

## Análisis exhaustivo de los principios de diseño en el contexto de Industria 4.0

Belman-Lopez, C.E.<sup>a,\*</sup>, Jiménez-García, J.A.<sup>b</sup>, Hernández-González, S.<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, Tecnológico Nacional de México en Celaya.

<sup>b</sup> Departamento de Ingeniería Industrial, Tecnológico Nacional de México en Celaya.

**To cite this article:** Belman-Lopez, C.E., Jiménez-García, J.A., Hernández-González, S. 2020. Comprehensive analysis of design principles in the context of Industry 4.0. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 17, 432-447. <https://doi.org/10.4995/riai.2020.12579>

### Resumen

Los sistemas de producción han evolucionado los últimos años gracias a avances tecnológicos recientes e innovaciones en el proceso de manufactura. El término Industria 4.0 se ha convertido en prioridad y objeto de estudio para empresas, centros de investigación y universidades, sin existir un consenso generalmente aceptado del término. Como resultado es difícil diseñar e implementar soluciones de Industria 4.0 a nivel académico, científico o empresarial. La contribución de este documento se centra en proporcionar un análisis del significado e implicaciones de Industria 4.0 y exponer de forma detallada 17 principios de diseño fundamentales obtenidos a través de un estudio de mapeo sistemático. Estos principios son eficiencia, integración, flexibilidad, descentralización, personalización, virtualización, seguridad, es holística, orientada a servicios, ubicua, colaborativa, modular, robusta, utiliza información en tiempo real, toma decisiones optimizadas por datos, equilibra la vida laboral y es autónoma e inteligente. A través de estos principios, ingenieros e investigadores están capacitados para investigar e implementar escenarios apropiados de Industria 4.0

*Palabras clave:* Industria 4.0, sistemas de fabricación flexible e inteligente, cuarta revolución industrial, modelado y control de sistemas de fabricación, automatización.

### Comprehensive analysis of design principles in the context of Industry 4.0

#### Abstract

Production systems have evolved in the last years thanks to the recent technological advances and innovations in the manufacturing process. The Industry 4.0 term has become a priority and object of study for companies, research centers and universities, but there is not a generally accepted consensus for the term. As a result, is difficult design and implementation appropriate Industry 4.0 solutions at academic, scientific or business level. The contribution of this paper focuses on providing an analysis of Industry 4.0 meaning and implications and exposes in detail 17 fundamental design principles obtained by a systematic mapping study method. These principles are efficiency, integration, flexibility, decentralization, personalization, virtualization, security, is holistic, ubiquitous, collaborative, modular, robust, use information in real time, makes optimized decisions driven by data, is service-oriented, work life balance and is autonomous and intelligent. With these design principles, engineers and researchers have the capacity to research and implement appropriate Industry 4.0 scenarios.

*Keywords:* Industry 4.0, flexible and intelligent manufacturing systems, fourth industrial revolution, modeling and control of manufacturing systems, automation.

### 1. Introducción

El sector industrial es considerado un motor de la innovación, crecimiento y estabilidad social, sin embargo, la competencia es cada vez más intensa. Los clientes demandan productos de alta calidad, personalizados y con un tiempo de producción

menor. Así que, sólo aquellas empresas que logren conseguir productos personalizados y reduzcan el tiempo de producción, mediante la máxima eficiencia en sus plantas, serán capaces de seguir siendo competitivas (Siemens, 2018). De igual manera, la industria de manufactura se enfrenta a grandes desafíos hoy en día, tales como, la globalización, competencia cada vez más

\*Autor para correspondencia: carlosbelman@gmail.com

Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0)

intensa, volatilidad en la demanda, la necesidad de reducir los ciclos de vida durante la innovación y creación de nuevos productos (Francalanza et al., 2018), aumento en la complejidad de productos y procesos (Pereira & Romero, 2017), altos consumos de energía (Angulo et al., 2016), complejidad en el área de diseño de productos (Nunes et al., 2017), mayor agilidad de respuesta al mercado, el cambio de enfoque de la producción en masa a la personalización en masa (Brettel et al., 2014), así como el cambio de la manufactura orientada a la producción a la manufactura orientada a servicios (Henzel & Herzwurm, 2018). Es por tales desafíos, que el diseño de sistemas y procesos de manufactura es considerado un problema altamente complejo (Francalanza et al., 2018), y la industria moderna requiere que la próxima generación de sistemas de manufactura sea inteligente, flexible e interoperable, capaces de ofrecer un mejor rendimiento a un menor costo (Wang et al., 2017).

El futuro de la producción según lo previsto por el nuevo paradigma de manufactura conocido como Industria 4.0, se basa en la integración profunda (Kagermann et al., 2013), donde cada elemento de manufactura intercambia información de manera autónoma, dispara acciones y se controla a sí mismo de forma independiente (Kagermann et al., 2013; Weyer et al., 2015; Pereira & Romero, 2017).

Este nuevo enfoque de manufactura pretende crear procesos y productos inteligentes (Schmidt et al., 2015), además de sistemas (Francalanza et al., 2018) caracterizados por pequeñas redes de producción descentralizadas y digitalizadas (Almada-Lobo, 2015), que actúan sin o con la mínima intervención humana, controlando de forma autónoma sus operaciones en función de los cambios en el ambiente y en los requerimientos (Pereira & Romero, 2017). Los procesos de manufactura en Industria 4.0 deben, asimismo, proporcionar acceso a los datos en tiempo real, lo que es permitido por la integración y conectividad de la información desde diferentes fuentes y localizaciones. Esto permite llevar a cabo negocios en un ciclo continuo y aumenta la visibilidad desde cualquier punto del sistema de manufactura (Deloitte, 2018).

Adicionalmente, las empresas buscan lograr una visión holística de las operaciones, lo que solo puede suceder integrando datos de varias fuentes diferentes. Mientras que, los análisis avanzados permiten comprender el rendimiento de los procesos de manufactura, la calidad de los productos y optimizar la cadena de suministro, también ayudan a identificar ineficiencias basadas en datos históricos permitiendo que se realicen acciones correctivas o preventivas (Almada-Lobo, 2015). Por otra parte, la Inteligencia Artificial (IA) permite a los futuros sistemas de manufactura inteligente tener la capacidad de aprendizaje, razonamiento y acción. La IA permite que los sistemas de manufactura aprendan de las experiencias para finalmente realizar una práctica industrial conectada, inteligente y ubicua (Zhong et al., 2017).

Pero los productos y los sistemas de manufactura son cada vez más complejos, esto como resultado de un incremento en la funcionalidad, la necesidad de una mayor personalización de los productos, requisitos de entrega cada vez más dinámicos, la creciente integración de diferentes organizaciones y disciplinas tecnológicas, así como las rápidamente cambiantes formas de cooperación entre las diferentes compañías (Kagermann et al., 2013).

La Industria 4.0 promete dirigir cambios profundos en los sectores industriales y de manufactura, teniendo fuertes impactos a lo largo de toda la cadena de valor, por lo cual la Industria 4.0 se ha convertido en una prioridad para muchas empresas, centros de investigación y universidades, pero las múltiples contribuciones académicas e industriales han hecho que el significado del término sea haya vuelto más borroso que concreto (Hermann et al., 2015). Kagermann et al., 2013, en su reporte final ya han descrito la visión inicial, las tecnologías básicas y describieron algunos escenarios puntuales, pero sin especificar principios de diseño claros. Como resultado, existen muy pocos trabajos en la literatura que realicen un análisis y expongan de manera explícita y detallada los principios de diseño fundamentales en el contexto de Industria 4.0. Esto obstaculiza la investigación científica por falta de definiciones y fundamentos claros, dado que cualquier estudio teórico requiere una base conceptual y terminológica sólida para poder llevarse a cabo. Por lo cual, las empresas enfrentan dificultades intentando desarrollar ideas sin estar seguras de los fundamentos básicos. Es claro que, empresas y organizaciones serían beneficiadas al poder identificar y entonces implementar los principios de diseño fundamentales de Industria 4.0 (Hermann et al., 2015). Estos principios abordan explícitamente este problema, proporcionando una "sistematización del conocimiento" (Gregor, 2009), describen los componentes y apoyan a los profesionales en el desarrollo de soluciones apropiadas. Además, desde una perspectiva académica, los principios de diseño son la base de la teoría del diseño (Gregor, 2002), y proporcionan un soporte para enfrentar los desafíos actuales de la manufactura inteligente, que como ya señaló Zhong et al. (2017), se encuentran en el desarrollo de nuevos sistemas para la manufactura inteligente, en la creación de modelos de manufactura basados en datos, en integrar la colaboración hombre-máquina y desarrollar casos de aplicación de la manufactura inteligente. Mediante Industria 4.0 y sus principios de diseño, los ingenieros de manufactura pueden rediseñar las fábricas, los procesos y las operaciones para que se adapten a los avances tecnológicos emergentes, y a la forma en que se tendrán que fabricar los productos dentro de instalaciones de manufactura cada vez más inteligentes, además, las empresas pueden lograr adaptar más rápido sus líneas de producción para explotar las tendencias de los consumidores y aumentar su productividad teniendo más probabilidades de sobrevivir y conservar la confianza del cliente (Crawford & ASME.org, 2018).

Por estos motivos, la contribución de este documento se centra en cerrar esta brecha de investigación y proporcionar un análisis del significado de Industria 4.0 exponiendo de forma detallada 17 principios de diseño fundamentales y claros para las empresas en el contexto de Industria 4.0 obtenidos a través de un estudio de mapeo sistemático. Estos principios son: la eficiencia y productividad, la integración, la flexibilidad y adaptabilidad, la descentralización, la personalización, la virtualización, la seguridad y protección, debe ser holística, ubicua, colaborativa, modular, operacionalmente robusta y confiable, maneja información en tiempo real, toma decisiones optimizadas e impulsadas por datos, es orientada a servicios, equilibra la vida laboral y personal del trabajador motivando su desarrollo profesional continuo y finalmente es autónoma e inteligente. Teniendo en cuenta estos principios de diseño, los

ingenieros e investigadores están capacitados para investigar e implementar los escenarios apropiados de Industria 4.0.

El resto de este documento está organizado de la siguiente manera: la Sección 2 muestra las antecedentes de Industria 4.0. La Sección 3 muestra trabajos relacionados a la presente investigación. La Sección 4 proporciona un análisis del significado de Industria 4.0 y sus implicaciones. La sección 5 expone el método de investigación utilizado para encontrar los principios de diseño. La Sección 6 expone de forma detallada los principios de diseño encontrados para Industria 4.0. La Sección 7 presenta las conclusiones de esta investigación.

## 2. Antecedentes

El término Industria 4.0 es un concepto que surgió en los últimos años debido a los avances tecnológicos y desarrollos disruptivos en el sector industrial (Zhou et al., 2016). El término se hizo público, cuando una iniciativa llamada "Industrie 4.0", una asociación de representantes de negocios, políticos y académicos encabezados por Kagermann, Lukas y Wahlster en 2011 promovieron la idea como un enfoque para fortalecer la competitividad de la industria de manufactura alemana (Hermann et al., 2015). El gobierno federal alemán apoyó la idea al anunciar que Industrie 4.0 sería una parte integral de su iniciativa "Estrategia de Alta Tecnología 2020 para Alemania", con el objetivo de liderar la innovación tecnológica (Hermann et al., 2015; Zhou et al., 2016).

De acuerdo con los impulsores de este movimiento, la primera revolución industrial surge a finales del siglo XVIII como consecuencia de la introducción en la industria de equipos mecánicos movidos por motores de vapor. La segunda revolución industrial inició a comienzos del siglo XX, apoyada en la electricidad, caracterizada por la producción en masa de bienes y basada en una acrecentada división del trabajo. La tercera revolución empezó a comienzos de los años 70 y llega hasta nuestros días, emplea la electrónica y las tecnologías de la información para conseguir incrementar la automatización de los procesos de manufactura (Hernández A. et al., 2018).

En la tercera revolución industrial, el avance de las tecnologías de la información y la comunicación (ICT por sus siglas en inglés) fue el núcleo que cambió el paradigma de manufactura. Por ejemplo, la adopción generalizada de control numérico por computadora (CNC) y la utilización de robots industriales hizo posible los sistemas de fabricación flexible (FMS). Las tecnologías para el diseño asistido por computadora (CAD), la manufactura asistida por computadora (CAM) y la planificación del procesamiento asistido por computadora (CAPP) hicieron posible la manufactura integrada por computadora (CIM) (Xu et al., 2018).

Cabe señalar que el incremento de la productividad ha sido la esencia de cada revolución industrial, permitiendo el aumento de la eficiencia y productividad a través del uso de desarrollos tecnológicos disruptivos (Pereira & Romero, 2017).

Además, a diferencia de la tercera revolución industrial que se centró más en la automatización de máquinas y procesos, la Industria 4.0 se enfoca más en la digitalización e integración de extremo a extremo (end-to-end) de los ecosistemas industriales digitales mediante la búsqueda de soluciones completamente integradas (Xu et al., 2018).

Hoy estamos en la cúspide de la Cuarta Revolución Industrial, en la que los mundos de la producción y la conectividad de red se integran a través del IoT y sistemas ciber físicos (CPS), para hacer que la Industria 4.0 sea una realidad (Xu et al., 2018). El IoT se refiere a la integración de las ICT en el entorno industrial (Schuh et al., 2014). En general, el IoT es capaz de ofrecer una conectividad avanzada entre objetos físicos, sistemas y servicios, lo que permite la comunicación entre objetos y el intercambio de datos (Zhong et al., 2017). El IoT se puede definir como una red en la que los CPS cooperan entre sí mediante esquemas de direccionamiento únicos (Hermann et al., 2015).

Al mismo tiempo, muchos otros países industriales son conscientes de esta nueva era de la manufactura. En China, se publicó un plan de desarrollo industrial en 2015, denominado "Hecho en China 2025" (Qin et al., 2016; Zhong et al., 2017; Xu et al., 2018). En Estados Unidos, General Electric promueve una idea similar bajo el nombre de Internet Industrial, definido como la integración de complejos mecanismos y dispositivos físicos con sensores y software en red, utilizados para predecir, controlar y planificar mejores resultados empresariales (Hermann et al., 2015; Zhong et al., 2017).

Los desarrollos y avances tecnológicos en la Industria 4.0 proporcionarán una gama viable de soluciones a las crecientes necesidades de la industria de manufactura. Esta viabilidad se ha demostrado por el hecho de que un número creciente de empresas en todo el mundo han explorado los beneficios de la digitalización e integración de las cadenas horizontales y verticales de las empresas a través de Industria 4.0, con el fin de convertirse en empresas (digitales) líderes en los complejos ecosistemas industriales del mañana (PWC, 2016).

## 3. Trabajos relacionados

Muhuri et al. (2019) realizaron un análisis bibliométrico sobre la evolución de la Industria 4.0 y obtuvieron métricas de publicaciones por país y principales áreas cubiertas, destacando Ingeniería, Ciencias de la Computación, Telecomunicaciones, Investigación de Operaciones, entre otras. Kipper et al. (2019) realizaron un estudio bibliométrico sobre la evolución de la Industria 4.0. El mapeo científico presentó 31 grupos en los que los temas más representativos fueron los Sistema Ciberfísicos (CPS), el Internet de las Cosas (IoT) y el Big Data, resaltaron los esfuerzos de la comunidad científica por la unión entre la manufactura esbelta y la Industria 4.0, el desarrollo de Sistemas de Producción Ciberfísicos (CPPS) y el Internet Industrial. Kamble et al. (2018) realizaron una revisión de literatura sobre Industria 4.0 en 6 etapas, categorizando 5 áreas principales: el concepto Industria 4.0, la interacción hombre-máquina, la interacción máquina-equipos, las tecnologías clave y la sostenibilidad, además obtuvieron 8 principios de diseño: la interoperabilidad, virtualización, respuesta en tiempo real, descentralización, modularidad y orientación a servicios. Cobo et al. (2018) realizaron un análisis conceptual de artículos sobre Industria 4.0 y obtuvieron un diagrama estratégico fundamentado en 7 áreas: CPS, Computación en la Nube, Redes Inteligentes, Innovación, ADN de decisión, redes de sensores inalámbricos y cadena de suministro. Xu et al. (2018) presentaron un estado

actual de Industria 4.0 y listaron como principales pilares tecnológicos a los CPS, el IoT, la Computación en la Nube y la integración industrial y empresarial, además, definieron como retos actuales, la estandarización, la escalabilidad y las nuevas técnicas de análisis de datos. Fatorachian & Kazemi (2018) realizaron una investigación deductiva sobre reportes industriales de Industria 4.0 y manufactura inteligente, proponiendo un marco de trabajo basado en teoría de sistemas para la operacionalización de la Industria 4.0. Kusiak (2017) analizó el origen, estado actual y desarrollos futuros de la manufactura inteligente. Kusiak considera la esencia de la manufactura inteligente basada en 6 pilares: los procesos y tecnología de manufactura, materiales, datos, ingeniería predictiva, sostenibilidad y las redes y recursos compartidos. Lu (2017) realizó una revisión de literatura sobre Industria 4.0, presentando una descripción general y dos conceptos clave: integración e interoperabilidad, en base a estos dos conceptos obtuvo 8 principios que son: accesibilidad, multilingüismo, seguridad, privacidad, subsidiariedad, uso de estándares abiertos, software de código abierto y soluciones multilaterales. Wang et al. (2017) mostraron un amplio estado del arte respecto a la implementación de los sistemas de manufactura con una visión holística de la tecnología, 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. Zhong et al. (2017) proporcionaron una revisión de los nuevos paradigmas de manufactura, como son: la manufactura inteligente, la manufactura basada en IoT y la manufactura en la nube, resaltando similitudes y diferencias y listando como tecnologías básicas el IoT, CPS, Computación en la Nube, Big Data y Tecnologías de la Información y Comunicación (ICT). Chen Y. (2017) realizó un estudio de las tendencias en el área de manufactura categorizando dos, la manufactura integrada y la manufactura inteligente y destacando 10 tecnologías principales: Impresión 3D, Big Data, Computación en la Nube, CPS, realidad virtual, entre otras. Oesterreich & Teuteberg (2016) realizaron una revisión sistemática de la literatura y propusieron un marco de trabajo para Industria 4.0

Como es posible observar, existen muy pocos trabajos en la literatura que realicen un análisis explícito, completo y detallado sobre los principios de diseño para Industria 4.0, dado que la mayoría de las investigaciones están principalmente enfocadas en conceptualizar el término Industria 4.0 y destacar las tecnológicas que le dan soporte, pero dejan de lado los principios que brindan una base conceptual sólida para las fases de diseño e implementación y desarrollo. Solo Kamble et al. (2018) y Lu (2017) presentaron unos pocos principios de diseño obtenidos de forma secundaria, pero omitiendo principios muy importantes cubiertos en esta investigación, y que son necesarios para la correcta y completa implementación de la Industria 4.0.

#### 4. Industria 4.0

Aunque Industria 4.0 o cuarta revolución industrial es actualmente una de las principales prioridades para muchas empresas, centros de investigación y universidades, no existe una definición específica, clara o generalmente aceptada del

término (Hermann et al., 2015), sino una amplia gama de tecnologías interdisciplinarias, con diferentes niveles de madurez y disponibilidad en el mercado, que facilitan la digitalización, automatización e integración de los procesos a lo largo de las cadenas de valor (Götz & Jankowska, 2017). La Industria 4.0 aún se encuentra en estado conceptual y dentro de las primeras etapas de implementación tanto en la industria, como en el entorno humano y la investigación científica. Los gobiernos, empresas, universidades y centros de investigación están intentando desarrollar fábricas "inteligentes" y automatizadas conectadas a través del Internet (Roblek et al., 2016).

El concepto de Industria 4.0 está basado en la integración de las ICT (Xu et al., 2018; Zhou et al., 2016) con tecnología industrial, siendo principalmente dependiente en la construcción de CPS (Jazdi, 2014), para llevar a cabo una fábrica digital e inteligente, dirigida por la información, personalizable y al cuidado del ambiente (Zhou et al., 2016).

La Industria 4.0, también conocida como manufactura inteligente, producción inteligente, fábricas inteligentes (Kagermann et al., 2013), manufactura cognitiva (Xu et al., 2018), industria integrada (Götz & Jankowska, 2017), entre otros nombres que se pueden encontrar en la literatura, encapsula tendencias de desarrollo de las fábricas del futuro (FoF), para lograr *procesos* inteligentes de manufactura, mediante la construcción de sistemas de producción ciber físicos (CPPS) e implementación y operación de fábricas inteligentes (Zhou et al., 2016). La Industria 4.0 toma como fundamento las oportunidades que brinda la disponibilidad, digitalizando e integrando la información relevante desde cualquier lugar y en cualquier momento (Neugebauer et al., 2016). La Industria 4.0 considera que la cadena de valor debe ser inteligente, ágil y en red mediante la integración de objetos físicos, factores humanos, máquinas inteligentes, sensores inteligentes, procesos de producción y líneas de producción a lo largo de los límites de la organización (Vaidya et al., 2018).

La Industria 4.0 consiste en una integración generalizada, donde cada elemento de fabricación intercambia información de manera autónoma, desencadena acciones y se controla a sí mismo de manera independiente (Pereira & Romero, 2017). Además, es un complejo sistema tecnológico formado fundamentalmente por la conectividad, la integración y la digitalización de la producción, enfatizando las oportunidades de integrar todos los elementos (personas, objetos y sistemas) en un sistema con valor agregado, dinámico, autoorganizado, autónomo y de funcionamiento en tiempo real (Neugebauer et al., 2016).

Para Charro & Schaefer (2018), el término Industria 4.0 se refiere a sistemas de manufactura avanzados e integrados mediante los cuales los equipos de manufactura pueden comunicarse en tiempo real entre sí (o con personas) para analizar datos, predecir fallas y reconfigurarse para optimizar la cadena de valor de una red de manufactura.

La necesidad en Industria 4.0 es convertir las máquinas tradicionales en máquinas autoconscientes y de autoaprendizaje para mejorar su rendimiento general, la gestión de su mantenimiento y la interacción que lo rodea (Lee et al., 2014). La supervisión de datos en tiempo real, el seguimiento del estado y las posiciones del producto, así como

el control de los procesos de producción son necesidades básicas en la Industria 4.0 (Almada-Lobo, 2015).

La Industria 4.0 aplica la ciencia de datos y los modelos analíticos para analizar datos en tiempo real de múltiples máquinas, procesos y sistemas para luego automatizar la manufactura como corresponde. Además, basada principalmente en IoT, CPS e ICT, es capaz de desarrollar una nueva generación de sistemas de manufactura que integran y sincronizan datos en tiempo real entre los objetos físicos y el espacio computacional cibernético (Xu et al., 2018).

La Industria 4.0 permite, a través de la creación de redes y sistemas inteligentes, una mayor conectividad, robustez, y más altos estándares de calidad en manufactura e ingeniería. Por ejemplo, la Industria 4.0 tiene el potencial para lograr que los procesos de negocios sean capaces de autoorganizarse y auto optimizarse, basándose en criterios como el costo, la disponibilidad de recursos y los requisitos de demanda (Fatorachian & Kazemi, 2018).

La Industria 4.0 tiene la capacidad para lograr el establecimiento de productos y fábricas inteligentes. Las fábricas inteligentes pueden lidiar fácilmente con la necesidad de un desarrollo rápido de productos y una producción flexible. De igual forma, logran crear productos inteligentes a través de procesos de manufactura inteligentes. Estos productos tienen la habilidad de comunicarse entre sí y con su entorno, lo que les permite apoyar a los procesos de manufactura dado que contienen el conocimiento acerca del proceso, además de información de las aplicaciones del cliente (Fatorachian & Kazemi, 2018).

## 5. Método de investigación

El enfoque metodológico empleado en la presente investigación utilizó un estudio de mapeo sistemático para encontrar los patrones de diseño de Industria 4.0. Asimismo, fue explicativo y observacional debido a que pretendió describir, y a su vez analizar de forma detallada los patrones de diseño encontrados.

El mapeo sistemático es un método definido para construir clasificaciones y conducir análisis a efecto de obtener un mapa visual del conocimiento existente dentro de un tema amplio (Macchi & Solari, 2012). El mapeo sistemático ha sido aplicado exitosamente para identificar y categorizar propuestas de arquitectura de software para Big Data (Russo & Solari, 2017), para identificar y clasificar arquitecturas de software para sistemas robóticos (Ahmad & Babar, 2016), para realizar inspecciones de software (Macchi & Solari, 2012), en la generación de casos de prueba (Quintana & Solari, 2012), y en el control de calidad de sistemas (Piedrahita & Vélez Ángel, 2017). Para realizar el estudio se llevaron a cabo 5 etapas: formular las preguntas de investigación, realizar la búsqueda, definir criterios de inclusión y exclusión para la calidad del estudio, sintetizar las evidencias y finalmente analizar y argumentar los resultados (Khan et al., 2003).

Las preguntas de investigación se definieron de acuerdo con los objetivos principales del estudio que son “identificar los principios de diseño fundamentales para Industria 4.0”. Para la realización de la búsqueda se consideraron artículos científicos en las bibliotecas digitales de Science Direct (SD), Taylor & Francis (TF) y ResearchGate (RG).

Para la selección de los estudios se definen como criterios de inclusión trabajos con las palabras Industria 4.0, Industrie 4.0, cuarta revolución industrial, manufactura inteligente, fabrica inteligente, manufactura cognitiva, fabricas del futuro, manufactura en la nube, internet industrial, manufactura ubicua dentro del título de los artículos entre 2013 y 2019, donde se obtuvieron SD (479), TF (202) y RG (188).

Tabla 1: Relación entre artículos seleccionados y los principios de diseño

Ghobakhloo (2019): 1,2,3,4,6,8,9,10,12,13,14,15,17	Luque et al. (2017): 1,2,3,4,5,6,8,10,11,12,13,14,17
Kipper et al. (2019): 2,4,6,7,12,13,14,10,17	Pereira & Romero (2017): 1,2,3,5,8,9,10,12,13,14,15,16,17
Muhuri et al. (2019): 2,4,13	Pereira et al. (2017): 14
Rosin et al. (2019): 1,2,3,4,12,13,17	Rojko (2017): 1,2,3,4,5,8,9
Alexopoulos et al. (2018): 2,13,15,17	Tjahjono et al. (2017): 1,2,3,5,7,8,13,15,17
Bibby & Dehe (2018): 1,2,3,4,8,9,11,12,14,15,17	Tortorella & Fettermann (2017): 1,2,3,8,9,10,11,12,15,17
Caggiano (2018): 2,4,11,13,15	Wang et al. (2017): 1,2,3,4,6,7,8,10,11,12,13,15,17
Charro & Schaefer (2018): 2,4,15	Wu et al. (2017): 1,2,12,17
Ciffolilli & Muscio (2018): 1,2,8,12,14,17	Zhong et al. (2017): 2,4,5,7,8,12,13,15,17
Cobo et al. (2018): 1,14,17	Ferreira et al. (2016): 2,8
Fatorachian & Kazemi (2018): 1,2,3,4,6,7,8,10,11,12,13,14,17	Neugebauer et al. (2016): 2,3,4,12,13,14
Fettermann et al. (2018): 1,2,3,5,6,7,12	Oesterreich & Teuteberg (2016): 1,2,6,8,9,10,12,13,14,15
Kamble et al. (2018): 1,2,3,5,8,9,10,12,13,15,17	Qin et al. (2016): 1,2,3,4,5,9,12,13,15,17
Moktadir et al. (2018): 13	Roblek et al. (2016): 2,8,16,17
Nassehi et al. (2018): 2,3,11,13,14,17	Schumacher et al. (2016): 1,2,3,17
Román-Ibáñez et al. (2018): 2,3,4,9,13,14	Shariatzadeh et al. (2016): 2,3,4,6,8,10,12,13,14
Rossit et al. (2018): 2,4,8,9,10,11,12,13,15,17	Shin et al. (2018): 1,13,15
Sony (2018): 1,2,3,4,8,10,15	Theorin et al. (2016): 1,2,3,4,8,12,13,15,17
Telukdarie et al. (2018): 2,12,13,17	Zhou et al. (2016): 1,2,3,4,5,7,8,10,12,13,14,15,17
Vaidya et al. (2018): 1,2,3,4,8,9,10,11,12,13,14,17	Almada-Lobo (2015): 1,2,4,5,6,9,10,12,13,15,17
Wang & Ha-Brookshire (2018): 1,2,10,13,17	Bagheri et al. (2015): 1,2,8,10,11,13,17
Xu & Duan (2018): 2,14	Hermann et al. (2015): 2,4,9,10,12,15,17
Xu et al. (2018): 2	Nodehi et al. (2015): 2,8,15
Chen Y. (2017): 2,8,15,17	Schmidt et al. (2015): 1,2,4,5,7,12,13,15
Chiu et al. (2017): 1,2,3,5,12,14,15,17	Shafiq et al. (2015): 1,2,3,10,12,13,17
Dilberoglu et al. (2017): 1,2,5,15,17	Škulj et al. (2015): 1,2,3,7,15,17
Götz & Jankowska (2017): 1,2,3,4,5,8,11,14,17	Weyer et al. (2015): 2,3,4,8,9,10,14,15,17
Jardim-Goncalves et al. (2017): 2,10,17	Brettel et al. (2014): 1,2,3,4,5,7,8,9,10,12,14,15,17
Ibarra et al. (2017): 2,3,9,10,12,13,15,17	Jazdi (2014): 14
Klingenberg (2017): 2,3,8,14,15,17	Lee et al. (2014): 1,2,3,8,13,17
Kusiak (2017): 1,2,4,8,12,13,15,17	Radziwon et al. (2014): 1,3,4,5,7,8,9,12,17
Laudante (2017): 1,2,3,8,10,12,13,17	Schuh et al. (2014): 1,2,3,4,6,8,11,17
Lu (2017): 1,2,3,4,5,6,8,9,10,12,13,14,15,17	Kagermann et al. (2013): 1,2,3,8,12,13,14,15,16

Como sería muy complicado revisar todas las publicaciones disponibles, se realizó una síntesis cualitativa de los artículos enfocada en obtener requerimientos, características básicas, principios de diseño, drivers arquitectónicos, habilitadores

(enablers), retos, arquitecturas y marcos de trabajo (frameworks) para Industria 4.0. Una vez aplicados estos criterios de inclusión y síntesis se obtuvo un número de 66 artículos (25 de SD, 30 de TF y 11 de RG) y 17 principios de diseño (enumerados al principio de la siguiente sección y cuya relación con los artículos seleccionados se aprecia en la Tabla 1), en respuesta a nuestra pregunta de investigación, los cuales se describen y analizan detalladamente a continuación.

## 6. Principios de diseño de Industria 4.0

En esta sección, se exponen los 17 principios de diseño fundamentales para las empresas en el contexto de Industria 4.0, obtenidos mediante el mapeo sistemático. Estos son: eficiencia y productividad (1), integración (2), flexibilidad y adaptabilidad (3), arquitectura descentralizada y distribuida (4), personalización (5), holística (6), ubicua (7), colaborativa (8), modular (9), virtualización (10), robusta y confiable (11), maneja información en tiempo real (12), toma decisiones optimizadas por datos (13), seguridad y protección (14), orientación a servicios (15), equilibra la vida laboral (16) y finalmente es autónoma e inteligente (17).

Teniendo en cuenta estos principios, ingenieros e investigadores están capacitados para seguir investigando e implementar los escenarios apropiados de Industria 4.0.

### 6.1. Eficiencia y productividad

El aumento de la productividad ha sido la esencia de cada revolución industrial (Pereira & Romero, 2017). Por lo tanto, los requerimientos de una mayor eficiencia y productividad de los procesos de manufactura tradicionales se heredan en Industria 4.0. Esto es la entrega del mayor rendimiento posible de productos (maximizar la salida) dado un volumen dado de recursos (productividad de recursos) y usar la menor cantidad posible de recursos para lograr una salida deseada (eficiencia de recursos).

El primer énfasis consiste en calcular la productividad de los recursos, mientras que en el segundo escenario el enfoque está en calcular la eficiencia de los recursos (Kagermann et al., 2013).

Uno de los desafíos clave para Industria 4.0 es demostrar que los recursos adicionales invertidos en el despliegue de CPS (Jazdi, 2014) junto con la infraestructura asociada pueden generar las suficientes oportunidades para entregar ganancias en la productividad y eficiencia de los recursos basados en la cantidad total de recursos utilizados en la ingeniería, manufactura, control de producción, logística de compras y distribución. La Industria 4.0 brinda la oportunidad de optimizar los objetivos generales de productividad y eficiencia de los recursos (Kagermann et al., 2013). La Industria 4.0, al integrar (véase Sección 6.2) de forma ubicua (véase Sección 6.7) y colaborativa (véase Sección 6.8) los recursos de manufactura e implementar análisis de datos (véase Sección 6.13) en conjunto con un sistema de soporte de decisiones (véase Sección 6.17) en tiempo real (véase Sección 6.12), permite solicitar servicios (véase Sección 6.15) adecuados y tomar medidas para maximizar el tiempo de actividad (véase Sección 6.11 y 6.14), la productividad y la eficiencia de los sistemas industriales.

### 6.2 Integración

En Industria 4.0, se debe implementar una integración horizontal a través de redes de valor y una 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 (Pereira & Romero, 2017; Kagermann et al., 2013).

La integración horizontal se refiere a la integración de los sistemas de TI utilizados en las diferentes fases de los procesos de manufactura y planificación de los negocios que involucran, un intercambio de materiales, energía e información dentro de una empresa (por ejemplo, logística de entrada, producción, logística de salida y comercialización) e integrando también, diferentes empresas al mismo tiempo. La integración vertical se refiere a la integración de los distintos sistemas de TI en los diferentes niveles jerárquicos (por ejemplo, actuador y sensor, control, gestión de la producción, manufactura y ejecución y los niveles de planificación corporativa) para ofrecer una solución de extremo a extremo (Kagermann et al., 2013). Finalmente la integración de extremo a extremo es probablemente el área más activa en esta época de la manufactura, primero permitiendo la integración máquina a máquina en el piso o taller, siendo las máquinas parte integral del sistema de manufactura, segundo integrando los clientes al sistema de manufactura, lo que permite a los ingenieros obtener retroalimentaciones de los clientes y tercero permite la integración de productos y servicios donde las condiciones del producto en uso pueden ser monitoreados directamente por los productores. En esta forma la cadena de valor es extendida hasta el servicio al cliente (Chen Y. , 2017).

Además, los procesos de negocios en el área de manufactura son a menudo todavía estáticos e implementados a través de sistemas de software extremadamente rígidos e inflexibles. La capa de software en Industria 4.0 debe obedecer ciertos principios de diseño como son: la orientación a datos, escalabilidad y robustez, heterogeneidad para el manejo de variedad de fuentes (como por ejemplo diferentes tipos de sensores) y dispositivos finales, manejo de datos en tiempo real (Angulo et al., 2016) y flexibilidad proporcionada por la integración y orquestación de datos, aplicaciones, servicios y CPS. Sin embargo, estos sistemas existentes no pueden ser simplemente reemplazados de la noche a la mañana por sistemas orientados al servicio. Será esencial integrar los nuevos sistemas y tecnologías con los ya existentes, y los sistemas antiguos necesitaran ser actualizados a sistemas que trabajen en tiempo real (Kagermann et al., 2013).

En Tamas & Murar (2018) se pueden encontrar soluciones a la integración vertical, y Chen Y. (2017) y Delaram & Valilai (2016) abordan el problema y soluciones para la manufactura integrada.

### 6.3 Flexibilidad y adaptabilidad

La Industria 4.0 tiene el propósito de construir sistemas de producción altamente flexibles, de productos y servicios digitales y personalizados, con interacciones en tiempo real entre personas, productos y dispositivos durante el proceso de producción (Zhou et al., 2016). La visión de Industria 4.0 implica el uso del IoT dentro del contexto de las fabricas para llevar a cabo una mayor

flexibilidad y adaptabilidad de los sistemas de producción (Weyer et al., 2015). A su vez, la alta variabilidad en las demandas de los productos, y la necesidad de ciclos de vida del producto más cortos requieren una estructura de producción ágil, flexible, y que se puede reconfigurar rápidamente para las nuevas demandas de los productos. Este grado de flexibilidad no puede ser alcanzada mediante la automatización industrial tradicional debido a su falta de manejo de datos, variedad de fuentes (como por ejemplo diferentes tipos de sensores) y dispositivos finales, conciencia del mundo real (Angulo et al., 2016) y la flexibilidad que proporciona la integración y orquestación de datos, aplicaciones, servicios y CPS (Kagermann et al., 2013). En su lugar estructuras modulares compuestas de dispositivos o máquinas inteligentes (CPS), conectados a través del IoT, son elementos claves para superar la rigidez de los actuales procesos de producción y planeación (Weyer et al., 2015). La Industria 4.0 basada en CPS permite la configuración dinámica de diferentes aspectos de los procesos de negocios, como calidad, tiempo, riesgo, robustez, precio y respeto por el medio ambiente. Esto implica también que los procesos de ingeniería pueden ser realizados de una forma más ágil, los procesos de manufactura pueden ser cambiados o reconfigurados de forma flexible, la escasez momentánea (por ejemplo, debido a problemas de suministro) pueden ser recompensada y se pueden lograr enormes aumentos en la producción en un corto espacio de tiempo (Kagermann et al., 2013).

En Moghaddam (2019) y Huang & Yan (2019) se abordan soluciones al diseño de sistemas de manufactura flexibles y reconfigurables, y García (2017) presenta una arquitectura para manufactura flexible basada en CPS.

#### 6.4 Arquitectura descentralizada y distribuida

La Industria 4.0 dicta el fin de las aplicaciones centralizadas para el control de la producción. Su visión de los ecosistemas dentro de las fábricas inteligentes que incluye objetos autónomos e inteligentes en los pisos de producción es inherentemente descentralizada. La combinación de CPS y CPPS está originando cambios significativos en el control y la producción de la manufactura, dirigiéndola hacia sistemas completamente descentralizados. La descentralización no necesariamente tiene que ser física, pero sí lógica, por ejemplo, un producto inteligente o un CPS, con la capacidad de identificarse y conectarse a un sistema físicamente centralizado, brindando su posición y estado, mientras que la potencia de cómputo puede estar en otra parte (Almada-Lobo, 2015). La computación en la nube proporciona una solución efectiva a tales desafíos. Todos los datos se pueden almacenar en servidores en la nube, de tal forma que pueden dar soporte a decisiones complejas gracias a la computación en la nube (Xu et al., 2018).

Las aplicaciones centralizadas y monolíticas para control y monitoreo de la producción eventualmente dejarán de existir, dando paso a soluciones capaces de soportar esta propuesta radicalmente diferente de procesos de producción y cadena de suministro conectados pero descentralizados. En Industria 4.0 el piso de producción o taller se convierte en un mercado de capacidades y necesidades de producción, donde los materiales inteligentes y los equipos inteligentes negocian de manera

autónoma, garantizando la mejor eficiencia posible, contradiciendo el modelo de los sistemas de control centralizado (Almada-Lobo, 2015).

En Wang et al. (2017), Škulj et al. (2015) y Talhi et al. (2015) pueden encontrarse soluciones y casos de estudio a modelos y procesos distribuidos y descentralizados mediante computación y manufactura en la nube.

#### 6.5 Satisfacción del cliente mediante la personalización

A medida que la saturación del mercado aumenta, los mercados se han ido transformando en mercados compradores forzando a la industria de la manufactura hacia la diferenciación de sus productos (Brettel et al., 2014). Además, hoy en día, no hay una visión global del producto que está siendo fabricado. Como resultado, los clientes no pueden seleccionar libremente las funciones y características de sus productos, aunque técnicamente sea posible el permitirles hacerlo (Kagermann et al., 2013).

Además, factores como la reubicación de la producción hacia países con salarios más bajos afecta especialmente a la producción en masa de productos estandarizados. Por lo tanto, los países con salarios altos deben centrarse en resolver la tensión entre las economías de escala y la planificación y orientación del valor. A grandes volúmenes de productos estandarizados, los países con salarios altos no pueden compensar la estructura de costos inferiores debido a los altos costos laborales en comparación con países de salarios más bajos, solo con una calidad y productividad superior. La producción industrial de productos de alta tecnología tiene que ser apalancada entre la satisfacción de las necesidades heterogéneas de los clientes a través de la individualización de los productos y los efectos de la economía de escala a lo largo de la cadena de valor. El dilema entre las economías de escala, la orientación del valor y la estructura de costos con respecto a países con salarios más bajos se puede abordar con el concepto de personalización en masa (Brettel et al., 2014).

En Industria 4.0 el cambio de la producción en masa hacia la personalización en masa juega un papel fundamental. Cada producto, al final de la cadena de suministro, tiene características únicas definidas por el cliente final. Las cadenas de suministro en Industria 4.0 son altamente transparentes e integradas. Los flujos físicos son continuamente digitalizados. Esto hará que cada servicio individual proporcionado por cada CPPS esté disponible para llevar a cabo las actividades necesarias para crear cada producto personalizado (Almada-Lobo, 2015). En la Industria 4.0 es posible fabricar artículos únicos y tener volúmenes de producción muy bajos (tamaño de lote de 1) sin dejar de obtener ganancias (Kagermann et al., 2013).

La manufactura aditiva, es una de las tecnologías más novedosas que ha permitido la generación de productos con alta calidad y altos niveles de personalización (Fatorachian & Kazemi, 2018). En Dilberoglu et al. (2017) se presenta un análisis detallado del rol de la manufactura aditiva en Industria 4.0.

## 6.6 Holística

La Industria 4.0 busca lograr una visión holística de las operaciones de manufactura, que solo puede suceder integrando datos de varias fuentes distintas, lo cual a su vez genera grandes cantidades de información (Almada-Lobo, 2015).

El objetivo de una fábrica digital en Industria 4.0 es la planificación holística, la evaluación y la mejora continua de todas las estructuras principales, procesos y recursos de la fábrica real en conjunto con el producto (Francalanza et al., 2018). Con el surgimiento del Internet Industrial de las Cosas (IIoT), concepto introducido por GE en 2012 (Evans & Annunziata, 2012), y definido como una circulación de datos, hardware, software e inteligencia, que permiten su interacción, almacenando, analizando y visualizando datos adquiridos a través de máquinas y redes inteligentes con la finalidad de permitir la toma de decisiones inteligente. El máximo potencial del IIoT es alcanzado a través de la integración holística de sus tres componentes: equipos inteligentes, sistemas inteligentes y toma de decisiones inteligente. Esta visión holística aplicada a máquinas, materiales, trabajadores y sistemas permitirá que el IIoT logre alcanzar la fábrica inteligente de la Industria 4.0 (Zhong et al., 2017). Además, en un sistema descentralizado donde los miembros del sistema poseen objetivos diferentes y restricciones que pueden contradecirse necesitará de una visión holística para asegurarse que solo se lleven a cabo operaciones eficientes (Almada-Lobo, 2015). Al mismo tiempo, una visión holística en el diseño junto a la manufactura basada en la nube permite abordar todo el proceso de fabricación del producto en su conjunto (Charro & Schaefer, 2018). La manufactura inteligente permite que todos los procesos físicos y flujos de información estén disponibles cuando y donde son necesarios a través de cadenas de suministro holísticas, pequeñas y medianas empresas (SME), hasta grandes empresas (Zhong et al., 2017). Así, la Industria 4.0 a través del IoT y la computación en la nube, permite tener una visión holística de todos los procesos de producción, y a través de dispositivos móviles se puede obtener un acceso temporal y espacialmente independiente a procesos y servicios de sistemas autónomos (Jazdi, 2014).

## 6.7 Ubicua

De acuerdo con Esmaeilian et al. (2016), la manufactura es un concepto que integra a todos los niveles, desde máquinas y operadores hasta sistemas de producción, para todas las operaciones a nivel de negocios. El término ubicua se refiere a la capacidad para hacer presencia en todos lados al mismo tiempo (definicionde.org, 2016) o al hecho de estar presente a un mismo tiempo en todas partes (WordReference.com, 2005). La manufactura ubicua (MU) ha recibido cada vez mayor atención entre los investigadores del área de manufactura debido a que las tecnologías computacionales ubicuas pueden ser aplicadas para hacer frente a una amplia gama de problemas en la industria de manufactura, en sectores como: gestión, planificación, procesos y equipos de manufactura (Wang et al., 2017).

La tecnología de computación ubicua (CU), comprende una colección de dispositivos inteligentes distribuidos de manera

lógica y espacial, siendo la tecnología núcleo de la MU dado que permite, la captura y procesamiento en tiempo real de enormes datos heterogéneos, la reconfiguración del sistema y la manufactura ágil. Los sistemas que han adoptado CU pueden ser cambiados y reconfigurados para nuevas tareas a través de la prestación de servicios, y son compatibles con herramientas semánticas para una comunicación inequívoca (Wang et al., 2017). Esto ha sido posible en gran medida, debido a que el costo de sensores ha disminuido considerablemente, permitiendo la implementación de la CU lo que ha llevado a la entrega de una gran cantidad de información en tiempo real. Como resultado, nuevos conceptos han aparecido como Big Data (Xu & Duan, 2018), computación en la nube (Caggiano, 2018; Charro & Schaefer, 2018) e IoT (Zhong et al., 2017). En Wang et al. (2017) y Chen & Tsai (2016) se encuentran análisis extensos de la manufactura ubicua, soluciones actuales y oportunidades.

## 6.8 Colaborativa

Hoy en día, en una fábrica de Industria 4.0 tanto máquinas como procesos, sistemas y personas están conectadas como una comunidad colaborativa (Lee et al., 2014), capaces de intercambiar información en tiempo real, desencadenar acciones y controlarse de forma autónoma, tomar decisiones y realizar acciones basadas en la información obtenida (Pereira & Romero, 2017; Kagermann et al., 2013). Aunque generalmente las empresas manufactureras no están preparadas ni para la servitización, ni para la colaboración (Wiesner & Thoben, 2016).

Sin embargo, es recomendable la promoción del aprendizaje orientado a Industria 4.0 y la cooperación entre todas las disciplinas (por ejemplo, ingenieros de manufactura, ingenieros de automatización, de TI, entre otros) con el fin de poder ofrecer un enfoque de ingeniería de sistemas. Esto requerirá que las diferentes disciplinas adquieran un entendimiento mutuo de la posición y enfoque del otro adoptando una visión íntegra de la estrategia y los procesos de negocios (Kagermann et al., 2013).

Un enfoque viable para aumentar la efectividad de la transformación de la manufactura es la colaboración a gran escala en los temas centrales atribuidos a las industrias con el mayor impacto social. La creación de una plataforma de desarrollo abierta en la que participen industrias clave permite dicha colaboración (Kusiak, 2017).

Un entorno de confianza y cooperación más favorable, estable y menos incierto facilita la transformación digital, en particular sus fases de introducción y pruebas. Además, las empresas no innovan y aprenden de forma aislada, sino que necesitan de interacciones con proveedores, clientes, instituciones públicas de investigación, universidades e incluso competidores. La mayoría de las innovaciones se basan en algún tipo de resolución de problemas. Luego, la proximidad espacial, las interacciones cara a cara, el lenguaje común, las relaciones de confianza, la fácil observación y la comparación inmediata mejoran los procesos de aprendizaje interactivo (Götz & Jankowska, 2017). Entonces con el fin de elevar la productividad, la colaboración se convierte en una de las principales fuentes de crecimiento en Industria 4.0. La comprensión de la colaboración implica el trabajo conjunto a



nivel humano-humano, humano-máquina y máquina-máquina (Schuh et al., 2014).

Los clusters, por ejemplo, son un método y vehículo útil para la implementación de la Industria 4.0. Los clusters son concentraciones geográficas de empresas interconectadas, proveedores especializados, proveedores de servicios e instituciones asociadas en un campo en particular que están presentes en una misma área, región o nación (Porter, 2000).

La naturaleza de la Industria 4.0 y los clusters parecen ser contradictorios. Sin embargo, estos no se excluyen entre sí. Los clusters brindan centros de excelencia donde los conocimientos son desarrollados en un entorno propicio para probar las tecnologías de Industria 4.0, proporcionando una incubadora para el desarrollo de esta (laboratorio experimental), por ejemplo, Plattform Industrie 4.0 (2019), es una iniciativa conjunta formada por las organizaciones industriales alemanas: BITKOM (Asociación Federal de Tecnología de la Información, Telecomunicaciones y Nuevos Medios), VDMA (Federación Alemana de Ingeniería) y ZVEI (Asociación de Fabricantes de Dispositivos Eléctricos y Electrónicos) (Germany Trade & Invest (GTAI), 2014).

El clúster alemán OWL es considerado el proyecto más grande y concreto en el contexto de la Industria 4.0. Este sirve como muestra de las mejores prácticas orientadas a aprovechar los clusters para la transformación empresarial hacia la Industria 4.0 (Federal Minister of Education and Research, 2013). Otros ejemplos de la aplicación de clusters orientados a Industria 4.0 son: Clusterplattform Deutschland (2019), el cluster europeo de iniciativas de excelencia (European Secretariat for Cluster Analysis, 2017) y el cluster de Industria 4.0 y producción inteligente (Netzwerk Smart Production, 2019).

Los clusters brindan múltiples ventajas, como la creación de competencias, la reducción de la incertidumbre y las relaciones cercanas en red, además, pueden facilitar el desarrollo y la implementación de soluciones para la Industria 4.0. Los clusters pueden ser un laboratorio para los experimentos en la Industria 4.0 que emulan el concepto de una "compañía conectada" y proporcionan un ambiente único de confianza que estimule la creación y difusión del conocimiento (Götz & Jankowska, 2017).

### 6.9 Modular

Los sistemas modulares son capaces de adaptarse de manera flexible a los cambios en los requerimientos reemplazando o expandiendo módulos individuales. Por lo tanto, los sistemas de forma modular pueden ser fácilmente ajustados en caso de fluctuaciones estacionales o cambios en las características del producto (Hermann et al., 2015).

La modularización es un medio ya aceptado para aumentar la variedad de productos, que son producidos por tecnologías basadas en herramientas. Para una modularización exitosa, la arquitectura del producto debe ser desacoplada en subsistemas con muy pocas interdependencias para lograr economías de escala apropiadas (Brettel et al., 2014).

Las técnicas de simulación y modelado modular permiten que unidades descentralizadas alteren los productos de manera flexible, en beneficio de una rápida innovación de productos (Brettel et al., 2014). Además, para llevar a cabo una

integración vertical, es clave garantizar la integración digital de extremo a extremo de las señales de actuadores y sensores a través de diferentes niveles hasta el ERP. Para esto, será necesario desarrollar estrategias de modularización y reutilización que permitan la reconfiguración de los sistemas de manufactura, junto con las apropiadas descripciones de capacidades de sistemas inteligentes (Kagermann et al., 2013).

La modularización se basa en el principio de "divide y vencerás" y se logra al descomponer el sistema en partes. Esta es importante porque permite, por una parte, dividir y desarrollar sistemas en paralelo, y por la otra, facilita tanto la realización de cambios en el sistema como su comprensión. Dos dificultades asociadas con la modularización residen en identificar la granularidad correcta y encontrar criterios para descomponer el sistema en módulos apropiados. Aunque seguir una alta cohesión y un bajo acoplamiento generalmente producen una granularidad adecuada (Cervantes Maceda et al., 2016).

### 6.10 Virtualización

La virtualización dentro de los procesos de manufactura se refiere a la identificación de la lógica detrás de las operaciones sobre los recursos físicos para su traducción al mundo virtual con el fin de mejorar la agilidad, la flexibilidad y reducir costos (Babiceanu & Seker, 2016). La virtualización es también una simulación virtual de los datos reales de un proceso, producto o servicio con el fin de prevenir errores, modificar parámetros y predecir comportamientos, algo que resultaría en una pérdida de tiempo y dinero si se hiciera con el modelo del mundo real (MIT Technology Review, 2018). La virtualización permite entrelazar el 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 (Klingenberg, 2017). La virtualización puede ser implementada mediante el desarrollo de sistemas ciberfísicos (CPS), que son la tecnología principal de la Industria 4.0 (Kagermann et al., 2013). En los CPS, los componentes físicos y de software se encuentran profundamente entrelazados, lo que representa un mayor nivel de integración y coordinación entre los elementos físicos y computacionales. Mediante la virtualización representada con el desarrollo de CPS, las máquinas podrán comunicarse entre sí y los sistemas de control podrán optimizar la producción (Xu et al., 2018). En Babiceanu & Seker (2016) se encuentra una implementación de la virtualización mediante CPS y Jazdi (2014) presenta arquitecturas de CPS en el contexto de Industria 4.0.

### 6.11 Robusta y confiable

En Industria 4.0 las empresas deben ser operacionalmente robustas y confiables. Estos requerimientos dependen del correcto funcionamiento del sistema o son satisfechos por el sistema en sí. Los elementos requeridos para brindar seguridad operacional son: tasas de fallas muy bajas, alta tolerancia a fallos (es decir, la habilidad de seguir funcionando correctamente incluso cuando ocurren fallas), la robustez (robustness), que se refiere a la capacidad de garantizar una funcionalidad básica en caso de una falla, y la confiabilidad

(fiability), que se refiere a la probabilidad de que un sistema tecnológico funcione correctamente durante un período de tiempo determinado en un ambiente determinado (Kagermann et al., 2013).

Desde el desarrollo del concepto de mantenimiento preventivo y mantenimiento productivo total (TPM) en 1951, las prácticas de mantenimiento han evolucionado no solo enfocándose a temas de calidad, sino enfocándose además en la creación de valor y servicios inteligentes (Lee et al., 2015).

Esta evolución ha conducido al desarrollo de servicios de diagnóstico y mantenimiento inteligentes, además de herramientas para la administración, monitoreo y control de la salud de activos y procesos (Lee et al., 2015; Caggiano, 2018).

Es muy importante poder detectar el desgaste en los activos sin necesidad de detener la producción o predecir fallas de componentes y otras interrupciones (Kagermann et al., 2013).

El diagnóstico y la predicción de fallas en los equipos se convertirá en una práctica común en la manufactura inteligente (Kusiak, 2017). Basados en datos sensoriales adquiridos en la fábrica, los diagnósticos inteligentes pueden mostrar información de la degradación del activo, la vida útil, predecir fallas en el activo o descubrir inconsistencias o ineficiencias en los procesos. Esto es llevado a cabo haciendo uso de algoritmos de aprendizaje y reconocimiento de patrones (Caggiano, 2018).

Estos patrones son en su mayoría invisibles, hasta que ocurre una falla. Pero el descubrimiento de tales patrones puede evitar fallas costosas y reducir el tiempo de inactividad no planificado de las máquinas. Dichos esquemas de mantenimiento conducen a una mayor sostenibilidad de los activos y, finalmente, a un tiempo de inactividad cercano a cero. Además, hacer visibles estos patrones hasta el momento invisibles puede ayudar a ajustar y afinar los procesos para hacerlos más consistentes y eficientes (Lee et al., 2015).

Mediante el uso de CPS existe el potencial de proporcionar a los activos conciencia de sí mismos y auto mantenimiento. La implementación de análisis predictivos como parte de la arquitectura de los CPS permite a los activos realizar un seguimiento continuo de su propio rendimiento, estado de salud, programar mantenimientos y predecir fallas potenciales (Lee et al., 2015).

El desarrollo de diagnósticos inteligentes basados en tecnologías de la nube dirige mejoras significativas en términos de reducción de desperdicios, costos de retrabajo e inspección, costos de herramientas, seguridad de máquinas y piezas, genera procesos robustos y reduce el tiempo de inactividad relacionado con las operaciones de reemplazo y mantenimiento en las herramientas (Caggiano, 2018).

El monitoreo del equipo en tiempo real permite generar los datos que den soporte a los modelos de diagnóstico implementados para monitorear y predecir el estado de salud de equipos y sistemas (Kusiak, 2017).

El desarrollo de procedimientos de monitoreo inteligente en la manufactura aumenta significativamente la productividad, reduce los costos de producción, mejora el rendimiento de los procesos de manufactura en la perspectiva de la fabricación con cero defectos y respalda la automatización mediante la adaptación de sistemas inteligentes (Caggiano, 2018).

## 6.12 Maneja información en tiempo real

La Industria 4.0 toma como fundamento las oportunidades que brinda la disponibilidad de la información relevante desde cualquier lugar en tiempo real (Neugebauer et al., 2016). El requisito más importante de la computación en tiempo real es la respuesta de los resultados, generalmente a nivel de milisegundos. La computación en tiempo real se puede clasificar en dos escenarios: (1) la cantidad de datos es enorme y los resultados no pueden ser calculados en el tiempo deseado. Este es el caso para el análisis y procesamiento de datos. En este caso es posible posponer parte del proceso de cómputo hasta la fase de consulta procesando parte de los datos por adelantado y combinándolos posteriormente con los resultados del cómputo en tiempo real mejorando así la eficiencia del procesamiento y proporcionando a los usuarios respuestas en tiempo real. (2) La fuente de datos es en tiempo real, continua y requiere de la respuesta en tiempo real, este caso es denominado “transmisión de datos” (streaming data) y es visto como un flujo continuo de datos de una serie de registros que no tienen límites en cuanto a distribución de tiempo y número. Siendo el registro la unidad más pequeña dentro del flujo, por ejemplo, los datos generados por sensores dentro del IoT (Tian & Zhao, 2015).

La computación y control en tiempo real transformará el contenido, los procesos y el entorno de trabajo (Kagermann et al., 2013). El proceso de cómputo de grandes datos en tiempo real puede ser dividido en tres fases: recopilación, análisis y procesamiento y servicios de consulta. La recopilación de datos debe garantizar la colección en tiempo real y una baja latencia. El sistema debe ser estable y confiable. Herramientas de adquisición de grandes datos incluyen Scribe de Facebook, Kafka de LinkedIn, Flume de Cloudera, Chukwa de Hadoop, entre otras. En el procesamiento de datos, las operaciones tradicionales incluyen recopilar y almacenar datos en una base de datos y luego interactuar a través de consultas para obtener las respuestas. Sin embargo, para grandes volúmenes y diversidad de datos, la arquitectura de base de datos relacional no es adecuada. Las nuevas arquitecturas adoptan una postura distribuida mientras el almacenamiento y procesamiento se asignan a nodos fácilmente escalables para cumplir con los requisitos en tiempo real. Al mismo tiempo, el almacenamiento de datos utiliza sistemas de archivos distribuidos a gran escala, como HDFS de Hadoop y bases de datos distribuidas NoSQL. Finalmente, el servicio de consulta puede ser implementado de tres formas: memoria completa, semi-memoria y disco completo. La memoria completa proporciona servicios de lectura a los datos directamente. La semi-memoria es utilizada por bases de datos como: Redis, Memcache, MongoDB, Berkeley DB y otras. Finalmente, el disco completo es utilizado por bases de datos NoSQL como HBase basadas en sistema de archivos distribuido como HDFS (Tian & Zhao, 2015).

La Industria 4.0 implica el uso de análisis de datos en tiempo real de múltiples máquinas, procesos y sistemas para posteriormente automatizar la manufactura (Xu et al., 2018). Además, los datos recopilados y analizados en tiempo real permiten que el estado de la fábrica sea rastreado y analizado permanentemente. Así la fábrica será capaz de reaccionar ante la falla de una máquina y redirigir los productos a otra.

Además, diagnósticos en tiempo real sobre las condiciones de los activos permiten optimizar la vida de estos, mediante la implementación de estrategias de administración, mantenimiento y monitoreo de forma inteligente (Caggiano, 2018).

### 6.13 Toma de decisiones optimizadas por datos

Para tener éxito en un mercado global, es fundamental poder tomar las decisiones correctas, en un lapso muy corto de tiempo. La Industria 4.0 proporciona transparencia de extremo a extremo en tiempo real, permitiendo la verificación temprana de las decisiones de ingeniería, respuestas más flexibles a interrupciones y una optimización global en el ámbito de la producción (Kagermann et al., 2013).

Los datos se han convertido en una parte integral de la toma de decisiones en el área de 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 inteligentes, etiquetas RFID y tecnología inalámbrica a lo largo de las líneas de producción. Los datos recopilados a través de redes IoT ayudan a acelerar la oportuna toma de decisiones (Xu et al., 2018). La recopilación de las diversas fuentes va desde las propiedades de los materiales, los parámetros del proceso hasta información sobre clientes y proveedores, entre otros datos de relevancia (Kusiak, 2017).

El creciente volumen de datos en la Industria 4.0 abre las puertas a la entrega de valor a partir de los datos. 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. Además, debido al gran flujo de datos, redes de comunicación e infraestructura de banda ancha, confiable, de alta calidad y escalabilidad, son un requisito clave para la Industria 4.0. El otro componente importante son los análisis de datos, que permiten obtener información a partir de los datos preparados por la infraestructura del sistema y pueden clasificarse en tres tipos: análisis descriptivos basados en funciones estadísticas, análisis predictivos y análisis prescriptivos (Xu & Duan, 2018).

Los análisis predictivos se han convertido en la mejor fuente para extraer conocimientos relacionados con la manufactura (Kusiak, 2017). Los métodos predictivos pueden categorizarse en 5 tipos: regresión, árboles de decisión, redes neuronales artificiales, máquinas de vector de soporte y análisis bayesianos. Finalmente, los análisis prescriptivos son importantes porque buscan el plan óptimo con el costo total más bajo, existiendo dos tipos principales: programación matemática y búsquedas heurística. Mientras que la programación matemática está diseñada para encontrar la solución óptima global, la búsqueda heurística está diseñada para encontrar soluciones óptimas locales en tiempos cortos. (Xu & Duan, 2018).

Pero con la llegada del Big Data nuevas técnicas de minería y análisis de datos son necesarias, dado que métodos tradicionales pueden fallar al intentar extraer información útil de estructuras complejas (Najafabadi et al., 2015; Beysolow II,

2017). A medida que los datos se vuelven cada vez más grandes, el aprendizaje profundo (Deep Learning) desempeñará un papel clave en la provisión de soluciones analíticas aplicadas a la manufactura (Chen & Lin, 2014). En la actualidad, el aprendizaje profundo y la Inteligencia Artificial han avanzado hasta el punto de tener el potencial para transformar el sector industrial (Thilmany & ASME.org, 2018).

En Xu & Duan (2018) se presentan diferentes métodos para análisis de datos en manufactura, Wuest et al. (2016) abordan el uso de los métodos de aprendizaje automático en la manufactura y Packianathera et al. (2017) presentan el uso de técnicas de minería de datos aplicadas a la manufactura.

### 6.14 Seguridad y protección

La seguridad y la protección son dos aspectos fundamentales para el éxito de los sistemas de manufactura inteligente, las instalaciones de manufactura y los productos que estás fabrican. Es importante garantizar que las instalaciones de producción, máquinas y productos por sí mismos no supongan un peligro para las personas o para el medio ambiente (safety). 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 (protección de acceso, seguridad contra ataques, seguridad de los datos, información y el conocimiento que estos contienen) (security). Esto requerirá, el despliegue de arquitecturas que integren estrategias de protección, seguridad e identificadores únicos, junto con mejoras relevantes en la capacitación y el desarrollo profesional continuo. A diferencia de la seguridad, los temas de protección han sido una consideración importante en el diseño de las instalaciones de manufactura y los productos que fabrican durante muchos años. La finalidad de las medidas de seguridad son aumentar la confidencialidad (la restricción del acceso a datos o servicios para máquinas y usuarios específicos), la integridad (precisión e integridad de los datos y el correcto funcionamiento de los servicios) y la disponibilidad (un medio para medir la capacidad de un sistema para realizar una función en un momento determinado) (Kagermann et al., 2013).

En NIST (2018) se abordan ampliamente escenarios y soluciones apropiadas sobre ciberseguridad y Tuptuk & Hailes (2018) abordan soluciones de seguridad en sistemas de manufactura inteligente.

### 6.15 Orientada a servicios

La orientación al servicio y el establecimiento de nuevos modelos de negocios colaborativos son condiciones previas para que las industrias de manufactura sigan siendo competitivas en el contexto global (Wiesner & Thoben, 2016).

La Industria 4.0 abre nuevas formas de crear valor y como emplearlo, por ejemplo, a través de servicios. Los algoritmos inteligentes pueden ser aplicados a grandes cantidades de datos (Big Data) grabados por dispositivos inteligentes para brindar servicios innovadores. Existen oportunidades importantes para que startups, y pequeñas y medianas empresas sean capaces de desarrollar servicios B2B (business-to-business) para Industria 4.0 (Kagermann et al., 2013).

El cambio del enfoque de desarrollos tipo producto-servicio (enfoque centrado en el producto) al enfoque servicios a través del producto (enfoque orientado a la solución) se considera una estrategia clave. Debido a este cambio de paradigma nuevos desarrollos tecnológicos como el Internet de Servicios (incluyendo Computación en la Nube, Plataforma como Servicio, Software como Servicio), donde los servicios básicos de la plataforma, los servicios públicos y los servicios de valor agregado serán proporcionados globalmente a todas las empresas bajo una composición flexible y dinámica. 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 (Wiesner & Thoben, 2016).

### 6.15.1 Servitización

El proceso de creación de valor mediante el agregado de servicios a un producto tangible ha sido denominado "servitización" por Vandermerwe y Rada en 1988. Ellos describen la creciente oferta orientada a la demanda del cliente de paquetes de productos y servicios.

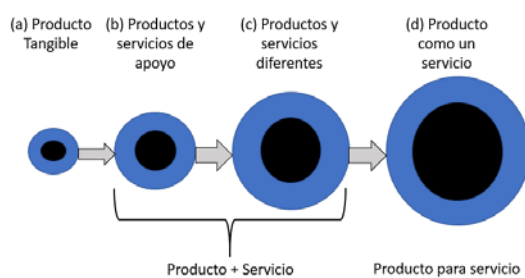


Figura 1. Niveles de servitización. Fuente: (Wiesner & Thoben, 2016).

El producto tangible (a), como se aprecia en la Figura 1, 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 (Wiesner & Thoben, 2016).

En Angulo et al. (2016) se aborda el diseño de arquitecturas orientadas a servicios, Wiesner & Thoben (2016) presentan un método para alcanzar los diferentes niveles de servitización y Charro & Schaefer (2018) presentan un modelo de negocio para manufactura como servicio.

### 6.16 Equilibra la vida laboral del trabajador

Ante la escasez de mano de obra calificada y la creciente diversidad de la fuerza laboral (en términos de edad, género y cultura), la Industria 4.0 permitirá diversas y flexibles trayectorias profesionales lo que permitirá a las personas seguir trabajando, siendo productivas durante más tiempo (Kagermann et al., 2013). El desafío será la reestructuración de puestos de trabajo porque algunas de las ocupaciones menos exigentes desaparecerán rápidamente. Los aumentos de productividad logrados por el uso de tecnologías inteligentes pueden ayudar a asegurar empleos, pero 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. Lo que es seguro es que los perfiles o roles de trabajo cambiarán. Esto significa que medidas de conversión y adaptación serán necesarias mediante la educación y el desarrollo de los empleados (Roblek et al., 2016). La Industria 4.0 conducirá a una mayor automatización de tareas, lo que significa que los trabajadores deben estar preparados para realizar nuevas tareas. Este nuevo paradigma de manufactura tendrá un impacto en el mercado laboral y en los roles profesionales, siendo crucial garantizar que se creen más empleos que los que desaparecerán (Pereira & Romero, 2017). En vista de la escasez de trabajadores calificados, con pensamiento interdisciplinario y excelentes actitudes técnicas y sociales, la Industria 4.0 permitirá a este tipo de trabajadores extender su vida laboral y seguir 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, por lo tanto, será necesario implementar estrategias adecuadas de capacitación y organizar el trabajo de manera que se fomente 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 seres 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 (Kagermann et al., 2013).

### 6.17 Autonomía e inteligencia

El concepto "inteligente" se está volviendo central en el marco de la Industria 4.0. 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 ambiente inteligente con otros dispositivos inteligentes, tomar decisiones y realizar acciones basadas en la información obtenida (Pereira & Romero, 2017; Kagermann et al., 2013).

Lee et al. (2014) y Lee et al. (2015) presentaron dos niveles de inteligencia, que se aprecian en la Figura 2, el nivel cognitivo y el nivel de configuración.

El nivel cognitivo genera un conocimiento profundo del sistema monitoreado, brindando soporte en la toma correcta de decisiones, genera diagnósticos y predicciones, además de

mostrar 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 (Bagheri et al., 2015). Este nivel puede ser alcanzado con las técnicas y métodos discutidos en la sección 6.13.



Figura 2. Niveles de inteligencia. Fuente: (Lee et al., 2015).

El nivel de configuración es la retroalimentación del espacio cibernético al espacio físico y actúa como control de supervisión para que las máquinas se autoconfiguren. Esta fase actúa como un medio de control que aplica sobre el sistema monitoreado las decisiones correctivas y preventivas, que se han tomado en el nivel cognitivo (Lee et al., 2015).

El nivel de configuración representa, la visión más profunda, completa e inteligente de Industria 4.0, caracterizada por redes de recursos de manufactura (maquinaria de manufactura, robots, sistemas de almacenamiento, transporte e instalaciones de producción) que son autónomos, capaces de controlarse a sí mismos en respuesta a diferentes situaciones, con la capacidad de auto configurarse en base al conocimiento, equipados con sensores espacialmente dispersos que incorporan información a los sistemas más relevantes de planificación y administración. Las cadenas de valor serán autoorganizadas y optimizadas en tiempo real en función de una variedad de criterios como costo, disponibilidad o consumo de recursos (Kagermann et al., 2013).

Para realizar procesos de manufactura eficientes y flexibles, sistemas, máquinas y procesos necesitan la capacidad de auto configurarse y optimizarse. Esto requiere un grado de habilidades cognitivas que permita a máquinas y procesos adaptarse a los cambios y optimizar sus parámetros en tiempo real (Neugebauer et al., 2016).

Los CPS al estar en conexión intensiva con el mundo físico circundante y sus procesos en curso, mediante servicios de acceso y procesamiento de datos tienen la capacidad para lograr los fines antes mencionados. Con la introducción de los CPS, las máquinas podrán comunicarse entre sí y los sistemas de control descentralizados podrán optimizar la producción (Xu et al., 2018).

En Kusiak (2017) y Zhong et al. (2017) se presentan amplias discusiones sobre la manufactura inteligente y Delicato et al. (2019) abordan el diseño de CPS hacia sistemas inteligentes.

## 7. Conclusiones

El aumento de la productividad ha sido la esencia de cada revolución industrial, lo que ha tenido un fuerte impacto en los procesos de manufactura, permitiendo un aumento en la eficiencia y la productividad a través del uso de desarrollos tecnológicos disruptivos. La Industria 4.0 promete dirigir cambios profundos en sectores industriales y de manufactura, teniendo fuerte impacto a lo largo de toda la cadena de valor y proporcionando un conjunto de oportunidades en el uso de tecnología de la producción en conjunto con las tecnologías de la información y comunicación, en la creación de nuevos empleos y organización del trabajo. La Industria 4.0 es una filosofía que enfatiza las oportunidades de integrar de forma ubicua, holística y colaborativa todos los elementos en un sistema que genera valor, siguiendo como principales objetivos el aumento de la eficiencia y productividad, la personalización en masa de productos y servicios, así como el equilibrio de la vida laboral del trabajador. La Industria 4.0, es a su vez, una convergencia tecnológica, fundamentada principalmente en el IoT, IoS, CPS y análisis de datos para lograr alcanzar la fábrica inteligente, que mediante una arquitectura descentralizada, modular, robusta, segura y flexible permite el desarrollo de procesos y productos a su vez inteligentes capaces de crear copias virtuales del mundo físico, analizar y monitorear los procesos, autogestionarse, optimizarse y tomar decisiones de forma autónoma basada en datos en tiempo real provenientes tanto de personas como máquinas, procesos y sistemas.

Este documento, además de aclarar la comprensión del término Industria 4.0, analiza y expone de forma exhaustiva 17 principios de diseño para las empresas en el contexto de Industria 4.0, obtenidas mediante un mapeo sistemático. El mapeo sistemático es un método que ha sido aplicado exitosamente para identificar y categorizar propuestas de arquitectura de software para Big Data, para realizar inspecciones de software, para identificar y clasificar arquitecturas de software para sistemas robóticos, en la generación de casos de prueba, y en el control de calidad de sistemas. Los principios de diseño encontrados proporcionan una sistematización del conocimiento, describen los componentes involucrados y apoyan a los profesionales en el desarrollo de soluciones apropiadas. Desde una perspectiva académica, los principios de diseño son la base de la teoría del diseño, además ayudan a ingenieros e investigadores a identificar, describir y seleccionar características de Industria 4.0 para sus investigaciones e implementaciones. Estos principios son: la eficiencia y productividad, la integración, la flexibilidad y adaptabilidad, la descentralización, la personalización, la seguridad y protección, la virtualización, debe ser holística, ubicua, colaborativa, modular, robusta y confiable, maneja información en tiempo real, toma decisiones optimizadas por datos, es orientada a servicios, equilibra la vida laboral del trabajador y finalmente es autónoma e inteligente.

Mediante estos principios de diseño, la Industria 4.0 tiene la capacidad de impactar de manera profunda los ecosistemas sociales, económicos, empresariales e individuales, ya sea como cliente (con acceso a productos más personalizados) o trabajador (creación de nuevos roles y tareas con una mayor

eficiencia). Además, impactará de forma disruptiva la forma en que se diseñaran los nuevos procesos y sistemas, surgiendo la necesidad de agregar valor e invertir en la educación, capacitación y readaptación de procesos empresariales y de recursos humanos, permitiendo el aumento de ingresos dada una mayor productividad. Aunque, la falta de herramientas aún representa un obstáculo importante para explotar todo el potencial de la Industria 4.0, lo que plantea desafíos únicos. Claro nichos de investigación se encuentran en la creación de nuevos modelos de negocios desde la perspectiva de los nuevos productos y servicios, la estandarización e interoperabilidad de la tecnología de múltiples proveedores, los cálculos de la inversión inicial requerida, así como del retorno de la inversión (ROI), el diseño de arquitecturas de referencia y el desarrollo de productos y sistemas de manufactura sustentables e inteligentes.

## Referencias

- Ahmad, A., & Babar, M. (2016). Software architectures for robotic systems: A systematic mapping study. *The Journal of Systems and Software*, 16-39.
- Alexopoulos, K., Sipsas, K., Xanthakis, E., Makris, S., & Mourtzis, D. (2018). An industrial Internet of things based platform for context-aware information services in manufacturing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 1-14. doi:https://doi.org/10.1080/0951192X.2018.1500716
- Almada-Lobo, F. (2015). The Industry 4.0 revolution and the future of Manufacturing Execution Systems (MES). *Journal of Innovation Management*, 16-21.
- 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
- Babiceanu, 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
- 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
- Beysolow II, T. (2017). *Introduction to Deep Learning Using R*. San Francisco, California, USA: Apress.
- Bibby, L., & Dehe, B. (2018). Defining and assessing industry 4.0 maturity levels – case of the defence sector. *Production Planning & Control*, 1-15. doi:https://doi.org/10.1080/09537287.2018.1503355
- 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.
- 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
- Cervantes Maceda, H., Velasco-Elizondo, P., & Castro Careaga, L. (2016). *Arquitectura de Software. Conceptos y ciclo de desarrollo*. Ciudad de México, México: CENGAGE Learning.
- Charro, A., & Schaefer, D. (2018). Cloud Manufacturing as a new type of Product-Service System. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 1018-1033.
- 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
- Chen, X.-W., & Lin, X. (2014). Big Data Deep Learning: Challenges and Perspectives. *IEEE Xplore*, 514 - 525.
- 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
- Chiu, Y.-C., Cheng, F.-T., & Huang, H.-C. (2017). Developing a factory-wide intelligent predictive maintenance system based on Industry 4.0. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 1-11. doi:http://dx.doi.org/10.1080/02533839.2017.1362357
- Ciffolilli, A., & Muscio, A. (2018). Industry 4.0: national and regional comparative advantages in key enabling technologies. *European Planning Studies*, 1-22. doi:https://doi.org/10.1080/09654313.2018.1529145
- Clusterplattform Deutschland . (2019). *Clusterplattform Deutschland* . Obtenido de Clusterplattform Deutschland : https://www.clusterplattform.de/CLUSTER/Navigation/DE/Home/home.html
- 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
- Crawford, M., & ASME.org. (01 de Julio de 2018). *How Industry 4.0 Impacts Engineering Design*. Obtenido de ASME: https://www.asme.org/engineering-topics/articles/manufacturing-design/industry-40-impacts-engineering-design-definicionde.org. (27 de Diciembre de 2016). *Definición de ubicuo - Que es según la RAE?* Obtenido de Definición de las palabras: http://definicionde.org/ubicuo/
- Delaram, J., & Valilai, O. (2016). Development of a Novel Solution to Enable Integration and Interoperability for Cloud Manufacturing. *Procedia CIRP*, 6-11. doi:10.1016/j.procir.2016.07.056
- Delicato, F., Al-Anbuky, A., & Wang, K.-K. (2019). Editorial: Smart Cyber-Physical Systems: Toward Pervasive Intelligence systems. *Future Generation Computer Systems*, 1-6. doi:https://doi.org/10.1016/j.future.2019.06.031
- Deloitte. (05 de 10 de 2018). *¿Qué es la Industria 4.0?* Obtenido de Deloitte.: https://www2.deloitte.com/es/es/pages/manufacturing/articles/que-es-la-industria-4.0.html
- Dilberoglou, U., Bahar, G., Yaman, U., & Dolen, M. (2017). The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0. *International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing* (págs. 1-10). Italia: Procedia Manufacturing. doi:10.1016/j.promfg.2017.07.148
- European Secretariat for Cluster Analysis. (2017). *Quality audit: Gold Label of the European Cluster Excellence Initiative (ECEI)*. Obtenido de ESCA: https://www.cluster-analysis.org/gold-label-new
- Evans, P., & Annunziata, M. (26 de Noviembre de 2012). *Industrial Internet: Pushing the Boundaries of Minds and Machines*. Obtenido de GE: https://www.ge.com/docs/chapters/Industrial\_Internet.pdf
- 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
- Federal Minister of Education and Research. (2013). *Deutschlands Spitzencluster Germany's Leading-Edge Clusters*. Obtenido de Federal Ministry of Education and Research (BMBF): https://www.hamburg.de/contentblob/2593364/3113df3e6f569c97b937bd87475564db/data/deutschlands-spitzencluster.pdf
- Ferreira, J., Sarraipa, J., Ferro-Beca, M., Agostinho, C., Costa, R., & Jardim-Goncalves, R. (2016). End-to-end manufacturing in factories of the future. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 1-14.
- Fetterman, D., Cavalcante, C., Domingues de Almeida, T., & Tortorella, G. (2018). How does Industry 4.0 contribute to operations management? *Journal of Industrial and Production Engineering*, 1-15. doi:https://doi.org/10.1080/21681015.2018.1462863
- 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
- García, M., Irisarri, E., Pérez, F., Estévez, E., & Marcos, M. (2017). Arquitectura de Automatización basada en Sistemas Ciberfísicos para la Fabricación Flexible en la Industria de Petróleo y Gas. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 1-11. doi:https://doi.org/10.4995/riai.2017.8823
- Germany Trade & Invest (GTAI). (1 de Julio de 2014). *Industrie 4.0 Smart Manufacturing for the future*. Obtenido de Germany Trade & Invest (GTAI): https://www.gtai.de/GTAI/Content/CN/Invest/\_SharedDocs/Downloads/GTAI/Brochures/Industries/industrie4.0-smart-manufacturing-for-the-future-en.pdf
- Ghobakhloo, M. (2019). Determinants of information and digital technology implementation for smart manufacturing. *International Journal of Production Research*, 1-23. doi:10.1080/00207543.2019.1630775
- 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
- Gregor, S. (2002). A Theory of Theories in Information Systems. *Information Systems Foundations. Building the Theoretical*, 1 - 20.
- 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* (págs. 1- 10). Philadelphia, Pennsylvania, USA: ACM Digital Library. doi:10.1145/1555619.1555625
- Henzel, R., & Herzswurm, G. (2018). Cloud Manufacturing: A state-of-the-art survey of current issues. *CIRP*, 947-952.
- 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
- Hernández A., A., Figueroa F., V., & Jiménez G., J. (2018). *Propuesta de una metodología de diagnóstico para identificar los requerimientos tecnológicos de una empresa tradicional de manufactura para evolucionar a Industria 4.0*. Celaya, Guanajuato, México: Tecnológico Nacional de México en Celaya.
- Huang, S., & Yan, Y. (2019). Design of delayed reconfigurable manufacturing system based on part family grouping and machine selection. *International Journal of Production Research*, 1-19. doi:10.1080/00207543.2019.1654631

- Ibarra, D., Ganzarain, J., & Igartua, J. (2017). Business model innovation through Industry 4.0: A review. *Procedia Manufacturing*, 4-10. doi:10.1016/j.promfg.2018.03.002
- Jardim-Goncalves, R., Romero, D., & Grilo, A. (2017). Factories of the future: challenges and leading innovations in intelligent manufacturing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 30, 4-14. doi:http://dx.doi.org/10.1080/0951192X.2016.1258120
- Jazdi, N. (17 de Jolio de 2014). Cyber Physical Systems in the Context of Industry 4.0. *IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics*. (págs. 1-3). Cluj-Napoca, Romania: IEEE. doi:10.1109/AQTR.2014.6857843
- 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.
- 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
- Khan, K., Kunz, R., Kleijnen, J., & Antes, G. (2003). Five steps to conducting a systematic review. *Journal of the royal society of medicine*, 118-121.
- Kipper, L., Furstenu, 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
- Klingenberg, C. (2017). Industry 4.0: what makes it a revolution? *EurOMA* (págs. 1-11). ResearchGate.
- Kusiak, A. (2017). Smart manufacturing. *International Journal of Production Research*, 508-517. doi:https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1351644
- Laudante, E. (2017). Industry 4.0, Innovation and Design. A new approach for ergonomic analysis in manufacturing system. *An International Journal for All Aspects of Design*, 1-12. doi:http://dx.doi.org/10.1080/14606925.2017.1352784
- 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.
- 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
- Lee, J., Kao, H.-A., & Yang, S. (2014). Service Innovation and Smart Analytics for Industry 4.0 and Big Data Environment. *Procedia CIRP*, 16, 3-8. doi:https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.02.001
- 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
- Luque, A., Peralta, E., De las Heras, A., & Córdoba, A. (2017). State of Industry 4.0 in the Andalusian food sector. *Procedia Manufacturing*, 1199-1205. doi:10.1016/j.promfg.2017.09.195
- Macchi, D., & Solari, M. (2012). Mapeo sistemático de la literatura sobre la Adopción de Inspecciones de Software. *Universidad ORT de Uruguay*, 1 - 8.
- MIT Technology Review. (31 de Octubre de 2018). "Digital twin", un gemelo virtual para aconsejar a la Industria 4.0. Obtenido de MIT Technology Review: <https://www.technologyreview.es/s/10696/digital-twin-un-gemelo-virtual-para-aconsejar-la-industria-40>
- Moghaddam, S., Houshmand, M., Saitou, K., & Valilai, O. (2019). Configuration design of scalable reconfigurable manufacturing systems for part family. *International Journal of Production Research*, 1-24. doi:10.1080/00207543.2019.1620365
- Moktadir, M., Ali, S., Kusi-Sarpong, S., & Ali Shaikh, M. (2018). Assessing challenges for implementing Industry 4.0: Implications for process safety and environmental protection. *Process Safety and Environmental Protection*, 730-741. doi:https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.04.020
- 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
- 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
- Netzwerk Smart Production. (01 de Enero de 2019). *Smart Production*. Obtenido de Netzwerk Smart Production: <https://www.smartproduction.de/>
- 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
- NIST. (16 de Abril de 2018). *Framework for Improving Critical Infrastructure Cybersecurity*. Obtenido de National Institute of Standards and Technology: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/CSWP/NIST.CSWP.04162018.pdf>
- Nodehi, T., Jardim-Goncalves, R., Zutshi, A., & Grilo, A. (2015). ICI: an intercloud interoperability framework for computing resource cloud providers in factories of the future. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 1-12. doi:http://dx.doi.org/10.1080/0951192X.2015.1067921
- Nunes, M., Pereira, A., & Alves, A. (2017). Smart products development approaches for Industry 4.0. *Manufacturing Engineering Society International Conference* (págs. 1215-1222). Vigo, España: Procedia Manufacturing.
- 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
- Packianathera, M., Davies, A., Harraden, S., Soman, S., & White, J. (2017). Data mining techniques applied to a manufacturing SME. *Data mining techniques applied to a manufacturing SME*, 123 - 128. doi:10.1016/j.procir.2016.06.120
- Pereira, A., & Romero, F. (2017). A review of the meaning and the implications of the Industry 4.0 concept. En P. Manufacturing (Ed.), *Manufacturing Engineering Society International Conference* (págs. 1206-1214). Vigo, España: Elsevier.
- Pereira, T., Barreto, L., & Amaral, A. (2017). Network and information security challenges within Industry 4.0 paradigm. *Procedia Manufacturing*, 1253-1260. doi:10.1016/j.promfg.2017.09.047
- Piedrahita, A., & Vélez Ángel, P. (2017). Control de calidad en sistemas crowdsourcing: un mapeo sistemático. *Scientia et Technica*, 1 - 10. doi:http://dx.doi.org/10.22517/23447214.13541
- Plattform Industrie 4.0. (2019). *Plattform Industrie 4.0*. Obtenido de Plattform Industrie 4.0: <https://www.plattform-i40.de/PI40/Navigation/EN/ThePlatform/Background/background.html>
- Porter, M. (2000). Location, Competition, and Economic Development: Local Clusters in a Global Economy. *Economic Development Quarterly*, 15-34. doi:10.1177/089124240001400105
- PWC. (01 de 01 de 2016). *Industry 4.0: Building the Digital Enterprise*. Obtenido de PWC: <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4-0/landing-page/industry-4-0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf>
- Qin, J., Liu, Y., & Grosvenor, R. (2016). A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and Beyond. *Procedia CIRP*, 173-178.
- Quintana, G., & Solari, M. (2012). Estudio de Mapeo Sistemático sobre Experimentos de Generación Automática de Casos de Prueba Estructurales. *Universidad ORT de Uruguay*, 1-10.
- Radziwon, A., Bilberg, A., Bogers, M., & Madsen, E. (2014). The Smart Factory: Exploring Adaptive and Flexible Manufacturing Solutions. *Procedia Engineering*, 1184 - 1190.
- Roblek, V., Meško, M., & Krapež, A. (2016). A Complex View of Industry 4.0. *SAGE*, 1-11. doi:10.1177/2158244016653987
- 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
- Román-Ibáñez, V., Jimeno-Morenilla, A., & Pujol-López, F. (2018). Distributed monitoring of heterogeneous robotic cells. A proposal for the footwear industry 4.0. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 1-16. doi:https://doi.org/10.1080/0951192X.2018.1529432
- Rosin, F., Forget, P., Lamouri, S., & Pellerin, R. (2019). Impacts of Industry 4.0 technologies on Lean principles. *International Journal of Production Research*, 1-19. doi:10.1080/00207543.2019.1672902
- Rossit, D., Tohmé, F., & Frutos, M. (2018). Industry 4.0: Smart Scheduling. *International Journal of Production Research*. doi:https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1504248
- Russo, J., & Solari, M. (2017). Estudio de Mapeo Sistemático sobre Arquitecturas de Software para Big Data. *Conferencia Iberoamericana en Software Engineering* (págs. 1 - 14). Buenos Aires, Argentina: ResearchGate.
- 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
- 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.
- Schumacher, A., Erol, S., & Sihn, W. (2016). A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises. *Procedia CIRP*, 161 - 166. doi:10.1016/j.procir.2016.07.040
- 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
- Shariatzadeh, N., Lundholm, T., Lindberg, L., & Sivard, G. (2016). Integration of digital factory with smart factory based on Internet of Things. *Procedia CIRP*, 512 - 517. doi:10.1016/j.procir.2016.05.050
- Shin, W., Dahlgaard, J., Dahlgaard-Park, S., & Kim, M. (2018). A Quality Scorecard for the era of Industry 4.0. *Total Quality Management & Business Excellence*, 1-19. doi:https://doi.org/10.1080/14783363.2018.1486536
- Siemens. (05 de 10 de 2018). *Siemens España | El Futuro de la Industria 4.0*. Obtenido de Siemens: [https://w5.siemens.com/spain/web/es/el-futuro-de-la-industria/pages/el\\_futuro\\_de\\_la\\_industria.aspx](https://w5.siemens.com/spain/web/es/el-futuro-de-la-industria/pages/el_futuro_de_la_industria.aspx)
- Škulj, G., Vrabčić, R., Butala, P., & Sluga, A. (2015). Decentralised network architecture for cloud manufacturing. *International Journal of Computer*

- Integrated Manufacturing*, 1-15. doi:<http://dx.doi.org/10.1080/0951192X.2015.1066861>
- Sony, M. (2018). Industry 4.0 and lean management: a proposed integration model and research propositions. *Production & Manufacturing Research*, 416-432. doi:[10.1080/21693277.2018.1540949](https://doi.org/10.1080/21693277.2018.1540949)
- Talhi, A., Huet, J., Fortineau, V., & Lamouri, S. (2015). Towards a Cloud Manufacturing systems modeling methodology. *IFAC*, 288-293. doi:[10.1016/j.ifacol.2015.06.096](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.096)
- Tamas, L., & Murar, M. (2018). Smart CPS: vertical integration overview and user story with a cobot. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 1-19. doi:<https://doi.org/10.1080/0951192X.2018.1535196>
- Telukdarie, A., Buhulaiga, E., Bag, S., Gupta, S., & Luo, Z. (2018). Industry 4.0 implementation for multinationals. *Process Safety and Environmental Protection*, 316-329. doi:<https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.06.030>
- Theorin, A., Bengtsson, K., Provost, J., Lieder, M., Johnsson, C., Lundholm, T., & Lennartson, B. (2016). An event-driven manufacturing information system architecture for Industry 4.0. *International Journal of Production Research*, 1-16. doi:[10.1080/00207543.2016.1201604](https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1201604)
- Thilmany, J., & ASME.org. (17 de Mayo de 2018). *Artificial Intelligence Transforms Manufacturing*. Obtenido de ASME: <https://www.asme.org/engineering-topics/articles/manufacturing-design/artificial-intelligence-transforms-manufacturing>
- Tian, W., & Zhao, Y. (2015). *Optimized Cloud Resource Management and Scheduling*. Morgan Kaufmann. doi:<https://doi.org/10.1016/C2013-0-13415-0>
- Tjahjono, B., Esplugues, C., Ares, E., & Pelaez, G. (2017). What does Industry 4.0 mean to Supply Chain? *Procedia Manufacturing*, 1175-1182.
- Tortorella, G., & Fettermann, D. (2017). Implementation of Industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies. *International Journal of Production Research*, 1-14. doi:<http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2017.1391420>
- 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>
- Vaidya, ., 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>
- Wang, B., & Ha-Brookshire, J. (2018). Exploration of Digital Competency Requirements within the Fashion Supply Chain with an Anticipation of Industry 4.0. *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*, 1-11. doi:<https://doi.org/10.1080/17543266.2018.1448459>
- Wang, X., Givehchi, M., & Wang, L. (2017). Manufacturing system on the cloud: a case study on cloud-based process planning. *Procedia CIRP*, 39 – 45. doi:[10.1016/j.procir.2017.03.103](https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.103)
- Wang, X., Givehchi, M., & Wang, L. (2017). Manufacturing system on the cloud: a case study on cloud-based process planning. *Procedia CIRP*, 39-45.
- 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>
- 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>
- 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>
- WordReference.com. (2005). *ubicuo - definición - WordReference.com*. Obtenido de WordReference.com: <https://www.wordreference.com/definicion/ubicuo>
- Wu, D., Jennings, C., Terpeny, J., Gao, R., & Kumara, S. (2017). A Comparative Study on Machine Learning Algorithms for Smart Manufacturing: Tool Wear Prediction Using Random Forests. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1-10.
- Wuest, T., Daniel, W., Irgens, C., & Thoben, K.-D. (2016). Machine learning in manufacturing: advantages, challenges, and applications. *Production & Manufacturing Research*, 23-45. doi:<http://dx.doi.org/10.1080/21693277.2016.1192517>
- 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](https://doi.org/10.1080/17517575.2018.1442934)
- 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>
- 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>
- Zhonga, R., Wang, L., & Xu, X. (2017). An IoT-enabled Real-time Machine Status Monitoring Approach for Cloud Manufacturing. *Procedia CIRP*, 709 – 714.
- Zhou, K., Liu, T., & Zhou, L. (2016). Industry 4.0: Towards Future Industrial Opportunities and Challenges. *International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery* (págs. 2147-2152). Zhangjiajie, China: IEEE.