

Fabricación inteligente y gemelos digitales en la Industria 4.0

Darío Jesús Quiroga-Parra⁹
Sandra Milena Zambrano Vargas¹⁰

El capital conocimiento puede darse o repartirse indefinidamente, enriqueciendo a muchos. Esta acción no empobrece a quien reparte su conocimiento.

Resumen

A través de los siglos, el progreso de la humanidad ha estado marcado por el avance en el conocimiento, la tecnología, la innovación y los desarrollos organizacionales que las sociedades han realizado y adoptado. Del siglo XVIII a la fecha, los seres humanos hemos trasegado por cuatro revoluciones industriales tecnológicas que nos han llevado a mejorar la productividad y la calidad de vida. En la actualidad, nos encontramos en la Cuarta Revolución o Industria 4.0, que ha traído enormes avances en todos los campos, en especial en el de la producción. El propósito del presente trabajo fue realizar una revisión bibliográfica de dos de las tecnologías más importantes de la Industria 4.0, que

⁹ Doctor en Ingeniería. Docente de la Facultad de Ciencias Administrativas, Económicas y Contables de la Universidad Cooperativa de Colombia (UCC). Correo electrónico: dario.quiroga@campusucc.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2424-0765>

¹⁰ Doctora en Administración. Docente de la Escuela de Administración de Empresas de la UPTC, seccional Tunja. Investigadora del Grupo de Investigación IDEAS. Correo electrónico: sandra.zambrano01@uptc.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3492-6971>

tienen una incidencia importante en las empresas manufactureras: la fabricación inteligente y los gemelos digitales. Para lo anterior, se indagó en las bases de datos de Scopus, Web of Science y Google Académico, por documentos relacionados con estas temáticas, lo que facilitó una revisión amplia de la literatura internacional que los ha estudiado. Los resultados exponen la trascendencia de la fabricación inteligente y los gemelos digitales en la actual Cuarta Revolución Industrial. Además, la indagación deja ver los retos que enfrentan las organizaciones para abordar estos avances, en cuanto a gestión y formación o capacitación del capital humano. El documento concluye exponiendo el acelerado progreso de estas tecnologías digitales y su importancia para la fabricación industrial.

1. Introducción

Desde la Primera Revolución Industrial, ocurrida en la segunda mitad del siglo XVIII, en Inglaterra, han surgido múltiples tecnologías y nuevos conocimientos que han generado avances científicos sin precedentes en los diferentes campos de la ciencia. Las dos primeras revoluciones industriales sentaron las bases científicas y tecnológicas para que la Tercera y Cuarta Revolución Industrial iniciaran una enorme transformación tecnológica en las empresas, la economía, la sociedad, y en otros múltiples ámbitos de todos los campos. De manera que se han estado transformando, desde entonces, actividades como las formas de comunicarnos, la forma de trabajar, manufacturar, comercializar y realizar transacciones económicas nacionales e internacionales. La consecuente transformación de los procesos manufactureros se ha dado gracias a la integración lograda entre tecnologías ya existentes, pero que trabajaban de aisladas, que ahora encuentran puntos comunes en todos los aspectos de la organización, no solo como tal en la producción, sino que aplican una visión sistémica capaz de comprender el entorno; en otras palabras, se ha cambiado el modo de hacer negocios (Ynzunza et al., 2017).

Una de las mayores transformaciones que ha tenido la humanidad y que han acelerado el progreso científico y tecnológico ha sido el surgimiento de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC). Esto a razón de que las TIC, además de protagonizar el nacimiento de

las actividades digitales, han facilitado y acelerado el desarrollo de los procesos de información y comunicación, constituyéndose en la base material, tecnológica y conceptual de la Industria 4.0 (Quiroga-Parra et al., 2017a y 2017b). La fuerte y masiva disponibilidad de información en Internet, sumada a la dinámica formación académico-científica del capital humano en el mundo, ha permitido la generación de nuevo conocimiento científico. Sistemáticamente, esto ha generado altos niveles de innovación y de creación de nuevas tecnologías, como es el caso de la emergente Industria 4.0, en la Cuarta Revolución Industrial, con múltiples y disruptivas innovaciones tecnológicas (Quiroga-Parra et al., 2022; Rocha-Jácome et al., 2022). Es destacable, igualmente, el protagonismo científico mundial en el desarrollo de la carrera espacial de la astronomía y la astrofísica; muchas de estas tecnologías digitales se han desarrollado, experimentado y aplicado como aporte científico-tecnológico, y posteriormente se han incorporado a las empresas, la medicina y el contexto económico de los países desarrollados.

Como concepto, la Industria 4.0 tuvo su origen en Alemania. Sin embargo, muchos otros países desarrollados, entre ellos Estados Unidos, China, Inglaterra, Japón y Corea, han dado inicio a una acelerada carrera tecnológica con la intención de aumentar, aún más, sus niveles de productividad y competitividad internacional, fortalecer la flexibilidad en la producción, con la consecuente reducción de costos y el mejoramiento de la calidad de vida de las personas, en términos estratégicos y de eficiencia productiva. El presente trabajo tiene como objetivo realizar una revisión sistemática de la literatura sobre los temas de Industria 4.0, específicamente en lo que respecta al smart manufacturing y los gemelos digitales, avances que impactan a las empresas manufactureras en el ámbito de la fabricación.

Para lo anterior, el uso de las bases de datos de Scopus, Web of Science y Google Académico sirvió como cimiento para la elaboración de una revisión bibliográfica que facilitó determinar los artículos científicos recientes, los más citados y los de mayor impacto en el desarrollo y avance de la Industria 4.0 en las tecnologías estudiadas. El alcance era internacional y la tipología del material que se rastreaba se concentraba en los artículos. Los resultados evidencian grandes avances y una robusta estructuración de la fabricación inteligente en las empresas de los países desarrollados. El trabajo concluye exponiendo los avances

y aplicaciones fundamentales de la Industria 4.0 en las empresas de manufactura, a través de la fabricación inteligente y de los gemelos digitales, lo que lleva a definir otros aspectos vitales para cualquier organización, como son la gestión y las capacidades del capital humano necesario para abordar los cambios propuestos en la Cuarta Revolución Industrial.

Estructuralmente, el capítulo está compuesto por los siguientes apartados: una aproximación a la revisión bibliográfica de la Industria 4.0 y la fabricación inteligente (smart manufacturing) en sus diversos campos, el desarrollo del tema de los gemelos digitales y su rol dentro del proceso de la fábrica inteligente; posteriormente, se exponen los retos de la gestión de las organizaciones en la era de la Industria 4.0; y, finalmente, se agregan las conclusiones y referencias bibliográficas utilizadas en este estudio.

2. Metodología

Para el presente trabajo se adelantó el siguiente proceso metodológico. En la primera fase, se recurrió a realizar una revisión bibliométrica en las bases de datos de Scopus y Web of Science. Este proceso facilitó la revisión del total de publicaciones sobre los temas “fabricación inteligente” y “gemelos digitales”, ambos en la Industria 4.0. Además, fueron rastreados, específicamente, los artículos científicos más citados y los más recientes, en ambas plataformas.

En la fase dos se eliminaron los documentos que no pertenecían al tema, en pro de conformar una lista más detallada de los artículos científicos relevantes para esta investigación. Seguidamente, se seleccionaron los artículos que recibieron el mayor número de citas entre toda la literatura internacional existente en el momento de la investigación. El motor de búsqueda de Google Académico contribuyó a encontrar los artículos que no estaban registrados en las dos bases de datos inicialmente consultadas. La lectura rigurosa de los artículos relevantes y de interés para el trabajo fue la base material seleccionada para realizar el presente trabajo académico de revisión de literatura dentro del contexto de la Industria 4.0, la fabricación inteligente y la tecnología de los gemelos digitales.

3. Una primera aproximación de revisión de literatura

3.1. La Industria 4.0

La Industria 4.0 ha sido llamada la Cuarta Revolución Industrial en la era de la humanidad. La Industria 4.0 (sintetizada en ocasiones como I4.0) fue concebida desde sus inicios como una filosofía y una estrategia. De hecho, la Industria 4.0, así como las múltiples tecnologías que la conforman, se ha convertido hoy en un paradigma para las empresas, las personas y los países, debido a que su aplicación exige la convergencia múltiple de la ciencia, la tecnología y la innovación (C&T+I). La Industria 4.0 se forjó entre los años 2011 y 2015 en Alemania y fue reconocida en el World Economic Forum (WEF, 2015).

No obstante, esta Cuarta Revolución no es más que la acelerada dinámica de los procesos de ciencia y tecnología protagonizada por la comunidad científica internacional, pero en específico por los llamados actualmente “países desarrollados”, liderados por la OECD. De modo que a la Industria 4.0 le preceden tres revoluciones, donde han estado presentes el conocimiento (ciencia), la tecnología y la empresa (el trabajo). La Primera Revolución Industrial ocurrió en Inglaterra, entre 1760 y 1840, a través de una transformación económica, social y tecnológica en donde la máquina de vapor y la mecanización fueron protagonistas. Esta revolución fue de gran transcendencia, a razón de que por medio de ella se pasó de una economía rural, fundamentada en la agricultura y el comercio, a una economía diferente, de características urbanas, con una industrialización empresarial mecanizada.

Igualmente, le prosigue la Segunda Revolución Industrial, cuyo protagonista fue Estados Unidos, entre los años 1840 y 1870, con la invención del motor a combustión y la energía eléctrica. Sus efectos más directos fueron los automóviles y el uso intensivo de la electricidad, a su vez, ambos aceleraron el desarrollo industrial y las economías globales. En ese contexto, es destacable el uso de combustibles, como el petróleo y el gas, que permitieron que los nuevos medios de transporte fueran protagonistas. Pueden servir de ejemplo el automóvil, el avión y las nuevas máquinas a vapor. Además, la invención del teléfono y la radio marcaron hitos históricos.

Posteriormente, el advenimiento de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), entre las décadas de 1960-1970, dio origen a la Tercera Revolución del conocimiento, la tecnología y la industria. Esta Tercera Revolución señala como protagonista a dos estadounidenses: Steve Jobs y Stephen Gary Wozniak, creadores de Apple. Su trabajo, así como el de muchos otros genios de la informática, promovió la apropiación masiva de las computadoras personales (PC) y la creación de la agencia ARPA (Advance Research Project Agency) que sirvió de vanguardia para el diseño y la creación de Internet.

Con base en lo anterior, las TIC pueden ser consideradas como la base material y conceptual de la Industria 4.0 (Quiroga-Parra et al., 2022). En la I4.0 se da una integración de las diferentes tecnologías en un sistema, con los contextos físicos de las máquinas, el ciberespacio y el hombre trabajador (Rupp et al., 2021). El rol de las TIC es ciertamente la integración de todo (múltiples contextos tecnológicos-virtuales-materiales y humanos) en un sistema de relativa facilidad de comprensión y manejo. Ciertamente, la multiplicidad de ese proceso de integración hace que este paradigma parezca muy complejo.

Es así como de la empresa tradicional se está pasando a una empresa con capacidad de integrar todos sus procesos productivos internos, la cadena logística de valor con los proveedores y clientes en el contexto local y en el global. Autores como Rupp et al. (2021) han postulado una definición de la I4.0, desde la integración de los sistemas Cyber Physical necesarios, haciendo uso de las TIC y el internet de las cosas (IoT) con la *Cloud Computing*, el Big Data y la inteligencia artificial (IA), para formar una fabricación inteligente, interrelacionada en tiempo real en la cadena de valor.

Algunas de las tecnologías más utilizadas en la I4.0 en las empresas son: TIC, Sistemas ciberfísicos (CPS), internet de las cosas (IoT), interfaz hombre-máquina (HMI), Big Data (BD), sistema de ejecución de fabricación (MES), radiofrecuencias (RFID), robótica colaborativa, inteligencia artificial (IA), gemelo digital (DT), ciberseguridad, computación en la nube (CC), redes de sensores inalámbricos (WSN), realidad aumentada (AR), drones, simulación, realidad virtual (VR), plataformas colaborativas (CP), ambientes virtuales 3D y fabricación aditiva 3D (AM) (Helu et al., 2016; Lu et al., 2020; Cinar et al., 2019; Qi y Tao, 2018 y Tao et al., 2021).

Las tecnologías digitales y la Industria 4.0 pueden ayudar a las empresas pequeñas y a las emergentes a tomar de estas tecnologías las ventajas características y aprovechar una parte importante de los equipos originales tradicionales, haciendo uso del concepto de digitalización, fabricación inteligente y computación en la nube. Entonces, parece posible cerrar la brecha entre las grandes y pequeñas empresas de la mayoría de las industrias, logrando mantener la ventaja competitiva y elevando los niveles de calidad y productividad (Garetti et al., 2012; Schleich et al., 2017; Moiceanu y Paraschiv, 2022).

3.2. La fabricación inteligente o smart manufacturing

En concordancia con lo expuesto en un apartado previo, se puede afirmar que las TIC son el fundamento conceptual, tecnológico y material tanto de la Industria 4.0 como de smart manufacturing y de los sistemas ciberfísicos, jugando estas un rol relevante en los sistemas de fabricación (Quiroga-Parra et al., 2022). Dada la importancia de estas tecnologías para las empresas de Colombia y América Latina, este capítulo las describe, de forma sucinta, como un aporte a la industria de la región, de los países, que más temprano que tarde deben protagonizar estos procesos, dados los altos niveles de competitividad internacional que se avecinan. Las denominadas tecnologías avanzadas, como los sistemas ciberfísicos (CPS), la inteligencia artificial (IA), el internet de las cosas (IoT), el internet industrial (II), blockchain (BCH), Smart Manufacturing System (SMS), los gemelos digitales y muchas otras, han hecho que las empresas y los países inicien procesos de transformación tecnológica de modo acelerado con el propósito de poder competir en los mercados internacionales altamente exigentes (Qu et al., 2019). Este es el caso de China, Alemania y Estados Unidos, seguidos por muchos otros, para quienes la estrategia es convertir a la manufactura en una serie de procesos inteligentes de fabricación con altos indicadores de rendimiento.

De hecho, para los sistemas de fabricación, la I4.0 o Cuarta Revolución Industrial es ciertamente una nueva etapa tecnológica de máximas expectativas, cuyas características centrales son la capacidad de responder rápidamente a la competencia internacional y la personalización de los productos. Esta tecnología reviste una enorme importancia para algunos países desarrollados, que la han tomado como estrategia

propia de liderazgo nacional y con una visión prospectiva internacional. Así, por ejemplo, en China la estrategia se denomina “China 25-30”; en Estados Unidos, “fabricación inteligente”; y en Corea del Sur, *manufacturing innovation 3.0* (Kang et al., 2016; Qu et al., 2019).

Dentro de los procesos de SMS, la cadena de suministros de las empresas juega un papel importante en todo su contexto. Esta es en sí misma un entorno heterogéneo que posee múltiples propósitos. La idoneidad de los procesos es un elemento relevante que requiere niveles óptimos de confiabilidad para asegurar la alta calidad de los productos fabricados. Uno de los pocos factores que garantizan bajos niveles de desviación estándar en la calidad es la digitalización de los procesos, minimizando los errores humanos (Wilding, 1998). Así mismo, esta debe estar presente tanto en la planificación (Serrano-Ruiz et al., 2021) como en la misma programación de la producción (Pinedo, 2012). De hecho, desde los aportes de Gantt, Knoeppel y Coes, señalados por McKay (1999), especialmente con las TIC, muchos otros aportes relevantes se han generado, incluyendo el de Serrano-Ruiz et al. (2021), con los gemelos digitales.

3.3. La evolución de la fabricación inteligente (smart manufacturing)

Más allá de la fabricación inteligente, en inglés “smart manufacturing”, se encuentran los sistemas de fabricación inteligente (SMS). En general, la manufactura inteligente dio sus inicios con el advenimiento de las TIC. Se pueden destacar cuatro periodos en su fase de desarrollo, los años 1970, 1990, 2010 y del 2014 a la fecha. En estos cuatro periodos se produjeron eventos destacables. Primero, en la década 1960-1970, se dio el nacimiento de las tecnologías de computación, simbolizadas en el computador personal (PC), que dio origen a la masificación de su uso; esto se suma al inicio de la manufactura integrada por computador. El segundo evento, en los años 1990, fue la integración de la tecnología informática, el pensamiento Lean y la inteligencia artificial (IA); así mismo, comenzó la integración del cliente a los procesos de manufactura y surgió la fabricación inteligente. La tercera fase se abrió paso en el 2010, en donde surgieron el sistema ciberfísico (CPS), la computación en la nube (CC), Big Data (BD), internet de las cosas (IoT), la AI 2.0, la realidad aumentada (AR), la realidad virtual (VR), y el blockchain; también se genera la sostenibilidad y la participación del cliente, y emerge el sistema de fabricación inteligente (SMS). La fase

cuarta se consolida con el reconocimiento de la Industria 4.0, como la Cuarta Revolución Industrial, entre los años 2011-2015, y como una filosofía-estrategia-tecnológica, en donde se destacan las tecnologías habilitadoras, los nuevos modelos de negocio y el paradigma de fabricación (Coalition SML, 2011; Qu et al., 2019).

Los SMS son sistemas dinámicos inteligentes avanzados que facilitan la agilidad en la manufactura de productos, proporcionando respuestas rápidas a la demanda de nuevos productos por parte de los clientes y optimizando el tiempo de producción y la cadena de redes de suministros. Estas plataformas integran la cadena de suministros, las operaciones productivas, los productos terminados, los sistemas comerciales, los centros de distribución y los clientes (Coalition SML, 2011). Técnicamente, desde la perspectiva de la comunicación y la interconexión, el uso de sensores y de las TIC proporciona la información de la captura de datos (Big Data), que facilitan los procesos de IoT y el CPS (Zheng et al., 2018). En el sistema, los datos se muestran de manera ubicua en entornos de Big Data, facilitando el análisis predictivo, la planificación, programación y control de los procesos de manufactura. Igualmente, de modo predictivo los datos proveen el suministro de materiales, la fabricación, el control de calidad, la evaluación de riesgos y el diagnóstico de fallas. Cuando una empresa posee el interés de iniciar el proceso de transformación hacia la Industria 4.0 debe considerar algunos aspectos relevantes: primero, definir los objetivos deseados; segundo, establecer los requisitos funcionales; tercero, determinar los requisitos tecnológicos; y, finalmente, asentar los requisitos comerciales (Qu et al., 2019).

En relación con el primer punto del objetivo, si bien es cierto que no existe precisión en la definición de SMS, este proceso se puede alcanzar con aproximaciones relevantes definidas desde el principio. En consecuencia, el desarrollo de objetivos estratégicos es importante en la fase de diseño del SMS, aspecto que se puede concretar alrededor del software del controlador y del equipo de fabricación, que puede estar habilitado con sensores, como sugieren Bititci et al. (2021).

3.4. La estructura tecnológica de la empresa inteligente

Los procesos de diseño e implementación de la empresa inteligente sugieren la integración digital de todos los recursos de la empresa, desde las diferentes perspectivas. Eso puede incluir el sistema financiero

y de costos. La Tabla 3.1 expone una de las primeras aproximaciones conceptuales de la fabricación inteligente en un sistema digital autónomo. La primera columna presenta los requerimientos del sistema; la segunda señala el tipo de tecnología o conocimiento requerido; y la tercera contiene el elemento conceptual del proceso.

Tabla 3.1
Estructura de requerimientos de smart manufacturing

Requerimientos SMS	Tipo tecnología / conocimiento	Concepto
Objetivos clave	Valor sostenible	Valor económico, valor social, valor medio ambiente
	Consortio ganar-ganar	Proveedores, comunidad, fabricantes
Función	Autodetección	Detección de estado cognitivo
	Autoadaptación	Detección de anomalías Adaptación
	Autoorganización	Reconfiguración Balanceo de carga
	Autodecisión	Predicción y pronósticos Optimización
Tecnologías emergentes	Big Data	Generación de conocimiento y creación de valor Predicción y detección de anomalías Toma de decisiones precisas y oportunas
	CPS	Comunicación en tiempo real Interacción y comunicación Computación
	IoT	Interconexión Sincronización y optimización en tiempo real
	Computación en la nube	Computación de alto rendimiento Plataforma / distribución de recursos
	Inteligencia artificial	Predicción de fallas mecánicas Predicción de la vida útil restante
	Realidad aumentada	Compartición de conocimiento

Requerimientos SMS	Tipo tecnología / conocimiento	Concepto
	Realidad virtual	Mejora de la satisfacción del usuario
	Impresión 3D	Impresión bajo demanda, fácil de mantener e implementar
	Blockchain	Inmutabilidad, antifalsificación
	Gemelos digitales	Representación digital de un producto ya existente
Negocios	Planeación de negocios y logística	Planeación y control, garantía de desempeño, diseño y mejora
	Administración de operaciones	Análisis de fabricación, gestión de la cadena de suministro
	Control	Gestión de la calidad, máquinas inteligentes y robótica avanzada

Nota. Elaboración propia con datos de Qu et al. (2019).

Otro de los componentes importantes del SMS es el nivel físico, llamado también capa física del SMS. En este contexto, a nivel general, se encuentran los siguientes elementos tecnológicos: los sensores, equipos logísticos inteligentes, dispositivos de almacenamiento y comunicación, equipos celulares móviles, pantalla de visualización, máquinas inteligentes y robótica. De hecho, los niveles físicos son considerados requisitos esenciales, incluyendo las células inteligentes y los agentes múltiples. Estas últimas están equipadas con elementos como los actuadores y las tecnologías de comunicación, los sensores, los equipos de robótica, el medidor inteligente y la misma máquina inteligente. No obstante, otras infraestructuras tecnológicas pueden conectarse entre sí. Esto último, normalmente se hace a través de nuevos módulos inteligentes, que son conectados al sistema central mediante el uso del bluetooth y del Wi-Fi. Siempre que se adaptan nuevos módulos al sistema, se logra que los elementos y procesos de producción se vuelvan más inteligentes.

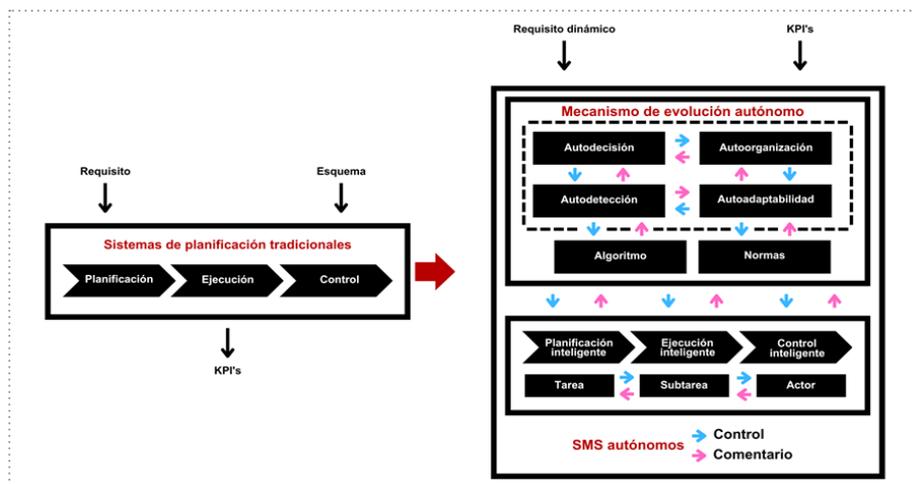
El software y los sistemas operativos inteligentes son dos de los elementos centrales del SMS. Así mismo, el dispositivo inteligente está compuesto por el funcionamiento y la decisión inteligente. Aun cuando todos funcionan integrados, como un sistema, elementos como

RFID y GPS cumplen funciones logísticas especiales en el rastreo de los materiales y el proceso de despacho de los productos en la logística interna y externa de la empresa. Aspecto este que proporciona información interna y externa hacia los clientes. Así mismo, es preciso señalar que el sistema físico del SMS presenta ciertas características o atributos, como la adaptabilidad, usabilidad, reconfiguración, capacidad de interconexión y autonomía (Qu et al., 2019).

De su parte, la Figura 3.1 describe en el lado izquierdo la manufactura tradicional que se utiliza hoy en día, con su respectivo indicador clave de desempeño, en inglés *Key Performance Indicator (KPI)*¹¹. La sección derecha expone una aproximación al diseño de un SMS en Industria 4.0.

Figura 3.1

De la manufactura tradicional a la fábrica inteligente de SMS



Nota. Qu et al. (2022).

Según lo observado, pasar de la fabricación tradicional mecanizada a la manufactura automatizada y sistematizada requiere que los mecanismos tradicionales evolucionen hacia la SMS, esto es, a unas dinámicas de manejo autónomo. Esto se logra encapsulando los mecanismos

11 El KPI es el indicador de rendimiento de un proceso productivo. Existen KPI para las diferentes áreas de la empresa. Sirven para señalar si los procesos están logrando los objetivos esperados y se expresan en porcentaje.

de aprendizaje automático mediante algoritmos matemáticos. Se trata de un proceso que se consigue mediante la ingeniería de producción, haciendo uso de la gestión de producción ajustada, de las TIC (en una función multidisciplinaria con la ingeniería del software) y de los algoritmos matemáticos. La integración de los subprocesos y procesos en un SMS conduce a lograr importantes niveles de KPI.

3.5. Los gemelos digitales en smart manufacturing

El contexto de producción o manufactura ha estado en las empresas desde el surgimiento de la Primera Revolución Industrial. Sin embargo, dicho concepto ha ido evolucionando de forma dinámica a través del tiempo y de la introducción de nuevos conocimientos y tecnologías. Inicialmente, en las empresas de manufactura este conocimiento ha estado marcado en los términos de planeación, organización, ejecución y control. Con el uso intensivo de las TIC, el concepto de *producción ajustada* ha empezado a tener cierto nivel de protagonismo. Este concepto introduce otros nuevos conocimientos que facilitan esencialmente la planificación de la producción, pero ante todo el fortalecimiento de la eficiencia del sistema. Lo anterior se ve reflejado en el diseño de la línea de producción.

De hecho, en el caso de las líneas de flujo de una sola pieza (en inglés “single piece flow”, SPF) buscan principalmente una distribución homogénea del tiempo de entrega de la producción (PLT), en inglés *production lead-time*. Lo anterior evita los cuellos de botella y, a su vez, el atraso de la entrega de otros trabajos diferentes que no dependen de su ubicación en el cronograma de producción (Barni et al., 2020). El balanceo de una línea de producción se torna en ocasiones complejo. No obstante, haciendo uso de nuevos conocimientos como, por ejemplo, el *heijunka-box*¹², las ventajas pueden ser transferidas a líneas de producción mixta.

¹² Heijunka es un concepto creado por Toyota. Su objetivo es lograr flujos de producción dinámicos y suavizar la producción. La llamada caja heijunka es la herramienta específica. Es utilizada para obtener los objetivos de heijunka. La caja está dividida en casilleros rectangulares, donde las columnas representan el tiempo. Las líneas del cronograma están divididas en turnos, días o semanas. El sistema trabaja con las tarjetas kanban, se disponen en la caja heijunka, con el propósito de dar una representación visual de las siguientes series de producción a realizar. Ver: https://en.wikipedia.org/wiki/Heijunka_box

Así, el uso del concepto de “producción ajustada”, mencionado en párrafos anteriores, contribuye a que el tiempo de finalización (en inglés “time to completion”, TTC) para trabajos homogéneos dependa de la cantidad de trabajo y del tiempo optimizado (Rüttimann, 2017). Cuando se trata de manejo de la calidad del producto y calidad del servicio para el cliente, algunos elementos se vuelven fundamentales para el proceso, es el caso de los costos de producción, los tiempos de entrega y los requisitos del cliente. Estos aspectos, igualmente, repercuten en el área de ventas y cumplen un rol protagónico en una empresa, específicamente, en la búsqueda del equilibrio entre los requisitos. Es más, estos requisitos se integran directamente en los llamados indicadores de rendimiento (en inglés “Key Performance Indicators”, KPI).

Con los acelerados cambios tecnológicos en el contexto global, primero de las TIC y posteriormente de la Industria 4.0, el uso de estos recursos tecnológicos está jugando un rol protagónico, en términos de calidad y de competitividad. Es así como la integración de los elementos y requisitos descritos en las tecnologías de la Industria 4.0, de la Cuarta Revolución Industrial, conducen a la fabricación inteligente, que busca integrar los procesos de fabricación, comercialización y gestión administrativa, todo esto en términos de mejoramiento de la eficiencia y la productividad. Lo que se pretende es reducir los costos en todo el sistema y disminuir los desperdicios (Moiceanu y Paraschiv, 2022). Puede concluirse que el mundo está pasando aceleradamente de los llamados procesos de fabricación de bienes, con el uso de maquinaria, equipos, herramientas tradicionales y mano de obra, hacia la fabricación digital y los procesos de fabricación inteligente (Kritzinger et al., 2018).

De hecho, la integración de los diferentes procesos de la empresa se hace viable tanto de manera horizontal como vertical a través de la tecnología digital (Moiceanu y Paraschiv, 2022). Los conceptos de sostenibilidad y el uso de activos son elementos relevantes que se utilizan para clasificar la fabricación inteligente (Moiceanu y Paraschiv, 2022). En efecto, la fabricación inteligente puede ser aplicada en múltiples empresas; sin embargo, es importante conocer con profundidad elementos como la tecnología, los factores que lo componen y las características de este tipo de sistema. A los SMS es preciso integrar permanentemente nuevos actores tecnológicos. Este es el caso de los

gemelos digitales surgidos recientemente, entre los años 2002-2010, como una nueva tecnología. La Tabla 3.1 contiene y describe esta tecnología brevemente.

Los gemelos digitales son hoy parte de los sistemas de smart manufacturing dentro del diseño de ingeniería de productos y, así mismo, parte de la Industria 4.0. Esta tecnología es atribuida a Michael Grieves, de la Universidad de Michigan, en el año 2002; fue diseñada inicialmente por la NASA y utilizada en sus procesos tecnológicos. Las primeras aplicaciones prácticas del gemelo digital se dieron allí en la NASA, en el año 2010, para mejorar la simulación de modelos físicos de naves espaciales (Negri, 2017). Es importante considerar que el diseño de los productos inicia desde el dibujo elaborado a mano o el dibujo asistido por computador, pasando por el proceso de la ingeniería de sistemas basada en modelos, hasta la integración al sistema de manufactura inteligente.

Los gemelos digitales se obtienen usando modelos de la dinámica de sistemas y estructuras de datos. Se pueden crear copias digitales de sistemas físicos (Stark y Damerou, 2019). Esto se logra mediante la sincronización del sistema virtual y el sistema físico. De hecho, el gemelo digital brinda las posibilidades de obtención del diseño, la operación y la optimización de los sistemas. En concreto, un gemelo digital es equivalente a una representación tipo digital de un producto existente (Barni et al., 2020). Las investigaciones han venido demostrando que, en los casos de pérdidas de rendimiento de las máquinas, debido a los tiempos de ciclo que tienen alta variabilidad, las bajas pueden compensarse haciendo uso de un gemelo digital.

En ingeniería de producto, el proceso de modelado y la misma simulación de sistemas de producción facilitan la predicción de la eficiencia o rendimiento del sistema para un escenario específico. Los flujos de materiales de los sistemas lineales de producción, pero igualmente de los ramificados, pueden ser modelados haciendo uso de simuladores discretos, en inglés “discrete event”, de sigla DE (Banks et al., 2005; Robinson, 2004; Cai et al., 2017). Para su implementación, es necesario disponer de una lista de eventos, igualmente, de una lista de objetos móviles (MO) y de una lista de estaciones. Los MO pueden ser representados por información o por materiales. De su parte, la lista de

estaciones representa el estado de las máquinas y de las celdas disponibles dentro del sistema modelado (Nutaró, 2011; Cheng et al., 2018). Para realizar la simulación “DE” en el contexto de los sistemas de producción el mercado ofrece varias herramientas útiles, tales como DDD-Simulator¹³, PlantSimulation (Siderska, 2016) y AnyLogic (Chidester et al., 1999; Borshchev, 2013; Barni et al., 2020).

El modelado se propone aprovechar la combinación de las herramientas Lean que puedan existir, dado que estas proporcionan la solidez y el nivel de inteligencia superior del gemelo digital. A su vez, esas herramientas Lean proveen la flexibilidad solicitada en el sistema. Así, por ejemplo, Barni et al. (2020) presentan casos específicos y evidencias concretas haciendo uso de los equipos en el lugar de trabajo de la fábrica, en donde implementaron un gemelo digital en una línea de producción, haciendo uso de un simulador “DE” que estaba sincronizado con un sistema físico de producción (Physical production system, PPS). El papel de PPS fue suministrar los datos de producción al gemelo digital instalado. A su vez, la tarea del gemelo digital fue proporcionar la información requerida al operador, para facilitarle la terminación (a tiempo) de los trabajos de producción, sobre todo de los que estaban en la cola del proceso productivo.

En síntesis, el gemelo digital es una tecnología habilitadora de simulación de modelos físicos del diseño y fabricación de productos. Esta forma parte de la Industria 4.0 y se encuentra integrada hoy a los SMS de la fabricación inteligente. Es uno de los recursos tecnológicos más sobresalientes, porque facilita el diseño y fabricación de productos, pero, a su vez, eleva los niveles de aseguramiento de los estándares de calidad de los productos recibidos por el cliente en el nuevo contexto de la Cuarta Revolución del conocimiento, la innovación, la tecnología y la industria.

3.6. Los retos de la gestión de las organizaciones en la era de la Industria 4.0

Hemos sido testigos de los enormes avances que ha traído consigo la Cuarta Revolución Industrial en la producción de bienes y servicios.

13 El simulador *domain-driven design* (DDD) o diseño guiado por el dominio, posee un software con una estructura de terminologías y prácticas para la toma de decisiones durante el proceso de diseño.

Las organizaciones se han visto obligadas a cambiar rápidamente sus esquemas de pensamiento y sus estructuras, para responder a los desafíos que impone la implementación de este tipo de tecnologías. Recordemos que las industrias han ido evolucionando, desde la Primera Revolución Industrial, que supuso la creación de las fábricas impulsadas por máquinas de vapor; en ese momento, la administración hizo sus primeras manifestaciones mediante el control de la producción. Durante la Segunda Revolución Industrial, con el crecimiento de las fábricas y el surgimiento de la producción en serie, apareció la teoría clásica de la administración; posteriormente, se dio paso al surgimiento de las teorías de la organización que, además, acompañaron también a la Tercera Revolución Industrial.

Hoy en día se aplican las teorías organizacionales, pero también han aparecido múltiples investigaciones en estudios organizacionales en la era de la Cuarta Revolución Industrial. Eso implica, por parte de los investigadores, la observación de múltiples fenómenos que deben ser vistos a partir de métodos no racionalistas, como se hacía en el pasado. Se infiere, entonces, el reconocimiento del ser humano dentro de las diferentes organizaciones, no como una pieza más de la gran máquina, tal como se concebía hace algunas décadas, sino como un actor fundamental de la organización, ya que sin su papel no sería posible que se dieran los procesos. En ese marco general surgen diferentes desafíos, en lo que se refiere a la administración, debido al gran volumen de información y de nuevo conocimiento que surge, en el que participan individuos, entendidos como ciudadanos digitales, y empresas que se encuentran soportadas en la tecnología (Barreto et al., 2019).

4. Conclusiones

Este capítulo ha expuesto cómo la literatura sobre la Industria 4.0 ha dado paso a la comprensión, en primer lugar, del rol de la Industria 4.0 dentro de la Cuarta Revolución Industrial. En segundo lugar, a la apropiación de la estructuración teórica del proceso de fabricación inteligente y al rol de la tecnología de gemelo digital dentro de smart manufacturing. Como tercer aspecto, desde la perspectiva empresarial, el capítulo puede ser visto como un aporte a las empresas para comprender, apropiarse e iniciar una aplicación de la Industria 4.0, a razón

de que su puesta en marcha y ejecución no reviste mayor complejidad. Algunas de las conclusiones más relevantes son las siguientes.

El término de Industria 4.0 se muestra aún en un proceso de construcción conceptual y de alcance. Las discusiones académicas no señalan aún un acuerdo en el rol de cada una de las tecnologías que la conforman y de su aplicación. Un aspecto similar se observa en el alcance de la industria en cada uno de los sectores productivos. Se convoca a los académicos para que sigan indagando sobre estas tecnologías y sobre los múltiples beneficios que conlleva su implementación.

La fabricación inteligente (smart manufacturing) presenta avances notables y un desarrollo estructurado, desde la perspectiva teórica. El análisis de la literatura recogida señala cómo esta tecnología se encuentra en aplicación en las empresas de los países que han profundizado sobre el tema, y lo han asumido como un reto de productividad y competitividad empresarial, como es el caso de Alemania, China y Estados Unidos, entre otros. Lo anterior demuestra las enormes ventajas que se alcanzarían a nivel empresarial, regional y nacional, si hubiese decisiones de fondo, por parte del Estado, para hacer parte de esa revolución a través del uso de estas tecnologías en todos los aspectos de la vida de nuestro país y nuestras regiones tan diversas.

El desarrollo de la fabricación inteligente está mostrando logros significativos, como la disminución de los costos de fabricación, el mejoramiento en el diseño, la fabricación y los tiempos de entrega del producto, la optimización de la calidad y una mayor relación digital y comercial con los clientes, incrementando el capital relacional de las empresas. Tal como lo confirman Ynzunza et al. (2017), para que las organizaciones alcancen niveles de mejoras sustanciales en sus procesos de manufactura será necesario el éxito en la integración de la cadena de valor, de forma tal que se logren redes de colaboración que ayuden con la creación de sistemas flexibles y reconfigurables para que puedan soportar estas nuevas formas de fabricación. Finalmente, el estudio muestra teóricamente que la Industria 4.0, en general, y la fabricación inteligente y los gemelos digitales, en específico, son los impulsores principales en la Cuarta Revolución Industrial, debido a que poseen una capacidad real para integrar el mundo físico y el digital.

Es necesario generar una revolución en la educación, tal como se ha hecho en las industrias, para que el capital humano de la era de la Industria 4.0 tenga la posibilidad de acceder a herramientas tecnológicas y lograr competencias digitales a partir del conocimiento de las nuevas necesidades del mercado y las industrias. Las organizaciones actuales requieren personas con liderazgo y autonomía en la toma de decisiones basadas en el análisis de datos y en el uso eficiente de procesos digitalizados. A su vez, la manufactura inteligente requiere de personas capacitadas y de una administración que haga frente a los nuevos retos de esta era, así como de las nuevas formas de hacer negocios, tal como lo afirman Barreto et al. (2019).

6. Referencias

- Banks, J., Carson, J., y Barry, L. (2005). *Discrete-Event System Simulation* (4ta ed.). Pearson.
- Barni, A., Pietraroia, D., Züst, S., West, S., y Stoll, O. (2020). Digital Twin Based Optimization of a Manufacturing Execution System to Handle High Degrees of Customer Specifications. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 4(4), 109. <https://doi.org/10.3390/jmmp4040109>
- Barreto, J. A., Alemán, H. G., y García, R. V. (2019). Desafíos y Transformaciones en las Organizaciones y la Gestión Humana en el marco de la Revolución 4.0. *Gestión de las Personas y Tecnología*, 12(36), 22-32.
- Bititci, U., Suwignjo, P., y Carrie, A. S. (2021). Strategy management through quantitative modelling of performance measurement systems. *International Journal of Production Economics*, 69(1), 15-22. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(99\)00113-9](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(99)00113-9)
- Borshchev, A. (2013). *The Big Book of Simulation Modeling: Multithread Modeling with AnyLogic* 6. AnyLogic. <https://doi.org/10.1002/9781118762745.ch12>

- Cai, Y., Starly, B., Cohen, P., y Lee, Y.-S. (2017). Sensor data and information fusion to construct digital-twins virtual machine tools for cyberphysical manufacturing. *Procedia Manufacturing*, (10), 1031-1042. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.094>
- Cinar, Z. M., Nuhu, A. A., Zeeshan, Q., y Korhan, O. (2019). Digital twins for Industry 4.0: a review. En *Global Joint Conference on Industrial Engineering and Its Application Areas* (pp. 193-203). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42416-9_18
- Cheng, Y., Zhang, Y., Ji, P., Xu, W., Zhou, Z., y Tao, F., (2018). Cyber-physical integration for moving digital factories forward towards smart manufacturing: a survey. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(1), 1209-1221. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2001-2>
- Chidester, A., Hinch, J., Mercer, T. C., y Schultz, K. (1999). Recording automotive crash event data. En: *Transportation Recording: 2000 and beyond*. International Symposium on Transportation Recorders.
- Feeney, A., Frechette, S., y Srinivasan, V. (2015). A portrait of an ISO STEP tolerancing standard as an enabler of smart manufacturing systems. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 15(2). <https://doi.org/10.1115/1.4029050>
- Garetti, M., Rosa, P., y Terzi, S. (2012). Life Cycle Simulation for the design of Product–Service Systems. *Computers in Industry*, 63(4), 361-369. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2012.02.007>
- Helu, M., Libes, D., Lubell, J., Lyons, K., y Morris, K. C. (2016). Enabling smart manufacturing technologies for decision-making support. *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (Vol. 50084). American Society of Mechanical Engineers. <https://doi.org/10.1115/DETC2016-59721>
- Kang, H., Lee, J., Choi, S., Kim, H., Park, J., Son, J., Kim, B. y Noh, S. (2016). Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions. *International journal of precision engineering and manufacturing-green technology*, 3(1), 111-128. <https://doi.org/10.1007/s40684-016-0015-5>

- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., y Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016-1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
- Lu, Y., Liu, C., Kevin, I., Wang, K., Huang, H., y Xu, X. (2020). Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, (61), e101837. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101837>
- McKay, K. N., y Wiers, V. C. (1999). Unifying the theory and practice of production scheduling. *Journal of Manufacturing Systems*, 18(4), 241-255. [https://doi.org/10.1016/S0278-6125\(00\)86628-5](https://doi.org/10.1016/S0278-6125(00)86628-5)
- Moiceanu, G., y Paraschiv, G. (2022). Digital Twin and Smart Manufacturing in Industries: A Bibliometric Analysis with a Focus on Industry 4.0. *Sensors*, 22(4), e1388. <https://doi.org/10.3390/s22041388>
- Negri, E. (2017). Una revisión de los roles de Digital Twin en sistemas de producción basados en CPS. *Fabricación de Procedia*, (11), 939-948. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198>
- Nutaro, J. (2011). *Building software for simulation: theory and algorithms, with applications in C++*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470877999>
- Pinedo, M. L. (2012). *Scheduling* (Vol. 29). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2361-4>
- Qi, Q., y Tao, F. (2018). Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison. *Lee Access*, (6), 3585-3593. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2793265>
- Qu, Y. J., Ming, X. G., Liu, Z. W., Zhang, X. Y., y Hou, Z. T. (2019). Smart manufacturing systems: state of the art and future trends. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103(9), 3751-3768. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03754-7>

- Quiroga-Parra, D., Torrent, J., De Lllano, J., Pinedo J., Montoya, C, Hernández, B., Caicedo, D., Gómez, C., Hernández, E., y Arturo, E. (2022). *Las nuevas fuentes de productividad: perspectiva América Latina*. Fondo Editorial - Ediciones Universidad Cooperativa de Colombia. <https://doi.org/10.16925/9789587603583>
- Quiroga-Parra, D., Torrent-Sellens, J., y Murcia-Zorrilla, C. (2017a). Uses of ICT in Latin America: a characterization. *Revista chilena de ingeniería*, 25(2), 289-305. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052017000200289>
- Quiroga-Parra, D., Torrent-Sellens, J., y Murcia-Zorrilla, C. (2017b). Las tecnologías de la información en América Latina, su incidencia en la productividad: un análisis comparado con países desarrollados. *Dyna*, 84(200), 281-290. <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n200.60632>
- Robinson, S. (2004). *Simulation: The Practice of Model Development and Use*. John Wiley & Sons.
- Rocha-Jácome, C., Carvajal, R.G., Chavero, F.M., Guevara-Cabezas, E., y Hidalgo Fort, E. (2022). Industry 4.0: A Proposal of Paradigm Organization Schemes from a Systematic Literature Review. *Sensors*, 22(1), 66. <https://doi.org/10.3390/s22010066>
- Rüttimann, B. G. (2017). *Lean Compendium Introduction to Modern Manufacturing Theory*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58601-4_1
- Rupp, M., Schneckenburger, M., Merkel, M., Börret, R., y Harrison, D. K. (2021). Industry 4.0: A Technological-Oriented Definition Based on Bibliometric Analysis and Literature Review. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 7(1), 68. <https://doi.org/10.3390/joitmc7010068>
- Serrano, J., Mula, J., y Poler, R., (2021). Smart Digital Twin for ZDM-based job-shop scheduling. *IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT*, 510-515. <http://dx.doi.org/10.1109/MetroInd4.0IoT51437.2021.9488473>

- Schleich, B., Anwer, N., Mathieu, L., y Wartzack, S. (2017). Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP Annals*, 66(1), 141-144. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.040>
- Siderska, J. (2016). Application of Tecnomatix Plant Simulation for Modeling Production and Logistics Processes. *Business, Management and Economics Engineering*, 14(1), 64-73. <https://doi.org/10.3846/bme.2016.316>
- Smart Manufacturing Leadership Coalition. (2011, June). Implementing 21st century smart manufacturing. En *Workshop Summary Report* (pp. 1-36). Smart Manufacturing Leadership Coalition.
- Stark, R., y Damerou, T. (2019). *Digital Twin*. En S. Chatti y T. Tolio (Eds.), *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7_16870-1
- Tao, F., Anwer, N., Liu, A., Wang, L., Nee, A. Y., Li, L., y Zhang, M. (2021). Digital twin towards smart manufacturing and industry 4.0. *Journal of manufacturing systems*, (58), 1-2. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.12.005>
- Wilding, R. (1998). The supply chain complexity triangle: Uncertainty generation in the supply chain. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 28(8), 599-616. <https://doi.org/10.1108/09600039810247524>
- World Economic Forum - WEF. (2015). *The Global Competitiveness Report (2015-2016)*. WEF. https://www3.weforum.org/docs/gcr/2015-2016/Global_Competitiveness_Report_2015-2016
- Ynzunza, C., Izar, J., Bocarando, J., Aguilar, F., y Larios, M. (2017). El entorno de la Industria 4.0: Implicaciones y perspectivas futuras. *Conciencia Tecnológica*, (54).
- Zheng, P., Wang, H., Sang, Z., Zhong, R. Y., Liu, Y., Liu, C., Mubarak, K., Yu, S., y Xu, X. (2018). Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 13(2), 137-150. <https://doi.org/10.1520/SSMS20180036>

