un mejor valor de la generación de los datos de fabricación, lo que mejora el rendimiento en la reducción de tiempo de inactividad como los costos de producción [51].

La integración de sistemas de planificación de recursos empresariales (ERP) en el entorno de la Internet de las Cosas (IoT) y la Industria 4.0 ha ampliado significativamente las capacidades de las empresas manufactureras. Estos sistemas no solo han facilitado la gestión eficiente de recursos y procesos, sino que también han ofrecido varias funcionalidades que respaldan las operaciones clave de la era digital.

Con la interconexión de dispositivos y máquinas a través de la IoT, los ERP pueden recopilar datos en tiempo real sobre el rendimiento de la maquinaria, el estado de inventario y la producción en curso. Esta información en tiempo real permite una toma de decisiones más ágil y precisa, lo que resulta en una mayor eficiencia operativa y una reducción de costos.

Además, los sistemas ERP integrados con IoT permiten una mayor automatización de los procesos de fabricación. Desde la monitorización remota de activos hasta la optimización de la cadena de suministro, las empresas pueden aprovechar la conectividad para incrementar tanto la productividad como la calidad del producto. En el contexto de la Industria 4.0, los ERP también desempeñan un papel crucial en la digitalización de la planta de producción. Al integrar datos de sensores y dispositivos IoT en el sistema ERP,

las empresas pueden implementar estrategias de mantenimiento predictivo, anticipando fallos en la maquinaria antes de que ocurran y minimizando así el tiempo de inactividad no planificado [52], [53].

El Internet Industrial de las Cosas (IIoT) implica a las organizaciones la integración de sensores inteligentes y dispositivos interconectados en equipos industriales, permitiendo la recopilación de datos en tiempo real y la posibilidad de monitoreo y control a distancia. En el contexto de la manufactura y fabricación, el IIoT facilita el mantenimiento predictivo, el seguimiento de la producción en tiempo real y la maximización de la cadena de suministro. Por ejemplo, en una planta conectada, los sensores pueden supervisar el estado y el uso de los equipos, lo que conduce a intervenciones de mantenimiento oportunas y un aumento en el tiempo de actividad de las máquinas [54].

En las organizaciones manufactureras, las tecnologías emergentes como los sistemas ciberfísicos, el Big Data, el Internet de las cosas (IoT), los gemelos digitales y la inteligencia artificial (IA) están catalizando una transformación sin precedentes. Estas innovaciones no solo están cambiando la forma en que operamos, sino que están redefiniendo las reglas del juego en la gestión y valorización de los datos industriales.

La capacidad de producir productos altamente personalizados en masa se ha convertido en un imperativo competitivo. Para lograrlo, la digitalización completa, la integración de la tecnología de la información (TI) y la tecnología operativa (OT) son esenciales en los procesos de fabricación. Esto nos obliga a adoptar enfoques flexibles y automatizados que se adapten a las demandas cambiantes del mercado.

En este escenario, la interoperabilidad se erige como piedra angular. Las arquitecturas orientadas a servicios (SOA), el concepto de fabricación como servicio (MaaS) y la disponibilidad de recursos como servicio (RaaS), se revelan como estrategias vitales. Estas no solo facilitan una integración fluida entre sistemas, sino que también nos posicionan para abrazar plenamente la visión de la Industria 4.0 [55].

2.4. El internet de las cosas y la industria 4.0: Big Data

Los sistemas de los procesos industriales consumen a nivel mundial demasiada energía que contribuyen significativamente a generar emisiones de gas de efecto invernadero, lo que lleva a considerar que, es más eficaz poder reducir el consumo de energía con la implementación de un sistema de gestión de energía

industrial basado en IoT y Big Data, todo esto para el análisis de la información y así contribuir en la toma de mejores decisiones (Figura 5) [56].

El desarrollo de la comunicación en la industria ha ido mejorando cada día. La comunicación entre software y hardware no se ha hecho esperar, ya que, con la intervención de los sensores de tipo unilateral para acceder a internet, han facilitado el flujo de la información, la medición de las entidades físicas, protocolos de autenticación transparente (SAP), que consumen menos gastos generales de cómputo, así como de comunicación, lo cual son beneficios importantes para la organización [57].

De acuerdo con [58] IoT y Big Data ayudan a administrar, lo mismo que a extraer valores de la información que es el mayor reto al que las organizaciones se han enfrentado; por otro lado, el IoT y la gran cantidad de información están creciendo a un ritmo acelerado, manteniéndolos listos para transformar muchas áreas de negocio al igual que acciones de la vida cotidiana, donde actualmente el 50% de las actividades de IoT están centradas en procesos de fabricación y logística.



Figura 5. Big Data- análisis de la información. Fuente: elaboración propia.

El desarrollo de la comunicación en la industria ha ido mejorando cada día. La comunicación entre software y hardware no se ha hecho esperar, ya que, con la intervención de los sensores de tipo unilateral para acceder a internet, han facilitado el flujo de la información, la medición de las entidades físicas, protocolos de autenticación transparente (SAP), que consumen menos gastos generales de cómputo, así como de comunicación, lo cual son beneficios importantes para la organización [57].

De acuerdo con [58] IoT y Big Data ayudan a administrar, lo mismo que a extraer valores de la información que es el mayor reto al que las organizaciones se han enfrentado; por otro lado, el IoT y la gran cantidad de información están creciendo a un ritmo acelerado, manteniéndolos listos para transformar muchas áreas de negocio al igual que acciones de la vida cotidiana, donde actualmente el 50% de las actividades de IoT están centradas en procesos de fabricación y logística.

El efecto IoT con Big Data trae beneficios a las organizaciones para un futuro sostenible, generando un papel de innovación e investigación [59]. El alcance de la aplicación de las nuevas tecnologías 5G en las organizaciones se están convirtiendo en oportunidades de desarrollo e innovación tecnológica asegurando el almacenamiento óptimo de la información [60].

En el ámbito del transporte acuático, el Water Rotterdam está implementando un enfoque innovador a través de algoritmos para la planificación automática de flotas, que permite una gestión más eficiente y sostenible. En lugar de simplemente ofrecer servicios bajo demanda, este sistema utiliza algoritmos para combinar viajes de manera inteligente, maximizando la capacidad de las embarcaciones y reduciendo tanto el consumo de combustible como las emisiones.

Los usuarios ya no reservan un servicio exclusivo, sino que comparten la embarcación con otros pasajeros que buscan rutas similares. Esto se facilita mediante sugerencias de reserva en tiempo real, basadas en el estado actual de la red de transporte acuático. Además, la integración de tecnologías como el Internet de las cosas (IoT) y el análisis de Big Data (BDA), mejora la eficiencia de los procedimientos de mantenimiento. Los datos recopilados por la plataforma DyNaMo Databox permiten monitorear el sistema de manera continua, identificando posibles fallos y, en algunos casos, incluso anticipándose a ellos.

Estas prácticas circulares inteligentes no solo optimizan la fase de uso de las embarcaciones, sino que también contribuyen a una gestión más sostenible y eficiente a lo largo de todo el ciclo de vida del ecosistema acuático [61].

Los avances en la gestión de la ingeniería y los sistemas de producción tanto en manufactura como en el ramo automotriz [62], respaldados por estudios sobre Big Data, han revelado una conexión decisiva entre la calidad de las piezas mecanizadas por subcontratistas y las capacidades de proceso de estos últimos. La insuficiencia en estas capacidades conduce

inevitablemente a un aumento en la tasa de defectos de los productos, generando mayores necesidades de retrabajo y un incremento en los desechos. Este panorama no solo eleva los costos de mantenimiento, sino que también devalúa económicamente el producto final y puede contribuir a un aumento de las emisiones de carbono, con consecuencias negativas para el medio ambiente.

En este contexto, la implementación de un modelo de evaluación de gráficos de radar difuso para la calidad del proceso de piezas, basado en el índice de capacidad del proceso, emerge como una solución eficaz. Este enfoque no solo impulsa a los fabricantes a mejorar continuamente la calidad de sus productos, sino que también reduce las tasas de retrabajo y desechos. Además, al optimizar el proceso de producción, se puede lograr una reducción significativa en las emisiones de carbono, lo que fortalece el compromiso de las empresas con la responsabilidad social y ambiental. Este impacto positivo no solo beneficia a las empresas en términos de eficiencia y competitividad, sino que también contribuye al bienestar del medio ambiente y la sociedad en general.

El Big Data y la revolución en la fabricación digital están transformando radicalmente la manera en que se desarrollan productos y se gestionan los datos en la industria. Esta evolución ha permitido la creación de productos de una complejidad y precisión sin precedentes, superando las limitaciones impuestas por ciclos y métodos de fabricación tradicionales [63].

2.5. El internet de las cosas y la industria 4.0: aplicaciones de la nube (cloud computing)

La computación en la nube (cloud computing), ha ayudado en la transformación de las diferentes actividades que son gestionadas por las organizaciones, lo que da beneficios como: minimización de costos, eficiencia en la optimización de recursos que ayudan a generar nuevas oportunidades de negocio y calidad organizacional (Figura 6) [64], [65], [66].

En organizaciones dedicadas al tratamiento de aguas residuales, el *cloud computing* es considerado como un elemento importante en el proceso para reducir contaminantes que la naturaleza pueda soportar. Actualmente, existen plantas que no están diseñadas para manejar desechos ni deterioro de las estructuras de las plantas de tratamiento.



Figura 6. Cloud computing conectado a dispositivos.
Fuente: elaboración propia.

En [67], presenta un modelo basado en la nube e IoT para poder monitorear y controlar las aguas residuales, potencia del hidrogeno y parámetros de temperatura de la entrada de agua, evitando el ingreso de aguas residuales no permitidas que puedan afectar el sistema. La industria 4.0 como la IoT, al igual que la computación en la nube, han ayudado a mejorar la eficiencia tal como la calidad en los procesos de automatización con efecto en la vida laboral de los trabajadores [68].

En temas de exportación e importación, muchas organizaciones presentan un envejecimiento tecnológico industrial con un bajo control de la información; la intervención de cloud computing y la IoT, ayudan a reducir la dificultad de los gastos generales para la gestión, al igual que la comunicación de las tecnologías utilizando protocolos de red pequeño (MQTT) y protocolo rápido (Kafka), para optimizar el control de grandes datos de información proveyendo mejor rendimiento [69].

El IoT cloud computing es una necesidad de la vida actual de las organizaciones, ayuda a identificar, analizar las condiciones de las operaciones, generar una responsabilidad de los activos que promueva el sano de desarrollo en cada uno los sistemas de producción de la mano de las tecnologías [70], [71]. En la solución de problemas o accidentes relacionados con los procesos de transporte y gestión logística, existen sistemas basados en IoT cloud computing, que tienen el objetivo de optimizar la información en tiempo real, así como las condiciones de operación de la cadena de suministro, con el fin de alertar tempranamente cualquier problema detectado en su proceso o producto [72].

La IoT cloud computing proporciona un enlace digital entre el binomio máquinas-personal laboral, obteniendo calidad en el control de los procesos, adicionando reducción de costos, con lo cual muchas organizaciones se pueden ver beneficiadas [73]. El IoT es un marco de internet donde una gran cantidad de equipos y dispositivos están sincronizados mediante tecnología de punta como softwares, basado en redes de computación conectadas a la nube, de máquina a máquina, aplicado ampliamente en las industrias, siendo beneficiados sus procesos industriales con la intervención de la industria 4.0 y generando una mejora organizacional de alto nivel [74].

La llegada de la industria 4.0 ha revolucionado los sistemas de producción automatizados al incorporar el Internet de las Cosas (IoT). Esto posibilita la conexión de múltiples sensores a través de la web, facilitando una robusta interconectividad y la transferencia de datos.

Mediante el almacenamiento en la nube y el procesamiento en computadoras, se pueden implementar algoritmos avanzados para analizar datos estadísticos y probabilísticos, ofreciendo así nuevas herramientas para la optimización y el control de procesos industriales [75], [76]. La fabricación en la nube es un nuevo enfoque donde los recursos dispersos se integran en servicios en línea y se administran desde un punto central. Esta infraestructura compartida ofrece a los usuarios acceso a servicios según su necesidad, abarcando todas las etapas del desarrollo del producto. La efectividad de este modelo depende en gran medida de cómo se coordinen los diferentes elementos [31], [77].

Debido a la rápida expansión de la tecnología actual de Internet de las cosas (IoT) y las redes 5G, así como la evolución continua de nuevos estilos de vida de servicio y negocios, hemos entrado en la era del procesamiento de grandes volúmenes de datos para el IoT. No obstante, la centralización de todos estos datos en la nube para su procesamiento puede ocasionar problemas como la latencia en la comunicación y las infracciones a la privacidad. Para abordar estos desafíos, ha surgido el Edge Computing de forma gradual, presentándose como una nueva arquitectura de red próxima a las fuentes de datos de los dispositivos terminales y capaz de ofrecer servicios con baja latencia [78].

2.6. El internet de las cosas y la industria 4.0: inteligencia artificial

Después de la pandemia del COVID-19 las organizaciones fueron obligadas a redireccionar la

cobertura de la innovación de muchas de sus tecnologías digitales. El IoT al igual que la inteligencia artificial (IA), presentan perspectivas aparte de técnicas de aprendizaje profundo entre: redes sociales, block chain, robots, privacidad y seguridad, que ayudarán a tener un impacto a futuro positivo en los procesos industriales [79], [80].

El reciente aumento de las aplicaciones relacionadas con el internet de las cosas (IoT), inteligencia artificial (IA), aprendizaje federado y distribuido, Big Data, el análisis, la cadena de bloques como cloud computing, han instado al diseño de la próxima red generación 6G, mejorando la calidad de servicios (QoS), disponibilidad y confiabilidad para satisfacer un acuerdo de nivel de servicio (SLA) para los usuarios finales [81]. La industria 4.0 junto con la inteligencia artificial, están contribuyendo a generar teorías tal como prácticas, para identificar problemas reales que enfrentan las organizaciones, a fin de tener una mejor comunicación de la información para mejorar la calidad de vida de los trabajadores [82], [83].

Cabe mencionar que, de acuerdo con estudios relacionados con la situación de mercado actual, muestran que las organizaciones están luchando para implementar tecnologías a través de IoT, AI, cloud computing y otras tecnologías avanzadas, con el objetivo de poder adaptarse lo más pronto posible antes de la llegada de la industria 5.0 que ya casi está en puerta [84], [85]. En [86] se menciona que la inteligencia artificial presenta diferentes campos de aplicación, entre ellas la automatización de máquinas, que al igual que equipos industriales representa un 30% seguido por la optimización de procesos, herramientas tecnológicas y mantenimiento de activos con un 28%.

La IA de la mano de la industria 4.0, incluye optimización aunado a rendimiento operativo, reforzando el aprendizaje profundo de los colaboradores para generar una adaptación estable que sean de beneficio a las organizaciones, pero también a sus procesos industriales [87]. Las organizaciones buscan responder a las necesidades humanas, a los cambios en el entorno empresarial utilizando aplicaciones modernas basadas en IA, NLP (*procesamiento de lenguaje natural*) basado en machine learning y el IoT, con el fin de adaptar los negocios a la nueva era de la industria 4.0 [88].

La industria 4.0 ha sido reconocida a nivel mundial como una palabra encaminada hacia una economía que implica nuevas tecnologías, moderna y con software de sistemas mediante la intervención de lenguaje natural e inteligencia artificial (Figura 7); ésta viene a ayudar a

las organizaciones en su desarrollo industrial, siendo la mejor solución para administrar un gran flujo de datos y almacenamiento en la red IoT [89], [90], [91], [92].

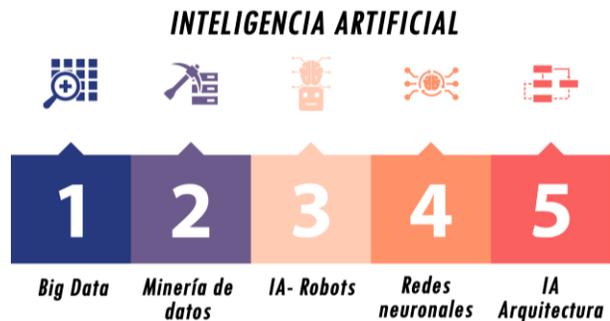


Figura 7. Elementos de la inteligencia artificial.

Fuente: elaboración propia.

En el sector energético, las empresas de servicios públicos tienen el potencial de ofrecer electricidad renovable y asequible, mientras impulsan la eficiencia energética entre sus usuarios. Para lograr esto plenamente, es vital que los empleados comprendan la inteligencia artificial (IA) como una herramienta facilitadora de sus tareas diarias y reconozcan sus aplicaciones. Al adquirir el conocimiento necesario sobre cómo interactuar con la IA, podrán proponer soluciones dentro de la organización, entender las oportunidades y limitaciones de su uso, y tener expectativas realistas sobre los resultados que pueden obtenerse. Hay que destacar la importancia de convencer a los empleados, tanto en la planta de producción como en las oficinas, para que adopten un Asistente de Inteligencia Aumentada Híbrido llamado DIA (Asistente Inteligente Digital) y así aprovechar los beneficios que esta tecnología puede brindar a la organización [93], [94].

Para el año 2030, se estima que la inteligencia artificial podría elevar la productividad del sector manufacturero hasta un 20%. Este avance se fundamenta en su capacidad para elevar la calidad de los productos, optimizar los procesos de producción y disminuir los costos operativos. Además, la IA está revolucionando la fabricación al permitir la producción de productos personalizados y flexibles, mientras aumenta la eficiencia en todas las fases de la cadena de suministro [95].

2.7. El internet de las cosas y la industria 4.0: robótica y simulación

Los desafíos que enfrentan actualmente las industrias han generado tecnologías novedosas, aplicaciones inteligentes mediante el uso de la IoT y la simulación en

tiempo real que ayudarán a enfrentar nuevas oportunidades, utilizando herramientas informáticas que permitirán detectar al igual que predecir patrones incluyendo características de la información [96]. Existen modelos de simulación dinámica y modelación cinemática de robots industriales, donde la industria 4.0 puede ayudar a controlar posibles errores en los parámetros de posición de un robot; estos modelos pueden ayudar a calcular el peso, también posición final adecuado para el mejor funcionamiento del equipo [97].

Muchas organizaciones están conscientes que, para obtener una mejor funcionalidad, la simulación es una metodología que puede contribuir a predecir el comportamiento de los sistemas industriales, generando planes estratégicos de optimización evitando problemas potenciales [98], [99]. La simulación, ha beneficiado en mantener flexibilidad en los sistemas de producción en las organizaciones, siendo una de las herramientas utilizadas el software Flexsim 3D, que auxilia en mantener los objetivos tanto estratégicos como operativos [100].

La simulación en las organizaciones se está convirtiendo en una de las técnicas más importantes de apoyo a la preparación de la producción, incluyendo los sectores industriales con procesos tecnológicos atípicos [101]. En la aplicación de conceptos de fabricación avanzada, se encuentran el internet de las cosas, sistemas ciberfísicos (CPS) e inteligencia artificial. Los modelos generados por estos conceptos pueden ser simulados generando una contribución favorable a las PyMe que estén interesados en adoptar los conceptos de la industria 4.0 en sus procesos de fabricación [102]. La simulación de instalaciones industriales y sistemas de producción son conceptos que se han desarrollado en el marco temporal de la era de la información 4.0, considerado un beneficio organizacional (Figura 8) [103].



Figura 8. Funcionamiento y simulación de sistemas de producción con la industria 4.0. Fuente: elaboración propia.

Otro de los campos importantes en el área de la simulación son los sistemas flexibles de manufactura (FMS), que son considerados parte integral de los sistemas de fabricación inteligente que forman la base para una fabricación digital [104]. Otra de las áreas que trabaja en conjunto con la simulación son las tecnologías en automatización que han auxiliado tanto a probar como a verificar el crecimiento del sector industrial, generando la implementación de fabricaciones digitales que puedan controlar el diseño de productos y procesos, además de sistemas automatizados que son controlados en tiempo real [105].

Por otro lado, la robótica promueve soluciones innovadoras para adquirir técnicas y habilidades del conocimiento que pueden favorecer a las organizaciones a impulsar sus sistemas de producción hacia las nuevas tecnologías como a la ciencia. Asimismo, las tecnologías utilizadas en la robótica han mejorado considerablemente en el siglo XX, logrando una producción más inteligente, presentando un enfoque diferente entre los elementos responsables por contacto físico, los robots y elementos asociados a la robótica e ingeniería mecatrónica, de manera que muchas de las universidades a nivel mundial ya están ofreciéndola a toda la comunidad estudiantil [106], [107], [108].

La automatización de procesos robóticos (RPA) y el uso de software robótico, se ha convertido en otra de las aportaciones de la industria 4.0 que han ayudado a realizar tareas repetitivas, con un alto grado de precisión, experimentando una creciente tendencia de interés en las organizaciones actualmente [109], [110].

En distintas industrias, los sistemas IIoT enfrentan diversos tipos de ataques, y es común encontrarse con distribuciones de datos desequilibradas al analizar el tráfico de ataques. Cuando se entrena un modelo con varios tipos de datos, si la cantidad de datos de una categoría específica es muy pequeña, el modelo puede no captar completamente las características de ese tipo de datos, lo que resulta en una disminución de la precisión del modelo. Al utilizar el modelo NSSA, podemos profundizar en la comprensión del impacto destructivo de los ataques cibernéticos contra los activos de información IIoT, los cuales representan una amenaza para su funcionamiento estable [111], [112].

En el ámbito del trabajo colaborativo del internet de las cosas, un elemento clave es el controlador SDN impulsado por machine learning. Este controlador tiene una visión integral y recibe datos de supervisión de los conmutadores SDN. Estos últimos, a su vez, se encargan de monitorear el flujo de tráfico de los dispositivos IoT industriales y transmitir esta

información al controlador SDN. Este controlador SDN utiliza los datos recibidos para identificar patrones de comportamiento inusuales gracias a algoritmos de aprendizaje automático. Es capaz de detectar potenciales amenazas en la red mediante la aplicación de estos algoritmos. Basándose en esta detección, el controlador SDN establece reglas específicas de flujo de tráfico para los conmutadores, lo que lo convierte en un sistema eficaz para la detección de anomalías en la red [113], [114].

La ingeniería industrial está transformando los métodos de cultivo en la agricultura, lo que impulsa su competitividad a escala global, ya que, para ello, emplea máquinas y técnicas de inteligencia artificial y análisis de datos como los robots agrícolas, análisis predictivo y monitoreo de cultivos y suelos. Mediante la visión por computadora y algoritmos de aprendizaje profundo, los datos de los cultivos capturados por drones o software son procesados para proporcionar información valiosa. Los agricultores ya están utilizando drones automatizados que vigilan y recopilan datos sobre los cultivos. Además, los robots agrícolas están en desarrollo para llevar a cabo diversas tareas, desde la siembra hasta la cosecha, con éxito probado en varias labores agrícolas. Para aprovechar al máximo la Internet de las cosas, es esencial integrar dispositivos inteligentes y aplicaciones en la nube en la infraestructura agrícola [115], [116].

Podemos decir que la industrial 4.0 está basada en la integración y avances de modelado de simulación de gemelos digitales, sistemas de internet de las cosas basados en IA y algoritmos de computación cognitiva y de máquinas virtuales que son de beneficio para los procesos industriales de las organizaciones [117].

3. Metodología

Para el desarrollo de esta investigación se consultó información de artículos científicos, repositorios y bases de datos especializadas en bases de datos como EBSCO Essential, MDPI, ScienceDirect, IEEE Xplore tanto en inglés como español. Se describen conceptos concernientes con la manufactura aditiva y su correspondencia con la ingeniería industrial. En la **Tabla 1**, se detalla el mecanismo de búsqueda que se utilizó para la obtención de información con los datos: nombre del autor, revista donde se publicó el trabajo de investigación, año de publicación, palabras clave y país donde se desarrolló o aplicó la investigación.

La búsqueda se basa en información de artículos, repositorios incluyendo páginas web especializadas en el tema de investigación en idioma español e inglés para presentar los conceptos del internet de las cosas y la industria 4.0. La revisión de la literatura se consideró de publicaciones de los últimos 6 años, tomando prioritariamente los más recientes. En la **Figura 9**, se puede observar la metodología utilizada, las categorías para las cuales la IoT y la I4.0 tiene oportunidad de brindar beneficios importantes a las organizaciones lo mismo que a la ingeniería industrial.

Para el análisis bibliométrico se utilizó el principio de la nube de palabras desarrollado en el software análisis MAXQDA v.2020. La búsqueda bibliográfica se utiliza de manera frecuente en el llamado estado del arte de los investigadores que buscan los fundamentos teóricos de sus variables de estudio. En el material complementario, se presenta la matriz de base de datos construida con la literatura existe.

Tabla 1. Mecanismos de búsqueda para la obtención de la información.

Base de datos					
EBSCO Essential	MDPI		ScienceDirect	IEEE Xplore	
Términos de búsqueda					
I 4.0 e internet de las cosas	IoT- cadena de suministro	IoT- Big data	IoT- computación en la nube	IoT- Inteligencia artificial	IoT- robótica y simulación
Análisis de la información					
Autor					
Revista de publicación					
Año de publicación					
Palabras clave					
País					

Fuente. elaboración propia.

4. Resultados

Para el análisis cualitativo se utilizó el software MAXQDA en su versión 2020, su herramienta de *nube de palabras* tiene la función de estructurar en forma del diseño visual un conjunto de palabras a partir de texto y organiza términos jerárquicamente que se presentan con mayor frecuencia. En la **Figura 9**, se pueden observar las palabras claves más frecuentes utilizadas en búsqueda de información de literatura científica aplicada en este trabajo.



Figura 9. Palabras clave utilizadas en la nube de datos.
Fuente. MAXQDA.

Las publicaciones relacionadas al tema de internet de las cosas y la industria 4.0, como elemento imprescindible y su aplicación en la ingeniería industrial han tenido participaciones por años en la que se ubicaron 119 productos con el tema de estudio como se muestran a continuación. El 43% del total de investigaciones pertenecen a los años 2021 y 2022, lo que significa que es uno de los temas innovadores en la ingeniería industrial y que está siendo implementado como parte las tecnologías 4.0 en las organizaciones (**Figura 10**). Cabe mencionar que para los años 2023 y 2024 se presenta un 39% lo cual indica que existe un aumento en la implementación e innovación de IoT.

En seguida, se muestra la cantidad de artículos y el número de citas correspondiente a cada año en que fueron publicados los artículos. La obtención de los resultados de las citas fue realizada mediante el uso del navegador de citas Google académico (Véase **Tabla 2**). Entre los años 2021 y 2022 se puede observar una cantidad de 52 artículos con un total 791 citas, lo que significa que un 43% de la literatura es actualizada con temas relacionados al internet de las cosas y la industria 4.0. Por otro lado, en el año 2018 hubo un número considerable llegando a 1332 citas relacionadas a trabajos de cadena de suministro, internet de las cosas e industria 4.0. En 2020 se obtuvo 440 citas relacionadas

a trabajos con impresión 3D, sistemas flexibles de manufactura, modelación y simulación de sistemas. En los años 2023 y 2024 se presentó un total de 456 citas lo que significa que la IoT y sus diferentes aplicaciones en la ingeniería es un tema innovador y que está siendo utilizado con mucha frecuencia.

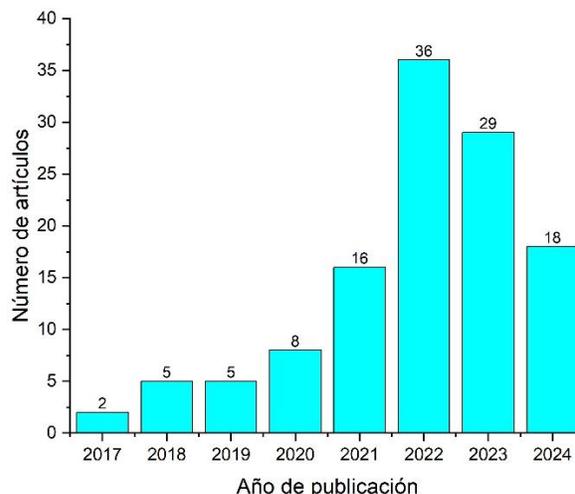


Figura 10. Número de publicaciones y artículos por año.
Fuente. elaboración propia.

Tabla 2. Numero de artículos y citas por año

Año	Artículos	Numero de citas
2017	2	265
2018	5	1332
2019	5	258
2020	8	440
2021	16	455
2022	36	336
2023	29	452
2024	18	4
Total	119	3542

Fuente: elaboración propia.

5. Conclusiones

Habiendo realizado el análisis bibliográfico, se pudo identificar un interés vigente en el impacto de la industria 4.0 en la ingeniería industrial reflejado en términos organizaciones y tecnológicos. La industria 4.0 como la IoT en la ingeniería industrial, han aportado beneficios a la eficiencia de las cadenas de suministro. La IoT por otra parte, ha generado una sostenibilidad en la información obtenida de los sistemas de producción que ha sido benéficas a las organizaciones. Igualmente, ha ayudado a tener una productividad más eficiente, a

mejorar el ciclo de vida del producto, que ha impactado positivamente al desarrollo de la ingeniería de producción.

Big Data y la IoT, han contribuido a nivel mundial a reducir el consumo de energía industrial, a tener una mejor comunicación de los sistemas de producción mediante la intervención de software y hardware.

La I4.0 ha apoyado a cumplir objetivos organizacionales tal como la minimización de costos de producción y maximización de recursos, lo cual se ha logrado mediante la intervención IoT y cloud computing. También han ayudado a mantener calidad en sus procesos al igual que en la vida laboral en sus trabajadores.

La inteligencia artificial ha aportado a las organizaciones, una cobertura de innovación digital mediante el uso de redes sociales, robots y blockchain, siendo parte del mejoramiento de sus procesos industriales. La IA representa 30% de las aplicaciones de la I4.0 para la optimización de procesos y herramientas tecnológicas, lo cual es importante ya que es parte de los elementos que ofrece la industria 4.0 como impacto positivo a la ingeniería industrial.

Otro de los campos de impacto a favor de la ingeniería industrial en esta nueva revolución industrial es la simulación y la robótica, donde se han encargado de reducir, pero también a controlar fallos en parámetros de posición en robots, predicción de posibles errores y generación de estrategias para una mejor toma de decisiones. La simulación e impresión 3D, ha optimizado, pero también prevenido, posibles equívocos de funcionamiento en tiempo real, evitando poder avanzar con el desarrollo de procesos que pudieran presentar equivocaciones indetectables por una persona, pero si con la intervención de estas tecnologías.

La robótica promueve soluciones innovadoras que han beneficiado en promover soluciones a las organizaciones en el mejoramiento de calidad de sus procesos industriales, reduciendo errores, utilizando al personal laboral en otras actividades, lo que mejora la línea de producción. Esto da paso a la industria 4.0, de modo que sus elementos ayuden a estar en un nuevo camino tecnológico industrial.

Finalmente, en la ingeniería industrial, la industria 4.0 representa la transformación digital en los sistemas de producción, digitalización de la manufactura y dirección de procesos. La ingeniería industrial se ha visto

beneficiada con las nuevas tecnologías: Big Data, IoT, cloud computing y manufactura aditiva [118]. Las nuevas generaciones de profesionales de la industria 4.0 necesitan contar con conocimientos aunado de habilidades altamente tecnológicas. Las principales competencias generales incluyen: 1) interdisciplinariedad del pensamiento, 2) agilidad en el proceso de toma de decisiones, 3) resolución de problemas, 4) relación intercultural, finalmente 5) compromiso de capacitación y aprendizaje a lo largo de una vida laboral [119]. La aplicación e importancia de la industria 4.0 en el mercado laboral actual es prometedora quedando demostrada; por lo que las organizaciones continúan luchando por digitalizar sus procesos, negocios al igual que sus sistemas de producción a través de IoT y AI.

Financiación

No aplica.

Contribución de los autores

R.V. Román-Salinas: Análisis Formal, Borrador Original, Conceptualización, Validación, Supervisión y Edición Final. M. A. Díaz-Martínez: Administrador del Proyecto, Investigación, Redacción, Metodología, Recursos, Software, Análisis Formal y Edición Final. S. Ruíz-Hernández: Conceptualización y Revisión. G. Cervantes-Zubirías: Conceptualización y Revisión. M.A. Morales-Rodríguez: Conceptualización y Revisión.

Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no tienen intereses financieros en competencia ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

Declaración de la Junta de Revisión Institucional

No aplica.

Declaración de consentimiento informado

No aplica.

Referencias

- [1] C. Ynzunza, J. Izar, J. Bocarando, “Implications and Perspectives of Industry 4.0”, *Conciencia Tecnológica*, vol. 1, no. 8, pp. 33-45, 2017.
- [2] M. Xu, J. M. David, S. H. Kim, “The fourth industrial revolution: Opportunities and challenges,” *Int. J. Financial Res.*, vol. 9, no. 2, pp. 92–95, 2018, doi: <https://doi.org/10.5430/ijfr.v9n2p90>
- [3] J. Corrales, N. Ribeiro, D. Roque, “Las competencias exigidas a los trabajadores de la Industria 4.0: Cambios en la gestión de personas”, *Relaciones Laborales*, vol. 40, no. 1, pp. 161-184, 2022, doi: <https://doi.org/10.5209/crla.72383>
- [4] M. Sujatha et al., “IoT and Machine Learning-Based Smart Automation System for Industry 4.0 Using Robotics and Sensors”, *Journal of Nanomaterials*, 2022, pp. 1-6, doi: <https://doi.org/10.1155/2022/6807585>
- [5] G. Lăzăroiu, T. Kliestik, A. Novak, “Internet of things smart devices, industrial artificial intelligence, and real-time sensor networks in sustainable cyber-physical production systems”, *Journal of Self-Governance and Management Economics*, vol. 9, no. 1, pp. 20–30, 2021, doi: <https://doi.org/10.22381/jsme9120212>
- [6] D. Velásquez et al., “A Hybrid Machine-Learning Ensemble for Anomaly Detection in Real-Time Industry 4.0 Systems”, in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 72024 - 72036, 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3188102>
- [7] G. Tancredi, G. Vignali, L. Bottani, “Integration of Digital Twin, Machine-Learning and Industry 4.0 Tools for Anomaly Detection: An application to a Food Plant”, *Sensors*, vol. 22, pp. 1-23, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/s22114143>
- [8] A. Efimova, P. Briš, “The Implementation of the Conjunction of Lean Six Sigma and Industry 4.0: A case Study in the Czech Republic”, *Sciendo*, vol. 30, no. 3, pp. 223-229, 2022, doi: <https://doi.org/10.2478/mspe-2021-0028>
- [9] H. Sikandar et al., “Scientific Mapping of Industry 4.0 Research: A bibliometric Analysis”, *IJIM*, vol. 15, no. 18, pp. 129-148, 2021, doi: <https://doi.org/10.3991/ijim.v15i18.25535>
- [10] I. González, R. Granillo, “Competences of industrial engineers in industry 4.0”, *Revista electrónica de investigación educativa*, vol. 22, No. 30, pp. 1-14, doi: <https://doi.org/10.24320/redie.2020.22.e30.2750>
- [11] M. Drakaki et al., “Machine Learning and Deep Learning Based Methods Towards Industry 4.0 Predictive Maintenance in Induction Motors: A State of the Art Survey”, *Journal of Industrial Engineering and Management*, vol.15, no. 1, pp. 31-57, 2021, doi: <http://dx.doi.org/10.3926/jiem.3597>
- [12] S. Mokhtari et al., “A Machine Learning Approach for Anomaly Detection in Industrial Control Systems Based on Measurement Data”, *Electronics*, vol. 10, no. 407, pp. 1-13, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/electronics10040407>
- [13] S. Chalichalamala, N. Govindan, R. Kasarupa, “Logistic regression ensemble classifier for intrusion detection system in internet of things,” *Sensors*, vol. 23, no. 23, pp. 1–19, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/s23239583>
- [14] M. Haider, M. Khan, H. Alkhalefah, “Predictive Maintenance Planning for Industry 4.0 Using Machine Learning for Sustainable Manufacturing”, *Sustainability*, vol. 14, no. 3387, pp. 1-27, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/su14063387>
- [15] L. Yu, H. Ming, C. Ching, “A multiplier-free convolution neural network hardware accelerator for real-time bearing condition detection of CNC machinery,” *Sensors*, vol. 23, no. 23, pp. 1–19, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/s23239437>
- [16] K. Masani, S. Agrawal, P. Oza, “Predictive maintenance and monitoring of industrial machine using machine learning”, *Scalable Computing: Practice and Experience*, vol.20, no. 4, pp. 663-667, 2019, doi: <https://doi.org/10.12694/scpe.v20i4.1585>
- [17] E. Cumbajin, N. Rodrigues, P. Costa, R. Miragaia, L. Frazão, N. Costa, A. Fernández, J. Carneiro, L. Buruberry, A. Pereira, “A real-time automated defect detection system for ceramic pieces manufacturing process based on computer vision with deep learning,” *Sensors*, vol. 24, no. 1, pp. 1–22, 2024, doi: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/1/232>

- [18] F. Ferras, R. Francelin, S. Jen, “Machine learning for detection and diagnostics of anomalies in applications driven by electric motors,” *Sensors*, vol. 23, no. 24, pp. 1–25, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/s23249725>
- [19] G. Shankarrao, A. Pandya, “How artificial intelligence and machine learning assist in industry 4.0 for mechanical engineers”, *Materialstoday Proceedings*, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.201>
- [20] A. Jaramillo, J. Govea, W. Villegas, “Anomaly detection in a smart industrial machinery plant using IoT and machine learning,” *Sensors*, vol. 23, no. 19, pp. 1–22, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/s23198286>
- [21] L. Concetti, G. Mazzuto, F. E. Ciarapica, M. Bevilacqua, “An unsupervised anomaly detection based on self-organizing map for the oil and gas sector,” *Appl. sciences*, vol. 13, no. 6, pp. 1–28, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/app13063725>
- [22] I. Peinado, N. Montés, E. Garcia, “Virtual sensor of gravity centres for real-time condition monitoring of an industrial stamping press in the automotive industry,” *Sensors*, vol. 23, no. 14, pp. 1–17, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/s23146569>
- [23] K. Tai, B. Gupta, J. Liu, V. Arya, N. Nedjah, A. Almomani, P. Chaurasia, “A survey of internet of things and cyber-physical system: standards, algorithms, applications, security, challenges, and future directions,” *Information*, vol. 14, no. 7, pp. 1–20, 2023, doi: <https://www.mdpi.com/2078-2489/14/7/388>
- [24] M. Lowe, R. Qin, X. Mao, “A Review on Machine Learning, Artificial Intelligence, and Smart Technology in Water Treatment and Monitoring”, *Water*, vol. 14, no. 1384, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/w14091384>
- [25] M. Guida, F. Caniato, A. Moretto, S. Ronchi, “The role of artificial intelligence in the procurement process: State of the art and research agenda,” *Journal Of Purchasing and Supply Management*, vol. 29, no. 2, pp. 1–21, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pursup.2023.100823>
- [26] F. Bachinger, J. Zenisek, M. Affenzeller, “Automated machine learning for industrial applications- challenges and opportunities,” *Procedia Computer Science*, vol. 232, pp. 1701–1710, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.01.168>
- [27] S. Elkateb, A. Métwalli, A. Shendy, A. Abu, “Machine learning and IoT-Based predictive maintenance approach for industrial applications,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 88, pp. 298–309, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.12.065>
- [28] A. Adam et al., “Green supply chain management and performance of listed oil and gas firms in Nigeria: A moderating role of internet of thing”, *Gusan Journal of Accounting and Finance*, vol. 2, no. 2, 2021, pp. 1–23, doi: <https://doi.org/10.57233/gujaf.v2i2.61>
- [29] K. Qureshi, B. Mewada, S. Kaur, S. Alghamdi, N. Almakayeel, A. Almuflih, M. Mohamed, “Sustainable manufacturing supply chain performance enhancement through technology utilization and process innovation in industry 4.0: A SEM-PLS approach,” *Sustainability*, vol. 15, no. 21, pp. 1–20, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/su152115388>
- [30] A. Alhabatah, M. Yaqot, B. Menezes, L. Kerbache, “Transformative procurement trends: Integrating industry 4.0 technologies for enhanced procurement processes,” *Logistics*, vol. 7, no. 3, pp. 1–40, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/logistics7030063>
- [31] P. Renna, “A review of game theory models to support production planning, scheduling, cloud manufacturing and sustainable production systems,” *Designs*, vol. 8, no. 2, pp. 1–40, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/designs8020026>
- [32] N. Adamashvili, N. Zhizhilashvili, C. Tricase, “The integration of the internet of things, artificial intelligence, and blockchain technology for advancing the wine supply chain,” *Computers*, vol. 13, no. 3, pp. 1–25, 2024, doi: <https://www.mdpi.com/2073-431X/13/3/72>
- [33] N. Azizi et al., “IoT-Blockchain: Harnessing the Power of Internet of Thing and Blockchain for Smart Supply Chain,” *Sensors*, no. 21, 2021, pp. 1–25, doi: <https://doi.org/10.3390/s21186048>
- [34] K. Pantanjali, S. Dheeraj, P. Pandey, “Industry 4.0 (I4.0) Based Virtual Organization Model for the Coordination of Sustainable Textile Supply Chain”, *American Business Review*, vol. 25, no. 1, 2022, doi: <https://doi.org/10.37625/abr.25.1.186-208>
- [35] E. Elif, “Industry 4.0 and Sustainable Supply Chain”, *Journal of Economic & Administrative Sciences*, vol. 43, no. 1, pp. 123–144, 2021, doi: <https://doi.org/10.14780/muiibd.960306>

- [36] A. Z. Musaddak et al., “Internet of Things-Based Smart and Connected Supply Chain: A Review”, *International Journal of Antennas & Propagation*, pp. 1-5, 2022, doi: <https://doi.org/10.1155/2022/8182813>
- [37] L. Zhang, W. Zhou, J. Xia et al., “Dqn-based mobile edge computing for smart internet of vehicle”, *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, no. 1, pp. 1–16, 2022, doi: <https://doi.org/10.1186/s13634-022-00876-1>
- [38] T. de Vass, H. Shee, S. Miah, “The effect of - Internet of Things- on supply chain integration and performance: An organisational capability perspective”, *Australasian Journal of Information Systems*, vol. 22, pp. 1–30, 2018, doi: <https://doi.org/10.3127/ajis.v22i0.1734>
- [39] H. Nazir, J. Fan, “Revolutionizing retail: Examining the influence of blockchain-enable IoT capabilities on sustainable firm performance”, *Sustainability*, vol. 16, no. 9, pp. 1–23, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/su16093534>
- [40] A. Alzahrani, M. Zubair, “Intelligent risk prediction system in IoT-Based supply chain management in logistics sector,” *Electronics*, vol. 12, no.13, pp. 1–24, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/electronics12132760>
- [41] S. Turki, “Major emerging markets: A systematic literature review of benefits, use, challenges, and mitigation strategies in supply chain management,” *Sustainability*, vol. 15, no.20, pp. 1–30, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/su152014811>
- [42] F. Yudi, T. Ming, I. Wahyuni, A. Lopes de souza, C. Chiappetta, C. Foropon, “Cyber supply chain risk management and performance in industry 4.0 era: information system security practices in Malaysia,” *Journal of Industrial and Production Engineering*, vol. 40, no. 2, doi: <https://doi.org/10.1080/21681015.2022.2116495>
- [43] M. Jameel, T. Masood, “Industry 4.0 driven green supply chain management in renewable energy sector: A critical systematic literature review,” *Journal of Industrial and Production Engineering*, vol. 16, no.19, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/en16196977>
- [44] R. Mouly, M. Kilaru, “Sustainability in supply chain management: A case study of the Indian retailing industry,” *Eng. Proc*, vol. 59, no.1, pp. 1-11, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/engproc2023059064>
- [45] L. Lynberg, and A. Deif, “Network effects in blockchain and supply chain: a theoretical research synthesis,” *Modern Supply Chain Research and Applications*, vol. 5, no.1, pp. 1-26, 2023, doi: <https://doi.org/10.1108/MS CRA-07-2022-0016>
- [46] R. Mashat, S. Abourobkbah, M. Asif, “Impact of internet of things adoption on organizational performance: A mediating analysis of supply chain integration, performance, and competitive advantage,” *Sustainability*, vol. 16, no.6, pp. 1-25, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/su16062250>
- [47] P. Trakadas et al., “An Artificial Intelligence-Based Collaboration Approach in Industrial IoT Manufacturing: Key Concepts, Architectural Extensions and Potential Applications”, *Sensors*, vol. 20, no. 5480, pp. 1-20, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/s20195480>
- [48] W. Qilin, Z. Yue, “Automation Design and Organization Innovation of Manufacturing Enterprises Based on the Internet of Things”, *Hindawi Scientific Programming*, pp. 1–12, 2022, doi: <https://doi.org/10.1155/2022/8729731>
- [49] L. Liu, P. Zhao, “Manufacturing Service Innovation and Foreign Trade Upgrade Model Based on Internet of Things and Industry 4.0”, *Hindawi Mathematical Problems in Engineering*, pp. 1–13, 2022, doi: <https://doi.org/10.1155/2022/4148713>
- [50] P. Barrios, C. Danjou B. Eynard, “Literature review and methodological framework fo integration of IoT and PLM in manufacturing industry”, *Computers in Industry*, vol. 140, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103688>
- [51] M. Sira, “Efficient Practices of Cognitive Technology Application For Smart Manufacturing”, *Sciend-Management Systems in Production Engineering*, vol. 30, no. 2, pp. 187-191, 2022, doi: <https://doi.org/10.2478/mspe-2022-0023>
- [52] A. Reddy, “Effective usage of artificial intelligence in enterprise resource planning applications,” *International Journal Of Computer Trends And Technology*, vol. 71, no.4, pp. 73-80, 2023, doi: <https://doi.org/10.14445/22312803/IJCTT-V71I4P109>

- [53] K. Vukman, K. Klarić, K. Greger, I. Perić, “Driving efficiency and competitiveness: Trends and innovations in ERP systems for wood industry,” *Forests*, vol. 15, no.2, pp. 1-21, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/f15020230>
- [54] N. Kashpruk, C. Piskor, J. Baranowski, “Time series prediction in industry 4.0: A comprehensive review and prospect for future advancements,” *Appl. Scien.*, vol. 13, no.22, pp. 1-20, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/app132212374>
- [55] C. Seródio, P. Mestre, J. Cabral, M. Gomes, F. Branco, “Software and architecture orchestration for process control in industry 4.0 enable by cyber-physical systems technologies,” *Appl. Scien.*, vol. 14, no.5, pp. 1-17, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/app14052160>
- [56] M. Ullah et al., “Industrial Energy Management System: Design of a Conceptual Framework Using IoT and Big Data”, *TechRxiv*, vol. 10, pp. 110557-110567, 2021, doi: <https://doi.org/10.36227/techrxiv.17045891.v1>
- [57] AL. Fadi, BD. Deeback, “Seamless Authentication: For IoT-Big Data Technologies in Smart Industrial Application Systems”, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 17, no. 4, pp. 2919-2927, 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/TII.2020.2990741>
- [58] P. Pathak, N. Vyas, S. Joshi, “Security Challenges for Communications on IOT & Big Data”, *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, vol. 8, no. 3, pp. 431-436, 2017.
- [59] D. Andersen, C. Ashbrook, N. Karlborg “Significance of Big Data analytics and internet of things (IoT) aspects in industrial development, governance and sustainability”, *International Journal of Intelligence Networks*, Vol. 1, pp. 107-111, 2020, Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijin.2020.12.003>
- [60] L. Hu, X. Xia, “5G-Oriented IoT Big Data Analysis Method System”, *Hindawi Mobile Information Systems*, pp. 1-9, 2021, doi: <https://doi.org/10.1155/2021/3186696>
- [61] L. Pirrone, A. Bionda, A. Ratti, “How digital technologies can support sustainability of the waterborne passenger mobility ecosystem: A case study analysis of smart circular practice in northern Europe,” *Sustainability*, vol. 16, no.1, pp. 1-21, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/su16010353>
- [62] K. Suann, C. Min, J. Shyong, T. Hung, Y. Syuan, “Fuzzy radar evaluation chart for improving machining quality of components,” *Mathematics.*, vol. 12, no.5, pp. 1-17, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/math12050732>
- [63] Y. Saif, A. Zafiah, Y. Yusof, M. Lliyas, S. Al, D. Hissein, A. Adam, Y. Hyeon, M. Al, H. Abdullah, “Advancements in roundness measurement parts for industrial automation using internet of things architecture-based computer vision and image processing techniques,” *Appl. Scien.*, vol. 13, no.20, pp. 1-22, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/app132011419>
- [64] L. Ortiz et al., “Computación en la Nube: Estudio de Herramientas Orientadas a la Industria 4.0”, *Lámpakos*, no. 20, pp. 68-75, 2018, doi: <https://doi.org/10.21501/21454086.2560>
- [65] I. Abdullahi, S. Longo, M. Samie, “Towards a distributed digital twin framework for predictive maintenance in industrial internet of things (IIoT),” *Sensors*, vol. 24, no.8, pp. 1-30, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/s24082663>
- [66] E. Taiwo, O. Christiana, J. Bamiele, “A lightweight image cryptosystem for cloud-assisted internet of things,” *Applied Scie.*, vol. 14, no.7, pp. 1-27, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/app14072808>
- [67] R.M.M. Salem et al., “An Industrial Cloud-Based IoT System for Real-Time Monitoring and Controlling of Wastewater”, *IEEE Access*, vol. 10, pp. 6528 – 6540, 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3141977>
- [68] N. Sun, “Deep Learning System for Recycled Clothing Classification Linked to Cloud and Edge Computing”, *Hindawi Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022, doi: <https://doi.org/10.1155/2022/6854626>
- [69] J. Nam, Y. Yun, M. Choi, “High Performance IoT Cloud Computing Framework Using Pub/Sub Techniques”, *Applied Sciences*, vol. 12, no. 11009, pp. 1-20, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/app122111009>
- [70] L. Song, “Construction of Accounting Internal Control Management Platform Based on IoT Cloud Computing”, *Hindawi- Wireless Communications and Mbile Computings*, vol. 2022, pp. 1-13, 2022, doi: <https://doi.org/10.1155/2022/9552118>

- [71] S. Badotra, S. Panda, “A review on software-defined networking enabled IoT cloud computing”, *IJUM Engineering Journal*, vol. 20, no. 2, 2019, doi: <https://doi.org/10.31436/ijumej.v20i2.1130>
- [72] H. Li, “Implementation of chemical logistics supervision forewarning platform based on IoT cloud computing”, *Chemical*, vol.71, pp. 727-732, 2018, doi: <https://doi.org/10.3303/CET1871122>
- [73] S. Janík, M. Míkva, M. Mareček, “Effective data utilization in the context of industry 4.0 technology integration,” *Appl. Sci*, vol. 12, no. 10517, pp. 1-16, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/app122010517>
- [74] Y. Hung, “Investigating how the cloud computing transforms the development of industries”, *IEEE access*, no. 7, pp.181505-181517, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2958973>
- [75] C. Cacciuttolo, V. Guzmán, P. Catriñir, E. Atencio, “Sensor technologies for safety monitoring in mine tailings storage facilities: Solutions in the industry 4.0 Era,” *Minerals*, vol. 14, no. 5, pp. 1-34, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/min14050446>
- [76] M. Zafar, A. Alsabban, “Industry-4.0-Enable digital transformation: Prospects, instruments, challenges, and implications for business state,” *Sustainability*, vol. 15, no. 11, pp. 1-33, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/su15118553>
- [77] X. Cao, H. Bo, Y. Liu, X. Liu, “Effects of different resource-sharing strategies in cloud manufacturing: a Stackelberg game-based approach,” *International Journal Of Production Research*, vol. 61, no. 2, pp. 520-540, 2023, doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.2010824>
- [78] W. Zhu, C. Zhou, L. Jiang, “A trusted internet of things access scheme for cloud edge collaboration,” *Electronics*, vol. 13, no. 6, pp. 1-17, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/electronics13061026>
- [79] J. Khan et al., “Artificial intelligence and internet of things (AI-IoT) technologies in response to covid-19 pandemic: A systematic review”, *IEEE Xplore*, vol. 10, pp. 62613-62660, 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3181605>
- [80] C. Naves, F. Verdier, S. Glock, P. Guitton, “A fair crowd-sourced automotive data monetization approach using substrate hybrid consensus blockchain,” *Future Internet.*, vol. 16, no. 5, pp. 1-27, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/fi16050156>
- [81] I. Leila, R. Buyya, “Artificial intelligence applications and self-Learning 6G networks for smart cities digital ecosystems: taxonomy, challenges, and future directions”, *Sensors*, vol. 22, no. 15, pp. 2-30, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/s22155750>
- [82] D. Stadnicka et al., “Industrial needs in the fields of artificial intelligence, internet of things and edge computing”, *Sensors*, no. 22, 2022, pp. 1-47, doi: <https://doi.org/10.3390/s22124501>
- [83] L. Paško et al., “Plan and develop advanced knowledge and skills for future industrial employees in the field of artificial intelligence, internet of things and edge computing”, *Sustainability*, vol.14, no. 6, pp. 1-49, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/su14063312>
- [84] L. Lachvajderová, J. Kádárová, “Industry 4.0 implementation and industry 5.0 readiness in industrial enterprises”, *Management And Production Engineering Review*, vol. 13, no. 3, pp. 102-109, 2022, doi: <https://doi.org/10.24425/mper.2022.142387>
- [85] A. Sayeed et al., “Approaches and challenges in internet of robotics things”, *Future internet*, vol. 14, no. 265, pp. 1-30, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/fi14090265>
- [86] T. Ahmad et al., “Energetics systems and artificial intelligence: applications of industry 4.0”, *Energy Reports*, 2022, vol. 8, pp. 334-361, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.11.256>
- [87] A. Toopshekan, H. Yousefi and F.R. Astarai, “Technical, economic, and performance analysis of hybrid energy system using a novel dispatch strategy” *Energy*, 2020, vol. 213, pp. 1-19, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118850>
- [88] P. Mah, I. Skalna, J. Muzam, “Natural language processing and artificial intelligence for enterprise management in the era of industry 4.0”, *Applied Sciences*, vol. 12, no. 9207, pp. 1-26, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/app12189207>

- [89] M. Tanniru et al., “An agile digital platform to support population health- A case study of a digital platform to support patients with delirium using IoT, NLP, and IA”, *International Journal of Environment Research and Public Health*, vol. 18, no. 5686, pp. 1-22, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph18115686>
- [90] H. Nasreddine et al., “AIoT with I4.0: the effect of internet of things and artificial intelligence technologies on the industry 4.0”, *ITM Web of Conference*, vol. 46, pp. 1-5, 2022, doi: <https://doi.org/10.1051/itmconf/20224603002>
- [91] W. Rafique et al., “An Application Development Framework for Internet of things service orchestration,” *IEEE Internet Of Things Journal*, vol. 7, No. 5, pp. 4543-4556, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2971013>
- [92] D. De Avila et al., “Internet of things e inteligência artificial nos meios produtivos”, *Revista CIATEC*, vol. 14, No. 2, pp. 156-165, 2022, doi: <https://doi.org/10.5335/ciatec.v14i2.13789>
- [93] P. Araújo, R. Moreira, L. Veiga, L. Dos Santos, V. Batista, “Artificial intelligence and industry 4.0? Validation of challenges considering the context of an emerging economy country using Cronbach’s Alpha and the Lawshe method,” *Eng.*, vol. 4, no. 3, pp. 1-16, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/eng4030133>
- [94] J. Li, M. Sacit, J. Nathwani, J. Wen, “Methods and applications for artificial intelligence, Big Data, Internet of things, and blockchain in smart energy management,” *Energy and Ai.*, vol. 11, pp. 1-18, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2022.100208>
- [95] L. Espina, J. Gregorio, H. Gutiérrez, H. Dworaczek, Y. Solier, L. Emérita, J. Rio, “Which industrial sectors are affected by artificial intelligence? A bibliometric analysis of trends and perspective,” *Sustainability*, vol. 15, no. 16, pp. 1-18, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/su151612176>
- [96] I. Rojek et al., “Modern methods in the field of machine modelling and simulation as a research and practical issue related to industry 4.0”, *Bull. Pol. Acad. Sci. Tech. Sci.*, Vol. 69, no. 2, pp. 1-12, 2021, doi: <https://doi.org/10.24425/bpasts.2021.136717>
- [97] G. Jin, S. Ma, Z. Li, “Dynamic simulation modeling of industrial robot kinematics in industry 4.0”, *Hindawi- Discrete dynamics in nature and society*, 2022, vol. 2022, pp. 1-11, doi: <https://doi.org/10.1155/2022/3217360>
- [98] B. Rodič, “Industry 4.0 and the new simulation modelling paradigm”, *Organizacija*, vol. 50, no. 3, pp. 193-207, 2022, doi: <https://doi.org/10.1515/orga-2017-0017>
- [99] Y. Zêdo, A. Andrade, "Simulation for decision support in process reengineering in the automotive industry", *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, vol. 7, no. 2, pp. 176-195, 2022, doi: <https://doi.org/10.33889/IJMEMS.2022.7.2.012>
- [100] S. Luściński, V. Ivanov, “A simulation study of industry 4.0 factories based on the ontology on flexibility with using Flexsim software”, *Management and Production Engineering Review*, vol. 11, no. 3, pp. 74-83, 2020, doi: <https://doi.org/10.24425/mper.2020.134934>
- [101] M. Niekurzak, E. Kubińska, “Production line modelling in accordance with the industry 4.0 concept as an element of process management in the iron and steel industry”, *Management and Production Engineering Review*, vol. 12, no. 4, pp. 3-12, 2021, doi: <https://doi.org/10.24425/mper.2021.139990>
- [102] J. Cavata et al., “Highlighting the benefits of industry 4.0 for production: an agent-based simulation approach”, *Gestão & Produção*, vol. 27, no. 3, pp. 1-35, 2020, doi: <https://doi.org/10.1590/0104-530X5619-20>
- [103] L. Alpala et al., “Methodology for the design and simulation of industrial facilities and production systems based on a modular approach in an industry 4.0 context”, *Dyna*, vol. 85, no. 207, pp. 243-252, 2018, doi: <http://doi.org/10.15446/dyna.v85n207.68545>
- [104] A. Florescu, S. Barabas, “Modeling and simulation of a flexible manufacturing system—a basic component of industry 4.0”, *Applied Sciences*, vol. 10, no. 22, pp. 1-20, 2020, doi: <http://dx.doi.org/10.3390/app10228300>
- [105] M. Arucu, “Industry 4.0 – Holistic Perspective: Modeling and Simulation Implementations in Manufacturing Systems”, *Journal of Innovative Science And Engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 50-63, 2021, doi: <https://doi.org/10.38088/jise.816023>

- [106] J. Braun et al., “A robot localization proposal for the robot factory 4.0: A novel robotics competition within the industry 4.0 concept”, *Frontiers*, vol. 9, pp. 1-19, 2022, doi: <https://doi.org/10.3389/frobt.2022.1023590>
- [107] K. Klineciewicz, “Robotics in the context of industry 4.0: patenting activities in Poland and their comparison with global developments”, *Problemy Zarządzania*, 2019, vol.17, pp. 53-95, doi: <https://doi.org/10.7172/1644-9584.82.3>
- [108] H. Parmar et al., “Advanced robotics and additive manufacturing of composites: towards a new era in industry 4.0”, *Materials and Manufacturing Processes*, 2021, vol. 37, no. 5, pp. 483-517, doi: <https://doi.org/10.1080/10426914.2020.1866195>
- [109] J. Ribeiro, “Robotic process automation and artificial intelligence in industry 4.0- a literature review”, *Procedia-Computer Science*, vol. 181, pp. 51-58, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.104>
- [110] J. Enríquez et al., “Robotic process automation: A scientific and industrial systematic mapping study”, *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 39113-39129, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2974934>
- [111] J. Yi, L. Guo, “AHP-Based network security situation assessment for industrial internet of things”, *Electronics*, vol. 12, no. 16, pp. 1-20, 2023, doi: <https://www.mdpi.com/2079-9292/12/16/3458>
- [112] J. Zhang, H. Feng, B. Liu, D. Zhao, “Survey of technology in network security situation awareness”, *Sensors*, vol. 23, no. 5, pp. 1-25, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/s23052608>
- [113] H. Alshahrani, A. Khan, M. Rizwan, M. Saleh, A. Sulaiman, A. Shaikh, “Intrusion detection framework for industrial internet of things software defined network”, *Sustainability*, vol. 23, no. 5, pp. 1-18, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/su15119001>
- [114] T. Emad, C. Yung, S. Manickan, “Machine learning techniques to detect a DDoS attack in SDN: A systematic review”, *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 5, pp. 1-27, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/app13053183>
- [115] S. Amerttet, G. Gebresenbet, H. Mohammed, “Utilizing an internet of things (IoT) device, intelligent control design, and simulation for an agricultural system”, *IoT.*, vol. 5, no. 1, pp. 1-21, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/iot5010004>
- [116] H. Karimah, M. Akmal, K. Syazwan, N. Alina, A. González, J. Corchado, M. Saberi, “Recent advancements and challenges of AIoT application in smart agriculture: A review,” *IoT.*, vol. 23, no. 7, pp. 1-22, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/s23073752>
- [117] K. Valaskova, M. Nagy, G. Grecu, “Digital Twin simulation modeling, artificial intelligence-based internet of manufacturing things systems, and virtual machine and cognitive computing algorithms in the industry 4.0 based Slovak labor market,” *Oeconomia*, vol. 15, no. 1, pp. 1-49, 2024, doi: <https://doi.org/10.24136/oc.2814>
- [118] M. Lemstra, E. Quinaglia, M. de Mesquita, “Industry 4.0 Technologies in industrial engineering courses: A faculty survey in Brazil”, *International Journal of Engineering Education*, vol. 38, no. 5, pp. 1458-1469, 2022.
- [119] S. Coşkun, Y. Kayıkçı, E. Gençay, “Adapting Engineering Education to Industry 4.0 Vision”, *Technologies*, vol. 7, no. 1, pp. 1-13, 2019, doi: <http://dx.doi.org/10.3390/technologies7010010>