Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Elementos fundamentales del sistema de manufactura inteligente en la era de Industria 4.0

Key elements of the smart manufacturing in the age of Industry 4.0

Belman-López, C.E.[a*], Jiménez-García, J.A.[b], Vázquez-López, J.A.[b], Hernández-González, S.[b], Franco-Barrón, J.E.[a]

[a] Departamento de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería; Tecnológico Nacional de México en Celaya; C.P 38010.
[b] Departamento de Ingeniería Industrial; Tecnológico Nacional de México en Celaya; C.P 38010.
carlosbelman@gmail.com; alfredo.jimenez@itcelaya.edu.mx; antonio.vazquez@itcelaya.edu.mx; salvador.hernandez@itcelaya.edu.mx; harryfranco111@hotmail.com

Innovación tecnológica: Diseño de sistemas inteligentes de manufactura.

Área de aplicación industrial: Sistemas de producción, diseño de empresas basadas en Industria 4.0, diseño de instalaciones inteligentes de manufactura.

Enviado: 03 junio 2020
Aceptado: 20 julio 2020

Abstract

Production systems are evolving thanks to recent technological and innovations advances in manufacturing systems. Terms such as Industry 4.0 and smart manufacturing have become a priority and object of study for companies and research centers, without generally accepted consensus. As a result, it is difficult to design and develop solutions for smart manufacturing and Industry 4.0, at scientific or business level. The contribution of this document is focused on providing an in-depth analysis of smart manufacturing and Industry 4.0, to later obtain (from the basic definitions of manufacturing systems, Industry 4.0 and smart manufacturing), categorize (according to the different types and hierarchical levels of CPS) and conceptualize (according to the corresponding design principles) the fundamental elements of the smart manufacturing system. The elements obtained are: augmented operator, smart materials, data-based infrastructure, cyber-physical objects, smart processes, cyber-physical production systems, and the smart factory that built on the basis of the correct design principles, together they have the ability to carry out the smart manufacturing in the age of Industry 4.0.

Keywords*:* Automation, Fourth Industrial Revolution, Industry 4.0, Flexible and Intelligent Manufacturing Systems, Modeling and Control of Manufacturing Systems.

Resumen

Los sistemas de producción están evolucionando gracias a avances tecnológicos recientes e innovaciones en los sistemas de manufactura. Términos como Industria 4.0 y manufactura inteligente se han convertido en prioridad y objeto de estudio para empresas y centros de investigación, sin existir consensos generalmente aceptados. Como resultado es difícil diseñar y desarrollar soluciones para la manufactura inteligente, a nivel científico o empresarial. La contribución de este documento se centra en proporcionar un análisis profundo de la manufactura inteligente e Industria 4.0, para posteriormente obtener (a partir de las definiciones básicas de sistemas de manufactura, Industria 4.0 y manufactura inteligente), categorizar (de acuerdo con los diferentes tipos y niveles jerárquicos de CPS) y conceptualizar (según sus correspondientes principios de diseño) los elementos fundamentales del sistema de manufactura inteligente. Los elementos obtenidos son: el operador aumentado, los materiales inteligentes, la infraestructura basada en datos, objetos ciberfísicos, los productos inteligentes, los procesos inteligentes, los sistemas de producción ciberfísicos y la fábrica inteligente, que conceptualizados en base a los principios correctos serán la base del diseño y desarrollo del sistema de manufactura inteligente en la era de Industria 4.0.

Palabras clave: Automatización, Cuarta Revolución Industrial, Industria 4.0, Modelado y Control de Sistemas de Fabricación, Sistemas de Fabricación Flexible e Inteligente.

1. Introducción

Hoy en día, la manufactura enfrenta grandes desafíos, como: la globalización, una competencia cada vez más intensa, volatilidad en la demanda, la necesidad de reducir los ciclos de vida de nuevos productos [20], aumento en la complejidad de productos y procesos [49], consumos de energía [3], complejidad en el área de diseño de productos [47], mayor agilidad de respuesta al mercado, el cambio de enfoque de la producción en masa a la personalización en masa [9], y el cambio de la manufactura orientada a la producción a la manufactura orientada a servicios [26]. Es por tales desafíos, que el diseño de las instalaciones y sistemas de manufactura se ha transformado en un problema altamente complejo [20], y la industria moderna requiere que la próxima generación de fábricas y sistemas de manufactura sea inteligente, flexible e interoperable, capaces de ofrecer un mejor rendimiento a un menor costo [69].

La Industria 4.0 implica una nueva revolución industrial que combina técnicas avanzadas de producción y operaciones con tecnologías emergentes que se integran junto a organizaciones, personas y activos. Por lo tanto, las empresas deben identificar las tecnologías que mejor satisfacen sus necesidades para invertir en ellas, abarcando un conjunto de nuevos desarrollos tecnológicos que les permitan mejorar la eficiencia y productividad [49]. La Industria 4.0 se encuentra dirigiendo cambios profundos en muchas industrias, como la farmacéutica, química, alimenticia, textil, energética, de la salud, entre muchas otras, incluyendo la manufactura y toda su cadena de valor. Es por esto, que la Industria 4.0 se ha convertido en una prioridad para muchas empresas, centros de investigación y universidades [27], donde el término "inteligente" se ha vuelto central, aunque complicado encontrar una definición general y precisa [49].

Al mismo tiempo, la manufactura inteligente (MI) es uno de los términos más ampliamente utilizados para describir la producción del

mañana, ocasionando un rápido aumento en el volumen de publicaciones sobre este tema [35]. La MI también conocida como producción inteligente [77] desempeña un papel fundamental en la Industria 4.0. Este nuevo enfoque de manufactura pretende crear procesos, sistemas [20] y productos inteligentes [57], caracterizados por redes de producción digitalizadas y descentralizadas [2], que actúan con la mínima intervención humana, controlando de forma autónoma sus operaciones en función de los cambios en el ambiente y en los requerimientos [49]. En la MI, los recursos típicos se convierten en objetos inteligentes capaces de sentir, actuar y tener comportamiento dentro de un ambiente a su vez inteligente [76].

Pero actualmente, la Industria 4.0 aún se encuentra en estado conceptual y dentro de las primeras etapas de implementación tanto en la industria como en la investigación científica [55]. Y las empresas están enfrentando dificultades al intentar desarrollar ideas sin estar seguras de los elementos básicos, mientras la investigación científica se ve obstaculizada por falta de definiciones y fundamentos claros, dado que cualquier estudio requiere una base conceptual y terminología sólida para llevarse a cabo [27].

Kagermann et al. [29], en su reporte final describieron la visión inicial, las tecnologías básicas y algunos escenarios puntuales de Industria 4.0, pero no especificaron principios de diseño claros ni los elementos fundamentales para el nuevo sistema de manufactura. Xu et al. [74] presentaron como principales pilares tecnológicos de la Industria 4.0, a los sistemas ciberfísicos (CPS), el Internet de las Cosas (IoT), la Computación en la Nube y la integración industrial. Cobo et al. [15] presentaron un diagrama estratégico sobre Industria 4.0 fundamentado en 7 áreas: CPS, Computación en la Nube, Redes Inteligentes, Innovación, ADN de decisión, redes de sensores inalámbricos y cadena de suministro. Fatorachian at al. [19] propusieron un marco de trabajo teórico basado en teoría de sistemas para la operacionalización de la Industria 4.0. Kamble et al. [30] destacaron 5 áreas principales de Industria 4.0: el concepto Industria 4.0, la interacción hombre-máquina, la interacción máquina-equipo, las tecnologías clave y la sostenibilidad y 8 principios de diseño: la interoperabilidad, virtualización, respuesta en tiempo real, descentralización, modularidad y orientación a servicios. Kusiak [35] propuso 6 pilares fundamentales para la MI: los procesos y tecnología de manufactura, materiales, datos, ingeniería predictiva, sostenibilidad, y redes y recursos compartidos. Chen [14] realizó un estudio de las tendencias en el área de manufactura destacando a la manufactura integrada, la MI y 10 tecnologías principales. Wang et al. [69] mostraron un amplio estado del arte respecto a la implementación de los sistemas de manufactura, enfocándose principalmente en procesos de manufactura, sistemas de control, logística, re-manufactura, manufactura en la nube, programación de la producción, evaluación y control de la calidad de la producción. Zhong et al. [76] proporcionaron una revisión de la MI, la manufactura basada en IoT y la manufactura en la nube, listando al IoT, CPS, computación en la nube, análisis en Big Data y las tecnológicas de la información y comunicación (ICT) como tecnologías que brindan soporte a la MI. Además, se han realizado múltiples análisis bibliométricos [32,43] y revisiones sistemáticas [40,48] sobre Industria 4.0.

Como se observa, existen muy pocos trabajos en la literatura que realicen un análisis explícito y detallado sobre los elementos que conforman el sistema de manufactura inteligente y su posible diseño. La mayoría de las investigaciones están enfocadas en el término Industria 4.0 y las tecnologías que utiliza, pero dejan de lado los principios y elementos básicos necesarios para las fases de diseño y desarrollo en los talleres de manufactura. Solo Kamble et

al. [30], Kusiak [35] y Wang et al. [69] presentaron áreas fundamentales para la MI, pero ninguno enfocado al sistema de manufactura inteligente ni a sus elementos.

Por estos motivos, la contribución de este documento se centra en cerrar esta brecha de investigación, proporcionando un análisis profundo de la manufactura inteligente e Industria 4.0, para posteriormente obtener (a partir de las definiciones básicas de sistemas de manufactura, Industria 4.0 y manufactura inteligente), categorizar (de acuerdo con los diferentes tipos y niveles jerárquicos de CPS) y conceptualizar (según sus correspondientes principios de diseño), los elementos fundamentales del sistema de manufactura inteligente. Los elementos obtenidos son: los objetos ciberfísicos, los materiales inteligentes, la infraestructura basada en datos, los procesos inteligentes, el operador aumentado, los productos inteligentes, los sistemas de producción ciberfísicos (CPPS) y la fábrica inteligente. Estos elementos conceptualizados en base a los principios de diseño correctos serán la base del diseño y desarrollo del sistema de manufactura inteligente en la era de Industria 4.0.

El documento está organizado de la siguiente manera: el resto de esta sección proporciona un análisis detallado sobre Industria 4.0 y la manufactura inteligente. La sección 2 expone el método utilizado. La sección 3 expone los resultados encontrados (elementos del sistema inteligente de manufactura). La sección 4 presenta la discusión. La sección 5 presenta las conclusiones obtenidas.

1.1 La Industria 4.0

El termino Industria 4.0 es un concepto que surgió en los últimos años debido a los avances tecnológicos y desarrollos disruptivos en el sector empresarial. El concepto de Industria 4.0 está basado en la integración de las ICT con tecnología industrial, siendo principalmente dependiente en la construcción de CPS [28], para llevar a cabo una fábrica digital e inteligente, dirigida por la información, personalizable y al cuidado del ambiente [50,58,65,77].

La Industria 4.0 toma como fundamento las oportunidades que brinda la disponibilidad de la información relevante proveniente de cualquier lugar y momento [45], mediante la integración de objetos, máquinas, recursos humanos, sensores, procesos y líneas de producción a lo largo de los límites de la organización [66].

La Industria 4.0 utiliza la ciencia de datos e inteligencia artificial para analizar datos en tiempo real de múltiples máquinas [61], procesos y sistemas para luego automatizar la producción como corresponde. Además, tiene la capacidad para desarrollar una nueva generación de sistemas de producción que logren integrar y sincronizar datos en tiempo real entre los objetos físicos y el espacio virtual [74].

Es un hecho que la Industria 4.0, aún se encuentra en estado conceptual y dentro de las primeras etapas de implementación tanto en la industria, en el entorno humano, como en la investigación científica. Por tanto, los gobiernos, empresas y centros de investigación están intentando desarrollar fábricas inteligentes, automatizadas y conectadas a través de Internet [55].

Los principios de diseño [7,23], mostrados en la Fig. 1, abordan explícitamente este problema, describen los componentes de Industria 4.0, apoyan a los profesionales en el desarrollo de soluciones, son la base de la teoría del diseño [24] y proporcionan un soporte para enfrentar los desafíos actuales de la MI [76]. A continuación, se exponen los principios de diseño para las empresas en el contexto de Industria 4.0.



Figura 1. Principios de diseño para las empresas en Industria 4.0.

Eficiencia y productividad. Este principio consiste en la entrega del mayor rendimiento posible de productos dado un volumen dado de recursos, así como el uso de la menor cantidad posible de recursos para lograr una salida deseada. El primer énfasis consiste maximizar la productividad de los recursos, mientras que en el segundo escenario el enfoque está en calcular la eficiencia de los recursos [29].

Integración. Implementación de la integración horizontal a través de redes de valor e integración vertical que incluya sistemas de manufactura en red para lograr mediante ambas una integración digital de extremo a extremo en toda la cadena de valor [49].

Flexibilidad y adaptabilidad. La alta variabilidad en las demandas de producto y la necesidad de reducir sus ciclos de vida requieren una estructura de producción ágil, flexible y que se pueda reconfigurar rápidamente ante las nuevas demandas [3]. En este principio, los procesos de manufactura pueden ser reconfigurados flexiblemente y la escasez momentánea de recursos puede ser recompensada logrando aumentos en la producción en cortos espacio de tiempo [29].

Arquitectura descentralización y distribuida. La combinación de CPS en los procesos está originando cambios en la producción, dirigiéndola hacia sistemas descentralizados. Esta descentralización no necesariamente es física, pero si lógica, por ejemplo, un producto inteligente o CPS, con la capacidad de identificarse y conectarse a un sistema físicamente centralizado, es capaz de brindar su posición y estado, mientras que la potencia de cómputo puede estar en otra parte [2].

Holística. Este principio consiste en la visión y evaluación de todas las estructuras principales, productos, procesos y recursos en conjunto permitiendo la mejora continua [20]. Esta visión holística aplicada a máquinas, materiales, trabajadores y sistemas permitirá alcanzar la fábrica inteligente de la Industria 4.0 [76].

Ubicua. Capacidad de diseñar en cualquier lugar, fabricar en cualquier parte, vender en cualquier lugar y en cualquier momento [13].

Colaborativa. Trabajo conjunto a nivel humano-humano, humano-máquina y máquina-máquina.

Modular. El sistema de manufactura debe ser construido de forma desacoplada entre subsistemas con pocas interdependencias [9].

Virtualización. Simulación virtual de los datos reales de un proceso, producto o servicio con el fin de prevenir errores, modificar parámetros y predecir comportamientos [41]. Mediante la virtualización se identifica la lógica detrás de las operaciones de los recursos físicos para su traducción al mundo virtual con el fin de mejorar la agilidad, la flexibilidad y reducir costos [4].

Robusta y confiable. La fábrica inteligente debe brindar seguridad operacional, tasas de fallos muy bajas, robustez, que se refiere a la capacidad de garantizar una funcionalidad básica en caso de una falla, y confiabilidad, que se refiere a la probabilidad de que un sistema tecnológico funcione correctamente durante un período de tiempo determinado en un ambiente determinado [29].

Información en tiempo real. Disponibilidad de la información relevante desde cualquier lugar en cualquier momento [45].

Toma de decisiones optimizadas por datos. Entrega de valor a partir de los datos [73] que incluyen desde propiedades de los materiales, parámetros de los procesos hasta información sobre clientes y proveedores, entre otros [35]. Estos datos permiten un conocimiento profundo del sistema, brindan soporte en la toma de decisiones, generan diagnósticos y predicciones, y muestran los conocimientos adquiridos a los usuarios [5].

Seguridad y protección. Garantizar que las instalaciones de producción, máquinas y productos por sí mismos no supongan un peligro para las personas o para el medio ambiente. Al mismo tiempo, tanto las instalaciones de producción, los productos y el sistema en sí, deben ser protegidos contra el uso indebido y el acceso no autorizado de los datos e información que estos contienen [29].

Orientación a servicios. Creación de valor a través de servicios innovadores. El cambio del enfoque centrado en el producto al enfoque servicios a través del producto es una estrategia clave. Estos servicios de valor agregado deben ser proporcionados globalmente a todas las empresas bajo una composición flexible [71].

Equilibrio de la vida laborar. A través de Industria 4.0 y el cambio de paradigma en la interacción entre humano y tecnología, serán las máquinas las que se adapten a las necesidades de los seres humanos y no viceversa. Mientras tanto, sistemas de asistencia inteligente evitarán que los trabajadores tengan que realizar tareas rutinarias, lo que les permitirá centrarse en actividades creativas y de valor agregado [29].

Autonomía e inteligencia. Convertir los recursos tradicionales de manufactura en entidades independientes y autónomas que pueden comunicarse en tiempo real y cooperar en un ambiente inteligente con otros dispositivos inteligentes, tomar decisiones y realizar acciones basadas en la información obtenida [49].

1.2 La manufactura inteligente

La Industria 4.0 está dirigiendo cambios profundos en muchas industrias, como la farmacéutica, química, alimenticia, textil, energética, de la salud, entre muchas otras, incluyendo el área de la manufactura. La Industria 4.0 mediante la implementación de CPS sostiene la promesa de una mayor flexibilidad en los procesos, una personalización masiva y un aumento en la productividad, permitiendo a las empresas fabricar productos cada vez más individualizados con un tiempo de entrega al mercado más corto y una mayor calidad [76].

La manufactura inteligente (MI) o producción inteligente es uno de los términos más ampliamente utilizados para describir la producción del mañana, ocasionando un rápido aumento en el volumen de publicaciones sobre este tema [35]. La MI desempeña un papel fundamental en la Industria 4.0 [77], donde el término "inteligente" (véase Sección 3.2) se vuelve central, volviéndose complicado encontrar una definición única y precisa [49]. Además, la complejidad de los modernos sistemas de manufactura y el enorme incremento en el volumen de datos ha ocasionado que la toma de decisiones sea cada vez más compleja, existiendo la necesidad de utilizar la inteligencia computacional para tomar la decisión correcta en el lugar y momento correcto [14]. En la MI, los recursos típicos de manufactura se convierten en objetos inteligentes capaces de sentir, actuar y tener comportamiento dentro de su ambiente [76]. El ambiente dentro de una fábrica inteligente consiste entonces, en una nueva comunicación e integración en tiempo real de todos los recursos de manufactura (sensores, actuadores, transportadores, máquinas, robots, entre otros recursos). Esta integración permite aumentar la eficiencia de fabricación y cumplir con los requisitos de mercados complejos [49].

Aunque no hay una definición consensuada de MI, de acuerdo con el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST), la MI es un sistema de manufactura colaborativo totalmente integrado que responde en tiempo real para satisfacer las demandas y condiciones cambiantes en la fábrica, en la cadena de suministro y en las necesidades del cliente. Es a su vez, una forma emergente de producción que integra los activos de manufactura con sensores, plataformas computacionales, tecnologías de la comunicación, control, simulación [12], modelado intensivo de datos e ingeniería predictiva [35]. La MI no solo se ocupa de la automatización de los pisos de producción, sino que depende de innovaciones basadas en datos para alcanzar altos niveles de autonomía y optimización en los procesos empresariales [75].

La MI hace uso de las tecnologías de la información y la comunicación aplicadas al área de la manufactura para lograr procesos flexibles y reconfigurables con el propósito de optimizar la producción, la calidad del producto, el nivel de servicio y así poder afrontar un mercado global y dinámico. La MI permite que todos los procesos físicos y flujos de información estén disponibles cuando y donde son necesarios [67,76]. La MI se trata de la autonomía, evolución, simulación y optimización de la empresa de manufactura, y no solo del grado de automatización del piso de producción. El nivel de inteligencia de la empresa de manufactura estará determinado por la cantidad de información disponible de los procesos de manufactura, en el momento y lugar necesario, y de forma fácilmente entendible para las empresas involucradas [75]. Además, del grado en que el mundo físico de la empresa haya sido reflejado en el mundo virtual o digital [35].

La MI mejora también en gran medida el diseño, producción, administración e integración de todo el ciclo de vida de un producto tradicional. El ciclo de vida del producto puede ser mejorado utilizando sensores avanzados, modelos de toma de decisiones, materiales y objetos inteligentes, así como análisis de datos [38]. Al mismo tiempo, sistemas de manufactura inteligente podrá proporcionar servicios colaborativos, personalizables, flexibles y reconfigurables a los usuarios finales. Las técnicas de Inteligencia Artificial (IA) tendrán un papel esencial en estos sistemas de manufactura al proporcionar características como la capacidad de aprendizaje, razonamiento y acción. Con el uso de la IA, se puede minimizar la participación humana dentro de los sistemas y procesos, a la vez se atienden los desafíos de la MI. Estos desafíos son: el desarrollo de sistema

inteligentes de manufactura, modelos de MI basados en datos, integración y colaboración profunda entre hombre y máquina y desarrollo de casos de aplicación reales [76].

2. Métodos y materiales

En esta investigación se analizó la MI y la Industria 4.0 con el fin de obtener y conceptualizar los elementos fundamentales del sistema inteligente de manufactura en el contexto de Industria 4.0, lo que permitirá una amplia integración de estos en los entornos de manufactura. El estudio utilizó un enfoque de investigación deductivo para dirigir la investigación [17], que comenzó con un análisis detallado de los términos Industria 4.0 y la manufactura inteligente en la sección anterior. Después de explorar estos términos, a continuación, se utilizó las definiciones básicas de sistemas de manufactura, Industria 4.0 y manufactura inteligente para identificar los elementos fundamentales del sistema de manufactura inteligente para ser posteriormente conceptualizados.

A partir de la definición tradicional de sistemas de manufactura, definidos como la colección de uno o más procesos de producción y transformación de la materia prima (materiales) mediante equipo (maquinaria, energía) y recursos humanos, con el fin de fabricar un producto [25]. Es posible identificar siete elementos fundamentales, estos son: los sistemas de manufactura (1), los procesos (2), los equipos u objetos (3), los materiales (4), los recursos humanos u operadores (5), la infraestructura (6) y los productos (7). Adicionalmente, a partir del concepto de Industria 4.0 que consiste en la integración de las ICT con tecnología industrial, para llevar a cabo una fábrica inteligente (8), dirigida por la información, personalizable y al cuidado del ambiente [10,28,58,69,74]. Es posible identificar el último elemento, la fábrica inteligente.

Por lo tanto, los elementos encontrados son: los objetos, la infraestructura, los materiales, los procesos, el operador, los productos, el sistema de producción y la fábrica. Pero de acuerdo con la definición de la MI, los recursos típicos de manufactura se deben convertir en objetos inteligentes capaces de percibir, actuar y tener comportamiento dentro de su ambiente, siendo principalmente dependiente en la construcción de CPS [8,49,55,77]. Estos CPS pueden ser divididos en tres niveles, donde cada uno implementa sus actividades según sus leyes físicas, funciones, estructura e incertidumbre dentro de su entorno. Estos niveles son unidad, sistema y sistema de sistemas [59]. Por lo tanto, los elementos encontrados pueden ser categorizados en infraestructura, CPS (objetos o equipos, materiales, procesos, sistemas, productos y fabrica) y recursos humanos. La Fig. 2, muestra los niveles jerárquicos de los diferentes tipos de CPS en el sistema de manufactura según su función y estructura hasta alcanzar la fábrica inteligente.

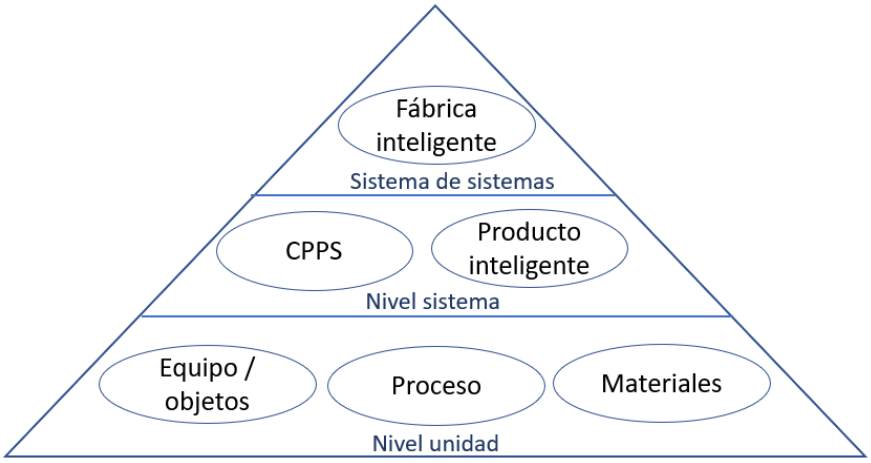


Figura 2. Niveles jerárquicos de los CPS según función y estructura hasta alcanza la fábrica inteligente.

Pero, la Industria 4.0 y la MI aún se encuentra en estado conceptual y dentro de las primeras etapas de implementación tanto en la industria como en la investigación científica [55] y las empresas están enfrentando dificultades al intentar desarrollar ideas sin estar seguras de los elementos y fundamentos básicos [27]. Los principios de diseño [7,23] abordan explícitamente este problema, apoyan a los profesionales en el desarrollo de soluciones siendo la base de la teoría del diseño [24] y proporcionan un soporte para enfrentar los desafíos actuales de la MI [76].

Por estos motivos, los elementos del sistema de manufactura encontrados son conceptualizados mediante los principios de diseño de Industria 4.0. La Tabla 1 muestra una relación entre los elementos del sistema de manufactura y sus principios de diseño correspondiente para ser contextualizados. Mediante la conceptualización de los elementos del sistema de manufactura inteligente en base a los principios de diseño adecuados, los ingenieros de manufactura podrán rediseñar fábricas, procesos y operaciones para que se adapten a los avances tecnológicos emergentes y a la fabricación de productos dentro de instalaciones de manufactura cada vez más complejas e inteligentes [16].

Tabla 1. Elementos fundamentales de los MI y sus principios de diseño.

Infraestructura	CPS	Operador
Integración	Flexibilidad y adaptabilidad	Colaboración
Holística	Colaborativos	Equilibrio de la vida
Ubicua	Modulares	laboral y desarrollo
Tiempo real	Tiempo real	profesional continuo
Seguridad	Virtualización	
Arquitectura distribuida	Orientación a servicios	
	Decisiones optimizadas por datos	
	Inteligencia y autonomía	
	Personalización	
	Eficiencia y productividad	
	Robustez	

3. Resultados (Elementos del sistema inteligente de manufactura)

Esta sección expone a detalle la conceptualización de los elementos obtenidos. Estos son: la infraestructura, el operador aumentado, y los diferentes tipos de CPS (los objetos ciberfísicos, los materiales inteligentes, los procesos inteligentes, los productos inteligentes, los sistemas de producción ciberfísicos y la fábrica inteligente). La conceptualización de estos elementos en base a sus correspondientes principios, serán la base del diseño, desarrollo e implementación del sistema de manufactura con la capacidad de alcanzar la manufactura inteligente en la era de Industria 4.0.

3.1 Infraestructura orientada a datos

La infraestructura se define como un sistema interconectado, que suministra energía y proporciona un medio de comunicación seguro y confiable para la operación de los procesos de producción. En la MI es fundamental poder tomar decisiones correctas, respuestas flexibles a interrupciones y optimizar la producción global en lapsos cortos de tiempo [29]. Por estos motivos, los datos se han convertido en una parte integral de la toma de decisiones en la manufactura. El aumento en el volumen, variedad y velocidad de los datos se ha desencadenado gracias al IoT, al incremento en el uso de sensores y etiquetas RFID a lo largo de las líneas de producción. Estos datos recopilados ayudan a acelerar la oportuna toma de decisiones [74] y abren las puertas a la entrega de valor a partir de estos. En general, existen dos componentes principales que brindan soporte al manejo de los datos en Industria 4.0, estos son la infraestructura del sistema y los análisis de datos. La infraestructura del sistema permite la conectividad y garantiza la comunicación en tiempo real entre las instalaciones y los dispositivos, incluyendo componentes relacionados con la captura, transferencia, almacenamiento y computación de datos en un entorno distribuido [73].

Las tecnologías de computación ubicua e IoT habilitan a personas y objetos el acceso y captura de información sin restricciones de tiempo y lugar proporcionando la forma más efectiva de percibir información proveniente del ambiente [62].

La Fig. 3 muestra el diseño de la infraestructura basada en los principios de diseño. La *capa de captura ubicua en tiempo real* está conformada por sensores ubicuos. Un sensor ordinario puede ser convertido en un sensor ubicuo al añadirle un módulo de red. Tecnología y sensores ubicuos incluyen imágenes, etiquetas RFID, auto ID, Kinect, GPS, GSM, entre otras. Por ejemplo, la tecnología RFID y auto ID pueden ser utilizadas para el seguimiento automático de objetos en tiempo real, aumentando la visibilidad, incrementando oportunidades de negocio y ayudando a automatizar las operaciones [13].

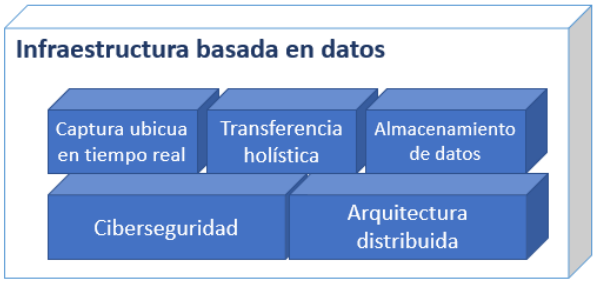


Figura 3. Diseño de la infraestructura basada en los principios de diseño.

La *capa de transferencia holística* es responsable de la transmisión de los datos obtenidos e interconexión de todos los objetos de la fábrica con diferentes características a través de diversos protocolos IoT. Protocolos de enlace de datos ampliamente utilizados incluyen Bluetooth, ZigBee, Zwave, WiFi y NFC. Bluetooth es utilizado comúnmente para redes de vehículos y aplicaciones de detección.

ZigBee es el protocolo para redes WSN más popular y posee un bajo consumo de energía, muy adecuado para la detección ubicua [39]. Z-wave tiene consumo de energía muy bajo adecuado para casas inteligentes y aplicaciones en el área de la salud. WiFi es un protocolo de red inalámbrico basado en los estándares IEEE 802.11, mientras que NFC se ve comúnmente en sistemas de pagos a través de teléfonos móviles. Mientras tanto, protocolos de red de largo alcance incluyen SigFox, Neul, LoRaWAN, además de las tecnologías de comunicación de teléfonos celulares o GSM. Estos protocolos de largo alcance se usan comúnmente dentro de ciudades inteligentes y aplicaciones ambientales con el fin de transmitir datos en rangos de 2 hasta 200 kilómetros [75].

La *capa de almacenamiento de datos* debe ofrecer una latencia baja tanto en el almacenamiento como en la ejecución de consultas, con la capacidad de manejar altos volúmenes de transacciones [53], datos estructurados y no estructurados, poseer alto rendimiento en tiempo real, escalabilidad, alta disponibilidad e integridad y consistencia en los datos [21]. Donde la computación en la nube y plataformas como servicio (PaaS) suelen presentar soluciones efectivas a tales desafíos [42]. Por ejemplo, los datos pueden ser almacenados en servidores en la nube [11], de forma que pueden dar soporte a decisiones complejas, brindando una arquitectura descentralizada y distribuida [74].

La alta dependencia de Industria 4.0 sobre lo digital, la acción y control basado en datos y el gran aumento en el número de conexiones conduce a nuevas vulnerabilidades como actividades maliciosas que no necesariamente requieren una intrusión física. Por ejemplo, la manipulación de información es un gran riesgo para la producción basada en datos [45].

Estos motivos hacen que la ciberseguridad sea primordial para el progreso de la MI, ya que los activos de datos se convertirán en un indicador creciente del valor de mercado de una empresa [35].

En la *capa de ciberseguridad,* instalaciones, productos y el sistema en sí, deben estar protegidos contra el uso indebido y el acceso no autorizado de los datos y del conocimiento que estos contienen [29]. En [46] se abordan ampliamente escenarios y soluciones apropiadas sobre ciberseguridad y [64] abordan soluciones de seguridad en sistemas de manufactura inteligente.

Finalmente, la completa evolución de la infraestructura en infraestructura inteligente requiere permitir realizar configuraciones y tareas de mantenimiento, administrar y monitorear la comunicación y flujos de energía con poca intervención humana. La infraestructura inteligente está al tanto de su topología, estado y capacidades, así como de la identidad y requisitos de los equipos conectados, utilizando esta información para optimizarse de acuerdo con métricas de negocio, como disponibilidad y costo [70].

3.2 Elementos ciberfísicos (CPS)

Hoy en día las personas están rodeadas de muchas cosas llamadas inteligentes, desde teléfonos inteligentes, casas inteligentes, ciudades inteligentes, entre otras. Pero el adjetivo inteligente parece ser abusado en muchos contextos y su significado con respecto a los objetos aún no está claramente definido [54].

El concepto "inteligente" es central en el marco de la Industria 4.0, y aunque no existe una definición precisa. Una definición que cumple con la visión de varios autores se asocia con dispositivos independientes y autónomos que pueden comunicarse en tiempo real y cooperar en un entorno inteligente con otros dispositivos,

tomar decisiones y realizar acciones basadas en la información obtenida [49].

El adjetivo inteligente es también comúnmente aplicado para caracterizar un objeto que fue mejorado mediante la implementación de características adicionales, como la capacidad de almacenamiento y cómputo o la capacidad de conectarse y comunicarse con otros dispositivos, representando un incremento en sus habilidades computacionales. La inteligencia de tal dispositivo puede ser revelada por la cooperación en red con otros dispositivos inteligentes, que tienen la habilidad para checar actualizaciones del estado del sistema y decidir si actuar sobre el sistema o no [54].

Los objetos inteligentes en el área de la manufactura evolucionan en la forma de CPS que poseen la capacidad de intercambiar información, desencadenar acciones y controlarse entre sí de forma autónoma, desarrollando un ambiente de manufactura abierto e inteligente [70]. Los CPS mediante la *virtualización* permiten la combinación del mundo físico con el digital, permitiendo que ambos mundos se conecten y actúen como si fueran uno solo. Todo lo que sucede sobre el mundo físico impacta sobre el mundo virtual y viceversa [33]. Numerosos ejemplos de CPS existen áreas como, la manufactura, la robótica, las redes inteligentes, la construcción de vehículos autónomos, entre otras [60]. Un CPS se compone (véase Fig. 4) de unidades de control y microcontroladores que controlan los sensores y actuadores necesarios para interactuar con el mundo real y procesar los datos obtenidos [28].

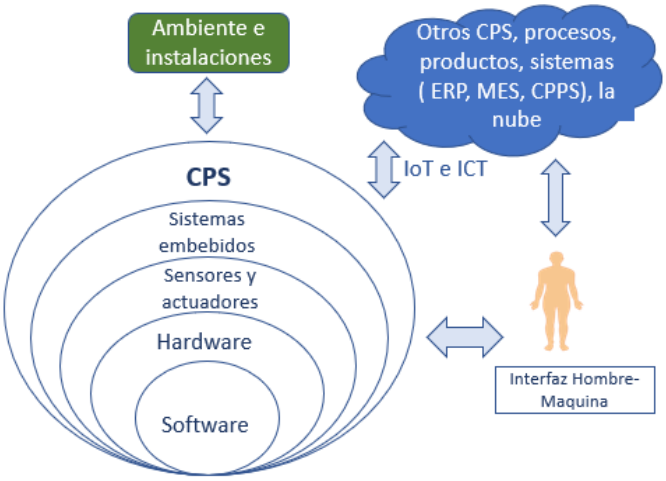


Figura 4. El entorno ciberfísico.

Los CPS requieren interfaces de comunicación (véase Figura 4 y 5) para intercambiar datos con productos, procesos, sistemas empresariales existentes (lo que permite una *integración* vertical), con la nube (para una descentralización lógica de sus capacidades computacionales), y con la fábrica y su ambiente circundante [60]. Los CPS, son *ubicuos*, es decir, pretenden tener la información y los servicios disponibles en todas partes y desde cualquier lugar [28], y *colaborativos*, permitiendo la comunicación entre humanos, máquinas, procesos y sistemas [9,19].

Los CPS son también sistemas autónomos que toman sus propias *decisiones basadas en datos* capturados en *tiempo real* mediante algoritmos

de aprendizaje automático [56,72]. Esto provoca altas demandas en la disponibilidad de servicios e infraestructura (véase Sección 3.1) en términos de espacio, calidad y seguridad [29].

El diseño del mundo digital de los CPS mediante la *virtualización* requiere de varios componentes (véase Fig. 5), como el modelo virtual del mundo físico, servicios de valor agregado y autonomía e inteligencia en sus operaciones. El *modelo* del CPS encapsula características importantes relacionadas con el objeto como recurso de manufactura en sí, tales como: parámetros, tolerancia, funcionalidad, requerimientos, conexiones, estado y experiencia [59].

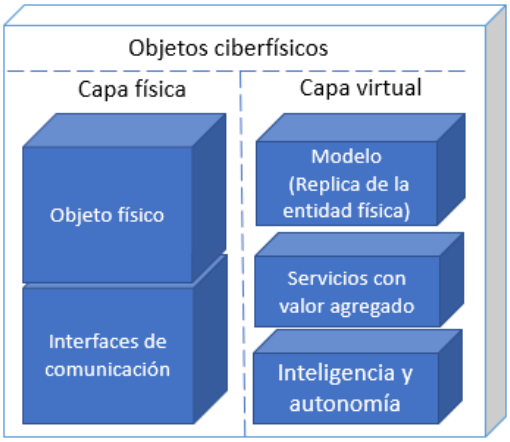


Figura 5. Diseño en distintas capas de los CPS.

La *capa de servicios* proporciona servicios de valor agregado *basados en datos* para, predicción, simulación, verificación, experimentación virtual, optimización y educación digital. Incluyendo servicios de diagnóstico y mantenimiento inteligentes, para el monitoreo y administración de la salud de activos y procesos [36], convirtiendo la fábrica en *robusta y confiable* y aumentando significativamente la *eficiencia y productividad*, reduciendo los costos de producción, mejorando el rendimiento de los procesos en la perspectiva de la fabricación con cero defectos [10].

Adicionalmente, los CPS son dispositivos *inteligentes y autónomos*. Para alcanzar este principio, Lee at al. [36,37] consideran dos niveles (véase Fig. 6), el nivel cognitivo y el nivel de configuración. Los servicios en el nivel cognitivo generan un conocimiento profundo del sistema monitoreado, brindan soporte en la toma correcta de decisiones, generan diagnósticos y predicciones mediante algoritmos de IA, y muestran los conocimientos adquiridos a los usuarios. Dado que la información y el estado de las máquinas están disponibles, las personas pueden tomar mejores decisiones, por ejemplo, sobre la prioridad de las tareas para optimizar los procesos [5]. Los servicios en el nivel de configuración representan la retroalimentación del espacio cibernético al espacio físico y actúan como control de supervisión para que las máquinas se autoconfiguren aplicando sobre el sistema monitoreado las decisiones correctivas y preventivas tomadas en el nivel cognitivo [36].

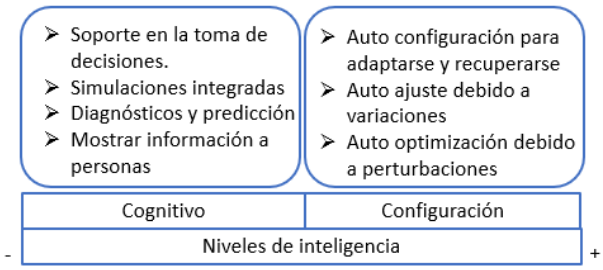


Figura 6. Niveles de inteligencia. Fuente: [36].

El nivel de configuración representa, la visión más completa de Industria 4.0, caracterizada por redes de recursos de manufactura (maquinaria de manufactura, robots, sistemas de almacenamiento, transporte e instalaciones de producción) autónomos, capaces de autocontrolarse en respuesta a diferentes situaciones, con la capacidad de autoconfigurarse en base al conocimiento y equipados con sensores ubicuos que incorporan

información a los sistemas de planificación y administración [29]. Mediante los CPS, la inteligencia está *descentralizada*, a lo largo de los procesos, proporcionando una mayor estabilidad y *flexibilidad* en las operaciones [33].

Finalmente, el mundo físico de los CPS dentro de la MI puede consistir en un equipo, un producto, un proceso, un sistema e incluso una organización. Cada uno implementa sus actividades según sus leyes físicas e incertidumbre dentro de su entorno y pueden ser divididos en niveles según sus funciones y estructura. La Fig. 7, muestra los elementos fundamentales de la MI y su correspondencia entre el mundo físico y digital. En las siguientes secciones se analizan los diferentes tipos de CPS, que, aunque comparten las bases expuestas en esta sección, también presentan diferencias en sus actividades según su función, estructura y entorno.

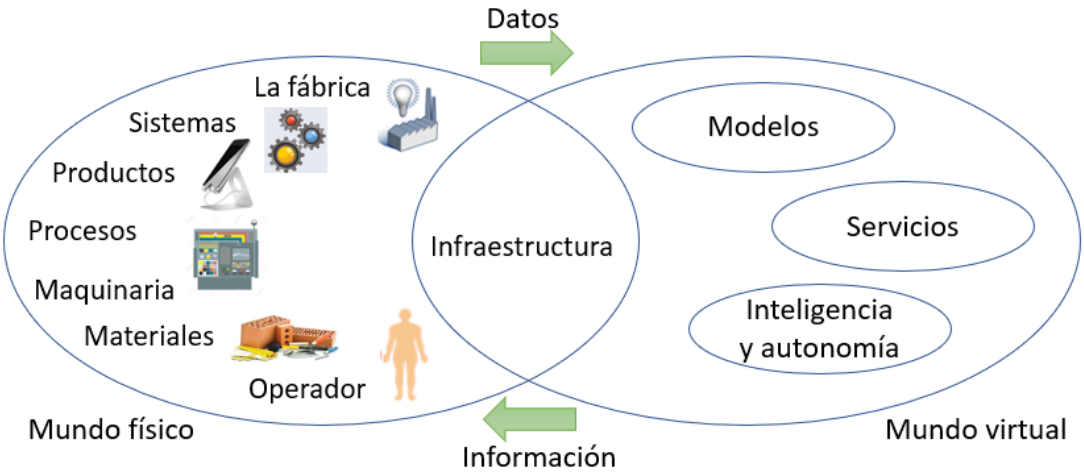


Figura 7. Elementos fundamentales de la MI y su correspondencia entre el mundo físico y digital.

3.2.1 Productos inteligentes

Uno de los objetivos principales de Industria 4.0 es satisfacer las necesidades individuales de los clientes, esto afecta áreas como la gestión de pedidos, la investigación, el desarrollo y tiempo de entrega de productos [66]. Bajo Industria 4.0, un nuevo método de compra será proporcionado a los clientes, permitiéndoles ordenar cualquier función o característica que pueda ser incluida dentro de los productos, es decir, están orientados a la *personalización* [52].

La Industria 4.0 permite integrar productos inteligentes con procesos físicos y digitales. Estos son definidos como productos capaces de realizar cálculos, almacenar datos, comunicarse e interactuar con su ambiente, proporcionando datos acerca de su identidad, sus propiedades, estados e historia durante todo su ciclo de vida [54]. Mediante Industria 4.0, las compañías están avanzando hacia una mayor creación de valor digital a través de los productos colaborando en ecosistemas digitales y de servicios [51].

Los productos inteligentes pueden ser descritos como CPS debido a su capacidad de permitir la conexión entre los mundos físicos y digitales. Estos productos son *integrados* en *tiempo real* en la cadena de valor como parte activa de los sistemas industriales, interactúan con su entorno, monitorean sus fases de producción, siendo capaces de solicitar los recursos necesarios para su finalización [49]. Los productos inteligentes poseen sensores integrados que recopilan de datos en *tiempo*

real utilizados para informar sobre la localización, estado del producto y condiciones del entorno [56].

Los productos inteligentes son identificables de forma única, pueden ser ubicados en todo momento, incluso mientras son fabricados, conocen su historia, estado actual, detalles de su proceso de fabricación y rutas alternativas para alcanzar su estado objetivo. Esto significa que, en ciertos sectores, los productos inteligentes podrán controlar las etapas individuales de su producción de forma semiautónoma [52]. Además, será posible que los productos terminados conozcan los parámetros dentro de los cuales pueden funcionar de manera óptima y sean capaces de reconocer signos de desgaste a lo largo de su ciclo de vida. Esta información permite optimizar la fábrica inteligente en términos de logística, implementación y mantenimiento, así como para la integración con las aplicaciones de gestión empresarial [29].

Los productos inteligentes conocen los pasos del proceso anteriores y pueden definir pasos futuros. Estos pasos no solo incluyen fases a ser realizadas en un producto sin terminar, sino también próximas operaciones de mantenimiento e incluso la definición de su ruta logística y de entrega [54]. De esta manera, el producto solicita los recursos necesarios y orquesta los procesos de producción para su finalización. Este es un prerrequisito para hacer posibles procesos *flexibles*, auto configurables en sistemas de producción altamente *modulares* [70].

Finalmente, el cambio del enfoque de desarrollos centrados en el producto al *enfoque servicios a través del producto* (enfoque orientado a la solución) se considera una estrategia clave. El cambio de paradigma de los consumidores que compran productos a los consumidores que demandan soluciones y beneficios se puede representar como el desarrollo hacia diferentes niveles de servitización [71].

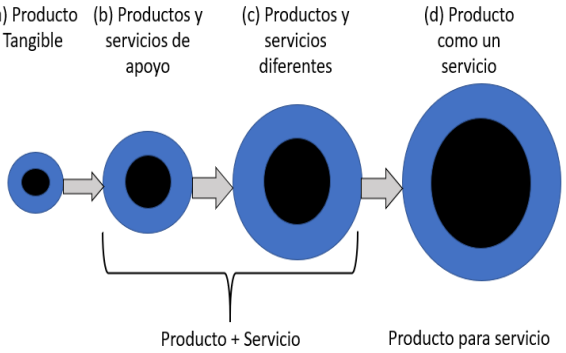


Figura 8. Niveles de servitización. Fuente: [71].

El producto tangible (a) (véase Figura 8), comprende solo el producto principal comprado por el cliente. Este es el nivel más bajo de servitización, la diferenciación con respecto a otros fabricantes es lograda sobre las funcionalidades del producto, calidad y precio, ya que estos criterios son decisivos para los clientes de productos tangibles. Los escenarios de Producto + Servicio incluyen la funcionalidad del producto tangible apoyado o soportado por servicios (b) o servicios que diferencian la oferta de los competidores (c). En estos casos, los servicios se pueden comprar junto al producto original o individualizar el producto y proporcionar funcionalidades adicionales al cliente, que se cobran por separado. Los requisitos individuales del cliente se consideran cada vez más para proporcionar una ventaja competitiva. Los escenarios de productos para servicios (d) desacoplan fuertemente la fabricación de bienes y la venta de servicios. El cliente compra servicios que se incluyen para la solución de un problema específico. El producto tangible, si es aún requerido, muy probablemente no será vendido, sino que simplemente será usado para proporcionar servicios [71].

3.2.2 Procesos inteligentes

La Industria 4.0 permite el desarrollo de procesos inteligentes que entrelazan el mundo real y virtual mediante CPS [70]. Los procesos inteligentes en el área de manufactura encapsulan su propia secuencia de operaciones, parámetros, tiempos y recursos necesarios [59]. Los procesos inteligentes controlados y monitoreados por CPS, logran actuar con menor intervención humana, controlando de forma autónoma sus operaciones en función a los cambios en los requerimientos o en el ambiente [49]. Los procesos inteligentes mediante CPS dotados de conectividad avanzada, recopilan e intercambian información en tiempo real con el fin de identificar, ubicar, rastrear, monitorear y optimizar de forma autónoma e independiente al proceso que conforman [56].

En cuanto a su arquitectura, los procesos inteligentes generalmente incluyen el acoplamiento con plataformas en la nube. Este modelo implica máquinas reales que operan en una plataforma en la nube que simulan la forma, condiciones del proceso y generan conocimiento descriptivo, predictivo y prescriptivo mediante algoritmos de inteligencia artificial de comportamientos anteriormente registrados que permiten optimizar al proceso en cuestión [56]. Finalmente, la integración de los CPS en los procesos de manufactura permite la *integración vertical y horizontal* de los sistemas de información con los procesos de producción en la cadena de valor [63], transformando las fábricas de hoy en fábricas de Industria 4.0 [36].

3.2.3 Sistemas de producción ciberfísicos

Los productos y sistemas de manufactura son cada vez más complejos. La prioridad para las presentes investigaciones se encuentra en el desarrollo de sistemas inteligentes de manufactura, descriptibles, manejables, sensibles al contexto y con la capacidad de autocontrolarse. En la MI, estos sistemas inteligentes evolucionan en la forma de CPPS. Las CPPS conocen su estado, capacidad, diferentes opciones de configuración, plan de preparación y mantenimiento y pueden tomar decisiones de forma autónoma [2]. Estos sistemas consisten en conjuntos de procesos implementados mediante CPS modulares configurados con funciones de ayuda e integrados sinérgicamente mediante la infraestructura. Los CPPS logran una integración mejorada de los procesos de manufactura reales y aquellos virtualmente planificados [29].

Las expectativas hacia los CPPS son enormes, requerimientos tales como: interoperabilidad, robustez, autonomía, autoorganización, auto mantenimiento y reparación, eficiencia, control, rastreo y gestión global de recursos y procesos y la generación de servicios mediante minería de datos implican formidables retos para la comunidad de investigación y desarrollo [22,44].

La principal diferencia los CPPS y los sistemas tradicionales es la capacidad de comunicarse, interactuar y *colaborar* con los procesos que lo conforman, con la fábrica y con su ambiente [27]. Los CPPS habilitan una nueva *integración en tiempo real* de todos los recursos y procesos de manufactura, desarrollando una visión holística que aumenta la eficiencia de fabricación y permite cumplir con los requisitos de mercados altamente complejos y dota a la fábrica con *inteligencia descentralizada* [49].

Los CPPS conformados con servicios de valor agregado, realizan análisis y permiten *tomar decisiones optimizadas* que transforman la producción en manufactura inteligente, colaborativa, personalizada y dirigida por datos [76]. Estos nuevos sistemas de manufactura se encuentran *integrados* de forma vertical con procesos de producción y de negocios [8], y horizontalmente con cadenas de valor dispersas

y descentralizadas física, lógica o geográficamente, pero administradas en *tiempo real* desde el momento en que se realiza un pedido, hasta que el pedido es entregado al cliente [29].

3.2.4 La fábrica inteligente

La manufactura se encamina hacia lo que se conoce como "fábrica inteligente". Está se concibe como un sistema de sistemas ciberfísicos que permite que la información sobre los procesos de manufactura esté disponible cuando, donde y en la forma que se necesita dentro de cadenas de suministro y ciclos de vida de productos realizados por múltiples industrias [75].

La fábrica inteligente, también conocida como, fabrica del futuro, fábrica ubicua, entre otros nombres, consiste en la *integración*, digitalización y uso de procesos *flexibles* e *inteligentes* a lo largo de toda la cadena de valor. La fábrica inteligente habilita una nueva comunicación e *integración* [6] en *tiempo real* de todos los recursos de manufactura, lo que permite aumentar la *eficiencia* de fabricación y cumplir con los requisitos de mercados altamente complejos [54]. La fábrica inteligente constituye una característica fundamental de Industria 4.0 [76], siendo definida como una fábrica que consciente de su propio contexto, es capaz de asistir a personas y máquinas en la ejecución de sus tareas. Esto es logrado mediante sistemas conscientes de su ambiente que toman en cuenta la información de su entorno, como, la posición y estado de diferentes objetos e información proveniente del mundo físico y virtual para cumplir sus tareas [27].

La fábrica inteligente encapsula y administra aspectos como: los niveles de inventario, la logística de los materiales, el control de la calidad, y el transporte y entrega de los productos terminados [59], gestionan la complejidad, fabrican productos de manera más eficiente y son menos propensas a las interrupciones. En la fábrica inteligente, las personas, las máquinas y los recursos se comunican entre sí con la misma naturalidad que en una red social [29]. Las fábricas inteligentes poseen una estructura *modular*, cuyos procesos son controlados y monitoreados por CPS que permiten *tomar decisiones inteligentes y descentralizadas* [49].

Finalmente, en las fábricas inteligentes es posible que requerimientos *individuales* por parte del cliente sean cumplidos, lo que significa que incluso artículos únicos pueden ser fabricados de manera rentable. De esta manera, es posible para negocios y procesos permitir cambios de último momento y responder de manera flexible a cambios, interrupciones y fallas por parte de máquinas y proveedores [29].

3.2.5 Materiales inteligentes

Las ciencias de los materiales es clave para los desarrollos de la MI (véase Fig. 9). La Industria 4.0 busca soluciones novedosas para crear piezas que puedan sustituir a sus contrapartes convencionales, surgiendo nuevos desarrollos en la tecnología de manufactura aditiva y manufactura metal aditiva [34].

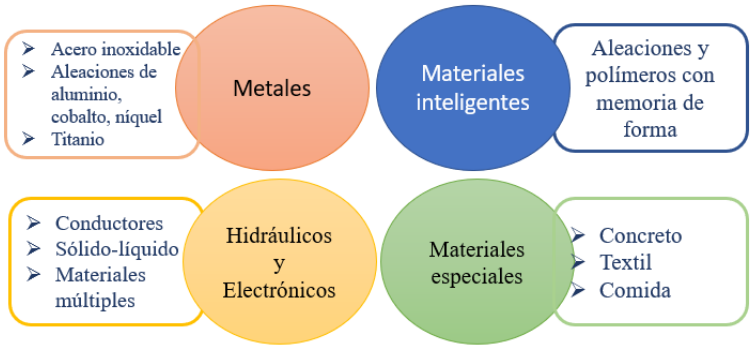


Figura 9. Materiales en la Industria 4.0. Fuente: [18].

Los materiales inteligentes se han identificado como aquellas que alteran su forma o propiedades como resultado de cambios en el tiempo o condiciones externas. La introducción de materiales inteligentes en la Industria 4.0 ofrece ciertas ventajas como la reconfiguración y logro de las estructuras y propiedades deseadas. En general, las aleaciones y polímeros con memoria de forma serán tomados en cuenta como materiales para producir partes funcionales de sistemas robóticos blandos, estructuras de evolución automática y aplicaciones de plegado secuencial controlado [31]. Además, la introducción de sustancias conductoras permite construir circuitos electrónicos dentro de los objetos. En consecuencia, la *integración* total del circuito en el objeto que lo acompaña (electrónica integrada) se convierte en un tema trascendental. La eficiencia en el embalaje de sistemas electrónicos puede ser mejorado mediante la Industria 4.0, permitiendo diseños más innovadores creados en un solo paso con la tecnología de impresión de materiales múltiples [18].

3.3 El operador aumentado

La Industria 4.0 integra a las personas en el proceso de manufactura con actividades de valor añadido que eviten desperdicios [66]. Es crucial para Industria 4.0, garantizar que se generen más empleos que los que desaparecerán al aplicar la tecnología en actividades rutinarias [49], surgiendo la necesidad de formar una nueva generación de gerentes y trabajadores capaces de transformar las empresas de manufactura en entidades colaborativas orientadas a servicios [71].

El concepto del operador aumentado se refiere al soporte técnico y tecnológico que los trabajadores deben brindar a los complejos sistemas de producción. La Industria 4.0, no visualiza instalaciones de producción sin trabajadores, sino que ve en los operadores las partes más flexibles en el sistema de producción con la capacidad de adaptarse al máximo a los cada vez más complejos y desafiantes ecosistemas industriales [70].

La Industria 4.0 conducirá a una mayor automatización de tareas y los trabajadores deben estar preparados para realizar nuevas actividades [49]. Ante la escasez de trabajadores calificados, con pensamiento interdisciplinario y excelentes actitudes técnicas y sociales, la Industria 4.0 permitirá a estos trabajadores extender su vida laboral siendo productivos durante más tiempo. Una flexible organización laboral permitirá promover un mejor equilibrio entre la vida laboral y personal con un continuo desarrollo profesional. La Industria 4.0 transformará radicalmente los perfiles del trabajo y la competencia de los trabajadores, siendo necesario implementar estrategias adecuadas de capacitación y organizar el trabajo fomentando

el aprendizaje continuo. Además, a través de Industria 4.0 y el cambio de paradigma en la interacción entre humano y tecnología, serán las máquinas las que se adapten a las necesidades de los humanos y no viceversa. Mientras que, sistemas de asistencia inteligente evitarán que los trabajadores tengan que realizar tareas rutinarias, lo que les permitirá centrarse en actividades creativas y de valor agregado [29].

4. Discusión

Actualmente, la falta de herramientas orientadas a explotar todo el potencial de la MI representa un obstáculo importante. La mayoría de las investigaciones están enfocadas en el término Industria 4.0 y las tecnologías que utiliza, pero dejan de lado los principios y elementos fundamentales necesarios para las fases de diseño y desarrollo del nuevo sistema de manufactura inteligente. Por esto, esta investigación realizó un análisis profundo de la manufactura inteligente e Industria 4.0, con el fin de obtener, categorizar y conceptualizar los elementos fundamentales del sistema de manufactura inteligente. Estos elementos conceptualizados en base a los principios de diseño correctos serán la base del diseño, desarrollo e implementación del sistema de manufactura inteligente en la era de Industria 4.0.

Para futuras investigaciones, el desarrollo de arquitectura formal para el nuevo sistema de manufactura es crucial para alcanzar la MI e Industria 4.0 [74]. Esta arquitectura de referencia es una clara brecha de investigación identificada en la literatura, que debe proporcionar una descripción técnica de los elementos, estándares y facilite su implementación. La arquitectura de referencia es un modelo general que se aplica a productos y servicios de todas las empresas asociadas, proporcionando un marco para la estructuración, desarrollo, integración y operación de los sistemas tecnológicos relevantes para la MI [29]. El uso de enfoques arquitectónicos es fundamental en el desarrollo de CPS y aplicaciones industriales, que debe abordarse como un problema global y no local. La mayoría de los ingenieros de manufactura son expertos en áreas como la mecánica, por lo cual, la noción del trabajo arquitectónico encuentra resistencia, de ahí, la necesidad de cerrar la brecha entre estas disciplinas [68].

Trabajos que justifiquen la cantidad para invertir es otro nicho de oportunidad para la mayoría de las iniciativas de manufactura basadas en nuevas tecnologías. Una inversión significativa es inicialmente requerida para implementar la MI en una pequeña y mediana empresa. La implementación de los pilares tecnológicos de la MI también requieren una gran cantidad de inversión inicial para cualquier organización [66]. La MI ofrece ganancias en productividad y eficiencia de los recursos. Pero será necesario estudios que permitan calcular las compensaciones entre los recursos adicionales que necesitan ser invertidos en las fábricas inteligentes y los posibles ahorros generados [29].

Finalmente, cabe destacar que la voluntad social de aceptar, usar y desarrollar este nuevo paradigma de manufactura y sus tecnologías relacionadas es fundamental para el éxito de la MI. La aceptación por parte de los usuarios es un requisito previo crucial. La aceptación significa que los usuarios perciben los sistemas tecnológicamente diseñados positivamente, los aceptan y están dispuestos a usarlos. El pasado ha demostrado que es extraordinariamente difícil predecir la aceptación. Al mismo tiempo, la aceptación depende mucho de interacciones hombre-máquina bien diseñadas. Por esta razón, los problemas de aceptación deben abordarse ampliamente desde un principio en especial en el desarrollo de CPS [1]. Además, existe el desafío en la reestructuración de puestos de trabajo y la preocupación al hecho de que algunas de las ocupaciones menos

exigentes desaparecerán. Aunque, los aumentos de productividad logrados por el uso de tecnologías inteligentes pueden ayudar a asegurar empleos, también puede destruir puestos de trabajo (efectos de redundancia). Existe la preocupación de que los efectos de redundancia de la Industria 4.0 predominen a largo plazo, lo que llevaría a lo que se conoce como desempleo tecnológico [55].

5. Conclusiones

El aumento de la productividad ha sido la esencia de cada revolución industrial. La Industria 4.0, también conocida como cuarta revolución industrial, industria integrada, entre otros nombres, encapsula tendencias de desarrollo de las fábricas del futuro, para desarrollar productos, procesos y sistemas de producción con la capacidad de alcanzar la operación de la fábrica inteligente. La Industria 4.0 se encuentra dirigiendo cambios profundos en muchas industrias, como la farmacéutica, química, alimenticia, textil, energética, de la salud, entre otras, incluyendo la manufactura y toda su cadena de valor. En la manufactura, la Industria 4.0 proporciona oportunidades en el diseño, desarrollo y ciclo de vida de nuevos productos, en el desarrollo de nuevos sistemas de producción, en el diseño de arquitecturas de referencia, en el desarrollo de nuevos modelos de negocios impactando el ámbito laboral, social y económico. La Industria 4.0 es una filosofía que enfatiza las oportunidades de integrar de forma colaborativa todos los elementos en un sistema que agrega valor, siguiendo como objetivos el aumento de la eficiencia y productividad, la personalización de productos y servicios, a la vez que equilibra la vida laboral del trabajador.

Al mismo tiempo, la MI es uno de los términos más ampliamente utilizados para describir la producción del mañana, donde los recursos típicos se convierten en objetos inteligentes con la capacidad de percibir señales de su entorno, actuar y tener comportamiento dentro de su ambiente. Cabe resaltar que la mayoría de las investigaciones están enfocadas en el término Industria 4.0 y las tecnologías que utiliza, pero dejan de lado los principios y elementos fundamentales necesarios para las fases de diseño y desarrollo del nuevo sistema de manufactura inteligente. Por esto, esta investigación realizó un análisis profundo de la manufactura inteligente e Industria 4.0, para posteriormente obtener (a partir de las definiciones básicas de sistemas de manufactura, Industria 4.0 y manufactura inteligente), categorizar (de acuerdo con los diferentes tipos y niveles jerárquicos de CPS) y conceptualizar (según sus correspondientes principios de diseño), los elementos fundamentales del sistema de manufactura inteligente. Los elementos obtenidos son: el operador aumentado, los materiales inteligentes, la infraestructura basada en datos, objetos ciberfísicos, los productos inteligentes, los procesos inteligentes, los sistemas de producción ciberfísicos y la fábrica inteligente. Estos elementos conceptualizados en base a los principios de diseño correctos serán la base del diseño y desarrollo del sistema de manufactura inteligente en la era de Industria 4.0. Este sistema permitirá cambios a nivel individual en clientes (con acceso a productos más personalizados) o trabajadores (con nuevos roles e incremento en la eficiencia de sus tareas) y cambios en los entornos empresariales, evolucionando las instalaciones de manufactura y la forma en que se diseñarán procesos y productos a través de sistemas de manufactura cada vez más complejos e inteligentes.

Referencias

[1] Acatech. (2011). *Cyber-Physical Systems. Driving force for innovation in mobility, health, energy and production.* Munich, Alemania: acatech – National Academy of Science and Engineering.

[2] Almada-Lobo, F. (2015). The Industry 4.0 revolution and the future of Manufacturing Execution Systems (MES). *Journal of Innovation Management*, 16-21.

[3] Angulo, P., Guzmán, C., Jiménez, G., & Romero, D. (2016). A service-oriented architecture and its ICT infrastructure to support eco-efficiency performance monitoring in manufacturing enterprises. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 202-214. doi:http://dx.doi.org/10.1080/0951192X.2016.1145810.

[4] Babiceanua, R., & Seker, R. (2016). Big Data and virtualization for manufacturing cyber-physical systems: A survey of the current status and future outlook. *Computers in Industry*, 128 - 137. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.compind.2016.02.004.

[5] Bagheri, B., Yang, S., Kao, H.-A., & Lee, J. (2015). Cyber-physical Systems Architecture for Self-Aware Machines in Industry 4.0 Environment. *IFAC-PapersOnLine*, 1622 - 1627. doi:10.1016/j.ifacol.2015.06.318.

[6] Belmán-López, C., & Jiménez-García, J. (2018). Industria 4.0: Revisión de su significado y áreas de impacto. *Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Celaya 2018*, 1-6.

[7] Belman-López, C., Jiménez-García, J., & 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*, 1-15. doi:https://doi.org/10.4995/riai.2020.12579.

[8] Blanchet, M., Rinn, T., Von Thaden, G., & De Thieulloy, G. (2014, Marzo 01). *INDUSTRY 4.0. The new industrial revolution. How Europe will succeed.* Retrieved from Roland Berg. Strategy Consult: http://www.iberglobal.com/files/Roland_Berger_Industry.pdf.

[9] Brettel, M., Friederichsen, N., Keller, M., & Rosenberg, M. (2014). How Virtualization, Decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape: An Industry 4.0 Perspective. *International Journal of Information and Communication Engineering*, 1-8.

[10] Caggiano, A. (2018). Cloud-based manufacturing process monitoring for smart diagnosis services. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 31*(7), 612-623. doi:https://doi.org/10.1080/0951192X.2018.1425552.

[11] Charro, A., & Schaefer, D. (2018). Cloud Manufacturing as a new type of Product-Service System. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 1018-1033.

[12] Chen, T., & Chiu, M.-C. (2016). Development of a cloud-based factory simulation system for enabling ubiquitous factory simulation. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 1-11. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2015.12.010.

[13] Chen, T., & Tsai, H.-R. (2016). Ubiquitous manufacturing: Current practices, challenges, and opportunities. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 1-7. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2016.01.001.

[14] Chen, Y. (2017). Integrated and Intelligent Manufacturing: Perspectives and Enablers. *Engineering*, 588–595. doi:http://dx.doi.org/10.1016/J.ENG.2017.04.009.

[15] Cobo, M., Jürgens, B., Herrero-Solana, V., Herrera-Viedma, E., & Martínez, M. (2018). Industry 4.0: a perspective based on

bibliometric analysis. *Procedia Computer Science*, 364–371. doi:https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.10.278.

[16] Crawford, M., & ASME.org. (2018, Julio 01). *How Industry 4.0 Impacts Engineering Design*. Retrieved from ASME: https://www.asme.org/engineering-topics/articles/manufacturing-design/industry-40-impacts-engineering-design.

[17] Creswell, J. (2009). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (3rd ed. ed.). Thousand Oaks, CA: Sage Publications, Inc.

[18] Dilberoglua, U., Gharehpapagh, B., Yaman, U., & Dolen, M. (2017). The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 545 – 554.

[19] Fatorachian, H., & Kazemi, H. (2018). A critical investigation of Industry 4.0 in manufacturing: theoretical operationalisation framework. *Production Planning & Control*, 633-644. doi:https://doi.org/10.1080/09537287.2018.1424960.

[20] Francalanza, E., Borg, J., & Constantinescu, C. (2018). Approaches for handling wicked manufacturing system design problems. *Procedia CIRP, 67*, 134-139. doi:https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.189.

[21] Gorton, I., & Klein, J. (2015). Distribution, Data, Deployment, Software Architecture Convergence in Big Data Systems. *IEEE COMPUTER SOCIETY*, 78-85.

[22] Götz, M., & Jankowska, B. (2017). Clusters and Industry 4.0 – do they fit together? *European Planning Studies*, 1633-1653. doi:10.1080/09654313.2017.1327037.

[23] Gregor, S. (2002). A Theory of Theories in Information Systems. *Information Systems Foundations. Building the Theoretical*, 1 - 20.

[24] Gregor, S. (2009). Building Theory in the Sciences of the Artificial. *Proceedings of the 4th International Conference on Design Science Research in Information Systems and Technology* (pp. 1- 10). Philadelphia, Pennsylvania, USA: ACM Digital Library. doi:10.1145/1555619.1555625.

[25] Groover, M. (2001). *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing.* USA: Prentice Hall.

[26] Henzel, R., & Herzwurm, G. (2018). Cloud Manufacturing: A state-of-the-art survey of current issues. *CIRP*, 947–952.

[27] Hermann, M., Otto, B., & Pentek, T. (2015). Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review. *ResearchGate*, 1-16. doi:10.13140/RG.2.2.29269.22248.

[28] Jazdi, N. (2014, Jolio 17). Cyber Physical Systems in the Context of Industry 4.0. *IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics.* (pp. 1-3). Cluj-Napoca, Romania: IEEE. doi:10.1109/AQTR.2014.6857843.

[29] Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group. *National Academy of Science and Engineering (acatech).*, 1-82.

[30] Kamble, S., Gunasekaran, A., & Gawankar, S. (2018). Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. *Process Safety and Environmental Protection*, 408–425. doi:https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.05.009.

[31] Khoo, Z., Teoh, J., Liu, Y., Chua, C., Yang, S., An, J., Yeong, W. (2015). 3D printing of smart materials: A review on recent progresses in 4D printing. *Virtual and Physical Prototyping*, 103-122. doi:https://doi.org/10.1080/17452759.2015.1097054.

[32] Kipper, L., Furstenau, L., Hoppe, D., Frozza, R., & Iespen, S. (2019). Scopus scientific mapping production in industry 4.0 (2011–2018): a bibliometric analysis. *International Journal of Production Research*, 1-24. doi:https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1671625.

[33] Klingenberg, C. (2017). Industry 4.0: what makes it a revolution? *EurOMA* (pp. 1-11). ResearchGate.

[34] Körner, C. (2016). Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting — a review. *International Materials Reviews*, 361-377. doi:https://doi.org/10.1080/09506608.2016.1176289.

[35] Kusiak, A. (2017). Smart manufacturing. *International Journal of Production Research*, 508-517. doi:https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1351644.

[36] Lee, J., Ardakani, H., Yang, S., & Bagheri, B. (2015). Industrial big data analytics and cyber-physical systems for future maintenance & service innovation. *Procedia CIRP*, 3-7.

[37] Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A. (2014). A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Society of Manufacturing Engineers (SME)*, 18- 23. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001.

[38] Li, B.-h., Hou, B.-c., Yu, W.-t., Lu, X.-b., & Yang, C.-w. (2017). Applications of artificial intelligence in intelligent manufacturing: a review. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 86-96. doi:http://dx.doi.org/10.1631/FITEE.1601885.

[39] Liu, Y., Peng, Y., Wang, B., Yao, S., & Liu, Z. (2017). Review on Cyber-physical Systems. *Journal of Automatica Sinica*, 27-40. doi:10.1109/JAS.2017.7510349.

[40] Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*, 1–10. doi:https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005.

[41] MIT Technology Review. (2018, Octubre 31). *"Digital twin", un gemelo virtual para aconsejar a la Industria 4.0*. Retrieved from MIT Technology Review: https://www.technologyreview.es/s/10696/digital-twin-un-gemelo-virtual-para-aconsejar-la-industria-40.

[42] Moghaddam, F., Ahmadi, M., & Eslami, M. (2015). Cloud Computing Challenges and Opportunities: A Survey. *International Conference on Telematics and Future Generation Networks (TAFGEN)* (pp. 34-38). Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE. doi:10.1109/TAFGEN.2015.7289571.

[43] Muhuri, P., Shukla, A., & Abraham, A. (2019). Industry 4.0: A bibliometric analysis and detailed overview. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 218–235. doi:https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.11.007.

[44] Nassehi, A., Schaefer, D., Wu, D., Xu, X., & Zaeh, M. (2018). Special issue on 'Cyber-physical product creation for Industry 4.0'. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 611-611. doi:10.1080/0951192X.2018.1482106.

[45] Neugebauer, R., Hippmann, S., Leis, M., & Landherr, M. (2016). Industrie 4.0 - From the Perspective of Applied Research. *Procedia CIRP*, *57*, 2-7. doi:https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.002.

[46] NIST. (2018, Abril 16). *Framework for Improving Critical Infrastructure Cybersecurity.* Retrieved from National Institute of Standards and Technology: https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/CSWP/NIST.CSWP.04162018.pdf.

[47] Nunes, M., Pereira, A., & Alves, A. (2017). Smart products development approches for Industry 4.0. *Manufacturing Engineering Society International Conference* (pp. 1215-1222). Vigo, España: Procedia Manufacturing.

[48] Oesterreich, T., & Teuteberg, F. (2016). Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. *Computers in Industry*, 121-139. doi:https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.09.006.

[49] Pereira, A., & Romero, F. (2017). A review of the meaning and the implications of the Industry 4.0 concept. In P. Manufacturing (Ed.), *Manufacturing Engineering Society International Conference* (pp. 1206-1214). Vigo, España: Elsevier.

[50] Plattform Industrie 4.0. (2019). *2030 Vision for Industrie 4.0 –Shaping digital ecosystems globally.* Retrieved from Plattform Industrie 4.0: https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/Positionspapier%20Leitbild%20(EN).pdf?__blob=publicationFile&v=6.

[51] PWC. (2016, 01 01). *Industry 4.0: Building the Digital Enterprise.* Retrieved from PWC: https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/landing-page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf.

[52] Qin, J., Liu, Y., & Grosvenor, R. (2016). A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and Beyond. *Procedia CIRP*, 173-178.

[53] R, S., & R, S. (2017). Data Mining with Big Data. *Intelligent Systems and Control (ISCO)* (pp. 246-250). Coimbatore, India: IEEE. doi:10.1109/ISCO.2017.7855990.

[54] Radziwon, A., Bilberg, A., Bogers, M., & Skov-Madsen, E. (2013). The Smart Factory: Exploring Adaptive and Flexible Manufacturing. In P. Engineering (Ed.), *24th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation* (pp. 1184 – 1190). Viena: Elservier.

[55] Roblek, V., Meško, M., & Krapež, A. (2016). A Complex View of Industry 4.0. *SAGE*, 1-11. doi:10.1177/2158244016653987.

[56] Rojko, A. (2017). Industry 4.0 Concept: Background and Overview. *International Journal of Innovation Management*, 1-14. doi:https://doi.org/10.3991/ijim.v11i5.7072.

[57] Schmidt, R., Möhring, M., Härting, R.-C., Reichstein, C., Neumaier, P., & Jozinović, P. (2015). Industry 4.0 - Potentials for Creating Smart Products: Empirical Research Results. *Business Information Systems*, 16–27. doi:10.1007/978-3-319-19027-3_2.

[58] Schuh, G., Potente, T., Wesch-Potente, C., Weber, A., & Prote, J.-P. (2014). Collaboration Mechanisms to increase Productivity in the Context of Industrie 4.0. *Procedia CIRP*, 51 - 56.

[59] Shafiq, S., Sanin, C., Toro, C., & Szczerbicki, E. (2015). Virtual Engineering Object (VEO): Toward Experience-Based

Design and Manufacturing for Industry 4.0. *Cybernetics and Systems: An International Journal*, 1-17. doi:10.1080/01969722.2015.1007734.

[60] Shelden, D. (2018). Cyber-Physical Systems and the Built Environment. *Technology|Architecture + Design*, 137-139. doi:10.1080/24751448.2018.1497358.

[61] Tao, F., Qi, Q., Liu, A., & Kusiak, A. (2018). Data-driven smart manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 1-13. doi:https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.01.006.

[62] Tian, W., & Zhao, Y. (2015). *Optimized Cloud Resource Management and Scheduling*. Morgan Kaufmann. doi:https://doi.org/10.1016/C2013-0-13415-0.

[63] Tjahjono, B., Esplugues, C., Ares, E., & Pelaez, G. (2017). What does Industry 4.0 mean to Supply Chain ? *Manufacturing Engineering Society International Conference* (pp. 1175 - 1182). España: Procedia Manufacturing.

[64] Tuptuk, N., & Hailes, S. (2018). Security of smart manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 93-106. doi:https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.04.007.

[65] United States Environmental Protection Agency. (2017, Junio). *Sustainable Manufacturing*. Retrieved from EPA: https://www.epa.gov/sustainability/sustainable-manufacturing.

[66] Vaidya, S., Ambad, P., & Bhosle, S. (2018). Industry 4.0 – A Glimpse. *Procedia Manufacturing, 20*, 233-238. doi:https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.034.

[67] Wang, J., Ma, Y., Zhang, L., Gao, R. X., & Wu, D. (2018). Deep learning for smart manufacturing: Methods and applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 144–156. doi:https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.01.003.

[68] Wang, L., Törngren, M., & Onori, M. (2015). Current status and advancement of cyber-physical systems inmanufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 517-527. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.04.008.

[69] Wang, X., Ong, S., & Nee, A. (2017). A comprehensive survey of ubiquitous manufacturing research. *International Journal of Production Research*, 604-628. doi:https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1413259.

[70] Weyer, S., Schmitt, M., Ohmer, M., & Gorecky, D. (2015). Towards Industry 4.0 - Standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production systems. *IFAC-PapersOnLine, 48*(3), 579-584. doi:https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.143.

[71] Wiesner, S., & Thoben, K.-D. (2016). Requirements for models, methods and tools supporting servitisation of products in manufacturing service ecosystems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 1-12. doi:http://dx.doi.org/10.1080/0951192X.2015.1130243.

[72] Wuest, T., Weimer, D., Irgens, C., & Thoben, K.-D. (2016). Machine learning in manufacturing: advantages, challenges, and applications. *Production & Manufacturing Research*, 23-45. doi:10.1080/21693277.2016.1192517.

[73] Xu, L. D., & Duan, L. (2018). Big data for cyber physical systems in industry 4.0: a survey. *Enterprise Information Systems*, 1-23. doi:10.1080/17517575.2018.1442934.

[74] Xu, L., Xu, E., & Li, L. (2018). Industry 4.0: state of the art and future trends. *International Journal of Production Research*, *56*, 2941–2962. doi:https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806.

[75] Yang, H., Kumara, S., Bukkapatnam, S., & Tsung, F. (2019). The Internet of Things for Smart Manufacturing: A Review. *IISE Transactions*, 1-36. doi:10.1080/24725854.2018.1555383.

[76] Zhong, R., Xu, X., Klotz, E., & Newman, S. (2017). Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. *Engineering*, 616–630. doi:http://dx.doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.015.

[77] Zhou, K., Liu, T., & Zhou, L. (2016). Industry 4.0: Towards Future Industrial Opportunities and Challenges. *International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery* (pp. 2147–2152). Zhangjiajie, China: IEEE.