

Review of the meaning of the Industry 4.0 concept and the challenges associated with information technologies and systems

Revisión del significado del concepto de Industria 4.0 y los desafíos asociados a las tecnologías y sistemas de información

Mariela Rico¹, Ma. Laura Taverna¹, Ma. Rosa Galli^{1,2}, Ma. Laura Caliusco^{1,2}

¹Centro de Investigación y Desarrollo de Ingeniería en Sistemas de Información (CIDISI) – Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Santa Fe
Lavaise 610 – 3000 – Santa Fe – Argentina

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Avellaneda 3657 – 3000 Santa Fe - Argentina.

{mrico,mtaverna}@frsf.utn.edu.ar, mrgalli@santafe-conicet.gov.ar,
mcaliusco@frsf.utn.edu.ar

***Abstract.** Industry 4.0 is a strategic initiative introduced by the German government whose objective is the transformation of manufacturing and industrial connectivity, through digitization and exploitation of the potential of new technologies. Thus, an Industry 4.0 production system is flexible and allows individualized and personalized products. The aim of this paper is to present and facilitate the understanding of the Industry 4.0 concepts, the technologies that make it possible, its main characteristics, and to discuss some of the challenges that arise from the perspective of decision-making systems, interoperability, and the management of large volumes of data.*

***Keywords:** Industry 4.0; enabling technologies; challenges.*

***Resumen.** Industria 4.0 es una iniciativa estratégica introducida por el gobierno alemán cuyo objetivo es la transformación de la fabricación y la conectividad industrial, a través de la digitalización y la explotación de las potencialidades de las nuevas tecnologías. Así, un sistema de producción de Industria 4.0 es flexible y permite productos individualizados y personalizados. El objetivo de este trabajo es presentar y facilitar la comprensión de los conceptos de la Industria 4.0, las tecnologías que la posibilitan, sus principales características y discutir algunos de los desafíos que se plantean desde la perspectiva de los sistemas de toma de decisiones, la interoperabilidad y la gestión de grandes volúmenes de datos.*

***Palabras clave:** Industria 4.0; tecnologías habilitadoras; desafíos.*

1. Introducción

La automatización e informatización, iniciadas en la tercera revolución industrial, sentaron las bases de una transformación radical en todos los órdenes de la vida. Con la aparición y diseminación de Internet y los rápidos avances en tecnologías como los sistemas ciberfísicos, Internet de las cosas y los servicios, el análisis de grandes volúmenes de datos y la computación en la nube hoy es posible llevar la industrialización al siguiente nivel, reconocido como la cuarta revolución industrial o Industria 4.0 [Colombo y otros 2017].

Según un estudio elaborado por el Departamento de Políticas del Parlamento Europeo [Smit y otros 2016], Industria 4.0 describe la organización de procesos de producción basados en tecnología y dispositivos que se comunican entre sí de manera autónoma a lo largo de la cadena de valor: un modelo de la fábrica “inteligente” del futuro donde los sistemas controlados por computadora monitorean los procesos físicos, crean una copia virtual del mundo físico y toman decisiones descentralizadas basadas en mecanismos de auto-organización.

La literatura alemana, desde que empezó a acuñar el concepto de Industria 4.0, lo introdujo como un discurso de política industrial y tecnológica que apunta a institucionalizar los sistemas de innovación [Reischauer 2018]. La posibilidad de implementar esta visión de una industria “inteligente” se debe tanto a la significativa caída en el precio de los sensores, los microcontroladores y las mini-computadoras con elevada potencia de cálculo, como los avances que se fueron dando en la digitalización y la conectividad mediante el uso intensivo de Internet [Casalet 2018; Klingenberg y do Vale Antunes 2017; Szalavetz 2019].

En este sentido, no se trata de un nuevo paradigma, sino de la evolución de los sistemas y tecnologías de la información hacia el funcionamiento sistémico de los componentes que integran la Industria 4.0 [Brixner y otros 2019]. Surge así la necesidad de entender cuáles son las tecnologías de la información que posibilitan la implementación del concepto de Industria 4.0, y plantear los desafíos que se presentan para continuar la evolución de los sistemas y tecnologías de la información comenzada en la década del setenta hacia la nueva revolución tecno-organizacional [Pérez 2009].

Este trabajo se organiza del siguiente modo. En la Sección 2 se presentan los principales conceptos asociados a Industria 4.0; en la Sección 3 se discuten las tecnologías más importantes que posibilitan su implementación y, en la Sección 4, se listan los principios de diseño preponderantes de la Industria 4.0. En la Sección 5 se discuten los principales desafíos desde la perspectiva de los sistemas de información y, en la Sección 6, se presentan las conclusiones.

2. Industria 4.0

El concepto de Industria 4.0 fue utilizado por primera vez en la Feria de Hanover en Alemania, en el año 2011, para referirse a la “fábrica inteligente” como una propuesta para el desarrollo de un nuevo concepto de política económica alemana basado en estrategias de alta tecnología [Mosconi 2015]. Para implementar este concepto es indispensable lograr la conectividad e interoperabilidad entre dispositivos; esta es una

de las características más salientes de la transformación digital aplicada a la industria [Leitão y otros 2016].

El objetivo de esta sección es presentar la arquitectura de la plataforma I4.0, RAMI4.0, y enumerar los principales beneficios de su implementación.

2.1. Modelo de Arquitectura de Referencia para Industria 4.0 “RAMI4.0”

El propósito fundamental de Industria 4.0 es facilitar la cooperación y colaboración entre objetos con valor para una organización, tanto físicos como intangibles [Deutsches Institut für Normung 2016]. Esto implica la necesidad de representar y conectar virtualmente dichos objetos o “activos”. En este sentido, el Modelo de Arquitectura de Referencia para Industria 4.0 “RAMI4.0” está destinado a crear reglas de descripción digital de un activo a lo largo de toda su vida útil, desde su desarrollo, producción y uso hasta su disposición, y de los cambios de valor asociados, como así también todos los aspectos relevantes para él. Un componente Industria 4.0 representa virtualmente un activo, usando información estructurada.

RAMI4.0 proporciona una descripción de los elementos principales de un activo utilizando un modelo de niveles que consta de tres ejes (Figura 1).

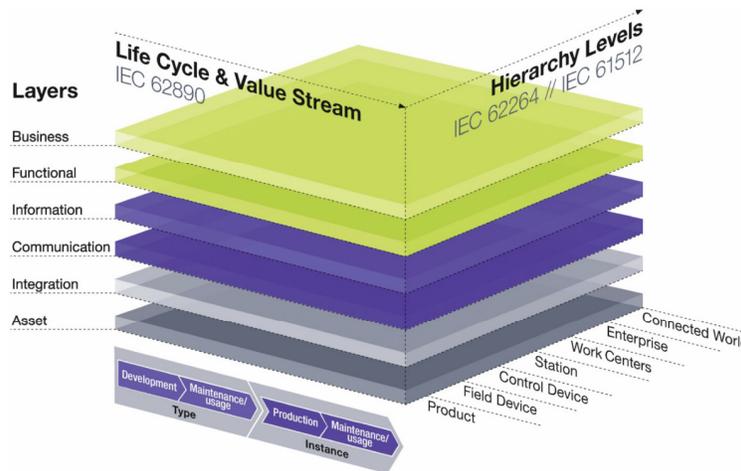


Figura 1. Modelo arquitectónico de referencia Industria 4.0 (RAMI 4.0) [Deutsches Institut für Normung 2016]

El eje vertical “Capas” es el de la arquitectura, con seis capas para describir las propiedades estructurales de un activo o combinación de activos. Para todos los componentes, se considera la funcionalidad de información y comunicación, sus partes constitutivas y estructura. Por ejemplo, si se trata de una máquina importan sus cables, accionamiento lineal y su estructura mecánica. Su información debe estar disponible como una "representación virtual", para lo cual hay una capa de activos en la parte inferior del modelo con la capa de integración arriba, facilitando así su digitalización. La capa de comunicación se ocupa de los protocolos y la transmisión de datos y archivos, la capa de información contiene los datos relevantes, la capa funcional todas las funciones necesarias (definidas formalmente) y la capa de negocio mapea los procesos de negocio relevantes.

El eje horizontal izquierdo de la Figura 1, “Ciclo de vida y flujo de valor”, permite rastrear los activos a lo largo de su vida útil. Este eje se basa en el estándar IEC 62890, Gestión del ciclo de vida de sistemas y productos, utilizados en la medición, control y automatización de procesos industriales.

El eje horizontal derecho se denomina “Niveles de jerarquía”, y representa las diferentes jerarquías técnicas y/u organizativas dentro de las fábricas o instalaciones a las cuales se asignan los activos. Este eje se basa en las normas DIN EN 62264, la serie de estándares internacionales para sistemas de control y TI empresariales, y DIN EN 61512-1, que define modelos de referencia para el control de lotes tal como se utilizan en las industrias de procesos y la terminología que ayuda a explicar las relaciones entre estos modelos y términos.

2.2. Principales Beneficios

Realizar una implementación de la noción de Industria 4.0 en una empresa no es una tarea trivial y presenta diferentes desafíos [Contreras y otros 2017]. Sin embargo, las tecnologías asociadas al concepto de Industria 4.0 (que se describen a continuación), posibilitan que las personas, el hardware de fabricación avanzada, y el software sofisticado, colaboren eficazmente para autonomizar procesos de fabricación y ofrecen diversas capacidades para [Al-Jaroodi y otros 2018]:

1. Automatizar más tareas con dispositivos y máquinas adaptables y personalizables para alcanzar una producción flexible.
2. Incorporar nuevos procesos y tecnologías de fabricación.
3. Automatizar tareas de detección, control y toma de decisiones, disminuyendo la interacción humana con las máquinas.
4. Mejorar los procedimientos de medición y seguimiento utilizando dispositivos de precisión.
5. Mejorar los tiempos de respuesta para un control más preciso de los procesos.
6. Recopilar y almacenar datos en tiempo real en todas las áreas de la cadena de suministro, incluyendo producción y logística, de forma continua.
7. Elevar las capacidades de análisis, utilizando los datos recopilados y modelos avanzados de análisis de datos.
8. Introducir algoritmos inteligentes que utilicen los datos disponibles para permitir al sistema tomar decisiones autónomas.
9. Reducir la dependencia de los seres humanos para el seguimiento y la toma de decisiones.
10. Proporcionar mejores operaciones de mantenimiento y reparación basadas en análisis predictivo de datos operativos.
11. Crear entornos de trabajo más seguros y cómodos.
12. Permitir la creación y utilización de nuevos modelos de negocio en fabricación.
13. Facilitar la integración de diferentes tecnologías, modelos, sectores y organizaciones de la industria manufacturera.

3. Pilares Tecnológicos de la Industria 4.0

A partir de la década de 1970, la industria se fue automatizando de manera incremental en comparación con los avances que transformaron la tecnología de la información, las

comunicaciones móviles y el comercio electrónico. Actualmente, la incorporación de nueva tecnología digital a las industrias está provocando cambios radicales en los procesos de negocio de las organizaciones, logrando mayor rapidez, flexibilidad y eficiencia a la hora de elaborar productos con mayor calidad y costos reducidos. Además, modifican el perfil de la fuerza laboral y afectan la competitividad de las empresas [Rübmann y otros 2015].

Varios autores coinciden en señalar que entre los avances tecnológicos más importantes asociados a Industria 4.0 se encuentran los siguientes [Patnaik 2020; Sharma and Jain 2020; Kumar and Nayyar 2020]:

- Internet es la tecnología central que permite conectar recursos, información, objetos y personas en red para crear el Internet de las cosas (IoT) y los servicios [Federal Ministry for Economic Affairs and Energy n.d.]. Esta comunicación trasciende las fronteras de una organización, permitiendo conectar también con redes de proveedores y clientes.
- Los sistemas ciberfísicos embeben software en un objeto físico [Sharma y Jain 2020]. Se componen de sistemas cibernéticos y físicos. Los primeros son la suma de unidades lógicas y sensoras, mientras que los segundos son la suma de unidades actuadoras. Gracias a la capacidad de interactuar y expandir las capacidades del mundo físico utilizando el poder de cómputo, las tecnologías de comunicación y los mecanismos de control, los sistemas ciberfísicos permiten ciclos de retroalimentación, mejorando los procesos de producción y el apoyo óptimo a las personas en sus procesos de toma de decisión. Incluyen tecnologías como la identificación por radiofrecuencia (RFID), que permiten una identificación única, y sistemas de localización en tiempo real, como GPS y otros. Al utilizar la tecnología de sensores, los sistemas ciberfísicos pueden recibir datos físicos directos y convertirlos en señales digitales. Pueden compartir esta información y acceder a los datos disponibles que la conectan a redes digitales, formando así un Internet de las cosas [Galar Pascual y otros 2020].
- IoT se puede definir como una red en la que los sistemas ciberfísicos cooperan entre sí a través de esquemas de direccionamiento únicos [Hermann y otros 2016]. Es decir, refiere a una red heterogénea de objetos naturales o artificiales a los que se les puede asignar un protocolo de Internet (IP) [Stankovic 2014]. Los sistemas ciberfísicos y el IoT permiten fusionar el mundo físico con el mundo virtual [Kumar y Nayyar 2020].
- Internet de Servicios (IoS) permite a los proveedores ofrecer sus servicios a través de Internet. El IoS consta de participantes, una infraestructura de servicios, modelos de negocio y los propios servicios. Los servicios son ofrecidos y combinados en servicios de valor agregado por varios proveedores; se comunican tanto a los usuarios como a los consumidores y acceden a ellos a través de varios canales [Buxmann y otros 2009].
- Big data permite almacenar, procesar y analizar de manera eficiente un gran volumen de datos. Concretamente, big data significa recopilación masiva de datos que contienen gran información [Mohanta y otros 2020]. Este concepto se define principalmente por 5 dimensiones [Mohanta y otros 2018]: Volumen, que refiere a la gran cantidad de datos que se generan; variedad, que referencia a los

diferentes tipos de datos estructurados y no estructurados, generados a partir de distintas fuentes de datos; velocidad, que alude a la rapidez con la que se generan y analizan los datos para su posterior procesamiento; veracidad, que refiere a la autenticidad de los datos; y valor, que alude a la antigüedad de los datos generados con el fin de mejorar la precisión de la información creada con un análisis adecuado. Las redes inteligentes permiten combinar y analizar datos sobre procesos de producción y el estado de un producto para descubrir, por ejemplo, cómo elaborar un producto de manera más eficiente. El análisis de datos es la base para modelos y servicios de negocio completamente nuevos.

- Computación en la nube surgió como un paradigma informático que provee diversos servicios de computación a través de una red, como la asignación dinámica de memoria y el intercambio de recursos, lo que permite a los usuarios usar los recursos de la nube según sus necesidades, incluidos hardware, software y recursos de infraestructura [Kumar y Nayyar 2020]. Está compuesto por tecnologías que facilitan el almacenamiento y procesamiento de grandes cantidades de datos con alto rendimiento en términos de velocidad, flexibilidad y eficiencia. La computación en la nube permite compartir información en tiempo real a través de múltiples sistemas y redes, asegurando datos para el sistema de producción, incluidas las funciones de monitoreo y control, y mejorando la calidad de las operaciones [Capestro y Kinkel 2020]. Existen tres formas de implementar computación en la nube: una nube pública, una nube privada o una nube híbrida [Mell y Grance 2011].
- Integración horizontal del flujo de datos entre socios, proveedores y clientes, conectando a redes de valor dispersas que se pueden administrar en tiempo real, desde el momento en que se realiza un pedido hasta la logística de salida, e integración vertical dentro de la organización, desde el desarrollo hasta el producto final. Fusiona el mundo virtual y el real. El resultado es un sistema en el que todos los procesos están completamente integrados [Galar Pascual y otros 2020].
- Los robots avanzados pueden resultar muy útiles para tareas como el mantenimiento predictivo. Pueden monitorear las condiciones de las máquinas, realizar análisis comparativos y diagnosticar y predecir fallas [Kumar y Nayyar 2020]. Además, estos robots son capaces de interactuar entre sí y con los seres humanos y pueden aprender cosas eventualmente [Patnaik 2020]. También se usan robots avanzados para ciertas etapas de la producción, control de calidad y fabricación aditiva, entre otras.
- Seguridad cibernética es la rama de la tecnología informática que brinda protección a los sistemas informáticos contra robos o daños al hardware, software o información y contra la interrupción de los servicios prestados [Kumar y Nayyar 2020]. La intensiva conectividad y el mayor uso de protocolos de comunicación hacen que los sistemas sean más vulnerables y estén expuestos a varios tipos de amenazas. Esto induce a la adopción de protocolos de seguridad cibernética para brindar canales de comunicación confiables y seguros y sistemas de gestión de autenticidad esenciales [Patnaik 2020].
- Métodos de fabricación aditiva, como la impresión 3D, que se utiliza principalmente para crear prototipos y producir componentes individuales. También, para producir pequeños lotes de productos personalizados que ofrecen

ventajas de construcción, como diseños complejos y livianos [Galar Pascual y otros 2020].

- Los sistemas basados en realidad aumentada admiten una variedad de servicios, como la selección de piezas en un almacén y el envío de instrucciones de reparación a través de dispositivos móviles. Otra aplicación es la formación virtual, por ejemplo, para entrenar al personal sobre operaciones peligrosas [Galar Pascual y otros 2020].
- La simulación de conceptos y modelos o prototipos de máquinas, productos y procesos con diferentes configuraciones de parámetros permite afinarlos y optimizarlos en el mundo virtual antes de implementarlos físicamente y también mejorar la calidad [Patnaik 2020; Galar Pascual y otros 2020].

4. Principios de Diseño de la Industria 4.0

Una revisión bibliográfica determinó como componentes clave de Industria 4.0 a los sistemas ciberfísicos, Internet de las cosas y los servicios, y fábricas inteligentes, donde los sistemas ciberfísicos se comunican a través de IoT y ayudan a las personas y las máquinas en la ejecución de sus tareas [Hermann y otros 2016]. En base a estos componentes, distintos autores han identificado diferentes principios de diseño de la Industria 4.0 [Belman-Lopez y otros 2020]. En este apartado se enumeran los más relevantes desde la perspectiva de los sistemas de información.

4.1. Conectividad

La transformación más profunda se produce por la digitalización y la posibilidad de conectar en tiempo real a todos los actores sociales mediante Internet. La conectividad alcanza a consumidores, empresas, gobierno, organizaciones de la sociedad civil, y es posible mediante dispositivos (smartphones, computadoras, sensores, dispositivos vestibles, etc.), sistemas informáticos y plataformas digitales (e-commerce, e-government, redes sociales). Pero la novedad de esta época es que la conectividad alcanza también a los objetos, permitiendo la conexión en varios sentidos: máquina-máquina (M2M), máquina-producto, máquina-humano, producto-humano [Garnero 2018].

4.2. Interoperabilidad

La interoperabilidad es un habilitador fundamental de la Industria 4.0 que afecta a todos los componentes clave [Hermann y otros 2016]. Los sistemas ciberfísicos y las personas necesitan entablar una comunicación real, donde a cada pieza de información compartida se le asigne la correcta interpretación. Los proveedores deben poder ofrecer sus servicios de manera comprensible tanto para máquinas como seres humanos. Considerando el modelo RAMI 4.0, se puede advertir la necesidad de lograr la interoperabilidad a lo largo de sus tres ejes constitutivos.

El término interoperabilidad se aplica en distintos ámbitos. En este sentido, el Marco Iberoamericano de Interoperabilidad, en línea con la definición dada por la Comisión Europea, recoge para el ámbito de la administración electrónica la siguiente definición: “La habilidad de organizaciones y sistemas dispares y diversos para interactuar con objetivos consensuados y comunes y con la finalidad de obtener beneficios mutuos. La interacción implica que las organizaciones involucradas

compartan información y conocimiento a través de sus procesos de negocio, mediante el intercambio de datos entre sus respectivos sistemas de tecnología de la información y las comunicaciones” [Criado y otros 2010].

Esta definición es aplicable también a Industria 4.0. La capa de activos está formada por un conjunto heterogéneo de dispositivos, los cuales deben ser capaces de describirse a sí mismos de una manera que sea comprensible tanto por las máquinas como por las personas, fomentando así una descripción semántica implícita o explícita de sí mismos [Lelli 2019].

4.3. Virtualización

La virtualización refiere a que el mundo real de una planta de producción es capturado por sensores, creando una imagen virtual de la misma. Esta imagen virtual, denominada “gemelo digital”, se conecta a modelos de simulación, aplicaciones de análisis predictivos y software de toma de decisiones. El objetivo de contar con un “gemelo digital” es mejorar la agilidad, la flexibilidad y reducir costos simulando los datos reales de un proceso, producto o servicio con el fin de prevenir errores, modificar parámetros y predecir comportamientos. Con la virtualización se entrelaza 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 debe impactar sobre el mundo virtual y viceversa [Rolle y otros 2020].

4.4. Descentralización

La descentralización refiere a la capacidad de los sistemas dentro de una fábrica inteligente de tomar decisiones en forma autónoma. Esta descentralización no necesita ser física, pero sí lógica. La toma de decisiones descentralizada tiene que estar soportada por la capacidad de acceso a datos, los cuales pueden estar almacenados en forma centralizada en una nube [Xu y otros 2018].

El principio de descentralización también se refiere a la autonomía otorgada a las personas como colaboradores en la Industria 4.0. Las personas tienen mayor libertad para identificar aspectos, analizar parámetros y tomar decisiones siempre que sea necesario, con el objetivo del bien común para su área de actividad en la industria así como para su plenitud [Pereira Carvalho y Cazarini 2020].

4.5. Modularidad

El principio de modularidad implica sistemas modulares que pueden adaptarse de manera flexible a los requisitos cambiantes del mercado, reemplazando o expandiendo módulos de producción individuales, lo que hace que agregar o quitar módulos sea mucho más fácil. Así, estos sistemas modulares pueden ajustarse de manera muy simple en caso de fluctuaciones estacionales o cambios en las necesidades de producción, como en el caso de incluir nuevas tecnologías [Pereira Carvalho y Cazarini 2020].

4.6. Capacidad en tiempo real

Las nuevas tecnologías permiten recopilar cantidades masivas de datos procedentes de diferentes áreas y un reto es combinarlos para obtener información procesable, en tiempo real. Esta información permite descentralizar la toma de decisiones, y pasar de

modelos preventivos a modelos predictivos que pueden aplicarse en todas las áreas de la organización: en la cadena de suministros (ajustando los tiempos en la provisión de insumos y minimizando la necesidad de inventarios); en los sistemas de detección de fallas de los equipos (eliminando las paradas preventivas y anticipando desperfectos); y en el sistema de logística (anticipando el requerimiento de insumos y productos terminados, logrando eficiencia en su distribución y entrega) [Basco y otros 2018].

Por otro lado, para decisiones a largo plazo, las estrategias de toma de decisiones tradicionales, utilizadas hasta ahora, se ven potenciadas gracias a contar con datos que se espera sean de mayor calidad.

4.7. Orientación al servicio

La orientación al servicio refiere a la capacidad de una industria para trasladar el nuevo valor generado al cliente en forma de nuevos servicios o servicios mejorados con la explotación de nuevos modelos de negocio colaborativos.

La orientación a servicios en el contexto de la Industria 4.0 abre nuevas formas de crear valor y cómo emplearlo. Por ejemplo, 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 la Industria 4.0 [Palo y otros 2019].

Hay un cambio de enfoque de desarrollos tipo producto-servicio (enfoque centrado en el producto) al enfoque servicios a través del producto (enfoque orientado a la solución). Debido a este cambio de paradigma, aparecen nuevos desarrollos tecnológicos como el Internet de Servicios, 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 [Thoben y otros 2017].

5. Análisis de los Principales Desafíos

Con el avance de las tecnologías que se describieron en la Sección 3 y los principios de diseño de la Sección 4, se puede decir que las industrias tienen acceso a mayor cantidad de datos y capacidades para su procesamiento, y que muchos de los datos, por estar almacenados en la nube, pueden ser obtenidos y manipulados en tiempo real. Estas tecnologías, como pilares que posibilitan la Industria 4.0, plantean una serie de desafíos para el diseño e implementación de los sistemas de información industriales.

En esta sección se analiza un conjunto de desafíos desde la perspectiva de los sistemas de toma de decisiones, la interoperabilidad y la gestión de grandes volúmenes de datos, considerados ejes fundamentales para una implementación exitosa.

5.1. Desafíos desde la perspectiva de los sistemas de toma de decisión

Un ecosistema organizacional es un sistema formado por la interacción de una comunidad de organizaciones y su entorno, que cruza las líneas tradicionales de la

industria [Laudon y Laudon 2018]. Por tal motivo, las organizaciones han ampliado su visión más allá de la cadena de suministro para considerar en sus decisiones el ecosistema del que forma parte. En un ecosistema industrial complejo que comprende una multitud de actores, con funciones diferentes y decisiones que tomar, generalmente se requiere una multitud de gemelos digitales para brindar servicios de soporte de decisiones a estos actores. Cómo combinar y modelar múltiples tipos de gemelos digitales en ecosistemas de manufactura y/o servicios industriales complejos para crear valor para el soporte a las decisiones es un campo que recién se está investigando [Meierhofer y otros 2021; Agnusdei y otros 2021].

Los procesos de toma de decisión de las empresas, tanto a nivel estratégico como operativo, deben tomar ventaja de la mayor disponibilidad de datos, conectividad y capacidad de análisis.

A nivel operativo, la disponibilidad de gran cantidad de datos en tiempo real que ofrecen las nuevas tecnologías de digitalización de las industrias y, en general, de la cadena de suministro, conduce a modificar las estrategias de toma de decisiones en los distintos puntos del proceso de negocio. Esto requiere el desarrollo de nuevos paradigmas de gestión de producción y operaciones que cumplan con los requisitos de mayor flexibilidad y resiliencia y reducción de costos [Guo y otros 2021]. Cómo aprovechar las tecnologías de la Industria 4.0 y la sincronización en la toma de decisiones para desarrollar nuevos paradigmas de gestión es aún un desafío.

Datos de demanda y de disponibilidad de equipamiento a tiempo real requiere aumentar la flexibilidad y la adaptabilidad de la producción para permitir la reducción del horizonte de planificación. El diseño de los sistemas de producción debe ser flexible de modo que permitan considerar la fabricación de productos innovadores [Rossit y otros 2021]. Estos sistemas deben ser capaces de desarrollar productos personalizados y esta personalización del producto impactará directamente sobre la programación de la producción. Es necesario desarrollar nuevos modelos de planificación y control de la producción, lo suficientemente simples para poder manipular gran cantidad de información proveniente de los distintos sectores de la empresa en forma ágil y eficaz.

A nivel estratégico, el análisis de grandes volúmenes de datos provenientes tanto de los talleres de producción como de los clientes y los procesos intermedios involucrados, debe permitir la toma de decisiones a mediano y largo plazo en forma colaborativa de manera de optimizar objetivos globales e individuales. Es necesario definir nuevos criterios de decisión que surjan del análisis del efecto de las acciones a lo largo de todo el ciclo de vida del producto y que contemplen los efectos en todo el ecosistema.

La toma de decisiones basada en modelos y datos requiere seleccionar cuáles son los datos importantes y necesarios para tomar nuevas y mejores decisiones, utilizar machine learning y otras herramientas de inteligencia artificial para analizarlos, aprender, identificar patrones y tomar decisiones con mínima intervención humana construyendo modelos analíticos.

5.2. Desafíos desde la perspectiva de gestión de grandes volúmenes de datos

La toma de decisiones basadas en datos (DDDM, Data Driven Decision Making) es el proceso de recopilación y análisis de datos relevantes para respaldar las decisiones

[Provost y Fawcett 2013]. Sobre los datos se pueden generar métricas, estadísticas e indicadores clave de rendimiento (Key Performance Indicators, KPIs) y requieren un monitoreo constante debido a la dinámica de sus cambios. A partir del análisis de los datos se genera información para extraer su significado, el cual debe estar a disposición de las personas adecuadas con mayor rapidez.

La captura y análisis de datos en tiempo real favorece la trazabilidad permanentemente actualizada, lo que se traduce directamente en beneficios para el cliente a lo largo de toda la cadena de suministro. Por lo tanto, el mayor desafío que enfrentan las empresas de manufactura tradicionales ante la Industria 4.0 es la forma en que piensan y gestionan grandes volúmenes de datos. El dato se considera el activo más precioso [Mamad 2018]. El gran desafío en este sentido es la gobernanza de datos.

Con esta visión, se puede decir que cuando se va a implementar una solución de Industria 4.0, la empresa debe pensar primero en los datos que harían más eficiente su trabajo. En este contexto, existen tres estrategias posibles: de arriba hacia abajo, de abajo hacia arriba y una combinación de ambas. Si se piensa en una estrategia de arriba hacia abajo, una empresa debe empezar por centrarse en definir claramente su misión y visión. A partir de ellas, definir objetivos generales, objetivos específicos, elaborar un análisis estratégico, y finalmente tomar decisiones sobre las estrategias y acciones empresariales a llevar a cabo. En este paso se conjugan todos los pasos anteriores. De este modo, se examinan los valores de la empresa que forman la visión, se verifica el enunciado de la misión o de la razón de ser de la empresa y se consideran los datos obtenidos del análisis tanto interno como externo. Si se piensa en una estrategia de abajo hacia arriba, una empresa debe centrarse en los componentes que pueden generar datos y crear información y conocimiento a partir de ellos que puedan ayudar a la toma de decisiones. En una estrategia mixta, se comienza definiendo la misión, visión, objetivos, etc., y los componentes que pueden proveer datos para luego vincularlos entre sí. Aquí juegan un rol central las herramientas de visualización de la información que proporcionan una forma accesible de ver y comprender tendencias, valores atípicos y patrones de datos [Valencia-Duque y otros 2020].

Uno de los retos más importantes es cómo describir semánticamente los datos que se gestionan dentro de una organización de forma tal de lograr tanto la interoperabilidad vertical como horizontal a nivel de datos entre los componentes de una Industria 4.0. Las tecnologías emergentes habilitan la interconexión entre los componentes, el desafío es lograr la interoperabilidad evitando las ambigüedades. El dato debe ser contextualizado y su semántica explícitamente definida [Rico y otros 2015].

5.3. Desafíos desde la perspectiva de la interoperabilidad

La adopción de Industria 4.0 significa evolucionar hacia empresas digitales. Una empresa digital es aquella que aplica datos e información con el objetivo de mejorar sus productos, procesos y servicios. Para ello, se requieren modelos o gemelos digitales, bucles de retroalimentación e integración entre unidades funcionales [Nardello 2019].

En términos de RAMI 4.0, los gemelos representan digitalmente los activos de la capa de activos. Esta digitalización exige coherencia de la información a lo largo de la cadena de creación de valor en todos los ejes de RAMI.

Cuando se trata de evaluar cómo comprende un sistema de información una expresión que proviene de otro sistema, existen varios niveles de interoperabilidad posibles [Euzenat 2001]. A los niveles de codificación, léxico y sintáctico se los refiere como interoperabilidad sintáctica, es decir, la capacidad de dos o más sistemas de comunicarse e intercambiar datos. Por su parte, a los niveles semántico y semiótico se los asocia con interoperabilidad semántica, esto es, la facultad de atribuir a cada pieza de conocimiento importada la correcta interpretación. “Correcta interpretación” significa que el receptor utiliza la información transmitida en el mismo sentido según lo previsto por el emisor.

El aumento de la estandarización en diferentes niveles de la arquitectura de sistemas de información contribuye al logro de la interoperabilidad, sobre todo sintáctica. Internet como estándar para la interconexión entre sistemas; ODBC y JDBC para la conectividad de base de datos; OPC UA y MQTT como protocolos de comunicación en IoT; HTML para documentos disponibles en la Web y XML para todas las formas de datos accesibles vía Web, son algunos de los estándares definidos.

Sin embargo, para establecer un intercambio de información eficiente, la interoperabilidad tiene que ser provista tanto a nivel técnico como informativo. Con el fin de lograr la interoperabilidad a nivel semántico, el significado de la información que se intercambia tiene que ser entendido a través de los sistemas.

Alcanzar un acuerdo sobre cómo expresar los aspectos relevantes de la realidad y cómo formalizarlo es un problema compartido, y el principio de reutilización proporciona una buena base para promover la interoperabilidad [Lelli 2019]. En pos de establecer un conjunto de conceptos clave para describir dispositivos, la comunidad de la web semántica está utilizando los estándares propuestos por el W3C para expresar el significado de los datos, mientras que los profesionales prefieren adoptar soluciones ligeras como schema.org, que proporciona vocabularios compartidos para describir entidades, relaciones entre entidades y acciones. Esto último lleva a pensar en la necesidad de soluciones fáciles de implementar y computacionalmente ligeras.

No obstante, los conflictos provocados por la heterogeneidad semiótica dificultan la interoperabilidad. Este tipo de heterogeneidad se ocupa de cómo las personas interpretan a las entidades. Generalmente, las personas interpretan a las entidades con respecto a su uso, aunque dichas entidades tengan exactamente la misma interpretación semántica [Euzenat y Shvaiko 2013]. Este tipo de heterogeneidad es difícil de detectar automáticamente y aún más difícil de resolver.

En pos de abordar el problema de la heterogeneidad semántica en los sistemas de información globales, varios autores han propuesto la combinación de contexto y ontología [Bouquet y otros 2004; Firat y otros 2005; Rifaieh and Benharkat 2006; Rico y otros 2015]. Sin embargo, este sigue siendo un tema abierto. En este sentido se requiere proponer soluciones a la interoperabilidad semiótica que se integren a las ya existentes que soportan la interoperabilidad sintáctica y semántica.

6. Conclusiones

El avance en el desarrollo de los sistemas físico-cibernéticos, eje central de la Industria 4.0, permite integrar las tecnologías operacionales con las tecnologías de la información

y la comunicación en tiempo real. Es posible conectar de manera automática máquinas con máquinas y máquinas con productos, integrando las distintas áreas de la unidad productiva. Esta situación genera un impacto no sólo sobre la gestión interna de la empresa, sino también sobre la administración de los sistemas de información que dan soporte a dicha gestión. En este trabajo se presentan algunos de los actuales desafíos en el área de sistemas de información y toma de decisiones, señalando los aspectos a considerar en los nuevos desarrollos.

Dado que el concepto de Industria 4.0 es relativamente nuevo, es necesario crear métodos y metodologías que conduzcan a desarrollar sistemas de información orientados a servicios, intensivos en datos y que tengan en cuenta la interoperabilidad semántica y semiótica de los mismos.

La toma de decisiones en cada empresa debe aprovechar la disponibilidad de datos generados internamente y aportados por proveedores y clientes. Deben definirse nuevas estrategias de toma de decisión sincrónica y asincrónica que conduzcan a lograr los objetivos propios pero que a su vez contribuyan a alcanzar las metas impuestas al ecosistema en el que participa. Esto hace necesario establecer estrategias de integración dinámicas y flexibles de los sistemas.

Por otro lado, lograr la interoperabilidad semántica y, fundamentalmente, semiótica, no solo de los datos sino de todos los activos que componen la “fábrica inteligente”, con soluciones fáciles de implementar y computacionalmente ligeras, sigue siendo un desafío.

Además, con el avance de las tecnologías se puede disponer de grandes volúmenes de datos que son recogidos por distintos sensores, sumado a datos provenientes de diferentes sistemas de información. En este contexto, las organizaciones deben resolver cómo gestionar dicho cúmulo de datos para convertirlos en información de valor para la toma de decisiones. Es decir, se requieren de nuevas formas de gestionar, controlar y analizar los datos para transformarlos en un activo empresarial estratégico, no sólo desde un punto de vista tecnológico sino también procedimental.

En consecuencia, es necesario un cambio de estrategia que aproveche los beneficios de las nuevas tecnologías en pos de mejorar los objetivos de cada empresa, que a su vez contribuyan a la satisfacción de las necesidades del ecosistema del cual forma parte.

Referencias

- Agnusdei, G. P., Elia, V. and Gnoni, M. G. (2021). Is Digital Twin Technology Supporting Safety Management? A Bibliometric and Systematic Review. In *Applied Sciences*, 11(6):2767. <https://doi.org/10.3390/app11062767>
- Al-Jaroodi, J., Mohamed, N. and Jawhar, I. (2018). A service-oriented middleware framework for manufacturing industry 4.0. In *ACM SIGBED Review*, 15(5), pages 29–36. ACM.
- Basco, A. I., Beliz, G., Coatz, D. and Garnero, P. (2018) “Industria 4.0: Fabricando el futuro”, Banco Interamericano de Desarrollo, <http://dx.doi.org/10.18235/0001229>

- Belman-Lopez, C. E., Jiménez-García, J. A. and Hernández-González, S. (2020). Análisis exhaustivo de los principios de diseño en el contexto de Industria 4.0. In *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 17(4), pages 432–447. CEA.
- Bouquet, P., Giunchiglia, F., van Harmelen, F., Serafini, L. and Stuckenschmidt, H. (2004). Contextualizing ontologies. In *Journal of Web Semantics*, 1(4), pages 325–343. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.websem.2004.07.001>
- Brixner, C., Isaak, P., Mochi, S. and Ozono, M. (2019) “Industria 4.0: ¿Intensificación del paradigma tic o nuevo paradigma tecnoorganizacional?”, Centro Interdisciplinario de Estudios en Ciencia, Tecnología e Innovación, <http://www.ciecti.org.ar/dt17-industria-4-0-intensificacion-del-paradigma-tic-o-nuevo-paradigma-tecnoorganizacional/>
- Buxmann, P., Hess, T. and Ruggaber, R. (2009). Internet of services. In *Business & Information Systems Engineering*, 5, pages 341–342. Springer.
- Capestro, M. and Kinkel, S. (2020) “Industry 4.0 and knowledge management: A review of empirical studies”, In: Knowledge management and industry 4.0. New paradigms for value creation, Edited by Marco Bettiol, Eleonora Di Maria and Stefano Micelli, Springer Nature Switzerland AG, p. 19-52.
- Casalet, M. (2018) “La digitalización industrial: Un camino hacia la gobernanza colaborativa. Estudios de casos”, CEPAL, <https://www.cepal.org/es/publicaciones/44266-la-digitalizacion-industrial-un-camino-la-gobernanza-colaborativa-estudios-casos>
- Colombo, A. W., Karnouskos, S., Kaynak, O., Shi, Y. and Yin, S. (2017). Industrial cyberphysical systems: A backbone of the fourth industrial revolution. In *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 11(1), pages 6–16. IEEE.
- Contreras, J. D., García, J. I. and Pastrana, J. D. (2017). Developing of industry 4.0 applications. In *International Journal of Online Engineering (iJOE)*, 13(10), pages 30–47. Online-Journals.org
- Criado, J. I., Gascó, M. and Jimenez-Gomez, C. (2010) “Bases para una estrategia iberoamericana de interoperabilidad”, CLAD - Cumbre Iberoamericana de Jefes de Estado y de Gobierno, <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4897.8001>
- Deutsches Institut für Normung (2016) “Reference architecture model industrie 4.0 (RAMI4.0)”, <https://www.en-standard.eu/din-spec-91345-reference-architecture-model-industrie-4-0-rami4-0/>
- Euzenat, J. (2001) “Towards a principled approach to semantic interoperability”, In: Proc. IJCAI 2001 workshop on ontology and information sharing, Edited by Asunción Gómez Pérez, Michael Gruninger, Heiner Stuckenschmidt and Michael Uschold, p. 19–25.
- Euzenat, J. and Shvaiko, P. (2013), *Ontology matching*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2nd edition.

- Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. (n.d.) “What is Industrie 4.0?”, Plattform Industrie 4.0, <https://www.plattform-i40.de/PI40/Navigation/EN/Industrie40/WhatIsIndustrie40/what-is-industrie40.html>
- Firat, A., Madnick, S. and Manola, F. (2005) “Multi-dimensional ontology views via contexts in the ECOIN semantic interoperability framework”, In: Contexts and ontologies: Theory, practice and applications, AAAI Press, p. 1–8.
- Galar Pascual, D., Daponte, P. and Kumar, U. (2020), Handbook of Industry 4.0 and SMART systems, Taylor & Francis Group.
- Garnero, P. (2018) “Industria 4.0, un informe sobre este desafío para Argentina”, Instituto para la Integración de América Latina y el Caribe (INTAL), <https://conexionintal.iadb.org/2018/09/03/industria-4-0-fabricando-el-futuro-3/>
- Guo, D., Li, M., Lyu, Z., Kang, K., Wu, W., Zhong, R. Y. and Huang, G. Q. (2021). Synchronoperation in industry 4.0 manufacturing. In *International Journal of Production Economics*, 238, 108171. Elsevier.
- Hermann, M., Pentek, T. and Otto, B. (2016) “Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios”, In: 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), IEEE, p. 3928-3937.
- Klingenberg, C. O. and do Vale Antunes, J. A. (2017) “Industry 4.0: What makes it a revolution?”, In: The 24th EurOMA conference.
- Kumar, A. and Nayyar, A. (2020) “si3-Industry: A sustainable, intelligent, innovative, internet-of-things industry”, In: A roadmap to industry 4.0: Smart production, sharp business and sustainable development, Edited by Anand Nayyar and Akshi Kumar, Springer Nature Switzerland AG, p. 1-21.
- Laudon, K. C. and Laudon, J. P. (2018). Management Information Systems. Managing the Digital Firm, Pearson, 15th edition.
- Leitão, P., Colombo, A. W. and Karnouskos, S. (2016). Industrial automation based on cyber-physical systems technologies. In *Computers in Industry*, 81(C), pages 11–25. Elsevier.
- Lelli, F. (2019). Interoperability of the time of industry 4.0 and the internet of things. In *Future Internet*, 11(36). <https://doi.org/10.3390/fi11020036>
- Mamad, M. (2018). Challenges and benefits of industry 4.0: An overview. In *International Journal of Supply and Operations Management*, 5(3), pages 256–265.
- Meierhofer, J., Schweiger, L., Lu, J., Züst, S., West, S., Stoll, O. and Kiritsis, D. (2021). Digital Twin-Enabled Decision Support Services in Industrial Ecosystems. In *Applied Sciences*, 11(23):11418. <https://doi.org/10.3390/app112311418>
- Mell, P. and Grance, T. (2011) “The NIST definition of cloud computing”, National Institute of Standards and Technology, <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-145.pdf>
- Mohanta, B., Patnaik, S. and Patnaik, S. (2018) “Big data for modelling interactive systems in IoT”, In: 2018 2nd international conference on data science and business analytics (ICDSBA), IEEE, p. 105-110.

- Mohanta, B., Nanda, P. and Patnaik, S. (2020) “Management of V.U.C.A. (Volatility, Uncertainty, Complexity and Ambiguity) using machine learning techniques in industry 4.0 paradigm”, In: *New paradigm of industry 4.0: Internet of things, big data & cyber physical systems*, Edited by Srikanta Patnaik, Springer Nature Switzerland AG, p. 1-24.
- Mosconi, F. (2015), *The New European Industrial Policy*, Routledge, 1st edition.
- Nardello, M. (2019). *Enterprise architecture for digital manufacturing: EA models and an automated EA modelling method to support Industry 4.0 transformation* [Doctoral dissertation, Faculty of Engineering and Science, Aalborg University]. Aalborg University Press.
- Palo, T., Åkesson, M. and Löfberg, N. (2019). Servitization as business model contestation: A practice approach. In *Journal of Business Research*, 104, pages 486–496. Elsevier.
- Patnaik, S. (2020) “Editorial”, In: *New paradigm of industry 4.0: Internet of things, big data & cyber physical systems*, Edited by Srikanta Patnaik, Springer Nature Switzerland AG, p. v-vii.
- Pereira Carvalho, N. G. and Cazarini, E. W. (2020) “Industry 4.0 - What Is It?”, In: *Industry 4.0: Current status and future trends*, Edited by Jesús Hamilton Ortiz, IntechOpen, p. 1-10.
- Pérez, C. (2009). Technological revolutions and techno-economic paradigms. In *Cambridge Journal of Economics*, 34(1), pages 185–202. Oxford Academic.
- Provost, F. and Fawcett, T. (2013). Data Science and its Relationship to Big Data and Data-Driven Decision Making. In *Big Data*, 1(1), pages 51-59. Mary Ann Liebert, Inc.
- Reischauer, G. (2018). Industry 4.0 as policy-driven discourse to institutionalize systemic innovation in manufacturing. In *Technological Forecasting and Social Change*, 132(C), pages 26–33. Elsevier.
- Rico, M., Caliusco, M. L., Chiotti, O. and Galli, M. R. (2015). An approach to define semantics for BPM systems interoperability. In *Enterprise Information Systems*, 9(3), pages 324–347. Taylor & Francis.
- Rifaieh, R. and Benharkat, N. (2006) “From ontology phobia to contextual ontology use in enterprise information systems”, In: *Web Semantics & Ontology*, Edited by David Taniar and Johanna Wenny Rahayu, Idea Group Publishing, p. 115–164.
- Rolle, R. P., Martucci, V. O. and Godoy, E. P. (2020). Architecture for digital twin implementation focusing on industry 4.0. In *IEEE Latin America Transactions*, 18(05), pages 889–898. IEEE.
- Rossit, D. A., Toncovich, A., Rossit, D. G. and Nesmachnow, S. (2021). Solving a flow shop scheduling problem with missing operations in an Industry 4.0 production environment. In *Journal of Project Management*, 6(1), pages 33–44. Growing Science.

- Rübmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Engel, P., Harnisch, M. and Justus, J. (2015) "Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries", The Boston Consulting Group, https://www.bcg.com/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries
- Sharma, A. and Jain, D. K. (2020) "Development of Industry 4.0", In: A roadmap to industry 4.0: Smart production, sharp business and sustainable development, Edited by Anand Nayyar and Akshi Kumar, Springer Nature Switzerland AG, p. 23-38.
- Smit, J., Kreutzer, S., Moeller, C. and Carlberg, M. (2016) "Industry 4.0. Policy Department A: Economic and Scientific Policy", European Parliament, [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/570007/IPOL_STU\(2016\)570007_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/570007/IPOL_STU(2016)570007_EN.pdf)
- Stankovic, J. A. (2014). Research directions for the internet of things. In *IEEE Internet of Things Journal*, 1(1), pages 3–9. IEEE.
- Szalavetz, A. (2019). Industry 4.0 and capability development in manufacturing subsidiaries. In *Technological Forecasting and Social Change*, 145, pages 384–395. Elsevier.
- Thoben, K., Wiesner, S. and Wuest, T. (2017). "Industrie 4.0" and smart manufacturing - A review of research issues and application examples. In *International Journal of Automation Technology*, 11, pages 4–19. Fuji Technology Press.
- Valencia-Duque, J. E., Mera, C. and Sepúlveda, L. M. (2020). Visualización de conjuntos de datos de múltiples instancias. In *RISTI - Revista Iberica de Sistemas e Tecnologias de Informacao*, 2020(39), pages 84–99. AISTI.
- Xu, L. D., Xu, E. L. and Li, L. (2018). Industry 4.0: State of the art and future trends. In *International Journal of Production Research*, 56(8), pages 2941–2962. Taylor & Francis.