



Universidad Nacional de Lomas de Zamora

Tesis Doctoral

**La 4^{ta} revolución industrial y su impacto en la gestión de la calidad:
Procesos, Productos Inteligentes y Calidad 4.0 en la Argentina**

Autor:

Sergio Salimbeni

Director:

Dr. Ing. Andrés Redchuk

Co-Directora:

Dr. Ing. Hilda Rousserie

Facultad de Ingeniería

Buenos Aires, 23 de febrero de 2024

DECLARACIÓN

Esta disertación es el resultado de mi propio trabajo y no incluye nada que sea el resultado del trabajo realizado en colaboración, excepto cuando se indique específicamente en el texto.

No ha sido presentado previamente, en parte o en su totalidad, a ninguna universidad o institución para cualquier grado, diploma u otra especialidad.



Sergio Duilio Salimbeni
DNI 16.131.268

Firma

Fecha: 23 de febrero de 2024

Sergio Duilio Salimbeni
Universidad del Salvador, Facultad de Ingeniería
Universidad de Lomas de Zamora, Facultad de Ingeniería

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todos aquellos que me han acompañado en este apasionante camino, en especial a mi familia, a quienes he privado de compartir momentos valiosos debido a este trabajo. A mis directores y tutores que tanto me han enseñado durante estos años.

Quería agradecer también a la Universidad de Lomas de Zamora, quien me ha brindado esta gran oportunidad. A la Universidad del Salvador, quien me ha formado como profesor e investigador, y la Universidad Tecnológica Nacional, donde me formé como ingeniero y comencé también este apasionante recorrido.

RESUMEN

El entorno industrial ha cambiado sustancialmente durante los últimos años debido a la introducción de nuevos conceptos y tecnologías basados en la 4ª Revolución Industrial. La demanda del mercado se ha sofisticado y las empresas buscan agregar valor para diferenciarse, desde la concepción de una idea hasta el final de la vida útil del producto o servicio brindado. La gestión del ciclo de vida del producto es una de las estrategias utilizadas por los fabricantes para mejorar el desempeño operacional, a través de una combinación de organización, procesos, metodología y tecnología, permitiendo a las empresas agregar valor a sus productos y servicios, obteniendo, de ese modo, una ventaja competitiva. Debido a esto es de vital importancia una Gestión de la Calidad integral, tanto del proceso como del producto, a lo largo de todo el ciclo de vida del flujo de valor, en tiempo real y con información disponible para todos los involucrados en la manufactura y comercialización.

Se aborda en la presente Tesis Doctoral el estudio del impacto de las tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0 en la Gestión de la Calidad a lo largo de todo el ciclo de vida del flujo de valor, incluyendo tanto los procesos como los objetos inteligentes; esta es la denominada Gestión de la Calidad 4.0. Para ello, luego de una extensa revisión bibliográfica, se han realizado 3 estudios cuantitativos a saber: (1) Estado actual de la Industria 4.0 en la Argentina; (2) Barreras de entrada a la Industria 4.0 en la Argentina y (3) Calidad 4.0 en la Argentina. Se han analizado también 3 casos de estudio de la industria manufacturera argentina representativos de algunos de los distintos usos de las nuevas tecnologías habilitadoras en la industria. Para todo lo anterior se ha realizado también entrevistas en profundidad previas a las encuestas.

Palabras clave: Calidad 4.0; Industria 4.0; Ciclo de Vida del Flujo de Valor; RAMI4.0

PRODUCCIÓN CIENTÍFICA DURANTE EL PERÍODO PREDOCTORAL

A continuación se detalla la producción científica del doctorando Sergio Salimbeni en el período predoctoral.

PUBLICACIONES EN CONGRESOS

Salimbeni, S. (2021). Humans and work in the Digital Factory: Designing the work organization. IEOM 2021 – First Asia Pacific Conference on Industrial Engineering and Operations Management. Harbin, China.

Salimbeni, S., Bonacina, M. Mamani, D. (2021). Análisis de viabilidad técnica para el uso de Cobots en pymes manufactureras: un caso de estudio. COINI 2021. XIX COINI 2021 – Congreso Internacional de Ingeniería Industrial – AACINI – UTN FR Buenos Aires.

Salimbeni, S. (2021). Assessment of Industry 4.0 maturity level. EPIEM 2021. IEM Teaching and Research at the Crossroads of Innovation, Digitalisation and Sustainability. Graz. Austria. BWL Publication Series No26. ISBN (e-book) 978-3-85125-827-1. DOI 10.3217/978-3-85125-827-1

Salimbeni, S. Redchuk, A. (2022). Digital Twin for the management of wind power plants. 10th European Conference on Renewable Energy Systems. ECRES 2022. Istanbul, Turkey. ISBN: 978-605-70842-0-0

Salimbeni, S. Rousserie, E. (2022). Digitalisation of a Mineral Water Bottling Plant. EPIEM 2022 – Creating a European IEM Future at the Intersection Innovation Digitalisation Sustainability. Graz. Austria. BWL Publication Series No.29. ISBN (print) 978-3-85125-889-9. ISBN (e-book) 978-3-85125-890-5. DOI 10.3217/978-3-85125-889-9

Salimbeni, S., Romera, N. Redchuk, A. (2022). Digital Twin in a Dairy Factory. ISIEA 2022. 1st International Symposium on Industrial Engineering and Automation. Managing and Implementing the Digital Transformation. Bolzano, Italia.

Salimbeni, S. Redchuk, A. (2022). The impact of intelligent objects on Quality 4.0. SysInt 2022. 6th International Conference on System-Integrated Intelligence: Intelligent, flexible and connected systems in products and production. Genova, Italy.

Salimbeni, S. (2022). The importance of Industry 4.0 component life cycle record for Quality 4.0. IEOM. 3rd South American International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. Asunción, Paraguay.

Salimbeni, S. Redchuk, A. (2022). Quality 4.0 and Smart Product development. IKIT 2022. 16th International Conference on Information Technology and Applications (ICITA) 2022. Lisbon, Portugal.

Salimbeni, S. Redchuk, A. (2022). Smart Product and the complete life cycle monitoring and control. Implementación y Gestión Sostenible de la Transformación Digital. CONFEDI 2022.

Salimbeni, S. (2022). The impact of Industry 4.0 on Sustainable Development Goals: The influence of renewable energies and IoT on Clean Water for marginalised communities. Ambiente y Sociedad: Desafíos para un future posible. USAL 26 y 27 de octubre de 2022.

Salimbeni, S. (2022). Barreras de entrada a la Industria 4.0. Desafíos y Oportunidades de la economía y de los negocios en la era de la incertidumbre. USAL 16 de noviembre de 2022.

PUBLICACIONES EN REVISTAS

Salimbeni, S. Bianchi, S. (2019). Estado actual y evolución de la industria nacional hacia la industria 4.0. INNOVA 3ra Edición / Julio 2019 / ISSN 2618-1894.

Salimbeni, S. Mamani, D. (2020). Marco de referencia para la incorporación de Cobots en líneas de manufactura. Podium No.38 (2020). ISSN: 1390-5473 eISSN: 2588-0969. <https://revistas.uees.edu.ec/index.php/Podium/article/view/512>

Salimbeni, S., (2021). Gestión del Ciclo de Vida del Producto en la Industria 4.0. Núm. 3 (2021): AACINI-RIII / 2021 / N°3. <http://www3.fi.mdp.edu.ar/otec/revista/index.php/AACINI-RIII/issue/archive>. Artículo premiado.

Salimbeni, S. Bonacina, M., Mamani, D. (2022). Análisis de viabilidad técnica para el uso de Cobots en pymes manufactureras: un caso de estudio. AACINI-RIII / 2022 / N°5 febrero de 2022 - julio de 2022). <http://www3.fi.mdp.edu.ar/otec/revista/index.php/AACINI-RIII/issue/archive>. Artículo premiado.

Salimbeni, S. Romera, N. Redchuk, A., (2022). Digital Twin in a Dairy Factory. Managing and Implementing the Digital Transformation. Digital Twin in a Dairy Factory. Springer Nature Switzerland AG 2023 D. T. Matt et al. (Eds.): ISIEA 2022, LNNS 525, pp. 1–11, 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14317-5_9.

Salimbeni, S. Redchuk, A. (2022). The impact of intelligent objects on Quality 4.0. Advances in System-Integrated Intelligence. Springer Nature Switzerland AG 2023. M. Valle et al. (Eds.): SYSINT 2022, LNNS 546, pp. 1–12, 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16281-7_28

Salimbeni, S. Redchuk, A. (2022). Quality 4.0 and Smart Product development. Proceedings of International Conference on Information Technology and Applications: ICITA 2022 Networks and Systems.

Salimbeni, S.; Redchuk, A. & Rousserie, H. (2023) Quality 4.0: technologies and readiness factors in the entire value flow life cycle, Production & Manufacturing Research, 11:1, 2238797, DOI: 10.1080/21693277.2023.2238797

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/21693277.2023.2238797>

TRABAJOS EN PROGRESO

En aprobación:

Salimbeni, S. Redchuk, A. (2023). The impact of Industry 4.0 on Sustainable Development Goals: The influence of renewable energies and IoT on Clean Water for marginalised communities. EPIEM 2023.

En producción:

Salimbeni, (2024). Artificial Intelligence and Computer Vision for pipe welds Quality Control.

Salimbeni, S.; Gruenbichler, R. (2024). Implementation hurdles that SMEs face in the manufacturing sector in order to use artificial intelligence.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I.....	9
1. INTRODUCCIÓN.....	9
CAPÍTULO II.....	16
2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	16
2.1. Fundamentos y delimitación del área de investigación.....	16
2.1.1. Motivación.....	16
2.1.2. Delimitación.....	17
2.1.3. Problema por resolver.....	17
2.1.4. Importancia de la temática, su vigencia y actualidad.....	17
2.1.5. Línea de investigación.....	17
2.2. Pregunta de Investigación, Hipótesis y Objetivos.....	18
2.2.1. Preguntas de Investigación.....	18
2.2.2. Hipótesis General.....	18
2.2.3. Objetivo General.....	18
2.2.4. Objetivos Específicos.....	18
2.2.5. Actividades.....	18
2.3. Metodología.....	19
2.4. Método.....	19
2.5. Técnicas de recolección de datos procesamiento y análisis.....	20
CAPÍTULO III.....	22
3. INDUSTRIA 4.0.....	22
3.1. Digitización y Digitalización.....	22
3.2. La 4 ^{ta} Revolución Industrial, Transformación Digital e Industria 4.0.....	25
3.3. Tecnologías habilitadoras de la I4.0.....	34
3.4. Componentes 4.0 y Productos Inteligentes.....	81
3.5. La I4.0, la economía circular y las organizaciones.....	102
3.6. La I4.0 y los Objetivos de Desarrollo Sustentable.....	104
CAPÍTULO IV.....	106
4. GESTIÓN DE LA CALIDAD.....	106
4.1. Introducción.....	106
4.2. Calidad 4.0 – (Q4.0).....	114
4.2.1. Qué es la Q4.0.....	114
4.2.2. Precedentes y consideraciones de la Q4.0 en el contexto internacional.....	118
4.2.3. Precedentes y consideraciones de los Estándares.....	123
4.2.4. Beneficios de la Q4.0.....	125
4.2.5. Desafíos, barreras y factores críticos de éxito.....	127
4.2.6. Prácticas, herramientas y tecnologías aplicables a la Q4.0.....	128

4.2.7.	Optimización de procesos y calidad en la 4 ^{ta} Revolución Industrial.....	130
4.2.8.	Dimensiones de distintos Marcos de Referencia para la Q4.0.....	134
CAPÍTULO V		135
5.	ESTUDIOS CUANTITATIVOS DE LA INDUSTRIA 4.0, BARRERAS DE ENTRADA Y CALIDAD 4.0 EN LA ARGENTINA	135
5.1.	INDUSTRIA 4.0 en la Argentina. Resultado del estudio cuantitativo.	135
5.1.1.	Análisis de la I4.0 en la Argentina	137
5.1.2.	Conclusiones sobre la encuesta 1: I4.0 en la Argentina	141
5.2.	BARRERAS DE ENTRADA a la Industria 4.0 en la Argentina. Resultados del estudio cuantitativo.	142
5.2.1.	Análisis de Barreras de entrada a la I4.0	143
5.2.2.	Conclusiones sobre la encuesta “Barreras de Entrada a la I4.0”	145
5.3.	CALIDAD 4.0 en la Argentina. Resultados del estudio cuantitativo.	147
5.3.1.	Análisis de la Calidad 4.0 en la Argentina.....	147
5.3.2.	Conclusiones de la encuesta Calidad 4.0 en la Argentina	157
CAPÍTULO VI		160
6.	APLICACIONES EN CASOS REALES.....	160
6.1.	LERCA S.C.A: Incorporación de Cobots para la mejora de calidad.	160
6.2.	ALMACENAR SRL: Simulación de proceso en una oficina técnica	164
6.3.	RANIERI S.A.: Diseño de Producto y mejora de una línea de producción	167
6.4.	Conclusiones de los Casos de Estudio	169
CAPÍTULO VII		171
7.	CONCLUSIONES GENERALES Y PERSPECTIVAS.....	171
7.1.	Marco de referencia para la Q4.0	171
7.2.	Hoja de ruta para la implementación de Q4.0.....	173
7.3.	Conclusiones finales y futuras líneas de investigación	174
REFERENCIAS.....		179

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

El entorno industrial ha cambiado sustancialmente durante los últimos años debido a la introducción de nuevos conceptos y tecnologías basados en la 4^{ta} revolución industrial (4th Industrial Revolution - 4IR). Se hizo referencia a ello, por primera vez, en la feria de Hannover 2011, denominándose “Industrie 4.0” (Industria 4.0 - I4.0) (Mark et al., 2021; Qin et al., 2016a; Sanders et al., 2016; Ganzarain & Errasti, 2016).

La I4.0 es la combinación de la producción, la tecnología de la información e Internet (Matt, 2020). No sólo la introducción de las nuevas tecnologías, sino la demanda de mercado más sofisticada y personalizada requieren líneas de producción cada vez más flexibles y ágiles de manera que puedan adaptarse a los nuevos tipos de clientes.

Los autores Lasi et al. (2014) explican que el término I4.0 se estableció para una 4IR planificada, siendo el término una reminiscencia del control de versiones de software.

La demanda del mercado es cambiante y las empresas buscan agregar valor para diferenciarse, desde la concepción de la idea hasta el final de la vida útil del producto.

La gestión del ciclo de vida del producto (Product Lifecycle Management - PLM) es una de las estrategias utilizadas por los fabricantes para mejorar el desempeño operacional, a través de una combinación de organización, procesos, metodología y tecnología, permitiendo a las empresas agregar valor a sus productos y servicios, obteniendo, de ese modo, una ventaja competitiva (Xin & Ojanen, 2018).

Una de las características fundamentales de la I4.0 es que permite una gestión de extremo a extremo, ampliando la definición tradicional del Ciclo de Vida del Producto (PLC) (Figura 1) llevándolo desde el relevamiento de requerimientos de parte de los clientes hasta la reutilización o el reciclaje de los productos y / o sus partes que los componen.



Figura 1 – Gestión del Ciclo de Vida de un Producto. Fuente: propia del autor.

Las empresas, fundamentalmente de manufactura, buscan adaptar sus instalaciones para poder posicionarse mejor frente a estos nuevos desafíos, siendo uno de los mayores de ellos el encontrar la manera adecuada de dar forma a las ventajas competitivas en la era 4IR; esto es una condición de supervivencia de largo plazo en el mercado, afirman los autores Adamik & Nowicki, (2018).

Mantener la participación de mercado es un desafío para todas las empresas, es por ello que, dichas organizaciones, han adoptado métodos que tienden a enfatizar la ingeniería de la calidad y la satisfacción del cliente (Rosa & Broday, 2018). Es por ese motivo que las empresas deben adaptarse rápidamente a la demanda y sus líneas de producción deben ser flexibles, aunque manteniendo o aún mejorando, la productividad y calidad del producto.

Las configuraciones actuales de los procesos de manufactura no ofrecen una respuesta adecuada para lograr una planta flexible (Malhotra, 2009). Si bien un esquema de Proceso de Trabajo en planta crea la flexibilidad necesaria para producir una amplia variedad de productos en cantidades significativas, con complejidad y divergencia considerables, y un grado de personalización alto y volumen de producción bajo, no se adaptan perfectamente a la I4.0. La flexibilidad necesaria en la disposición de las plantas de producción es, actualmente, otro de los impulsores de la I4.0.

La digitalización de la cadena de valor de la industria a lo largo de todo su ciclo de vida, desde los insumos, partes semielaboradas, productos o inclusive documentación, denominados “assets” en la I4.0 (Rojko, 2017), permitiría que la información sea compartida, no sólo entre todos los departamentos de la empresa, sino también con proveedores y clientes, estando entonces disponible para todos los interesados. El “asset” es un objeto físico o lógico, propiedad de / o bajo los deberes de custodia de una organización, que tiene un valor percibido o real para ella (Bader et al., 2020). Estos “assets” u “objetos inteligentes” son los que permitirán el intercambio de datos, y, en consecuencia, de información y conocimiento.

El intercambio de datos, como la puesta a disposición de la información dentro de una comunidad, se considera que juega un papel crucial en la gestión del conocimiento, siendo, en este sentido, el intercambio de información uno de los temas más importantes, lo que permite mejorar la eficiencia, la calidad y el tiempo de comercialización en el desarrollo de nuevos productos (Gao & Bernard, 2018).

Estudios de la consultora LNS Research (Align Technology to Create Market Advantage, 2018), destacan que la mejora de la calidad es el principal impulsor para la transformación industrial, seguidos por la mejora de la eficiencia operativa, los productos conectados, el gemelo digital, el trabajador conectado y el mantenimiento predictivo. Un aspecto importante para destacar es que un vasto número de iniciativas I4.0 centradas en la calidad no son lideradas por los Departamentos de Calidad de las empresas, sino por las áreas de Operaciones, Ingeniería, Ventas o Marketing; este es un factor que se debe reconsiderar en la transición hacia una I4.0 (Eng & Nikolova-Jahn, 2019).

Los principales pilares de la I4.0 son el Internet de las Cosas (IoT), los Sistemas Ciberfísicos (CPS), la Inteligencia Artificial (AI) y la conectividad e interoperabilidad entre dispositivos, lo cual es uno de los grandes desafíos en esta 4IR (Alcácer & Cruz-Machado, 2019).

Los autores Mittal et al. (2018) aseveran que la gestión de la calidad se verá afectada positivamente por la utilización de las nuevas tecnologías habilitadoras y el consecuente cambio de paradigma en los sistemas de producción. La aceleración del cambio tecnológico afecta al diseño de los nuevos productos y los procesos empresariales; surgen gran cantidad de oportunidades de negocio a partir de los adelantos en la tecnología informática, los robots y la AI. El proceso de monitoreo y control en múltiples procesos de producción, a través de todo el ciclo de vida del producto y mediante la sensorización en tiempo real, es lo que permite, entre otros, la analítica predictiva, la cual mejorará la Gestión de la Calidad de la cadena de valor (Malhotra, 2009).

La I4.0 precisa establecer normas para la producción industrial digitalizada. Se buscan estructuras de comunicación comunes: redes y protocolos, reglas para la ciberseguridad y la protección de datos, un lenguaje que incluya signos, alfabeto, vocabulario, sintaxis y semántica. Se ha desarrollado para este fin, un modelo tridimensional que funciona como un marco de referencia de la arquitectura de la I4.0. Esta es la RAMI4.0 (Reference Architectural Model Industrie 4.0), el Modelo de Referencia de Arquitectura de la I4.0 (Pessl et al., 2020) . Las tres dimensiones de la RAMI4.0 son: (1) Capas (*Layers*), (2) Ciclo de Vida del Flujo de Valor (*Life Cycle Value Stream*) y (3) Niveles Jerárquicos (*Hierarchy Levels*), tal como se observa a continuación (Figura 2).

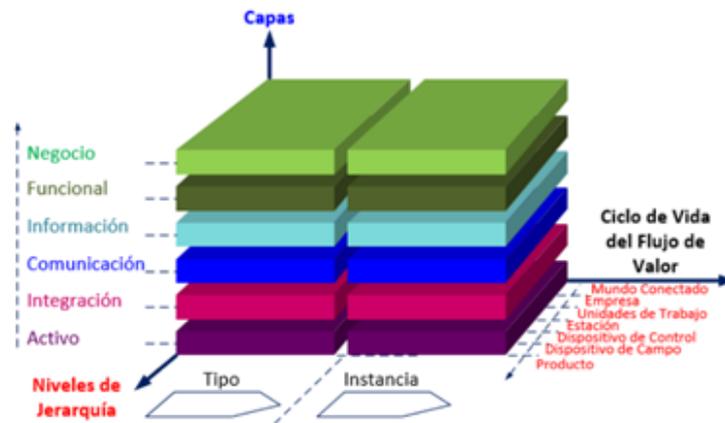


Figura 2 – RAMI4.0. Fuente: adaptado de RAMI4.0

El primer eje, Capas, posee 6 niveles: (1) Negocio, el cual se refiere a la estrategia de negocios de la empresa y respondería a la pregunta: ¿cuánto está dispuesto a pagar mi cliente por mi producto?, (2) Funcional, que define el papel de los activos (assets) dentro del sistema I4.0 y responde a la pregunta: ¿qué se supone que mi producto debe hacer? , (3) Información, que se refiere a los datos organizados y debe responder a la pregunta: ¿qué datos debe proveer mi producto?, (4) Comunicación, que se ocupa de transmitir y recibir datos y debe responder a la pregunta: ¿cómo mi cliente y mi empresa pueden acceder a los datos? , (5) Integración, que es el enlace entre la capa física y el mundo digital y responde a la pregunta: ¿qué partes de mi producto están digitalizados? y por último el (6) Assets, que son objetos físicos o intangibles en el mundo real y responde a la pregunta: ¿cómo integrar el producto o servicio al proceso con el fin de llevarlo al mundo real?

El segundo eje pertenece al Ciclo de Vida del Flujo de Valor (Life Cycle Value Stream), el cual se basa en el estándar IEC 62890 (Standard RAMI40-IEC62890– 2017 – (68).pdf, n.d.). Cada empresa tiene una serie de actividades las cuales conforman sus procesos y deben agregar valor, ese es el llamado Flujo de Valor. A su vez, cada organización tiene sus proveedores y clientes, quienes también poseen su Flujo de Valor; ese conjunto constituye el llamado Sistema de Valor. El Flujo de valor de una empresa se ve representado por un ciclo de vida, es decir, las diferentes fases por las que, indefectiblemente, las partes y productos transitan. La RAMI4.0 representa ese Ciclo de Vida del Flujo de Valor en dos grandes fases denominadas “Tipo” e “Instancia” (Figura 3). La fase Tipo tiene a su vez dos subfases: (a) Desarrollo y (b) Mantenimiento (mantenimiento del desarrollo). La fase Instancia posee también dos subfases: (a) Producción y (b) Mantenimiento (mantenimiento de la producción y del producto). Por ejemplo, para un fabricante de motores, la subfase Desarrollo está compuesta por todos los pasos de desarrollo de un nuevo producto, mientras que la siguiente subfase, Mantenimiento, se refiere al mantenimiento de dicho diseño y desarrollo, por ejemplo “updates” y “upgrades” del producto. En la fase Instancia, la subfase Producción se refiere, en este ejemplo, a la fabricación del motor, mientras que la subfase Mantenimiento (de Instancia), se refiere al mantenimiento del sistema de producción y los

servicios de posventa correspondientes a dicho motor, el cual está siendo usado ya por el cliente. Esto se observa también en la Figura 3.

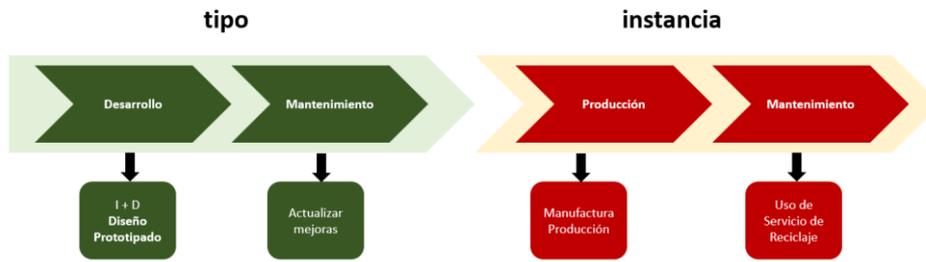


Figura 3 – Ciclo de Vida del Flujo de Valor RAMI4.0. Fuente: adaptado de RAMI4.0

El tercer eje, Niveles de Jerarquía, está basado en los estándares ISO/IEC 62264 (Manufacturing Architecture Product) y el modelo RAMI4.0 amplía esos niveles de jerarquía en la parte inferior, añadiendo un séptimo nivel “Producto” o “Pieza de Trabajo”. Se tiene entonces en este eje de jerarquías: (1) Mundo Conectado, (2) Empresa, (3) Centro de Trabajo, (4) Estación, (5) Dispositivo de Control, (6) Dispositivo de Campo y (7) Producto (Batchkova et al., 2017).

El presente trabajo de investigación se enfoca especialmente en el plano: “Capas” – “Ciclo de Vida del Flujo de Valor”, las cuales denotan claramente dos de las características más importantes de la I4.0: la Integración Vertical y la Integración Horizontal. Esto se ilustra en la siguiente Figura 4.

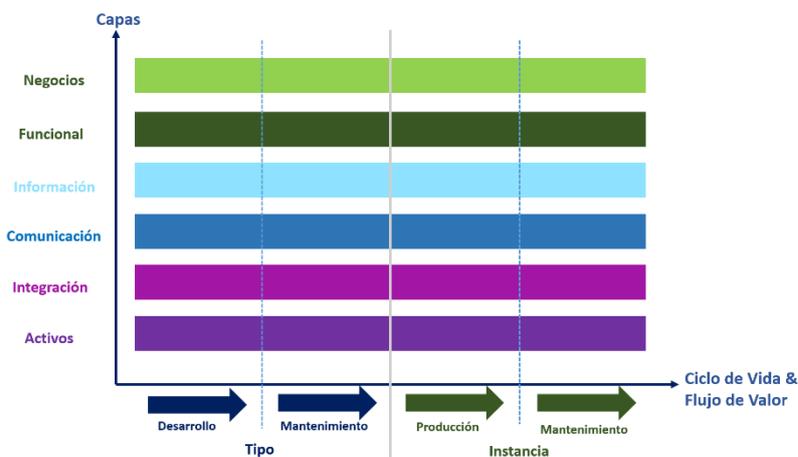


Figura 4 – Capas - Ciclo de Vida del Flujo de Valor. Fuente: Adaptado de RAMI4.0

Se puede observar en el eje “Ciclo de Vida del Flujo de Valor” que es posible monitorear y controlar el producto, e incluso sus partes constitutivas, desde el relevamiento de las necesidades del cliente, pasando por el diseño, fabricación, uso y hasta la “muerte” o la eliminación del producto final y su reciclaje. Esto es representado en la siguiente ilustración (Figura 5).



Figura 5 – Eje Ciclo de Vida del Flujo de Valor. Fuente: propia del autor

La trazabilidad digital del ciclo de vida del flujo de valor ofrece un alto potencial para el suministro de información. Hoy en día, sin embargo, su uso está generalmente limitado a fases individuales, no estando integrada totalmente durante todo el ciclo de vida (Kiklhorn et al., 2020).

Los insumos y componentes representan una parte clave en todos los productos manufacturados, especialmente en las primeras etapas de la cadena de valor; es por ello que ser capaz de monitorear y controlar de forma más efectiva su progreso y calidad, generará oportunidades para mejorar el desempeño de la producción y gestión de la cadena de valor, logrando, de ese modo, operaciones más sostenibles (Ferber, 2015). Esto último no sólo afecta a las áreas de producción de la empresa sino a otras tales como las de Marketing, Desarrollo, Comercial y Posventa (Rauch et al., 2019). Una tarea clave para mejorar dicha productividad es la digitalización integral del proceso (Fonseca et al., 2021a). En primer lugar, la digitalización de las “cosas” permite la mejora del desarrollo de productos y la sensorización puede proporcionar información del estado de éste en tiempo real, con el fin de mejorar el mismo producto y el proceso de fabricación. En segundo lugar, la digitalización ayuda a reducir el tiempo de comercialización del producto y, en tercer lugar, podría inclusive mejorar la gestión de la energía, entre otros beneficios (Xin & Ojanen, 2018).

Estudios realizados en Alemania en 2015, comprobaban que la digitalización y automatización mejoraban la productividad de las empresas. Los autores Rübmann et al. (2015) aseguraban que durante los siguientes cinco a diez años la I4.0 sería adoptada por más compañías, lo que mejoraría la productividad en todos los sectores manufactureros alemanes. Con ese fin, el Sistema de Valor debía ser digitalizado y estar interconectado poniendo a disposición los datos para todos los interesados del sistema: proveedores, fábricas intermedias y clientes; ello está ilustrado en la siguiente Figura 6.

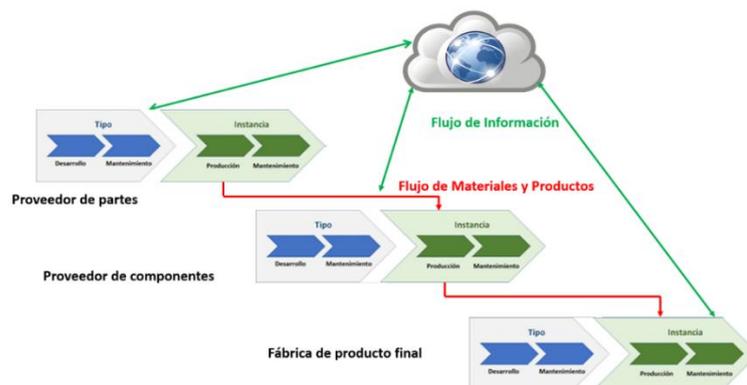


Figura 6 – Sistema de Valor. Fuente: propia del autor

Las aplicaciones de la I4.0 se están convirtiendo, gradualmente, en parte del ciclo de vida completo de un producto; esto se logra con la ayuda del Internet de las Cosas (Internet of Things – IoT) y de las redes de comunicación modernas (Mourtzis et al., 2019). La digitalización está presente no sólo en las líneas de producción, sino en los mismos

productos, los insumos y prácticamente en todo lo que respecta a los procesos industriales de transformación. En términos simples, se podría decir que “digitalizar” es lograr que esas máquinas, productos, insumos, “cosas” puedan autoidentificarse, brindando información de sí mismas subiendo los datos a “la nube” de modo de compartirlos con todos los interesados, internos y externos; de allí el concepto de “Objetos Inteligentes”, el cual se explicará en adelante.

La Gestión Total de la Calidad (Total Quality Management - TQM) no ha cambiado en esencia, sin embargo, la cantidad, fiabilidad y velocidad con que se capturan y analizan los datos ofrece información mucho más precisa y en tiempo real, lo cual permite mejores tomas de decisiones (Demartini & Tonelli, 2018).

La calidad está evolucionando debido a la digitalización, y allí es donde la Calidad 4.0 (Quality 4.0 - Q4.0) proporciona la creación de valor.

La nueva modalidad de la Gestión de la Calidad orientada por datos o “Data Driven” Management (DDM) (Miragliotta et al., 2018) impone actualizaciones de normas y estándares, entre ellos la ISO 22400, la cual especifica los Indicadores Clave de Desempeño (KPI) utilizados en la gestión de operaciones de manufactura (MOM). También la IEC 62264 derivada de la ISA 95 (Professur für Prozessleittechnik, n.d.), la cual, en su Nivel 4, colecta datos relativos a la calidad (Batchkova et al., 2017), el QIF3.0 (Quality Information Framework) (DMSC, 2014), estándar de marco XML unificado para sistemas QIF de calidad asistidos por computadora y la familia de las ISO 8000, compuesta por conceptos generales sobre calidad de datos, procesos de gestión de calidad de datos y aspectos de intercambio de datos maestros entre organizaciones.

La I4.0 no puede entenderse sin la convergencia entre la Tecnología de la Información (Information Technology) (IT) y la Tecnología de las Operaciones (Operational Technology) (OT), es decir, la integración de los sistemas de IT utilizados para computación centrada en datos con los sistemas de OT utilizados para supervisar eventos, procesos, dispositivos y realizar ajustes en las operaciones empresariales e industriales (Armando W. Colombo, et. al. 2014).

Cuando los datos provenientes de los sensores, las máquinas y los controladores quedan a disposición de toda la empresa, se convierten en una herramienta clave para la toma de decisiones, haciéndolas más efectivas y logrando una diferenciación competitiva más aún cuando se integran los Sistemas de Control con los Sistemas de Información. La interacción entre los Sistemas de Información y los de Operaciones son representados en la siguiente ilustración (Figura 7).

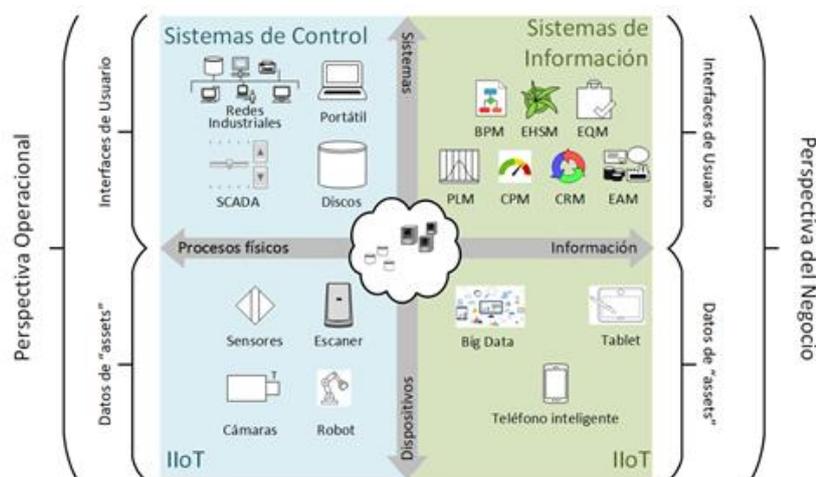


Figura 7 - Sistemas de Información y Operacional. Fuente: propia del autor

Uno de los grandes desafíos de la I4.0 es considerar al OT y al IT, no como dos redes independientes, sino como sistemas complementarios, ya que ambos se asocian mejorando la calidad de la información y la productividad de las empresas (Leitão et al., 2016).

La digitalización y el Internet de las Cosas Industrial (IIoT) generan cambios que trascienden los límites de los dominios tradicionales abriendo nuevas oportunidades en aplicaciones industriales y en toda la cadena de valor en el ciclo de vida del producto y sistema de producción, todo enmarcado en la RAMI4.0. Gracias a ello, por ejemplo, se podrían ofrecer nuevos servicios inteligentes, como los relacionados con el mantenimiento predictivo y prescriptivo. Toda la información estará también a disposición de las áreas de Marketing, Diseño, Desarrollo, Producción, Ventas y Servicios (Assenza et al., 2018).

Concluida la presente introducción, se abordará en la presente Tesis Doctoral el estudio del impacto de las tecnologías habilitadoras de la I4.0 en la Gestión de la Calidad a lo largo de todo el ciclo de vida del flujo de valor (VSLC), incluyendo tanto los procesos como los objetos inteligentes; esta es la denominada Calidad 4.0 (Q4.0).

Se han desarrollado, para ello, siete capítulos. En el primero se introduce y presenta el tema de la Tesis. El Capítulo 2 corresponde al diseño de la investigación y la metodología utilizada. En el Capítulo 3 se expone el marco teórico, el estado de arte de la Industria 4.0 a nivel global y sus tecnologías habilitadoras. El Capítulo 4 aborda la Gestión de la Calidad, en particular la Calidad 4.0. En el Capítulo 5 se presentan 3 estudios cuantitativos a saber: (1) Estado actual de la Industria 4.0 en la Argentina; (2) Barreras de entrada a la Industria 4.0 en la Argentina y (3) Calidad 4.0 en la Argentina. El Capítulo 6 describe tres casos de estudio de la industria manufacturera en la Argentina representativos de los distintos usos de nuevas tecnologías habilitadoras en la industria. Finalmente, en el Capítulo 7 se encuentran las conclusiones generales y perspectivas.

Se ilustra en la Figura 8 , la hoja de ruta de la investigación:

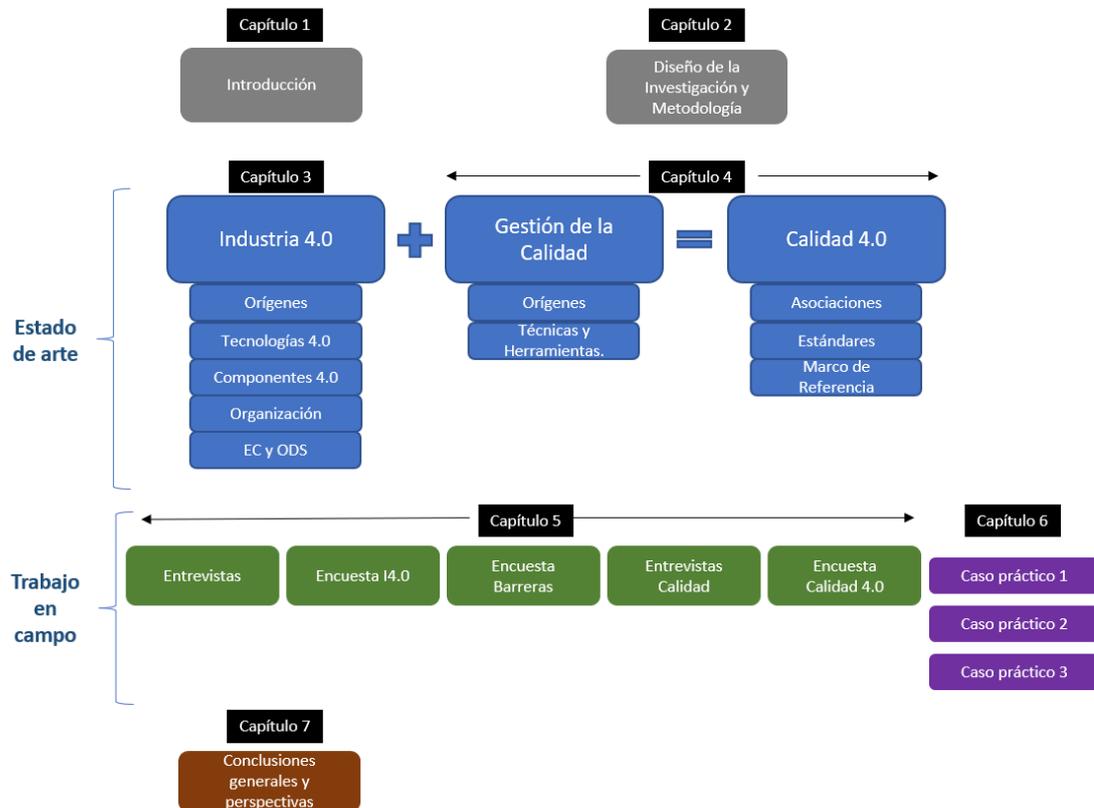


Figura 8 – Hoja de ruta de la presente investigación. Fuente: propia del autor

CAPÍTULO II

DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Fundamentos y delimitación del área de investigación

2.1.1. Motivación

La aparición de Internet ha estado generando cambios innovadores y radicales liderados por el Internet de las cosas (IoT), la inteligencia artificial (AI), la computación en la nube (CC) y los sistemas ciberfísicas (CPS) integrando el mundo real con el virtual. Si bien estos cambios se analizan y estudian ya transcurridos años de historia, ya se puede asegurar que actualmente se está transitando la 4^{ta} Revolución Industrial (4IR).

La 4IR significa la era de la aplicación del IoT, la AI y los CPS. En esta concepción los productos controlan su propia producción, ya que estos productos y componentes se comunican con las máquinas y equipos mediante códigos de producto únicos durante su producción (Kovács *et al.*, 2019). Esta 4IR aplicada a la industria ha sido denominada I4.0 y está dando lugar a cambios, no sólo tecnológicos, sino sociales y económicos. Estas nuevas tecnologías, técnicas, herramientas, habilidades transversales, educación y formación están generando nuevos conceptos, disciplinas y oportunidades de negocios. Servicios 4.0, Productos 4.0 o Inteligentes, Trabajadores 4.0, Educación 4.0 y la Calidad 4.0, son nuevos términos y denominaciones cada vez más frecuentes.

Los productos inteligentes permiten el uso racional de los recursos, los insumos, la responsabilidad social y el cuidado del medioambiente, y ello, enmarcado en la era 4.0, da lugar a un nuevo concepto de aseguramiento de la calidad, considerando ahora el ciclo de vida completo, la integración vertical y horizontal y en tiempo real; es la denominada Q4.0.

Un informe del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de la República Argentina (2020)¹, indica que la necesidad de mejorar el ciclo de vida y el uso de los activos continúa en aumento, destacando que el IoT es muy demandado por las empresas manufactureras (Salvarezza, Roberto Ministerio de Ciencia, 2020). Debido a ello, la industria moderna requiere el desarrollo de “activos” y productos inteligentes a lo largo de todo su

¹ Según lo expresado desde el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la Nación Argentina, por el científico Salvarezza Roberto (2020)

ciclo de vida, desde el relevamiento de requerimientos de por parte del cliente hasta el reúso o reciclaje del producto. Estos activos y productos inteligentes tienen información sobre sus procesos de producción, gestión de la calidad, aplicaciones y reutilización. Admiten procesos de fabricación activos que definen cuándo se producirán, con qué parámetros, con qué materiales y qué tipo de modificaciones deben realizarse.

La gestión de la calidad del VSLC de estos productos inteligentes debe cumplir con los nuevos requisitos impuestos por la 4IR (Nikolova, 2019). Por su parte, mientras que en un enfoque de calidad Lean se intenta desarmar sistemas complejos logrando soluciones simples, la I4.0 permite el desarrollo de procesos complejos y no predefinidos debido a la conexión en red de sus componentes inteligentes. Queda en claro que, aunque debe analizarse de qué manera podrían ambos enfoques combinarse, ellos buscan alcanzar los mismos objetivos: mejoras de tiempo, calidad, costos, seguridad y motivación (Enke et al., 2018).

Basándose en lo anterior es de sumo interés analizar de qué manera y con qué nuevas tecnologías y herramientas se gestionará la calidad de los productos y procesos en este nuevo contexto y durante todo el ciclo de vida del flujo de valor.

2.1.2. Delimitación

El estudio enmarcado en la presente tesis quedará delimitado en su fase de trabajo exploratorio y en campo en el contexto de la Industria manufacturera argentina. El trabajo se encuadra dentro de: Ingeniería, Industrial, Calidad, Ciclo de Vida del Flujo de Valor, Empresas Manufactureras, Argentina.

2.1.3. Problema por resolver

La brecha que se pretende cubrir es el Integrar la Gestión de la Calidad del Ciclo de vida del flujo de valor completo, de los procesos y productos, entre todas las partes interesadas, desde el relevamiento de las necesidades de la demanda, pasando por la planificación, desarrollo, producción y puesta en mercado del producto e, inclusive, hasta su reciclaje o descarte.

En el sector industrial argentino la propuesta de lograr integrar la Gestión de la Calidad del Ciclo de vida completo aparece como una brecha entre los procesos y productos y todas las partes interesadas; desde el relevamiento de las necesidades de la demanda, hasta su reciclaje o descarte. Esto se convierte en una problemática de relevancia por resolver, dado que en dicha brecha se ponen en juego diferentes factores que definen una realidad compleja, por lo que lograr capturarla supone de una visión objetiva como otra subjetiva.

2.1.4. Importancia de la temática, su vigencia y actualidad

La I4.0 y sus tecnologías habilitadoras están transformando las prácticas de la manufactura, las técnicas, las herramientas y las habilidades que los trabajadores precisan. Todo ello impacta la Gestión de la Calidad Total de las organizaciones y sistemas en red.

Luego del estudio preliminar del estado de arte se observa que este tema no está muy desarrollado aún y los cambios e impactos que producen podrían ser realmente importantes. Es por ello la importancia y vigencia del tema. La revisión bibliográfica de antecedentes de investigación da cuenta del escaso desarrollo de estudios que analicen los cambios e impactos que producen la I4.0 y sus tecnologías habilitadoras sobre la Gestión de la Calidad Total. Dada esta situación, es de considerar vigente y de gran importancia abordar el estudio de este tema.

2.1.5. Línea de investigación

La línea de investigación se encuadra dentro del área de la Ingeniería Industrial, ya que el estudio involucra técnicas y procedimientos de trabajo en procesos industriales. Incluye, en menor grado, a la Ingeniería Electrónica, debido a que se hace referencia a la utilización de dispositivos electrónicos. Por último, y no menos importante, la Ingeniería Informática, ya

que se recurre a la utilización de softwares en todos los niveles de actuación en la nueva gestión de la calidad.

2.2. Pregunta de Investigación, Hipótesis y Objetivos

2.2.1. Preguntas de Investigación

¿Cómo impacta y qué cambios produce la denominada I4.0 en la Gestión de la Calidad durante el ciclo de vida del flujo de valor en las industrias manufactureras?

- PI1. ¿Cuál es el estado de arte de la Industria 4.0 en la dimensión Ciclo de Vida del Flujo de Valor?
- PI2. ¿Cuál es el estado de arte de Calidad 4.0 en la dimensión Ciclo de Vida del Flujo de Valor?
- PI3. ¿Cómo puede describirse y caracterizarse en la actualidad la Industria 4.0 y sus barreras de entrada en la Argentina?
- PI4. ¿Cuál es el impacto de las tecnologías 4.0 en la gestión de la calidad a lo largo del ciclo de vida del flujo de valor de las fábricas en la Argentina?

2.2.2. Hipótesis General

La Gestión de la Calidad del flujo de valor en la industria manufacturera en la era 4.0, conlleva innovaciones, cambios disruptivos en la forma de coleccionar datos, analizarlos y predecir comportamientos. El uso de dicha información y conocimiento para la toma de decisiones impacta sobre a todas las áreas de la empresa e interesados, generando cambios en los modelos de negocios y su cadena de valor.

2.2.3. Objetivo General

Profundizar el estudio del estado actual de la I4.0 y la Q4.0 en la Argentina encontrando brechas y proveyendo, a partir de los hallazgos, nuevos conocimientos que integren la gestión de la calidad de las diferentes fases del Ciclo de Vida del Flujo de Valor de las empresas.

2.2.4. Objetivos Específicos

- OE1. Relevar el estado de arte de la I4.0, enmarcado en el RAMI4.0 en la dimensión Ciclo de Vida del Flujo de Valor.
- OE2. Relevar el estado de arte de la Q4.0, enmarcado en el RAMI4.0 en la dimensión Ciclo de Vida del Flujo de Valor.
- OE3. Evaluar cualitativa y cuantitativamente el estado actual de la I4.0, sus barreras de entrada y especialmente la Q4.0 en la Argentina a lo largo del Ciclo de Vida del Flujo de Valor.
- OE4. Analizar el impacto de las tecnologías 4.0 (T4.0) sobre la gestión de la calidad durante el ciclo de vida del flujo de valor en empresas de manufactura en la Argentina.

2.2.5. Actividades

- A1. Revisión bibliográfica y participación en seminarios y congresos nacionales e internacionales específicos de la I4.0.
- A2. Revisión bibliográfica y participación en seminarios y congresos nacionales e internacionales específicos de la gestión de la calidad.
- A3. Entrevistas en profundidad y encuesta en industrias manufactureras argentinas, con el fin de evaluar el Nivel de Madurez. Entrevistas en profundidad y encuesta en

industrias manufactureras argentinas con el fin de identificar y evaluar Barreras de Entrada.

- A4. Encuesta sobre el impacto de las tecnologías habilitadoras en la gestión de la calidad a lo largo de todo el ciclo de vida del flujo de valor. Desarrollo de 3 tres casos de estudio con el fin de evaluar la aplicación de tecnologías habilitadoras en la gestión de la calidad.

En resumen, se realizan entrevistas en profundidad previas a cada encuesta. Son 3 encuestas, a saber: Industria 4.0, Barreras de Entrada y Calidad 4.0.

2.3. Metodología

La metodología utilizada se basa en un enfoque mixto y, fundamentalmente, desde la perspectiva de la ingeniería industrial.

El alcance de la investigación es exploratorio y descriptivo, con observación participante y cuestionario estructurado.

La metodología para el marco teórico fue el de una Revisión Sistemática de Literatura (Schmeisser, 2013) con fichas de lectura, método de mapeo, codificación y bibliometría.

Se utilizan herramienta de gestión bibliográfica MENDELEY™, bibliometría VOSviewer™ y cualitativas MAXQDA™. Excel™ y Minitab™ para análisis estadísticos.

La evaluación, recolección, análisis y desarrollo se realiza conforme las preguntas de investigación: PI1, PI2, PI3 y PI4.

En su fase cualitativa, el diseño metodológico se basa en la Teoría Fundamentada. Desde esta teoría las proposiciones teóricas surgen de los datos obtenidos en la investigación (Hernández-Sampieri, 2018). En su fase cuantitativa el diseño metodológico se sustenta en el análisis estadístico de los datos obtenidos en el sector industrial de la Argentina. Se observa la secuencia en la siguiente Figura 9.



Figura 9 – Metodología enfoque mixto secuencial. Fuente: propia del autor

2.4. Método

Enfoque

Para el desarrollo de la presente tesis se propone una metodología basada en un enfoque mixto secuencial y centrada en el campo de la ingeniería industrial. Los métodos mixtos son un conjunto de procesos sistemáticos, empíricos y críticos de investigación que implican la recolección y el análisis de datos (cualitativos y cuantitativos) integrándolos de forma de realizar inferencias para lograr un mayor entendimiento del fenómeno bajo estudio (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2008).

Tal como se ha mencionado, el diseño y abordaje de la investigación, en su fase cualitativa, sigue una Teoría Fundamentada, es decir que las proposiciones teóricas surgen de los datos obtenidos en la investigación. El diseño específico es Sistemático y el procedimiento fue por Codificación Abierta (Hernández-Sampieri, 2018, p.523).

Trabajo en de campo. Unidades de análisis y respuesta.

Para la recopilación de información en el contexto del sector industrial en Argentina se seleccionó el trabajo de campo como método para la recopilación de datos acordes a lo planteado en la hipótesis del presente trabajo de investigación. De acuerdo con el enfoque mixto adoptado se distingue dos etapas en el desarrollo de este:

Para la etapa cualitativa: como unidad de respuesta y de análisis se toman 3 empresas manufactureras argentinas.

Para la etapa cuantitativa: se toma como unidad de análisis al menos 100 muestras estadísticas representativas de empresas industriales argentinas. Unidad de respuesta: supervisores, jefes y gerentes de planta, producción, desarrollo, logística, marketing, ventas y administración, todo ello para los estudios cuantitativos 1 y 2 (Industria 4.0 y Barreras de entrada). Para el estudio 3 (Calidad 4.0) se seleccionan exclusivamente roles relacionados a la gestión de la calidad.

2.5. Técnicas de recolección de datos procesamiento y análisis.

Se utilizan técnicas cualitativas y cuantitativas para el desarrollo de la presente tesis. Tal como explica el autor Hernández Sampieri y Mendoza (2008), el enfoque cualitativo utiliza la recolección de datos sin medición numérica con el objetivo de descubrir o afinar preguntas de investigación en el proceso de interpretación. Él explica también que, el caso de la técnica cuantitativa, parte de una idea que va acotándose y, una vez delimitada, se derivan objetivos y preguntas de investigación, se revisa la literatura y se construye un marco o una perspectiva teórica. De las preguntas se establecen hipótesis y determinan variables; se desarrolla un plan para probarlas (diseño); se miden las variables en un determinado contexto; se analizan las mediciones obtenidas (con frecuencia utilizando métodos estadísticos), y se establece una serie de conclusiones respecto de las hipótesis.

Técnicas:

Etapla cualitativa: entrevistas en profundidad. Se realizan previamente a cada encuesta.

Etapla cuantitativa: encuestas con formularios autogestionados. (Hernández Sampieri y Mendoza, 2008)

Muestras:

Etapla cualitativa: se recurre a la estrategia del muestreo teórico, o sea, a la selección de casos o participantes conforme a la necesidad de precisión y refinamiento de la teoría que se está desarrollando. Esto se realiza para seleccionar las industrias, empresas y personas a participantes.

Etapla cuantitativa: la encuesta se administra a un grupo de industrias, empresas / personas denominado la muestra, con el objetivo de identificar tendencias en actitudes, opiniones, comportamientos o características de un grupo mayor de individuos denominados la población. Para la obtención de datos se sigue la siguiente secuencia: (1) se envía la encuesta a, mínimo, 300 contactos; (2) se obtiene, al menos, 100 respuestas en forma completa y válida ($n \geq 100$); (3) se analizan mediante el uso de herramientas estadísticas.

Etapla Cualitativa:

Para el presente trabajo se ha realizado una primera etapa cualitativa a partir de 7 entrevistas en profundidad. Las mismas fueron realizadas en empresas manufactureras pertenecientes a distintos sectores de la Industria. Se resumen a continuación dichos estudios:

Tabla 1 - Entrevistas

Nombre de la empresa	Sector Industrial
NEWSAN	Electrónica de consumo
SOLNIK S.A.	Electrónica de consumo
ATHUEL Electrónica SA	Electrónica de consumo
LERCA	Industria productos eléctricos alta tensión
LARA	Metalúrgica
B&B	Manufactura
RANIERI	Manufactura

Procesamiento y análisis:

Etapa cualitativa: se utiliza herramienta de análisis cualitativo MAXQDA™2020.

Etapa cuantitativa: la plataforma e-encuesta™ se utiliza para la realización de las encuestas “en línea” generando una matriz de datos de las respuestas. La misma se convierte para su posterior procesamiento con una hoja de cálculo. Se complementa el análisis cuantitativo con la utilización de la herramienta MS Excel™ y Minitab™. Se ilustra a continuación (Figura 10) el proceso de codificación y análisis.

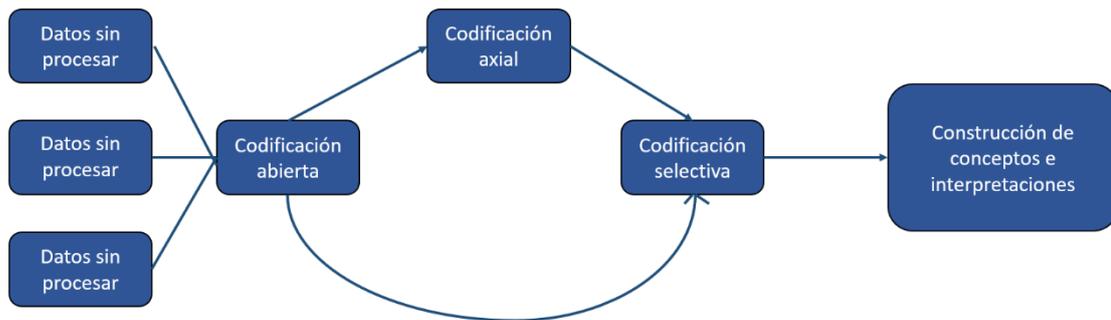


Figura 10 - Codificación del análisis cualitativo. Fuente: propia del autor

CAPÍTULO III

INDUSTRIA 4.0

3. INDUSTRIA 4.0

3.1. Digitización y Digitalización

Introducción

Con el advenimiento de nuevas tecnologías y sus aplicaciones comienzan a surgir nuevos términos, en la mayoría de los casos, acuñados por los propios usuarios.

Uno de los ejemplos sobre ello es el de Digitización, Digitalización, Transformación Digital (DX) e I4.0. Éstos no son exactamente sinónimos, aunque coloquialmente así se los utilicen en algunas ocasiones.

Un poco de historia

Hace unos 3.000 años, el hombre ya lograba transmitir mensajes a distancia utilizando métodos primitivos. Hacia el año 1184 a. de C., en el antiguo imperio romano y griego, se podían transmitir mensajes a través de señales de fuego.

En los años 500 a. de C., dos ingenieros de Alejandría, Kleoxenos y Demokleitos, utilizaban un sistema de transmisión y recepción de “datos”, aunque sólo era posible hacerlo por las noches. El sistema constaba de dos caminos separados por una colina, y dependiendo de cuantas antorchas y de cómo fueran distribuidas en la colina, el mensaje podía ser interpretado; para el mensaje “One hundred Cretans have deserted”, fueron utilizadas 173 antorchas y la transmisión duró alrededor de 1 hora y media (Historia de las comunicaciones). También el hombre tenía otras maneras de comunicarse; las personas se ubicaban en sitios altos y se comunicaban a través de gestos hechos por el movimiento de sus brazos. En otras geografías mucho más difíciles de tener línea de vista para ese tipo de comunicación, como por ejemplo en zonas selváticas, fueron desarrollados los “telégrafos de tambor”. La idea era transmitir la información a través de diferentes sonidos; esto era habitual en el África y en América, mientras que en China usaban el Tamtam, un gran plato metálico creado para transmitir información audible con algunos toques de un martillo sobre él.

Otro invento muy interesante era el denominado telégrafo hidro-óptico, el cual no sólo permitía la transmisión a partir de señales de fuego, sino que se podía “almacenar” el mensaje y se tiene evidencia de ellos hacia los años 360 a. de C. El sistema consistía en una serie de barriles llenos de agua hasta un determinado nivel que se tapaban o destapaban de acuerdo con la señal de fuego que correspondiera. Como se ve, todo esto se va pareciendo a una comunicación digital, la cual se explicará en detalle en adelante.

En los años 150 a. de C. había unas 3.000 redes de telégrafos de agua alrededor del imperio romano. Ellos trabajaron en este tipo de transmisión y tenían telégrafos de humo por una longitud total de unos 4.500 kilómetros, los cuales eran utilizados para señalización militar. Dicha red de telégrafos constaba de torres localizadas dentro de un alcance visible,

desde donde se enviaban señales ópticas y de humo combinadas con el fin de transmitir un mensaje.

Pero un primer paso hacia la digitización comienza con el sistema de numeración digital. Ya en el año 570 a. de C. los hindúes crearon un práctico sistema de notación numérica en el que el valor de una cifra era igual a su posición. El astrónomo Arya-Bhatta, de la India, desarrolló el sistema de numeración decimal, con el cual logró encontrar la facilidad de representar números largos con la adición de ceros decimales.

Saliendo de las comunicaciones y yendo a los cálculos, el ábaco fue el primer dispositivo auxiliar de cálculo del que se tiene noticia, inventado entre los años 1.000 y 500 a. de C. en Babilonia (algunas fuentes consideran que el ábaco fue inventado en China).

En 1642, Blaise Pascal desarrolló una máquina aritmética para ayudar a su padre, quien era recaudador de impuestos, a sumar cantidades de dinero. Esta máquina era muy simple y realmente sólo podía sumar y la resta se realizaba utilizando técnicas de complemento similares a las utilizadas por las computadoras modernas.

Aunque a Pascal se le atribuye la invención de la primera máquina operacional de cálculo, se sabe que Wilhelm Schickard, un astrónomo alemán, construyó en 1623 un dispositivo que podía sumar, restar, multiplicar y dividir (Mejía, 2015).

Algo más cercano a nuestra época, en 1703, Gottfried Wilhelm von Leibniz, matemático alemán, desarrolló el concepto que sería conocido como "digitización", el cual publicó en su artículo "Explication de l'Arithmétique Binaire".

El concepto se basaba en un sistema numérico en base-2, o sea, que representaba dos valores: "1s" y "0s". Dicho sistema fue luego mejorado y complementado por George Boole en 1854, matemático británico luego conocido por sus trabajos en álgebra (de Boole). Por su parte, continuaron trabajando en esa misma línea Claude Elwood Shannon (1938), matemático e ingeniero estadounidense reconocido por su libro titulado "La teoría matemática de la comunicación" y George Stibitz, científico, también estadounidense, destacado por sus trabajos realizados en los años 1930 y 1940 por el desarrollo de circuitos digitales lógicos usando relés electromecánicos como conmutadores. De ese modo se fueron dando los primeros pasos en las técnicas digitales y la computación, cuna de la digitalización actual. Justamente la primera computadora electrónica, aunque analógica, fue presentada por John Atanasoff, de origen búlgaro, en 1939. Atanasoff, con una subvención y la asistencia de un estudiante graduado, Clifford Berry, construyó el prototipo de la computadora Atanasoff Berry Computer (ABC) en noviembre de ese mismo año.

Continuando el camino de la computación, pero ya digital, Stibitz es también considerado uno de los pioneros, a través del desarrollo de la primera computadora electromecánica, la cual funcionaba con relés. En 1944 en Estados Unidos, Howard H. Aiken's diseñó el primer computador programable llamado MARK1.

Esta revolución se aceleró con el desarrollo de computadoras personales, como el Simon en 1950, Apple II en 1977 e IBM PC (Personal Computer) en 1981. Finalmente, con la introducción de la World Wide Web (www), cambiaron fundamentalmente el alcance, la dimensión, la escala, la velocidad y los efectos de la digitización, dando lugar a una mayor aceleración al proceso de transformación de las sociedades (Ford & Baum, 1997).

Digitización

La digitización se define como la representación de información analógica en modo digital, es decir, en formato binario. Esto no es, ni más ni menos, que la representación de textos, sonidos, imágenes o cualquier tipo de señal, en una serie de "unos" y "ceros". La gran ventaja de este tipo de tratamiento es que las computadoras, o cualquier dispositivo con cierta "inteligencia", puede almacenar, hacer cálculos, procesar o transmitir dicha información de manera más simple y con mayor calidad. Desde un simple texto, pasando por la temperatura en un motor, o hasta imágenes satelitales, todo puede ser representado por dicha sucesión de 1s y 0s. Prácticamente todas las organizaciones y empresas, ya sea industriales y de servicios, se han visto fuertemente favorecidos por esta digitización. Ejemplos simples de

señales digitizadas podrían ser un documento escaneado, la conversión de sonidos, música, video a MP4 o magnitudes fisicoquímicas como temperatura o PH. Se observa en la siguiente Figura 11 un esquema básico de digitización de sonido.

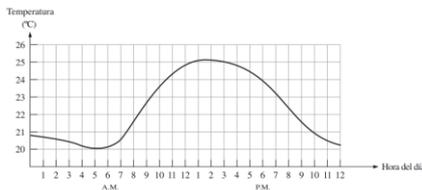
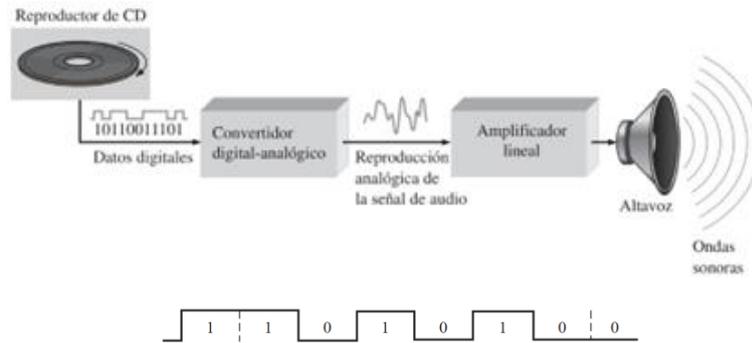


FIGURA 1.1 Gráfica de una magnitud analógica (temperatura en función del tiempo).

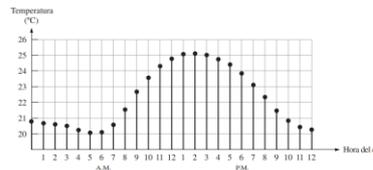


FIGURA 1.2 Representación de los valores muestreados (cuantificación) de la magnitud analógica de la Figura 1.1. Cada valor representado por un punto puede digitalizarse, representándolo como un código digital que consta de una serie de 1s y 0s.

Figura 11 – Digitización. Fuente: propia del autor.

Digitalización

A diferencia de la digitización, la digitalización se define como el proceso de cambio. En los negocios, la digitalización a menudo se refiere a habilitar, mejorar y transformar las operaciones y modelos comerciales mediante el uso de datos digitalizados, aprovechando las técnicas y tecnologías digitales para lograr un negocio superador; esto es un nuevo modelo de negocios “dirigidos” por los datos. Por lo tanto, la digitalización requiere de la digitización de todas las cosas. Basándose en este último concepto, se puede decir que cuando el intercambio, monitoreo y control de dichos datos se realiza a través de la Internet, se está hablando de “Internet de las cosas”, la cual es una de las varias tecnologías más relacionadas a la digitalización. El almacenamiento de datos en la “nube”, la automatización de flujos de trabajo, la realidad aumentada o la analítica de datos e inteligencia artificial para servicios al cliente, pueden ser buenos ejemplos de digitalización (Ford & Baum, 1997).

En resumen y tomando el trabajo del autor (Marciniak et al., 2020) se puede ilustrar lo anteriormente dicho de la siguiente manera:

Tabla 2 - Términos relacionados a la DX

	Digitización	Digitalización	Automatización	Robotización	TXDX
Acción	Conversión	Adaptación	Reemplazo	Imitación	Creación de Valor
Enfoque	Datos e Información	Actividades y Procesos	Actividades y Procesos	Actividades y Procesos	Nivel de negocio
Propósito	Eficiencia	Efectividad	Eficiencia	Eficiencia	Efectividad
Soporte	Técnicas digitales	Sistemas informáticos	Máquinas y Computadoras	Máquinas y Computadoras	Todos
Fase	Digitización	Digitalización	Optimización digital	Optimización digital	Transformación del Negocio

3.2. La 4ª Revolución Industrial, Transformación Digital e Industria 4.0

Revoluciones Industriales

Según el diccionario de Cambridge (2017), el término Revolución Industrial se define como: “[...] el período de tiempo durante el cual se empezó a trabajar más con máquinas en las fábricas que a mano en la casa”.

Los avances en ciencia y tecnología han apoyado continuamente el desarrollo de la industrialización en todo el mundo y han contribuido a darle significados más específicos y explícitos a este término a lo largo de los años. Si bien en la actualidad no existe un acuerdo universal sobre lo que constituye una revolución industrial, se han identificado cuatro fases generales desde la perspectiva de la evolución tecnológica las cuales se muestran en la Figura 12 y se describen a continuación (Liao et al., 2018).

Las islas británicas se industrializaron más rápidamente que los otros países europeos por una serie de circunstancias favorables. Cuando el mundo se orientaba hacia el perfeccionamiento y la utilización de las técnicas, en Inglaterra se daba un conjunto de condiciones capaces de exaltar esta nueva forma de actividad humana. Un reciente imperio colonial, mercados externos que conquistar y acumulación de capitales producidos por las grandes exploraciones. España y Holanda, potencias de la época, estaban en decadencia, lo que colaboró para que Inglaterra pasara a ser la gran potencia colonial. Además de estas causas existían otras; por ejemplo, como la actividad individual no tenía trabas, los empresarios pudieron desplegar sin límites su ingenio y su afán de progreso. A todo esto, la agricultura colaboró radicalmente con la técnica de producción. Los nuevos métodos de la agricultura hicieron que los agricultores emigraran abandonando sus tierras y de ese modo se concentraron en las ciudades, ofreciendo mano de obra intensiva para la nueva industria (Ducassé, 1979).

Hacia mediados del siglo XVIII, con la invención de la máquina a vapor y su impacto en la industria textil y del transporte, se comienza a delinear el comienzo de la 1ª Revolución Industrial, comenzando ésta con el aumento en el uso de sistemas mecánicos (Antunes et al., 2018). El diseño de los primeros telares mecánicos que permitieron el uso de la energía del agua y el vapor de manera más eficiente se considera como la evolución de la producción desde la fuerza de trabajo humana hacia la potencia de la máquina (Della et al., 2020). Las máquinas, en el momento de la primera revolución industrial, consistían en herramientas mecánicas simples, como engranajes, pistones, correas y poleas. Comenzaron en el Reino Unido y pronto se produjo un rápido progreso en un corto período de tiempo, extendiéndose por toda Europa y Estados Unidos (Öztürk & Kayar, 2019). Como se acaba de mencionar, esto se dio fundamentalmente en las fábricas textiles en una Gran Bretaña gobernada por una monarquía liberal no absolutista. Esta revolución se caracterizó por el aumento del uso de la energía del vapor y el desarrollo de máquinas-herramientas. No fue sólo una revolución tecnológica, sino que impactó en aspectos económicos, culturales y sociales, es decir, en los usos y costumbres de toda la sociedad. Así la gente se movilizó a las ciudades, modificando la geografía de varias regiones.

Durante la 1ª Revolución Industrial (1765) se asiste al surgimiento de la mecanización, proceso que sustituyó a la agricultura por la industria como fundamento de la estructura económica de la sociedad (Bisio et al., 2018). En resumen, se podría decir que el uso de la máquina de vapor para la mecanización de la producción es el hito para el comienzo de esta 1ª Revolución Industrial (Oluwaseun & Numbu, 2019).

La Segunda Revolución Industrial ocurrió entre los años 1850 y 1914, y supuso el desarrollo de grandes inventos en relación con el transporte y las telecomunicaciones, a través del telégrafo, el teléfono, la radio y el avión. También el uso de la electricidad y la producción en masa en las líneas de montaje, lo cual dio otro nuevo giro y perfeccionamiento

a la industria. Esta revolución tecnológica tuvo como principal contribución el desarrollo de máquinas que funcionaban con energía eléctrica y la producción en masa, lo que luego se convertiría en una práctica estándar. Esto trajo aparejado, además, una primera globalización, dado que la economía se internacionalizó y expandió su influencia sobre los territorios no alcanzados en la explosión anterior. Esta Segunda Revolución Industrial, también conocida como Revolución Tecnológica, ganó impulso a finales del siglo XIX y principios del XX, e hizo posible la producción en masa gracias a la electricidad y las líneas de montaje, tal como se mencionara anteriormente (Gadre & Deoskar, 2020). En conclusión, la manufactura, en la primera revolución industrial, dio paso a la división del trabajo y la capacidad de producción en masa en la segunda. Uno de los ejemplos más reconocibles y llamativos de producción en masa es Ford Motor Company de Henry Ford (Öztürk & Kayar, 2019). Por todo ello se dice que en ese siglo XIX, con el descubrimiento y la explotación del petróleo y posteriormente el uso de la electricidad, fundamentalmente en la industria, se da inicio a la denominada 2^{da} Revolución Industrial. El Reino Unido, Francia, Alemania, el Imperio austrohúngaro y Rusia, se hallaban en lo más alto de su supremacía, permitiendo a sus estados dominar buena parte del mundo (Morrow, 2008).

La denominada 3^{ra} Revolución Industrial, a mediados del siglo XX, fue determinada por la utilización de la electrónica, la invención del semiconductor, las tecnologías digitales, la automatización de la producción y finalmente la red de datos global, Internet, la cual abriría las puertas hacia una nueva era. Esta tercera revolución es conocida también como la Revolución Digital, justamente por el desarrollo de diferentes dispositivos para la conversión de señales analógicas en digitales. Por su parte, conforme los investigadores Della et al. (2020) la 3ra Revolución Industrial comenzó en 1969, utilizando el poder de la electrónica y la tecnología de la información para automatizar los procesos de fabricación.

Actualmente el mundo está entrando en una cuarta nueva era. En este siglo, la 4^{ta} Revolución Industrial se caracteriza por la unificación de diferentes tecnologías creando una nueva área de ciencias independientes, como, por ejemplo, la física, la ciencia de datos y la biología (Morshidi & Hamid, 2010).

La 4^{ta} Revolución Industrial

Además de la invención disruptiva de Internet, se están enfrentando, actualmente, cambios innovadores liderados por la inteligencia artificial, la computación en la nube, la comunicación autónoma entre distintos dispositivos o máquinas sin intervención humana y las tecnologías ciberfísicas CPS, integrando el mundo real con el virtual.

La 4IR representa una era de la aplicación de robots de fabricación inteligentes, componentes que controlan su propia producción y productos que se comunican con las máquinas y equipos mediante códigos únicos durante su producción (Kovács et al., 2019). Esta revolución desencadena impactos positivos y negativos. El gran desafío tiene que ver con enfrentar la destrucción de un número importante de puestos de trabajo debido al cambio de perfiles laborales, lo que hace necesario, entre otras acciones, adecuar la oferta educativa y el desarrollo de nuevos perfiles profesionales (Antunes et al., 2018).

En el sector manufacturero, por ejemplo, la 4IR puede cambiar el diseño, fabricación, operaciones, servicios, productos y sistemas de producción, la conectividad y la interacción entre piezas, máquinas y personas (Serumaga-Zake & van der Poll, 2021). Por otra parte, debe destacarse también que, no sólo las fábricas y empresas, sino que todos los sistemas socio técnicos son relevantes para la I4.0 (Babatunde, 2020).

Se ilustra en la siguiente Figura 12 la evolución de las revoluciones industriales.



Figura 12 - Estadios del desarrollo industrial. Fuente: propia del autor

La 4ª Revolución Industrial en Europa

Tal como se ha mencionado, el término “Industria 4.0” apareció por primera vez en la Hannover Messe en abril de 2011 en Alemania. Desde entonces comenzó a atraer cada vez más atención después de convertirse oficialmente en uno de los diez proyectos dentro del plan de acción “Estrategia de alta tecnología 2020” en marzo de 2012. Su objetivo era desarrollar tecnologías de vanguardia para asegurar el futuro de la industria manufacturera alemana. El informe final del Grupo de Trabajo “Industria 4.0” (Academia Nacional de Ciencias e Ingeniería, 2013) (National Academy of Science and Engineering, 2013) se publicó en abril de 2013, proporcionando la visión, características de integración, áreas prioritarias de acción y ejemplos de aplicaciones para la cuarta revolución industrial.

En Francia, la primera fase de “La Nouvelle France Industrielle”, una revisión estratégica, fue lanzada por el presidente de Francia en septiembre de 2013, definiendo 34 iniciativas sectoriales como las prioridades de la política industrial de Francia (Conseil National de L’industrie, 2013). Luego, a mediados de 2015, se llevó a cabo la segunda fase de este programa a través de complementarlo con la Alianza para la Industria del Futuro, que se centra en la modernización de las herramientas de producción de Francia y presentar nueve soluciones industriales que brindan respuestas del mundo real a desafíos económicos y sociales claves (Nouvelle France Industrielle, 2016).

Por su parte, en el Reino Unido desde diciembre de 2011, se propuso un proyecto de 2 años para proporcionar una imagen estratégica a largo plazo sobre su sector de fabricación hasta 2050, a saber, el “Future of Manufacturing” (El futuro de la fabricación). Como resultado, en octubre de 2013, el Programa de Prospectiva de la Oficina Gubernamental para la Ciencia publicó el informe final del proyecto “Foresight Programme of the Government Office for Science” (Foresight, 2013). Finalmente, en abril de 2016, se inició un “National Innovation Plan (NIP) (Plan Nacional de Innovación) por el “Department for Business, Energy and Industrial Strategy” (Departamento de Estrategia Empresarial, Energética e Industrial) para apoyar e impulsar la innovación. Como parte clave de este NIP, el nuevo Plan de Entrega de la agencia “Innovate UK” ha asignado casi una cuarta parte de su gasto anual a proyectos relacionados con Fabricación y Materiales (Innovate UK, 2016).

En Suecia, Teknikföretagen (Asociación Sueca de Industrias de Ingeniería) propuso en abril de 2013 una agenda estratégica de investigación e innovación para la innovación en la producción, denominada “Made in Sweden 2030”, que identifica seis áreas clave para fortalecer la producción y cinco instrumentos para asegurar implementación eficiente a largo plazo de la investigación y la innovación (Teknikföretagen, 2013). Luego, en junio de 2016, el Ministerio sueco de Empresa e Innovación anunció la estrategia de “Industria inteligente” para una nueva industrialización con el fin de fortalecer las capacidades de las empresas para cambiar y competir, y la I4.0 figura como una de sus cuatro áreas de enfoque (Suecia, 2016).

En España, la “Industria Conectada 4.0” ha sido puesta en marcha en julio de 2015 por el Ministerio de Industria, Energía y Turismo (MINETUR), con el objetivo de promover la DX de la industria española a través de la acción conjunta y coordinada de la ciudadanía y sectores privados (España, 2014b). Esta iniciativa es complementaria a la “Agenda para el Fortalecimiento del Sector Industrial en España”, aprobada por el Consejo de Ministros, en julio de 2014 (España, 2014a), y está alineada con la “Agenda Digital para España”, las cuales definen la hoja de ruta para que España cumpla con la “Agenda Digital para Europa” de 2015 a 2020, y también para el desarrollo de la economía y la sociedad digital en España (España, 2014c).

En los Países Bajos, en la Hannover Messe, en abril de 2014, se presentó un informe sobre el significado de “Smart Industry” (industria inteligente) que define y explica la visión de la industria inteligente en el contexto holandés (FME Dutch association of enterprises). Posteriormente, en noviembre de 2014, el Equipo de Industria Inteligente del gobierno holandés elaboró su correspondiente Agenda de Acción de acuerdo con tres líneas de acción principales: capitalización del conocimiento existente, aceleración en los laboratorios de campo y refuerzo de emprendimientos.

En Italia, desde septiembre de 2012, el Ministerio de Educación, Universidades e Investigación de Italia (MIUR) ha creado el Clúster de Tecnología Italiana “Fabbrica Intelligente” para promover, facilitar y apoyar la investigación y la innovación en sistemas de fabricación, y el desarrollo de la industria manufacturera nacional (Cluster Fabbrica Intelligente, 2015). En septiembre de 2016, el Ministerio de Desarrollo Económico de Italia anunció oficialmente el “Piano Nazionale I4.0”, que define las medidas estratégicas y complementarias que Italia debería implementar desde 2017 a 2020 (Italia, 2016).

En la Unión Europea, en diciembre de 2013, la nueva Asociación Público-Privada contractual para las “Fábricas del Futuro (FoF)” se publicitó en el marco del Programa Marco de Investigación e Innovación de la Unión Europea, denominado “Horizonte 2020”, que prevé proporcionar casi 1,150 millones de euros de financiación disponible específicamente para ello.

Más recientemente, sobre la base de la visión de FoF, desde abril de 2016, la Asociación de Investigación de las Fábricas Europeas del Futuro (European Factories of the Future Research Association - EFFRA) inició la preparación de un programa de trabajo para 2018 a 2020, denominado “Factories 4.0 and Beyond” (Fábricas 4.0 y más allá) para proporcionar una actualización sobre cómo estar en sinergia con la ola actual de “La 4^{ta} Revolución Industrial” (Asociación de Investigación de las Fábricas Europeas del Futuro, 2016) (European Factories of the Future Research Association, 2016).

La 4^{ta} Revolución Industrial en los Estados Unidos de Norte América

En los Estados Unidos, desde junio de 2011, el Consejo de Asesores de Ciencia y Tecnología del Presidente (President’s Council of Advisors on Science and Technology - PCAST) recomendó una serie de esfuerzos a nivel nacional denominado “Asociación de fabricación avanzada”. Éste tiene la intención de unir al gobierno federal, las industrias y las universidades para crear un entorno fértil para la innovación e invertir en nuevas tecnologías y metodologías de diseño (Consejo de Asesores de Ciencia y Tecnología del Presidente, 2011). Luego, en septiembre de 2013, para suceder a AMP, se lanzó AMP 2.0 e identificó una serie de pasos adicionales para permitir la innovación, asegurar el flujo de talento y mejorar el clima empresarial (Consejo de Asesores del Presidente de Ciencia y Tecnología, 2014).

La 4^{ta} Revolución Industrial en Asia

En China, el concepto de “Made in China 2025” (Hecho en China 2025) fue propuesto y recomendado inicialmente por la Academia China de Ingeniería (Chinese Academy of Engineering - CAE) a principios de 2014. Luego, liderado por el Ministerio de Industria y Tecnología de la Información de China (Ministry of Industry and Information Technology (MIIT), elaborando un plan estratégico. Finalmente, en mayo de 2015, fue aprobado

oficialmente por el Consejo de Estado chino (Chinese State Council) y se convirtió en un programa de acción nacional junto con el plan “Internet +”. Da prioridad a diez campos del sector manufacturero para acelerar la informatización y la industrialización en China (2015) (Liao et al., 2018).

Transformación Digital

El término Transformación Digital (DX) tiene un alcance más amplio aún que la digitalización o la observación de la innovación tecnológica de la 4IR. No se trata sólo de tecnologías, sino también de procesos y personas. Se puede decir que es la conjunción de esos tres pilares (Figura 13).

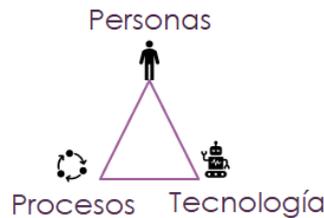


Figura 13 - La base de la DX. Fuente: propia del autor

En el ambiente actual, la velocidad de evolución de la tecnología es vista como una poderosa fuente de generación de cambios, pero no se habla tan sólo de tecnologías, sino además de la fusión del mundo físico con el virtual, inclusive el biológico (Zapata et al., 2020). De hecho, son las expectativas de los clientes sobre los productos y servicios y los cambios en las tendencias de los consumidores los que definirán los requisitos de esta nueva era socioeconómica, exigiendo a las empresas la agilidad y flexibilidad necesarias para responder a los cambios del mercado. Además de los desafíos que representan, las tecnologías digitales poseen la capacidad de desarrollar productos y servicios más sofisticados, con diversas funcionalidades, pero también dotados de cierta inteligencia para interactuar de manera autónoma durante todo su ciclo de vida, abriendo nuevas posibilidades de eficiencia y flexibilidad a su proceso productivo.

Son innumerables los cambios que se han estado produciendo, desde tecnologías en la fotografía y video, hasta automóviles autónomos, drones, o cirugías realizadas por robots.

La digitalización de todas las “cosas” ha transformado a las organizaciones, y este cambio ha generado nuevas circunstancias en las que un gran número de organizaciones compiten por hacer frente; segmentos de clientes nuevos y emergentes, diversidad cultural en un mercado global, volatilidad del mercado, aumento de las expectativas de los clientes sobre la calidad de los productos y servicios, y el impacto de Internet en el negocio principal de una organización.

En el mercado laboral, ha habido un crecimiento en trabajos de nivel superior, como puestos gerenciales y profesionales que requieren flexibilidad y habilidades para resolver problemas lo cual impacta también en la educación (Sousa & Rocha, 2019). Pero, como se dijo, la tecnología por sí sola no es suficiente para entrar en la DX. Los procesos de negocios se deben adaptar a una nueva modalidad de trabajo dirigida por datos. La integración horizontal, o sea, la cadena de valor completa, y la integración vertical, es decir, sistemas de las tecnologías de la Información (IT) y las tecnologías de operación (OT), deben poder comunicarse y operar entre sí. Toda esta transformación, tanto en las tecnologías como los procesos de negocios y las personas, es lo que cabe bajo un paraguas conceptual de la DX.

Industria 4.0

La iniciativa “Industria 4.0” se hizo pública por primera vez en la Feria de Hannover en 2011. Henning Kagermann, Wolf-Dieter Lukas y Wolfgang Wahlster, tres representantes del mundo empresarial, la política y la ciencia, mostraron cómo se produciría el cambio de paradigma en la industria. “En la próxima década”, decían, refiriéndose a nuestra actualidad, “serán posibles nuevos modelos comerciales basados en sistemas ciberfísicos, y Alemania podría

“jugar un rol fundamental en ello” (Ates et al., 2020). Se explicaba también que, a diferencia de otros países industrializados, Alemania había logrado mantener estable el número de empleados en la producción durante los últimos diez años, controlando los efectos económicos de las crisis financieras mejor que muchos otros países, y esto fue debido a que la industria manufacturera alemana es de un tamaño medio, pero sumamente innovadora (Kagermann, n.d.).

Como se decía, en dicha exposición de Hannover 2011, y por primera vez, este fenómeno se menciona como Industrie 4.0 (Rauch et al., 2020) (Qin et al., 2016b) (Sanders et al., 2016) (Oluwaseun & Numbu, 2019). En abril de 2013, el término "Industrie 4.0" apareció nuevamente en la feria industrial en Hannover, Alemania, y rápidamente se convirtió en la estrategia nacional alemana.

El término I4.0 describe la revolución en la industria manufacturera en todo el mundo. Es la combinación de la tecnología de la información, de operaciones e Internet en la fábrica (Prause, 2019); es la integración e interacción de tecnologías, tanto en el ámbito digital como físico, lo cual la diferencia de otras revoluciones industriales (Demartini & Tonelli, 2018); los objetos inteligentes se comunican entre sí y crean una Internet de objetos y servicios. El mundo físico y el mundo virtual están integrados en sistemas ciberfísicos (L. Sommer, 2015). Es la DX aplicada a la industria (Salimbeni & Mamani, 2020). Por su parte Kowang et al. (2019) define la I4.0 como la revolución de todo el proceso de la cadena de valor en la fabricación de bases industriales sobre la base del sistema de producción ciberfísico. En el “Industrial Internet Consortium 2017” la I4.0 se definió como la integración de maquinarias y dispositivos físicos complejos con sensores y software en red, utilizados para predecir, controlar y planificar mejores resultados comerciales y sociales (Maresova et al., 2018). Por su parte, Kagermann (2014) lo define como un nuevo nivel de organización de la cadena de valor y gestión a lo largo del ciclo de vida de los productos. Mientras que Hermann et al (2016) lo considera como un término colectivo para tecnologías y conceptos de organización de la cadena de valor.

En un informe publicado por el Boston Consulting Group, con el título: "I4.0: El futuro de la productividad y el crecimiento en la manufactura", se identificaron las nueve tecnologías de transformación que caracterizan la I4.0 (Rüßmann et al., 2015) , tal como se muestra en la siguiente Figura 14.



Figura 14 - Las 9 tecnologías de la I4.0. Fuente: adaptado de LNS Research

Por otra parte, para Rauch & Vinante (2021), la I4.0 se caracteriza por las siguientes tecnologías clave: (1) fabricación avanzada, (2) fabricación aditiva, (3) simulación, (4) realidad aumentada, (5) integración de datos horizontal/vertical, (6) internet industrial de las cosas

(IIoT), (7) computación cognitiva, (8) ciberseguridad y (9) big data y analítica (BDA). Sin embargo, en esta nueva era, se desarrollan e implementan muchas otras nuevas tecnologías.

Por su lado, en la Unión Europea, se realizó un estudio mucho más detallado sobre las tecnologías habilitadoras y sus diferentes ramificaciones, tal como se observa en la European Commission (2017) (Mabkhot et al., 2021) y son las que serán consideradas como base para el desarrollo del presente trabajo (Figura 16). Se las describen en la siguiente sección (Sección 3.3).

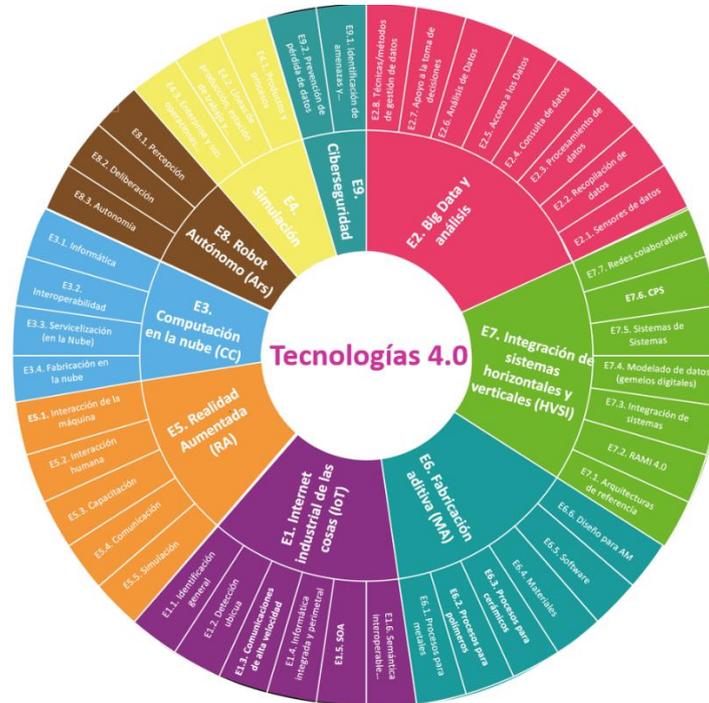


Figura 15 – Elementos tecnológicos de la Industria I4.0. Fuente: EC, 2017

La I4.0 es un término ya conocido por muchas de las industrias argentinas, especialmente en las medianas y grandes. Como comparación se puede mencionar que, en 2015, en Alemania, cuna de la I4.0, tan sólo un tercio de la industria conocía el concepto I4.0 (L. Sommer, 2015).

Las Pequeñas y medianas empresas (pyme) sufren los impactos de la actualidad económica, fundamentalmente por factores externos a ellas, pero existen una cantidad de variables internas que no colaboran para mitigar los agentes externos negativos, sino que, por el contrario, generalmente, agravan el cuadro general de situación. La adopción de nuevas tecnologías puede convertirse, a veces, en un factor que origine nuevos problemas en lugar de resolverlos. La inadecuada infraestructura de la empresa y las competencias del personal que deban llevarla a cabo podrían ser también la causa raíz de este efecto. Por regla general, existe una conciencia sobre la relevancia del tema, pero la disposición y la capacidad para enfrentar este desafío existen en partes, sin embargo, dependen fuertemente del tamaño de la empresa. Cuanto más pequeñas son las pyme, mayor es el riesgo de que se conviertan en víctimas en lugar de beneficiarias de esta revolución.

El hecho de que las máquinas comiencen a comunicarse entre sí, prescindiendo de la intervención humana, genera en la mayoría de los casos mejoras en la productividad, pero demanda una mayor y mejor preparación en la estructura organizacional y en las competencias de las personas.

Según los autores Mosterman & Zander (2016) los tres pilares de la I4.0 son: (1) la digitalización de la producción, (2) la automatización y (3) el intercambio automático de datos. Los objetos inteligentes se comunican, se crea una Internet de objetos y servicios, el mundo físico y el mundo virtual se funden en sistemas ciberfísicos. Como se mencionaba, este tipo de automatización generalizada produce incertidumbre en los empleados de la

empresa, pensando en la desocupación que podría producir. Existe la preocupación de que el efecto redundante de la I4.0 predominará en el largo plazo, lo que llevará a lo que se conoce como desempleo tecnológico (Roblek et al., 2016).

Estudios actuales, fundamentalmente en Alemania, comprueban la mejora en la productividad en las empresas gracias a su digitalización y automatización: durante los próximos cinco a diez años, la I4.0 será adoptada por más compañías, lo que aumentará la productividad en todos los sectores manufactureros alemanes (Logunova et al., 2020) (Rüßmann et al., 2015).

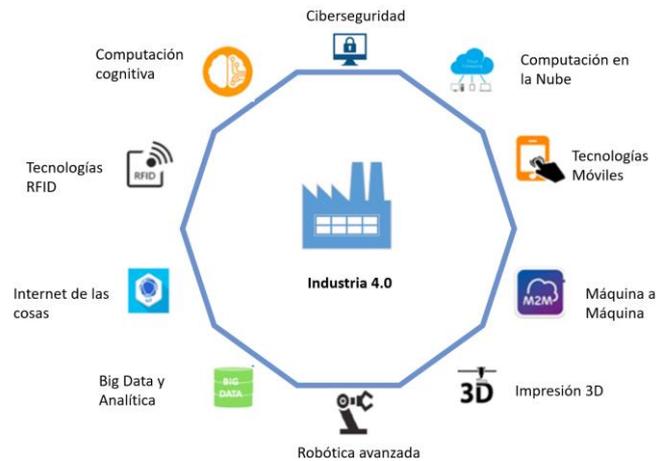


Figura 16 - Tecnologías habilitadoras de la I4.0. Fuente: propia del autor

Adicionalmente a las tecnologías utilizadas en las empresas de servicios, se agregan a las industrias manufactureras la comunicación máquina-máquina, la fabricación aditiva o también llamada 3D, el internet industrial de las cosas y los sistemas ciberfísicos o robots colaborativos. Los sistemas ciberfísicos (CPS) son una disciplina emergente que implica sistemas informáticos y de comunicación diseñados que se interconectan con el mundo físico.

Demanda en la 4^{ta} Revolución Industrial

El origen de los paradigmas emergentes sobre el cambio planteado en este contexto se estableció, como ya se dijo, en 2011. Muchas de las principales economías del mundo, incluidas Alemania, Estados Unidos y Francia, que son conocidas por su éxito en la industria y la producción, comenzaron a sufrir una derrota económica contra China; siendo ésta la estrella en ascenso del mercado asiático. Los bajos costos laborales en algunos países densamente poblados, especialmente China, son los principales factores que dificultan la competencia.

Además de los costos laborales existentes, el hecho de que el promedio de edad de la población mundial haya aumentado y la tasa de crecimiento de la población haya disminuido gradualmente, en muchos países y principalmente en los europeos, comprende muchos factores de riesgo para la industria y la producción para el futuro cercano (Hackmann et al., 2019).

En años recientes, las compañías manufactureras han experimentado la globalización, el incremento de la competencia, las demandas dinámicas del mercado, y el acortamiento de los ciclos de vida de los productos. Por lo tanto, cada cambio en los productos demandados necesita sistemas de manufactura más ágiles y eficientes. Estos cambios en la demanda hacen que sea necesaria una mayor flexibilidad de los sistemas y procesos de producción para abordar la creciente complejidad de los productos y las cadenas de suministro. Ello puede ser realizado mediante la integración de Tecnologías de la Información (IT) del nivel de producción con el nivel de planificación y más allá de los clientes

y proveedores (Faller & Feldmüller, 2015). Con el fin de lidiar con dichos desafíos multidimensionales, es esencial la producción flexible, adaptable y eficiente, como así también las modificaciones en los sistemas de logística.

La I4.0 ofrece una nueva forma de combinar las operaciones físicas y las tecnologías de la información con el fin de superar esos procesos actuales tan rígidos. La utilización de CPS e IoT delinea sistemas altamente inteligentes y conectados lo que permite a las empresas agregar más valor a sus productos (Hamzeh et al., 2018).

Objetivos y beneficios de la I4.0

El objetivo de la I4.0 es trabajar con un mayor nivel de automatización logrando una mejor productividad y eficiencia operativa (Alcácer & Cruz-Machado, 2019) . Aporta un buen desarrollo para el escenario industrial enfocándose en la creación de productos, procesos y procedimientos inteligentes. Las empresas esperan incrementar el nivel de digitalización trabajando juntas en ecosistemas digitales con clientes y proveedores.

La conectividad digital permite una producción automatizada y auto-optimizada de bienes y servicios, incluida la logística, sin intervención humana (sistemas de producción autoadaptables basados en la transparencia y el poder predictivo). Las redes de valor se controlan de manera descentralizada, mientras que los elementos del sistema (como las instalaciones de fabricación o los vehículos de transporte) toman decisiones autónomas (Hofmann & Rüsçh, 2017).

Por su parte, los beneficios en la adopción de nuevas tecnologías están claramente identificados: mejora de la calidad del producto, mejora de las comunicaciones, ahorro de tiempo y costos, mejora en las relaciones con los clientes, consumidores y más eficiencia en el desarrollo de productos y servicios personalizados (Antunes et al., 2018).

Desafíos y barreras de la I4.0

Grandes desafíos y barreras de entrada están enfrentando la I4.0. Entre ellos es importante mencionar los costos de implementación, cambios organizacionales y de procesos, seguridad y protección de datos y la necesidad de personal calificado en todos los niveles organizacionales, capaces de manejar la creciente complejidad de los futuros sistemas de producción (Schumacher et al., 2016). Sin embargo, este marco de referencia emergente impulsado por la I4.0 trae no sólo ventajas, sino como se dijo también grandes desafíos, debido a la enorme cantidad de dispositivos y datos a gestionar. Por esta razón se deben diseñar soluciones específicas para hacer frente a los problemas típicos relacionados con el IoT, como las limitaciones de energía y almacenamiento, y los nuevos escenarios desafiantes (Bisio et al., 2018) .

A su vez, especialmente las pyme, tienen la dificultad de no estar preparadas, en general, para aplicaciones y tecnologías de la I4.0. Esto se debe al hecho de que esas empresas, generalmente, no tienen la mano de obra calificada para el futuro y más allá de su propio producto y rango de producción para ingresar a nuevas áreas y, por lo general, no tienen la posibilidad de invertir en tecnologías emergentes (Faller & Feldmüller, 2015).

Al respecto, estudios realizados en Nueva Zelanda, dicen que las empresas están preocupadas por la innovación de sus modelos de negocio actuales, ya que hay varios desafíos internos y externos que deben identificarse y abordarse. También es un desafío para la dirección desarrollar modelos de negocios novedosos y comercialmente viables (Hamzeh et al., 2018).

En Dinamarca, la utilización de tecnologías de I4.0 arroja como resultado la reasignación de personal de mano de obra no calificada a mano de obra técnicamente calificada. Una de las principales preocupaciones de los empleados de las empresas que implementan tecnologías 4.0 (T4.0) es que ellas reemplazarían a la fuerza laboral; se cree que las T4.0 resulten en una disminución del número de empleados. Aunque esta discusión varía caso por caso, estas respuestas se dividieron entre aquellos que creen que los puestos

permanecerán y aquellos que creen que se eliminarán ciertos puestos de trabajo, pero se crearán otros nuevos (Darnley et al., 2018).

Por su parte Shuttleworth et al. (2022) concluyen que su análisis empírico corrobora la afirmación de que una mayor digitalización brindará más oportunidades de empleo para los empleados altamente calificados, mientras que las personas que trabajan en la fabricación y el ensamble son más susceptibles a la pérdida de empleo.

Finalmente, y en relación con el “trabajador 4.0” se deben mencionar las habilidades de adaptabilidad de los empleados para la I4.0. Según los autores Sony & Mekoth (2022) las seis dimensiones descubiertas en su estudio son: (1) la adaptabilidad interpersonal en la Industria 4.0, (2) el manejo de crisis y circunstancias imprevistas, (3) la adaptabilidad a la resolución creativa de problemas en la Industria 4.0, (4) la adaptabilidad con el aprendizaje, la capacitación y la educación continua en la Industria 4.0, (5) la adaptabilidad con la gestión del estrés en la Industria 4.0 y (6) la adaptabilidad del equipo en la Industria 4.0.

3.3. Tecnologías habilitadoras de la I4.0

3.3.1. Introducción a las Tecnologías y Organizaciones Exponenciales

Tecnologías Exponenciales

Las nuevas tecnologías, denominadas también exponenciales, se destacan porque cumplen con tres características principales:

1. Su costo y complejidad van disminuyendo en el tiempo en forma relevante.
2. Su capacidad y la cantidad de diferentes aplicaciones aumenta en forma exponencial.
3. Son utilizables, prácticas, accesibles y capaces de resolver problemas reales.

Algunas de las tecnologías que cumplen con las tres características antes mencionadas son: dispositivos móviles conectados, Inteligencia Artificial, Internet de las Cosas (IoT), Cloud Computing (CC), Computación cuántica, robótica avanzada, vehículos autónomos, genómica, impresión aditiva, almacenamiento de energía y las energías renovables, nano tecnología, drones, BlockChain (BC) y realidad virtual y aumentada, entre otras.

Economía Exponencial

Se ha acuñado también el término “Economía Exponencial”, creado originalmente por Nathan Myhrvold, antiguo directivo de Microsoft, al referirse a la existencia de campos de la tecnología con crecimientos de eficiencia exponenciales que, puestos a disposición del mercado, podrían generar crecimientos económicos también exponenciales, aumentando notablemente la productividad por lo que la riqueza y el bienestar se difundirían por todo el mundo. Algunas condiciones que el autor cita son la masa crítica de investigación, los científicos cooperando y compitiendo, un conjunto de empresas competidoras, sacar provecho de la investigación y que operen bajo estándares comunes. Unos pocos productos, innovaciones disruptivas, que inicien el espiral innovador y un profundo conocimiento de los fenómenos físicos subyacentes puedan determinar procesos de mejora más allá de los límites físicos aparentes.

Organización Exponencial

Las organizaciones exponenciales son aquellas capaces de causar un impacto mucho mayor que su competencia tradicional. Las empresas que lo han logrado, suelen tener como nexo común que están utilizando las tecnologías de la información y las comunicaciones y que operan en el mundo digital sin perder la conexión con el mundo físico.

Las seis características clave de las organizaciones exponenciales, conocidas como “Las 6Ds” son una reacción en cadena de progreso tecnológico, una hoja de ruta de rápido

desarrollo que siempre conduce a enormes trastornos y oportunidades” (Peter Diamandis and Steven Kotler cofundador y presidente de Singularity University).

Las 6D de las organizaciones exponenciales son:

1. Digitización (Digitized): digital, facilitar, compartir, velocidad, escalabilidad.
2. Decepción (Deceptive): resultados no esperados, paciencia.
3. Disrupción (Disruptive): fuera de lo tradicional, por dentro de la organización o por fuera de ella.
4. Desmaterialización (Dematerialized): acostumbrados al uso de un elemento físico, se transforma por completo en una versión digital, brindando las mismas prestaciones.
5. Desmonetización (Demonetized): disminución de costos, cuando las personas se encuentren con mayor accesibilidad con la tecnología, el costo de conseguir o llegar a cualquier cosa tenderá a cero.
6. Democratización (Democratized): el producto o servicio alcanzará a todas las personas de manera democrática. Será accesible para todos.

Las leyes del cambio

Mientras que la mente humana percibe los cambios de manera lineal, la tecnología evoluciona exponencialmente. Existen tres leyes clave para entender esta exponencialidad, según se muestra en la Figura 17.

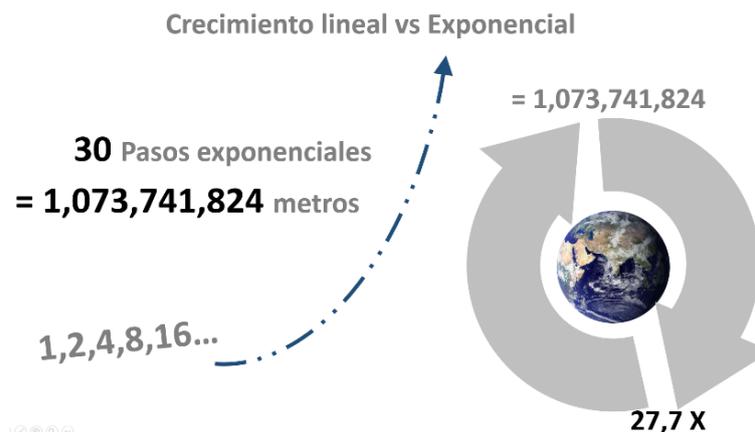


Figura 17 - Exponencialidad. Fuente: propia del autor

La Ley de Moore:

Gordon Moore (cofundador de Intel el 19 de abril de 1965), enuncia una Ley que lleva su nombre tras su trabajo relacionado con la producción masiva de semiconductores y transistores. Establece que la velocidad del procesador o el poder de procesamiento total de los ordenadores, se duplica cada 24 meses. Originalmente era cada 12 meses, luego se reformuló (1975). En 2007 el propio Moore determinó una fecha de caducidad: «Mi ley dejará de cumplirse dentro de 10 o 15 años, es decir para el 2022.

La Ley de Butter:

Tomando de base la ley de Moore, Gerald Butter, científico líder en Bell Labs (AT&T Bell Laboratories), hizo un estudio en retrospectiva con respecto a la velocidad de datos en fibra óptica. La cantidad de información transmitida a través de una fibra óptica se duplica cada 9 meses. Consecuencia: el costo de transmitir un bit sobre una red de fibra óptica se reduce a la mitad cada 9 meses.

La Ley de Kryder:

Mark Howard Kryder, Ing. Eléctrico y vicepresidente de investigación y CEO de Seagate, ha inspirado el término ley de Kryder desde 2005 para referirse a los rápidos aumentos en la densidad de almacenamiento de unidades magnéticas durante los últimos 60 años. La capacidad de almacenamiento se duplica cada 13 meses. Es un término para un análisis de la densidad y capacidad de los medios de almacenamiento en disco duro a lo largo del tiempo. En resumen, el ritmo del cambio a los que se refieren estas leyes se manifiesta sobre los siguientes tres aspectos:

- Poder de procesamiento (Ley de Moore)
- Velocidad de la comunicación (Ley de Butter)
- Capacidad de almacenamiento (Ley de Kryder)

Finalmente se puede decir que se procesa, se transmite y se almacena, y entorno a estas tres actividades se desarrolla todo el mundo de la DX.

El éxito no depende sólo de emplear las tecnologías exponenciales más adecuadas, sino que hay que aprovecharlas, mitigando los riesgos que impone su utilización. La innovación en las organizaciones puede ser un rasgo diferencial.

.....

3.3.2. *IoT - Internet de las cosas*

La tecnología de la información es, actualmente, mucho más que los datos generados por los seres humanos. Las máquinas, con sus microprocesadores embebidos, son capaces de comunicarse entre sí y con los seres humanos, vía Internet u otros medios inalámbricos. Esto es lo que comúnmente se denomina Internet de las Cosas o las “cosas en Internet” (IoT) (Ghosh, 2017). Una investigación llevada a cabo en el jardín botánico de Erlangen, Alemania, junto a la universidad local es un claro ejemplo de los inicios del IoT. Allí estaban investigando temas acerca de cómo y cuándo crecían realmente los árboles y la diferencia entre los de la ciudad y los del bosque. Por este motivo equiparon a los árboles con sensores y WiFi (Wireless Fidelity) para recopilar datos; entre ellos un roble de 150 años. A causa de ello el viejo roble, en el verano de 2011, se convirtió en miembro activo de Facebook, Flickr y YouTube y comenzó a “hablar”.

El IoT es una de las principales tecnologías habilitadoras de la 4IR. Es la red de objetos físicos o "cosas" integrados con la electrónica, software, sensores y conectividad, los cuales permiten que estos objetos recopilen e intercambien datos. Estas capacidades incluyen comunicación y cooperación, direccionabilidad, identificación, detección, actuación, procesamiento de información integrado, localización e interfaces de usuario. (Bisio et al., 2018).

Existe un interés creciente en la conexión progresiva de los sistemas electrónicos a través de redes informáticas, y específicamente a Internet. Las tecnologías habilitadoras, como redes inalámbricas de baja potencia, los protocolos de comunicación y la computación en la nube, abren la posibilidad de una nueva gama de aplicaciones desarrolladas a partir de la interacción de dispositivos conectados a Internet. El IoT es el paradigma de diseño detrás de estas aplicaciones. Servicios como hogares y lugares de trabajo inteligentes, redes de sensores inalámbricos en infraestructuras urbanas y rurales, automatización industrial y atención médica inteligente, se encuentran entre algunos campos relevantes de implementación.

El término IoT fue propuesto por Kevin Ashton en 1999, enfatizando inicialmente las crecientes capacidades de los identificadores de radiofrecuencia (RFID) y tecnologías inalámbricas. La identificación por radiofrecuencia es una tecnología de captura de datos de identificación automatizada (AIDC) cada vez más utilizada para mejorar las funciones de seguimiento de objetos y componentes, la captura de datos “fuera de la vista”, la navegación y las capacidades de mapeo espacial (Hakeem et al., 2020).

No obstante, el término IoT se diversificó para incluir un amplio conjunto de redes de sensores inalámbricos (Carreras Guzmán et al., 2020). La tecnología RFID ha sido ampliamente estudiada y explotada en varios campos de aplicaciones. Dicho concepto hizo su primera aparición en 1948, se desarrolló fuertemente durante los años 70 y 80, y finalmente encontró aplicaciones en todo el mundo en el nuevo milenio.

Un sistema RFID generalmente consta de tres componentes: (1) una etiqueta, (2) un lector y (3) un sistema de alojamiento, generalmente interconectados con los sistemas empresariales (De Marchi et al., 2022).

Como se dijo, el IoT se refiere a un mundo de interconexión en red, en el que varios objetos están integrados a través de sensores electrónicos, actuadores u otros dispositivos digitales, con el fin de que puedan conectarse e intercambiar datos. En general, puede ofrecer conectividad avanzada de objetos físicos y de sistemas y servicios, lo que permite la comunicación de objeto a objeto y el intercambio de datos y por ende de información (Zhong et al., 2017a).

Las “cosas”, como se ha dicho, se conectan de modo inalámbrico y sin intervención humana; además, pueden poner sus datos a disposición de los usuarios permitiéndoles acceder y tener control sobre el dispositivo desde cualquier parte del mundo. En palabras simples, el IoT recopila datos desde y en cualquier lugar y en cualquier momento, luego los analiza, los procesa y realiza acciones para respaldar la toma de decisiones (Gattu, 2021).

Forero & Sisodia (2020) definen el IoT como una tecnología emergente, que ayuda a dar forma a una nueva era en la tecnología informática y de las telecomunicaciones. Por su parte, Piccarozzi et al. (2018), opinan que desde un punto de vista conceptual el IoT se basa en tres fundamentos: (1) que los objetos inteligentes sean reconocibles, (2) que se comuniquen entre sí y (3) que interactúen entre ellos. Al menos se los relacionan con un nombre y una dirección, la cual es una definición legible por los humanos. La dirección es un dato identificable por computadora que se puede utilizar para comunicarse con una entidad.

Ates et al. (2020) aseveraban que la capacidad de los objetos para conectarse entre sí traería consigo muchos beneficios positivos, especialmente en el campo de la producción. Agregaba también que las siguientes cinco tecnologías principales del IoT se utilizan ampliamente para la distribución de datos de red. Las tecnologías de IoT se definen como (1) identificación por radiofrecuencia (RFID), (2) redes de sensores inalámbricos (WSN), (3) middleware, (4) computación en la nube y (5) software de aplicación.

Según un informe de Gartner habría alrededor de 25 a 30 mil millones de dispositivos IoT conectados a través de Internet para 2020 (Sivagami et al., 2021). Se puede observar un detalle de ello en la siguiente Figura 18.

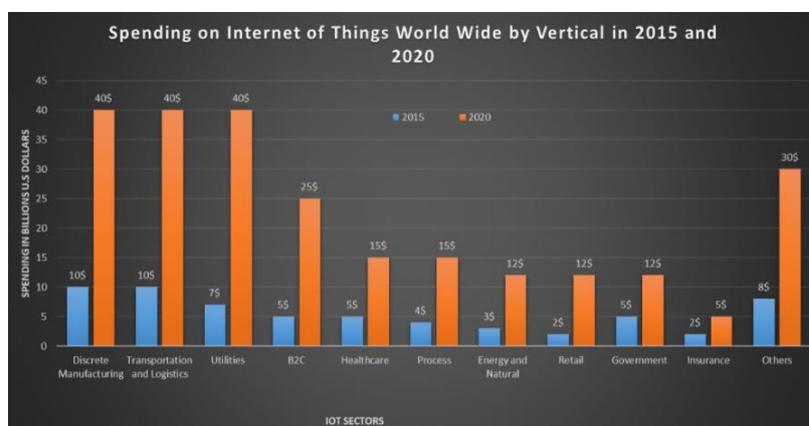


Figura 18 – Evolución del IoT. Fuente: Sivagami 2021

Conforme un estudio de Deloitte University Press (Holdowsky et al., 2015 según Braun (2009), el precio promedio de un sensor cayó más del 90% entre 1992 y 2014 (de us\$ 22.00

a us\$ 1.40) y las velocidades de reloj del microprocesador aumentaron en un factor de 991 hasta alcanzar lo 30GHz durante el mismo período de tiempo.

El IoT ha ganado mucha popularidad impulsada por los nuevos avances en los sistemas de información móvil. En general, el concepto de inteligencia está estrictamente relacionado con la definición de la jerarquía de datos-información-conocimiento-sabiduría que ha evolucionado en muchas variantes diferentes, cada una caracterizando un aspecto distinto de la información. Este concepto suele estar representado por una estructura piramidal, tal como muestra la Figura 19 (Bisio et al., 2018).

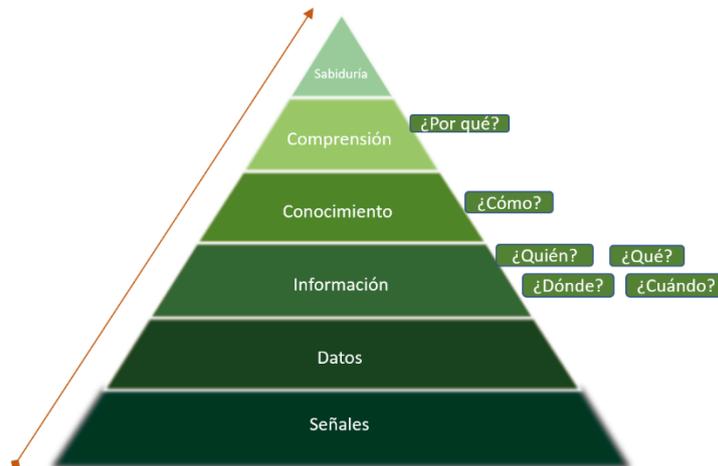


Figura 19 - Jerarquías del IoT. Fuente: propia del autor

Finalmente, tal como aseveran Vo et al. (2020) IoT y BD son útiles para resolver problemas utilizando datos en tiempo real.

Clasificaciones de los dispositivos IoT

En este apartado se describirán los dispositivos IoT según su clasificación, teniendo en cuenta los siguientes criterios:

a. La capacidad y desempeño.

Según la capacidad y el desempeño, los dispositivos de IoT se clasifican como dispositivos de gama baja, de gama media y de gama alta. Los dispositivos de gama baja están basados en propiedades técnicas tales como memoria, soporte de hardware heterogéneo, conectividad de red, eficiencia y capacidad en tiempo real. Se clasifican además como "Class 0, Class 1 y Class 2". Los dispositivos de IoT de gama media y alta tienen la capacidad de utilizar más de una tecnología de comunicación. La velocidad del reloj y la RAM (Random Access Memory) está en el rango de cientos de MHZ.

b. La entidad y el ciclo de vida del servicio.

Otra clasificación está basada en la relación de la entidad con la de los dispositivos físicos y se clasifican como servicio de bajo nivel, servicio de recursos, servicio de entidad y servicio integrado. Estas clasificaciones están representadas en la Figura 20 y la Figura 21.



Figura 20 - Entidades. Fuente: Sivagami 2019

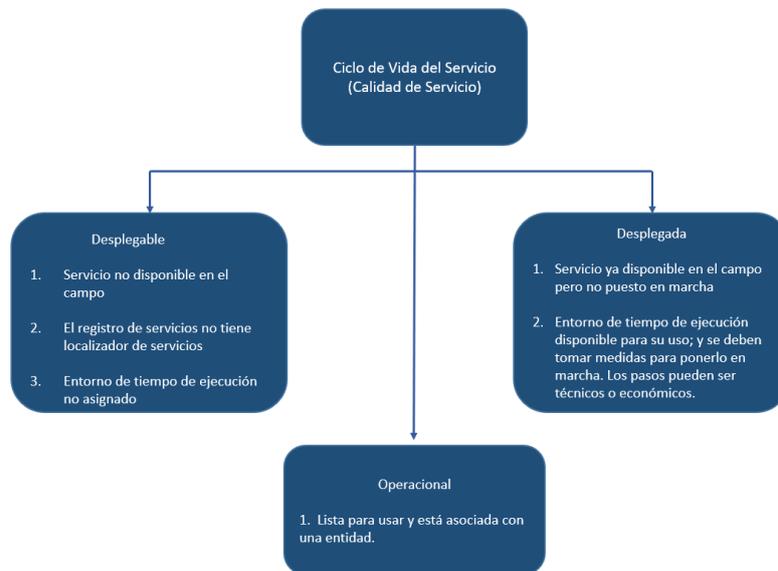


Figura 21 - Ciclo de vida del servicio. Fuente: Sivagami 2019

c. El sistema operativo.

Los dispositivos IoT pueden tener un sistema operativo incorporado para ejecutar los programas y autoadministrarse. Según el sistema operativo que posean se clasifican como gama baja y gama alta. La representación esquemática se muestra en la Figura 22.

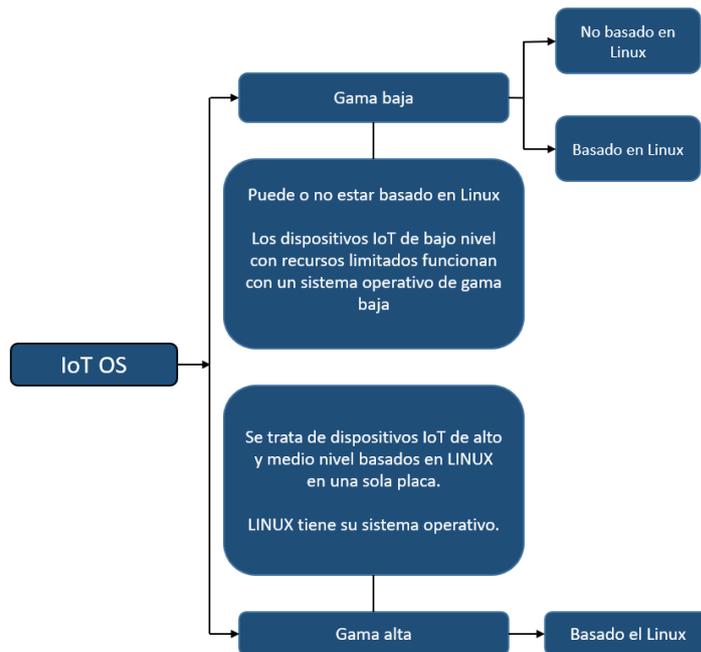


Figura 22 - Sistemas operativos. Fuente: Sivagami 2019

d. Las tecnologías de comunicación

El IoT requiere tecnologías de comunicación para conectar objetos heterogéneos con el fin de proporcionar servicios inteligentes específicos. Las tecnologías de la comunicación ayudan al intercambio de información. La comunicación se puede realizar localmente mediante Bluetooth, comunicación de campo cercano NFC (Near Field Communication) o mediante Internet. La principal diferencia entre la comunicación local y el protocolo de Internet se basa en factores tales como el rango de comunicación, el consumo de energía y la memoria utilizada.

El protocolo de Internet, aunque tiene un alto consumo de energía, no tiene limitaciones de alcance, es decir, no está restringido a una distancia específica. Algunos de los protocolos de Internet son NFC (Near Field Communication), redes de sensores inalámbricos y tecnologías de bajo consumo. En el caso de las NFC las ondas de radio que se utilizan para identificar los objetos son los denominados RFID. NFC es un subconjunto de RFID, es un RFID de alta frecuencia que funciona a 13,56 MHZ; consta de lector, etiqueta y antena y es una forma segura de intercambio de datos. La RFID puede ser activa o pasiva. Los requisitos de red no son los mismos para todas las aplicaciones de IoT. Cada aplicación IoT tiene sus propios requisitos. Los factores que influyen en la selección de la tecnología inalámbrica para una aplicación única de IoT son: el alcance, la seguridad, la latencia del ancho de banda, la energía consumida por los dispositivos, la calidad del servicio y la gestión de la red.

e. El middleware

Los diferentes dominios de aplicación que se comunican a través de distintas interfaces están vinculados por una plataforma de software llamada IoT Middleware. El middleware también se denomina “software glue” (pegamento de software), ya que ayuda a los programadores a desarrollar software para implementar la comunicación. Si la programación no está diseñada para ello desde un principio, el middleware permite integrarla más tarde con la ayuda de la arquitectura de soporte.

f. La arquitectura

La arquitectura básica de IoT consta sólo de tres capas, a saber: la capa de percepción que realiza la detección y la activación, la capa de red que lleva a cabo la transmisión y el procesamiento de datos y la capa de aplicación que proporciona al usuario el requisito. Existe

una arquitectura de cinco capas, para proporcionar más abstracción a la arquitectura de IoT. Incluye percepción, donde el sensor mide los datos, la capa de transporte realiza la función de transporte de datos, la capa de procesamiento procesa y analiza los datos obtenidos a través de la capa de transporte, el middleware interconecta los objetos heterogéneos con el sistema heterogéneo que es la columna vertebral del ecosistema de IoT.

g. La plataforma IoT

La plataforma de IoT vincula el hardware y el software. Es una parte del *middleware* que interconecta las puertas de enlace, las redes a la nube, el servidor y la aplicación. Las diferentes capas del funcionamiento responsables de las plataformas IoT son capas que realizan intercomunicación entre dispositivos, función de mensajería y capa de comunicación; permite la comunicación entre el hardware y la nube para transferir datos para el proceso de análisis de datos, colecta datos, identifica el dispositivo, administra el dispositivo, actualiza el software del sistema, informa la visualización y la capa de procesamiento y los resultados se pueden determinar a partir de los informes generados.

h. La puerta de enlace de IoT según los modos de funcionamiento

La puerta de enlace de IoT es un dispositivo de gama media que une las redes de detección y los dispositivos de IoT de gama alta. La puerta de enlace puede comunicarse con otra puerta de enlace, o el dispositivo de gama baja puede comunicarse con la puerta de enlace, o la puerta de enlace puede comunicarse con el controlador o con la plataforma de IoT. El Gateway puede operar en cualquiera de los tres modos, a saber: pasivo, semiautomático y totalmente automatizado.

i. Las técnicas de almacenamiento utilizadas para IoT

Los datos obtenidos de los objetos físicos a través de dispositivos de detección deben procesarse y almacenarse. Las formas en que se almacenan pueden ser varias y se realizan mediante middleware. Para apoyar el almacenamiento las técnicas disponibles son: Grandes Volúmenes de datos (Big Data), Computación en la Nube y Computación en la Niebla (Fog Computing).

j. Las aplicaciones

Internet de las cosas médicas (IoMT):

Los dispositivos son “wearables” (“usables”, portables por las personas) médicos que miden los parámetros como latidos del corazón, diabetes, electrocardiogramas, entre otros.

Internet de las cosas animales (IoAT):

Los animales se monitorean mediante objetos y dispositivos inteligentes. Para el estudio de la vida animal se pueden colocar cámaras en el campo y se puede estudiar su comportamiento a partir de la información disponible.

Internet de los desechos (IoWaste):

También conocido como Internet de los Contenedores, utiliza dispositivos inteligentes como sensores, cámaras y actuadores para eliminar la basura acumulada en una región mediante redes inalámbricas.

Internet de los vehículos (IoV):

Sirve como extensiones LAN ubicuas móviles y según el medio utilizado para la comunicación se clasifica como: Internet de las cosas submarinas (IoUWT) e Internet de las cosas subterráneas (IoUGT).

Según la tecnología impulsada, se clasifica como:

Internet de las Nano Cosas (IoNT):

La información puede transmitirse y recibirse incrustando códigos en las moléculas de nano materiales denominados comunicación molecular o mediante radiaciones electromagnéticas de nanomateriales denominados nano comunicación electromagnética.

Internet de las cosas móviles (IoMobT):

Los dispositivos personales inteligentes como teléfonos móviles, tabletas, etc., los vehículos pueden moverse en cualquier lugar.

Soportes de “niebla” móviles (IoMobT):

La mejora está limitada por factores como la recopilación y el análisis de datos móviles, la seguridad y la privacidad.

Internet de las Cosas Industrial – IIOT:

El IIOT, como se muestra la Figura 23, se presenta como una revolución que está cambiando la faz de la industria. En realidad, IIOT es una evolución que tiene su origen en tecnologías y funcionalidades desarrolladas para ser aplicadas a la industria. El mejor resultado de IIOT es que los usuarios finales y los fabricantes de maquinaria ahora pueden comprender su inversión en tecnología y personas mientras aprovechan las ventajas de las tecnologías disponibles. La aparición de la IIOT ha generado expectativas entre las partes interesadas responsables de la operación de las plantas. La mayoría se centra en el impacto de los avances tecnológicos en las plataformas de automatización existentes. La visión del mundo de IIOT es aquella en la que los activos inteligentes conectados operan como parte de sistemas superiores que componen la fabricación inteligente (Karmakar et al., 2019).

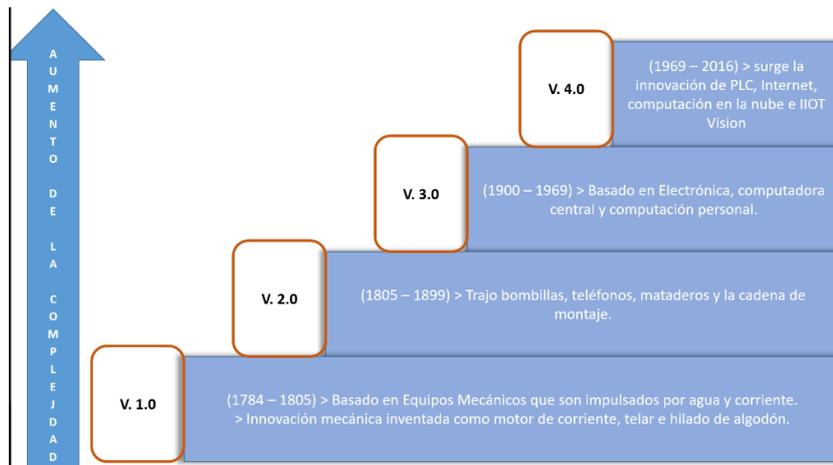


Figura 23 - Evolución del IIOT. Fuente: propia del autor, adaptado de Karmakar, 2019

Mientras que el IoT conecta los objetos físicos a través de redes cableadas e inalámbricas, el IIoT se ocupa de maquinaria y componentes físicos que están conectados mediante sensores y el software correspondiente. El IIoT no sólo implica la conexión entre máquinas, sino que también tiene una interfaz para los humanos.

Existe una gran posibilidad de que el IIOT reemplace los trabajos simples y repetitivos como el montaje de la producción, la administración, el control de calidad y la planificación. No obstante, es muy beneficioso para determinados perfiles laborales. Actualmente, se considera que la tecnología proporcionada por el IIOT mejorará la utilidad de las nuevas ofertas de productos y modelos comerciales, como las “máquinas como servicio” o la manufactura aditiva *in situ*. Sin embargo, el IIOT lleva esto a un nuevo nivel, porque proporciona un sistema y un estándar para la interconexión universal a través de IP, protocolo clave para intercambiar información a través de Internet, sin importar qué tipo de dispositivo esté realizando el intercambio. Pueden comunicarse con otros dispositivos que están en su red utilizando los mismos protocolos y arquitectura. El protocolo de Internet IP

jugó un papel muy importante en la interconexión de dispositivos físicos, así como en la infraestructura de red.

El IIOT incluye ML y tecnología de BD junto con los PLC (controlador lógico programable) y SCADA (control de supervisión y adquisición de datos), también puede tener capacidad de autodiagnóstico y rectificación en las industrias de control de procesos, dispositivos físicos (presión, temperatura, vibración, flujo, nivel y muchos más), que generalmente sólo ayudan a recopilar datos, análisis e intercambio.

Según los expertos en IIOT estas tecnologías mejorarán en gran medida el control de la calidad, mantendrán la sostenibilidad y las prácticas ecológicas, y mejorarán la gestión y la eficiencia de la cadena de suministro. La adaptación del IoT del nivel comercial al nivel industrial afecta en términos de eficiencia y continuidad a la industria en todo el mundo. Un ejemplo de IIoT sería la implementación de una red de sensores que puedan tomar en tiempo real información de las máquinas y enviarlas a una aplicación Web que se encargue de almacenarlas en su base de datos para que luego el personal de la planta pueda observar, en tiempo real, cuántas unidades llevan completas cada orden de trabajo y el tiempo en que estuvo productiva cada máquina con el fin de tomar mejores decisiones (Candia et al., 2018). Su modelo arquitectónico consta de tres capas: (1) Capa de Comunicación, (2) Capa Middleware y (3) Capa de Aplicación.

.....

3.3.3. Computación en la nube

La computación en la nube (Cloud Computing - CC), es un término general que se refiere a la entrega de servicios computacionales a través de recursos visualizados y escalables a través de Internet (Zhong et al., 2017a). En lugar de satisfacer necesidades de hardware y software dentro de la misma empresa, las compañías lo hacen en forma externa, o sea, en la nube, con el fin de reducir costos, mejorar la flexibilidad y disminuir la complejidad de la infraestructura y almacenamiento de datos dentro de la empresa. Es una tecnología flexible y económica que brinda servicios que incluyen infraestructura, software, hardware, plataformas y otros recursos de infraestructura de IT. Los usuarios pueden utilizar los servicios que se les proporcionan de acuerdo con los requisitos de la aplicación y en función del acceso a los sistemas informáticos y de almacenamiento (Zhou et al., 2015). Por su parte Oluwaseun & Numbu (2019) aseguran que la CC es el acceso a recursos configurables que se pueden gestionar rápidamente con una mínima interacción utilizando infraestructuras de Internet. En relación con el sector industrial, los sistemas en la nube facilitan el acceso a toda la maquinaria y equipo de producción proporcionando almacenamiento de datos a través de la red (Ates et al., 2020).

Una tendencia actual es la provisión de Servicios en la nube. Los servicios en la nube exponen una función de una persona o cosa, y, dependiendo el contexto y variables que la afecten, la realización o ejecución de dicha función tendrá un resultado específico (Figura 24).

La definición de un servicio, desde el punto de vista de la ingeniería de software, es una funcionalidad que, por ejemplo, permite la recuperación de información específica o la ejecución de un conjunto de operaciones.

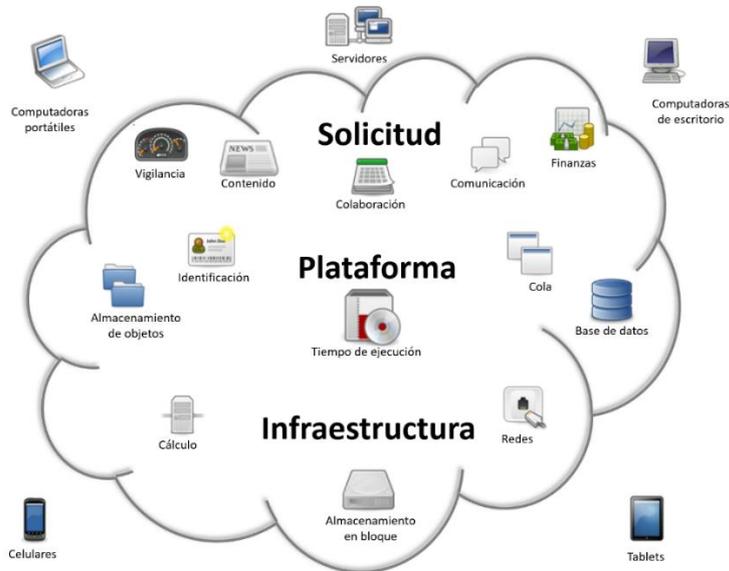


Figura 24 - Servicios en la nube. Fuerte: adaptado de J. Agustín Martínez, 2021

La misma es reutilizable por diferentes clientes y diferentes propósitos, incluyendo las políticas que deben controlar su uso, basado, por ejemplo, en la identidad del cliente que solicita el servicio. Para lograr una correcta evolución a una 4IR, es necesario que en la industria se comiencen a ver los problemas y las soluciones con un nuevo enfoque; éste tiene diferentes alternativas, pero se orienta al diseño de soluciones teniendo en cuenta especialmente una orientación a servicios.

Una orientación a Servicios, desde la perspectiva del software, es un paradigma de diseño cuyos principios enfatizan la separación de sus funcionalidades. Permite generar unidades de software divididas en unidades discretas, autónomas y accesibles a través de la red, cada una diseñada para resolver un aspecto único del negocio donde cada unidad se considera un servicio. Tomando la definición más ampliamente aceptada que es la que propone el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología, NIST (National Institute of Standards and Technology):

“La computación en la nube es un modelo que permite el acceso adecuado y bajo demanda de un conjunto de recursos de cómputo configurables, como, por ejemplo, redes, servidores, almacenamiento, aplicaciones y servicios y que pueden ser rápidamente provistos y puestos a disposición del cliente con un mínimo esfuerzo de gestión y de interacción con el proveedor del servicio”.

Características de la Computación en la Nube

- Servicio bajo demanda (On-demand self-service): es aquel donde un cliente puede, en forma unilateral, aprovisionarse de capacidades y /o recursos de cómputo de acuerdo con sus necesidades de forma automática y sin precisar de la interacción “humana” con el proveedor del servicio.
- Acceso por red – Internet (Broad network Access): las capacidades de cómputo están disponibles en la red y son accesibles mediante mecanismos estándares (HTTP, TCP, IP, SOAP, REST, OpenAPI, GraphQL, gRPC) que promueven su uso por equipos de cliente heterogéneos.
- Recursos comunes (Resource pooling): se refiere a un principio de arquitectura de software donde un sistema comparte varios clientes, es decir, que trabaja sobre una misma instancia de software la cual se ejecuta desde un servidor. A este tipo de arquitectura se la llama arquitectura multipropietario o multiusuario.
- Elasticidad rápida (Rapid elasticity): otra de las características importantes de la CC es que dichas capacidades pueden ser provistas y liberadas rápida y elásticamente,

y, en algunos casos, automáticamente. El cliente tiene la visión de tener acceso a recursos ilimitados que puede comprar en cualquier cantidad y en cualquier momento.

- **Servicio Medible (Measured Service):** se refiere a que el uso de los recursos es monitoreado, controlado y medido al nivel de abstracción apropiado para el tipo de servicio o recurso en cuestión (ancho de banda, procesamiento, almacenamiento, cuentas de usuario, etc.). De esta forma, la información del servicio utilizado es clara tanto por el consumidor como para el proveedor.

Modelos de Servicio

Un servicio en la nube puede proveer acceso a aplicaciones de software, como por ejemplo email o herramientas de ofimática (SaaS - Software as a Service). Puede también proveer un entorno que los consumidores usen para construir su propio software como el de Plataforma como un Servicio o PaaS (Platform as a Service). Finalmente, también se pueden proveer acceso al cómputo tradicional, tales como procesamiento y almacenamiento (IaaS - Infrastructure as Service). Cada uno de estos tres modelos tiene diferentes fortalezas y es adecuado para distintos tipos de consumidores y objetivos de negocio, como se puede observar a continuación en la Figura 25.

Software como Servicio (SaaS - Software as a Service)

El SaaS brinda al cliente la capacidad de utilizar aplicaciones del proveedor ejecutándose directamente en la infraestructura en la nube. Se puede acceder a dichas aplicaciones desde diferentes dispositivos, desde interfaces livianas como por ejemplo en un navegador web. El cliente no controla la infraestructura por debajo de las aplicaciones como por ejemplo redes, servidores, sistemas operativos o almacenamiento, excepto en casos muy particulares y para configuraciones específicas.

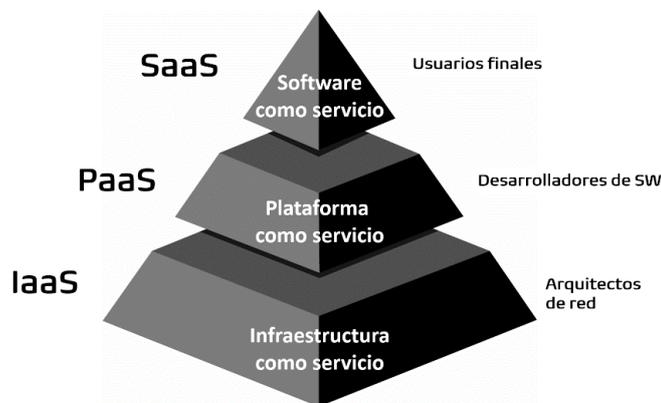


Figura 25 - Servicios en la nube. Fuente: adaptado de J. Agustín Martínez, 2021

Plataforma como Servicio (PaaS - Platform as a Service)

El PaaS brinda al cliente la capacidad de desplegar, en la infraestructura en la nube, aplicaciones creadas por el mismo cliente o adquiridas por él desde terceros, utilizando lenguajes de programación y tecnologías soportadas por el proveedor de PaaS. El cliente no administra ni controla las capas inferiores de la infraestructura, tales como servidores, redes, sistemas operativos o almacenamiento. Tiene un control y administración sobre la configuración de las aplicaciones desplegadas y también sobre la configuración de variables de entorno para dichas aplicaciones.

Infraestructura como Servicio (IaaS - Infrastructure as as Service)

El IaaS, brinda al cliente la posibilidad de acceder al procesamiento, almacenamiento, redes, y otros servicios de cómputo Cloud fundamentales, donde puede desplegar y ejecutar cualquier software, incluyendo sistemas operativos y aplicaciones. Nuevamente, el consumidor no controla lo que sucede por debajo de la infraestructura Cloud, pero tiene

control sobre sistemas operativos, almacenamiento, aplicaciones desplegadas y la posibilidad de controlar un selecto grupo de componentes de red, como, por ejemplo, los firewalls.

Finalmente se puede mencionar que algunas de las desventajas de los servicios en la nube podrían ser: su fiabilidad, disponibilidad, seguridad, complejidad, problemas legales y de regulaciones, migraciones, falta de estándares, privacidad y la personalización limitada.

Computación Móvil en la Nube

Después del desarrollo de la CC, las empresas introdujeron el concepto de CC móvil (MCC – Mobile Cloud Computing). Este concepto atrajo a muchas empresas de redes móviles debido a la reducción del costo de desarrollo y mantenimiento de la aplicación móvil y la infraestructura (Figura 26).

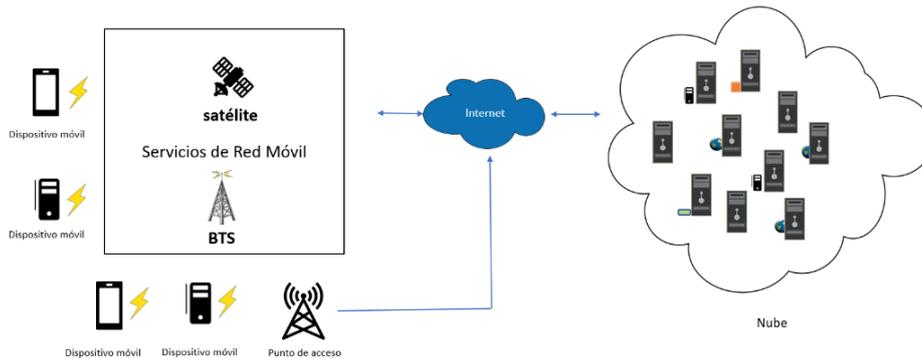


Figura 26 - Computación en la nube móvil. Fuente: propia del autor

Este modelo proporciona varios entornos móviles beneficiosos y a menor costo. Varios autores propusieron una definición para la MCC, y entre ellas se pueden citar que la MCC es una técnica o modelo en el que las aplicaciones móviles se construyen, potencian y alojan utilizando tecnología de computación en la nube o que es una combinación de computación móvil, computación en la nube y red inalámbrica, que se unen con un propósito, como recursos computacionales enriquecidos para usuarios móviles, operadores de red y proveedores de computación en la nube (Estamsetty, 2021).

La MCC tiene actualmente varias ventajas, como una mayor duración de la batería, una capacidad de almacenamiento mejorada y que son más confiables. No obstante, hay aún varios problemas que superar en la MCC, como lo es la energía de los dispositivos móviles, la conectividad de red, el precio de utilización del ancho de banda y el número de comunicaciones.

La arquitectura de la MCC comprende básicamente cinco componentes: Internet, nube, punto de acceso, dispositivo móvil y servicios de red móvil.

.....

3.3.4. Sistemas Ciberfísicos - CPS

Una definición generalizada de un CPS es que él es la "integración de la computación con procesos físicos" (Carreras Guzman et al., 2020).

La fundación "National Science" define CPS como un sistema que contiene componentes, tanto físicos como de software, y que están entrelazados, comunicándose entre sí (Oluwaseun & Numbu, 2019). Los sistemas ciberfísicos son la integración de los procesos físicos con los procesos virtuales, donde los físicos se monitorean y controlan a través de computadoras integradas, sensores, softwares y redes (Koçoğlu & Demirkol, 2020).

Un CPS implica una gran cantidad de metodologías interdisciplinarias, como la informática, la ingeniería mecánica y la mecatrónica, la ciencia del diseño y los procesos, los sistemas de fabricación y la informática. Uno de los métodos técnicos clave son los sistemas integrados, los cuales permiten una relación altamente coordinada y combinada entre los objetos físicos y sus elementos o servicios computacionales (Zhong et al., 2017a).

Los CPS requieren una interacción bidireccional entre los mundos digital y físico que normalmente se logra mediante el modelado computacional y el IoT a través de la identificación única de objetos, por ejemplo, identificación por radiofrecuencia, asociada con materiales, máquinas, productos y personas (Neal et al., 2021). Por ejemplo, Leitão et al. (2016) aseguran que la Fábrica del Futuro se basará en un gran ecosistema en los que se llevará a cabo una colaboración en gran escala. Además, se espera que el CPS aproveche los beneficios de la CC, incluida la flexibilidad de recursos y la capacidad de adaptación. Esto no sólo tiene el potencial de mejorar la funcionalidad de los CPS, sino que también permitirá un consumo mucho más amplio de datos y servicios (Armando W. Colombo, Thomas Bangemann, Stamatis Karnouskos, Jerker Delsing, Petr Stluka, Robert Harrison, Francois Jammes, 2014).

Es probable que los CPS se conviertan en uno de los desarrollos tecnológicos más importantes en un futuro próximo. Cuando se los examinan en general, estos son sistemas en los que los datos de entrada a las computadoras se procesan con el aprendizaje automático y la inteligencia artificial y componen un entorno físico controlado por software (Chiu et al., 2017) (J. Lee et al., 2015). Los sistemas se centran en la informatización, la comunicación entre sistemas y el control de entrada y salida o bucle de retroalimentación (Türkeş et al., 2019). Muchos de los sistemas que se utilizan hoy en día, los llamados “sistemas de producción inteligente”, generalmente se centran en la lógica de continuar el mismo proceso de forma singular y continua, que es también el aspecto distintivo de los sistemas ciberfísicos (ATEŞ et al., 2020).

La innovación en CPS abre un campo creciente de cooperación multidisciplinaria, vinculando la informática y la teoría de control con varias áreas de ingeniería, ciencias naturales e inclusive la medicina. Los CPS están mejorando, cada vez más, el desempeño, la productividad y la eficiencia energética en el control de los procesos físicos.

Otras aplicaciones relevantes de los CPS incluyen sistemas de control industrial en plantas de fabricación y proceso, robótica y sistemas de control en infraestructuras críticas que brindan servicios esenciales a las comunidades (Carreras Guzmán et al., 2020).

Centrándose en los principios de diseño, modelado y verificación de los componentes computacionales y su integración, se han propuesto un conjunto de características clave de los CPS. En particular se mencionan los cálculos reactivos, la concurrencia, el control de retroalimentación, el cálculo en tiempo real y las aplicaciones críticas para la seguridad. Si bien este conjunto de características es un punto de partida útil para categorizar los CPS, se argumenta la necesidad de incluir el papel de los humanos en las arquitecturas de diseño como una característica clave de los CPS con implicaciones de seguridad y protección (Carreras Guzmán et al., 2020).

Cyber Physical Production Systems (CPPS)

Los especialistas Leitão et al. (2016) sugieren que los sistemas de producción ciberfísicos ofrecen una mejora en el desempeño de la producción y una reducción de los desechos debido a la detección avanzada de defectos que resultan en una mayor calidad del producto, eficiencia de producción y adaptabilidad del sistema (Leitão et al., 2016).

La I4.0 hace hincapié en el CPPS que funciona según el principio de vincular la tecnología de la información con componentes mecánicos y electrónicos que se comunican entre sí a través de una red (Kowang et al., 2019).

La literatura considera, en general, a los CPS como una etapa mejorada de los Sistemas Embebidos (Embedded Systems - ES). En términos simples, los ES son computadoras pequeñas incorporadas dentro de otros dispositivos y que no son visibles para los usuarios.

Sus orígenes se remontan a la década de 1970 y consisten en “hardware” y “software” integrados dentro de un sistema mecánico, eléctrico o electrónico diseñado para un propósito específico. Ellos están ampliamente implementados en productos de electrónica de consumo, como por ejemplo televisores, cámaras digitales, teléfonos inteligentes, lavarropas y microondas. En muchos casos, los operan en lazos de control abiertos, es decir, sin incorporar una retroalimentación de los procesos físicos. Este es el caso de muchos productos de electrónica de consumo, siendo un lavarropas un ejemplo típico. La evolución de estos es con la incorporación de nuevas tecnologías, como la AI, transformándoles en los denominados actualmente CPS.

CPS e IoT

Se argumenta en algunas ocasiones que el IoT es una base clave que permite la implementación de los CPS. Para las aplicaciones del IoT, puede que no sea necesario un control de retroalimentación en tiempo real de los procesos físicos. En cambio, muchas arquitecturas de sistemas IoT desarrollan aplicaciones móviles o aplicaciones en la nube como servicios finales mediante la integración de sensores inteligentes, redes inalámbricas, acceso a Internet y plataformas en la nube con análisis de datos avanzados. Por el contrario, los servicios finales en los CPS son sistemas físicos que realizan tareas de control en tiempo real y en el mundo físico. Se ilustra a continuación la integración entre el IoT y el CPS (Figura 27).

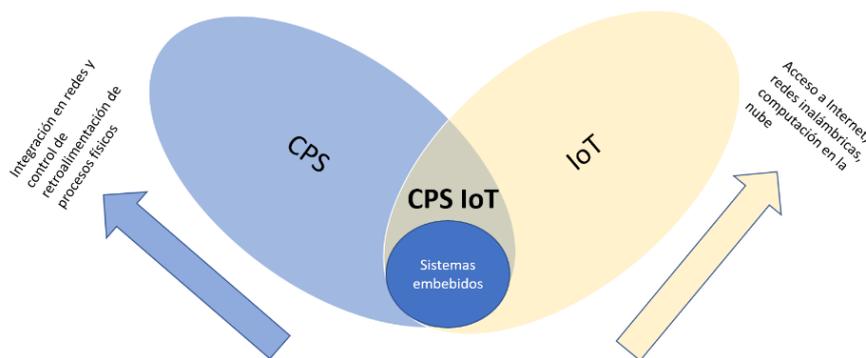


Figura 27 - CPS e IoT. Fuente: propia del autor modificado de Kowang 2019

El campo de la cibernética sentó las bases para los sistemas de control de retroalimentación que interactúan con el mundo físico, incluso antes de la revolución en la computación digital y las comunicaciones en red (Figura 28). Norbert Wiener abrió el campo de la cibernética en 1948, desde aplicaciones en sistemas de armas automáticas expandiéndose a un amplio campo de sistemas técnicos e incluso al comportamiento humano y la neurociencia. En otras palabras, una amplia gama de dispositivos industriales y sistemas operativos (OT), por ejemplo, control de supervisión y adquisición de datos, SCADA, sistemas de control distribuido (DCS) y controladores lógicos programables (PLC), están incorporando las características operativas de CPS.

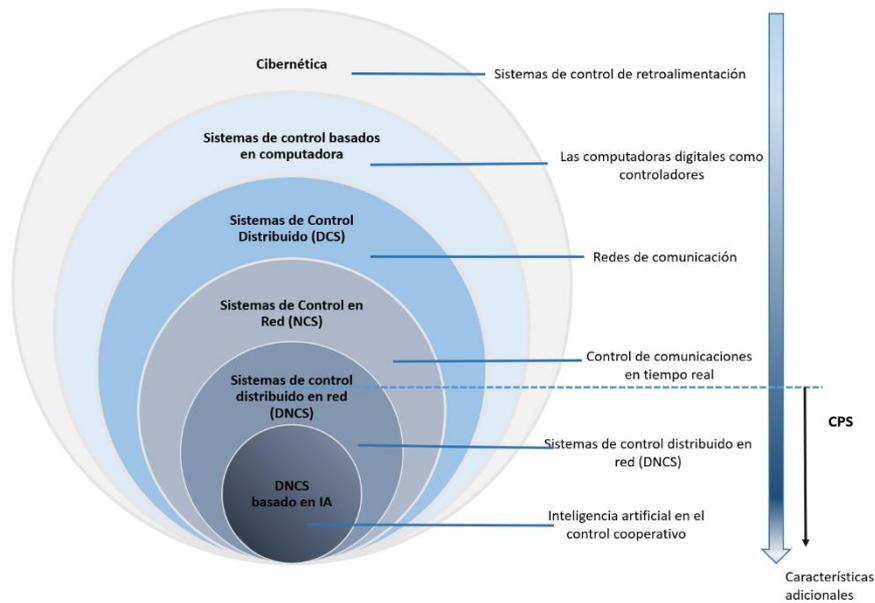


Figura 28 - Segunda perspectiva: Evolución secuencial de la cibernética a DNCS y CPS

En resumen, las características clave de los CPS son: (1) Control de retroalimentación en tiempo real de procesos físicos a través de sensores y actuadores; (2) Control cooperativo entre subsistemas en red y (3) un umbral de nivel de automatización en el que las computadoras cierran los bucles de control de retroalimentación en tareas automatizadas.

3.3.5. Robots Colaborativos: Cobots

La palabra “Robot” fue introducida en la literatura en 1920, en la obra R.U.R. (Rossum's Universal Robots), de Karel Čapek, nacido en lo que hoy es la República Checa. Proviene de la palabra checa “robota”, que significa “labor forzada, servicio, esclavo”. Este nombre fue utilizado en el imperio austrohúngaro hasta 1848. La palabra inventada por Josef Čapek sirve para designar a las máquinas trabajadoras o serviles.

Por su parte, la nueva expresión, Cobot, es un brazo robótico creado para trabajar junto a los humanos, de ahí que sean conocidos como Cobots o “Collaborative Robots”.

El mercado demanda cada vez y con mayor frecuencia productos personalizados, lo que obliga a la industria a rediseñar o adaptar sus clásicas disposiciones de planta. La producción en línea deja lugar, en algunos casos, a la reestructuración en celdas de trabajo. Las nuevas tecnologías, en particular los Cobots pueden ayudar con la mano de obra, fundamentalmente en tareas muy repetitivas. Es por ello que, una gran parte de los futuros sistemas de colaboración, surgirán de las estaciones de trabajo manuales existentes. Por esta razón, es necesario estudiar una metodología estructurada, que permita a los especialistas en manufactura evaluar si es posible, y económicamente razonable, implementar estaciones de trabajo de ensamble colaborativo.

La tecnología robótica ha transformado la industria manufacturera desde la aparición del primer robot industrial a principios de los años 60. El desafío de desarrollar soluciones flexibles, donde las líneas de producción se puedan replanificar, adaptar y estructurar rápidamente para productos nuevos o modificados sigue siendo un importante desafío (Kragic et al., 2018). Es por ello que, a medida que los fabricantes de todo el mundo avanzan para desarrollar la visión de la I4.0, muchos, sino la mayoría de ellos, adoptarán máquinas avanzadas para acelerar la DX de sus operaciones. Se debe mejorar la productividad, cumplir con las expectativas de los consumidores para la personalización e impulsar la innovación continua del producto, todo ello mientras se reducen los costos de manera constante. En

resumen, los fabricantes no pueden ignorar el ritmo que exige un progreso significativo y medible en la I4.0 (Esben H. Østergaard, 2017).

El alto costo de la inversión basada en tecnología y el descuido de su desempeño son factores que impiden que las empresas se convenzan de esta DX. Comprender la contribución de la transición de la I4.0 a una I4.0 competitiva y eficiente, facilitará la toma de decisiones favorables por parte de los ejecutivos de la empresa (Sevinç et al., 2018).

Con la introducción de la I4.0, la cooperación entre el hombre y la máquina es cada vez más importante. Especialmente, en el campo de la colaboración humano-robot se espera un aumento en la flexibilidad y una opción de automatización, incluso para pequeñas producciones. Un aspecto muy importante para la introducción de Cobots a las líneas de producción es la seguridad de los operarios. A pesar de los nuevos desarrollos en robótica colaborativa, la seguridad de las células robotizadas juega un papel importante en el diseño de sistemas de producción. Los Cobots comerciales son seguros como tales, pero esto a menudo cambia conforme el tipo de aplicación (Gualtieri et al., 2018).

Como ejemplo de aplicación colaborativa se puede mencionar la preparación de partes antes de un ensamble. Sin embargo, la preparación de kits respaldada por Cobots no es de uso intensivo hasta el momento ya que existe una considerable confusión en la industria con respecto a cómo se pueden usar los Cobots en la preparación de kits (Fager et al., 2020).

A partir de entrevistas realizadas por el autor con productores y usuarios de tecnología de automatización, se concluye que la automatización y la robótica mejoran la eficiencia del tiempo (Gualtieri et al., 2020). Adicionalmente, la realidad aumentada (AR) mejora la comunicación en la industria en todo el mundo reduciendo el tiempo de respuesta y de inactividad de la máquina (Darnley et al., 2018).

Teniendo en cuenta que el mercado de Cobots está en continuo crecimiento es razonable suponer que el montaje colaborativo será una aplicación crucial en el futuro cercano (Djuric et al., 2016). Tal como se dijo, una gran parte de los futuros sistemas de colaboración surgirán de las estaciones de trabajo manuales existentes en la actualidad. Es necesario estudiar una metodología estructurada que permita evaluar si es posible y razonable implementar una estación de trabajo de ensamble colaborativo a partir de uno ya existente.

Es por ello por lo que la introducción de Cobots tiene como objetivo apoyar las condiciones de trabajo y la productividad de los operadores al mejorar la ergonomía física, aumentar la capacidad de producción y mejorar la calidad de los productos y procesos. Dado que la colaboración humano-robot tiene como objetivo combinar las habilidades humanas como la flexibilidad, la creatividad y las habilidades de toma de decisiones con las fortalezas de la máquina inteligente como la precisión, la repetibilidad y la carga útil, es aconsejable diseñar nuevos sistemas de colaboración considerando las habilidades y limitaciones de los recursos humanos y los Cobots (Selvaggio et al., 2021) (Figura 29).

Los Cobots y los robots industriales tradicionales se diferencian en varios aspectos. El robot industrial produce de forma masiva, ocupa mucho espacio y, en general, permanece en una posición fija. En cambio, el Cobot es compacto, ocupa poco espacio y se puede reubicar en cualquier lugar de la planta con relativa facilidad. Los robots industriales, debido a su actividad intensiva, resultan peligrosos y no pueden instalarse sin barreras de seguridad que protejan a las personas. La ausencia de sensores de fuerza, que dota al robot de la capacidad de conocer su entorno y que le permite detenerse automáticamente en caso de una intrusión en su espacio, sumado a su elevado peso, convierte a los robots industriales en herramientas potencialmente peligrosas. Por el contrario, los Cobots, están equipados con sensores que les permiten detenerse en caso de obstrucción o necesidad. En conclusión, los Cobots ofrecen la oportunidad de eliminar las barreras de seguridad para llevar a las personas al núcleo del proceso productivo y facilitar su integración en una cadena de producción.

La mayor diferencia entre los Cobots y los robots industriales es el objetivo con que cada uno de ellos fue diseñado. Un robot industrial se diseña, construye y utiliza con un único

propósito y ese propósito lo podrá resolver de manera eficiente. El Cobot puede estar desarrollado para realizar una sola tarea o para realizar varias según las necesidades de producción. Se puede reprogramar de forma sencilla para que realice una nueva serie de tareas de forma rápida y sin la necesidad de ayuda de un experto en robótica. Por último, mientras que el robot hace su trabajo en forma autónoma, el Cobot trabaja como colaborador del operario y no como sustituto.

Son varias las ventajas de trabajar junto a un Cobot, por ejemplo, son capaces de hacerlo las 24 horas ininterrumpidamente, están preparados para ejercer la fuerza requerida para las tareas más pesadas y realizan labores repetitivas en forma eficiente, dotando al producto de la mejor calidad, permitiendo a las empresas alcanzar elevados niveles de productividad.

La combinación de la tecnología de producción convencional con las ICTs, la M2M, el IIoT y los Cobots, transforman las plantas en fábricas inteligentes y todo esto gracias a la colaboración del robot con el hombre.



Figura 29 - Interacción Humano-Máquina. Fuente: propia del autor

Conforme aseguran los autores Rauch et al. (2021), las ventajas de la colaboración entre humanos y robots son las siguientes:

- Mejoran las condiciones de trabajo de los operarios debido a los cuidados en seguridad.
- Mejoran la utilización de las áreas de producción debido a que no existen barreras físicas.
- Mejoran la accesibilidad a las áreas de trabajo.
- Aumentan la capacidad de producción y calidad.
- Mejoran la utilización de la fuerza laboral más especializada.

La HRC permite también una división de tareas “dinámicas” y una revisión del cronograma de trabajo en tiempo real. Otro de los beneficios clave es la posibilidad de transformar las estaciones de trabajo de hoy en día en sistemas colaborativos. Esto ofrece escalabilidad y se precisaría menor inversión por el hecho de ser una mejora y no un rediseño total de la planta. La pregunta habitual es si es posible y razonable implementar una estación de trabajo colaborativo a partir de los puestos de ensamble que las fábricas utilizan en la actualidad. Ello es posible y debe evaluarse en cada caso desde diferentes perspectivas, inclusive, esta interacción trae aparejados también cambios en la estructura organizacional de la empresa, los cuales deben ser analizados.

La HRC en tareas de ensamble requiere que ambas partes puedan hacer referencia a objetos en un espacio compartido. Los humanos pueden usar una combinación de descripciones verbales, gestos señaladores y miradas para seleccionar uno de los muchos objetos. Es posible que un humano, que esté en una tarea de ensamble, no pueda hacer gestos para indicar a un Cobot la siguiente pieza. Sin embargo, dado que las descripciones verbales pueden ser difíciles de interpretar, el Cobot necesita formas de comprender cuál objeto pretende el usuario. Las expresiones de referencia ambiguas se pueden resolver mediante una base verbal, señalando o utilizando la mirada. Por supuesto, los Cobots también pueden usar formas no humanas para indicar su foco de atención, como proyectar

sus necesidades en el entorno compartido o mediante el uso de realidad aumentada o mixta. Se debe tomar en consideración las ventajas del robot y del trabajador, tal como se muestra en la siguiente tabla (Kragic et al., 2018).

Tabla 3 - Características del humano y el robot

HUMANO	ROBOT
Intuición	Velocidad
Flexibilidad	Manejo de grandes volúmenes y pesos
Percepción	Alcance
Pensamiento	Reproductibilidad
Decisión	Precisión
Actuación	

En conclusión, por todo lo anterior, se concluiría que en el futuro el humano no se orientará a tareas monótonas y repetitivas, sino que mucho más a actividades más elaboradas como las de supervisión y control.

.....

3.3.6. Simulación y Gemelos Digitales

3.3.6.1. Simulación

Se podría decir que la historia de la Simulación comienza hace 5.000 años con los juegos de guerra chinos, llamados Weichí y continúa en 1780 cuando los prusianos utilizaron dichos juegos para ayudar a entrenar a su ejército. A partir de los juegos militares y de operaciones durante la Segunda Guerra Mundial, el matemático John Von Neumann desarrolló un nuevo concepto: la simulación Monte Carlo. Su nombre proviene del famoso casino, ya que el científico utilizaba una ruleta con el fin de generar números aleatorios para simular y resolver problemas de física cuyo análisis manual era demasiado complejo.

Si se quisiera definir en pocas palabras qué es la simulación, se podría tomar la definición de Render et al. (2006) quienes dicen que simular es intentar duplicar las particularidades, apariencia y características de un sistema real.

Las herramientas analíticas modernas para el apoyo de la toma de decisiones se han vuelto indispensables para el apoyo de la toma de decisiones para las organizaciones que quieran garantizar la satisfacción del cliente y reducir sus costos. Una de las técnicas más populares y poderosas para analizar sistemas complejos es, justamente, la simulación, la cual representa sistemas reales a través de un modelo computacional (Soares do Amaral et al., 2022). Según dos Santos et al. (2020), la simulación es una de las técnicas más utilizadas en el área de la Investigación Operativa en aplicaciones tales como el diseño y análisis de sistemas de manufactura, evaluaciones de sistemas financieros, diseño y análisis de transporte, servicios y sistemas. Banks y col. (2010) destacan también que el comportamiento de los sistemas se puede analizar a través de modelos de simulación construidos a partir de observaciones e inferencias. Según los autores, tales inferencias pueden expresarse mediante técnicas y relaciones matemáticas, lógicas y simbólicas.

Con respecto al uso de la simulación en las operaciones de fabricación, los autores mencionan la necesidad de técnicas más eficientes con el fin de hacer frente a la creciente complejidad de ellas. Debido a esto último, es muy importante la aplicación de enfoques híbridos, donde la simulación se combina con una o más técnicas, tal como se verá en adelante. Los autores Fonseca et al. (2021) en su trabajo "Quality 4.0: The EFQM 2020 Model and Industry 4.0 Relationships and Implications" citan a la Simulación y Virtualización como uno de los grandes beneficios de la I4.0.

Los modelos de simulación son métodos que se utilizan también en la Teoría de Colas. Resolver tareas de optimización complicadas mediante la simulación conduce, frecuentemente, a la creación de un modelo que contiene elementos de un sistema real y relaciones entre ellos. Este método puede modelar el progreso de un evento. Un evento representa un cambio en el estado del sistema a la vez. Los modelos de simulación son funcionales y proporcionan también gran cantidad de estadísticas (Dutkova et al., 2020).

Existen, hoy en día, innumerables aplicaciones, por ejemplo, existe la necesidad de obtener sistemas de fabricación cada vez más eficientes y la simulación resultó ser una técnica poderosa para diseñarlos y evaluarlos debido a su bajo costo, rapidez y bajo riesgo de análisis (Mourtzis et al., 2018). Para los investigadores dos Santos et al. (2020), la simulación vive la era del Gemelo Digital o Digital Twin (DT), favoreciendo un apoyo constante a la toma de decisiones. Existen también modelos econométricos, los cuales se basan en una serie de ecuaciones de regresión que van desde unas pocas y hasta miles de variables (Hair et al., 2010).

Modelados

En la actualidad existen tres métodos de modelado que son esenciales para las tres formas de mapear el sistema del mundo real, convirtiéndolos en modelos virtuales. Los tres métodos de modelado que existen en la actualidad son esencialmente formas de mapear el sistema del mundo real convirtiéndolos en modelos virtuales. Ellos son: los sistemas dinámicos, eventos discretos y modelos basados en agentes.

1. Dinámica de Sistemas (SD - System Dynamics): sugiere abstraerse de los objetos individuales, pensar en términos de agregados, existencias, flujos y ciclos de retroalimentación.

2. Modelado de eventos discretos (DE- Discrete Events): adopta un enfoque orientado a procesos; la dinámica de este modelo se representa como una secuencia de operaciones realizadas sobre entidades.

3. Modelo basado en agentes (AB- Agent Based): el modelador describe el sistema desde el punto de vista de los objetos individuales que pueden interactuar entre sí y con el entorno.

Dependiendo de los objetivos del proyecto de simulación, los datos disponibles y la naturaleza del sistema que se modela, se pueden utilizar los diferentes métodos e inclusive combinarlos entre sí. Por ejemplo, si el sistema es heterogéneo, los distintos componentes pueden describirse mejor utilizando diferentes métodos de modelado. En el modelo de una cadena de suministro que entrega bienes a un mercado de consumo, el mercado puede describirse en términos SD, los minoristas, distribuidores y productores pueden modelarse como AB, y las operaciones dentro de esos componentes de la cadena de suministro pueden modelarse como diagramas de flujo de procesos (Borshchev, 2014).

Aplicaciones de Modelos de Simulación

Junto con el rápido desarrollo de las redes de computadoras de alta velocidad, sus requerimientos de operación y funcionamiento demandan cada vez más y mayores exigencias de grandes anchos de banda y tiempos muertos cada vez menores. El control de la congestión desempeña un rol importante en la red y es debido a ello que Millán Naveas & Vargas Guzmán (2020) proponen un esquema de control de flujo basado en la teoría de control discreto, análisis de estabilidad y viabilidad del sistema. A partir de simulaciones se demuestra que ese algoritmo de control puede ajustar la tasa de envío y la cola del buffer de forma rápida y eficaz. Además, la longitud de la cola del buffer se ve poco afectada por los parámetros variables del sistema.

Otro ejemplo de aplicación es el diseño de plantas de trituración en la industria cerámica, utilizando un enfoque de optimización basado en simulación y la relación entre la producción real y demandada en una extrusora durante el período de tiempo considerado. Para evaluar la viabilidad de la solución fue necesario desarrollar un modelo de simulación que, mediante discretización temporal, calculara la producción obtenida y la granulometría

del material, así como el nivel de servicio. Debido a los altos tiempos de cálculo necesarios para evaluar la producción fue necesario considerar diferentes estrategias, incluida la mejora local para seleccionar una solución óptima en un tiempo más corto (de Landazuri Suárez, 2021).

Es posible, además, simular aplicaciones matemáticas para ecuaciones diferenciales. Son bastante difundidos los modelados de ecuaciones diferenciales ordinarias (ODE – Ordinary Differential Equations) con software matemático como Mathematica y MatLab, pero Zlatanovska et al. (2018) demuestran que el modelado de ODE también es posible con un software de simulación general tal como el AnyLogic™. Para dicha prueba, se realizaron como ejemplos de modelación sistemas Rossler, Chua y Chen. Dichos sistemas son ecuaciones diferenciales ordinarias definidas como sistemas dinámicos continuos. Ello es un ejemplo de sistemas caóticos ya conocidos en la teoría del caos.

Otra aplicación posible para las simulaciones, tiene que ver con los sistemas de Planificación de Recursos Empresariales (ERP- Enterprise Resource Planning). En un estudio realizado por los autores Aruväli & Rauch (2022) explican cómo el ERP permite aumentar la resiliencia organizacional a través de una planificación más detallada y flexible. Sin embargo, los problemas de disponibilidad del sistema ERP como facilitador para un flujo de trabajo de fabricación se convierten en una amenaza. Por lo tanto, el restablecimiento de la estructura de fabricación principal en relación con la planificación debe garantizarse también sin el ERP. En este caso, la integración de simulaciones puede proporcionar resiliencia adicional al realizar copias de seguridad de la información más importante y usada constantemente siendo ello, en tiempo real, una mejora adicional.

Otro destacado uso que la simulación puede proveer es la evaluación de los sistemas colaborativos entre humanos y robots. Las primeras aplicaciones industriales de colaboración básica entre humanos y robots (HRC) fueron implementadas hace más de un lustro, como por ejemplo en la planta de Volkswagen en Wolfsburg (Volkswagen, 2016). En estas aplicaciones el principal incentivo es la implementación de la interacción segura HRC y el logro de la aceptación de esta nueva tecnología por parte de los operarios. Mientras se maximizan los objetivos como el tiempo, los costos y la calidad, se consideran limitaciones como las capacidades del trabajador y el robot. Además, el espacio de trabajo debe modelarse con precisión y también deben tenerse en cuenta los aspectos sociales, como las preferencias de los trabajadores. En este nuevo enfoque, la optimización no se lleva a cabo utilizando una función de optimización simple, sino con respecto a un valor de aptitud que se calcula en la misma simulación. A diferencia de los métodos de optimización existentes para la asignación de tareas HRC, el método presentado pudo considerar la interacción dinámica entre el trabajador y el robot en el mismo espacio de trabajo (Bänziger et al., 2020).

Por su parte, según los autores Soares do Amaral et al. (2022), la simulación puede representar el comportamiento de un sistema de mejor manera que los modelos algebraicos capturando su mecanismo y dinámica y permitiendo a los tomadores de decisiones administrar sus operaciones a corto, mediano y largo plazo. En ese caso, es posible analizar los impactos de los cambios en las operaciones y políticas de gestión y comparar diferentes escenarios sin interferencia del sistema físico. Con el fin de mejorar y controlar un sistema complejo, los tomadores de decisiones pueden lidiar con varias variables en forma simultánea, como la cantidad de máquinas en una línea de producción, la cantidad de enfermeras en un hospital, o las dimensiones de las piezas en el diseño de un producto, entre otras aplicaciones.

Sistemas de simulación y producción

La influencia de la I4.0 en el desarrollo de los nuevos métodos de simulación es muy importante para aumentar la competitividad (Gajsek et al., 2019). Se utilizan diferentes métodos y softwares de simulación en los sistemas de fabricación. Se han utilizado métodos de descomposición para modelar el flujo en dichos sistemas. Un hallazgo importante fue el encontrar un método para ayudar a las empresas manufactureras a sincronizar la producción

con la demanda del mercado. Los constantes cambios de la demanda exigen la eficiencia económica de las empresas. La simulación ayuda a mejorar el flujo de materiales en las empresas de producción en términos de eficiencia económica y ahorro de tiempo. Además, el tiempo de producción es importante para ser competitivo, por lo que las empresas deben buscar ahorros de tiempo en la producción. Con el fin de mejorar el flujo de materiales y el sistema de fabricación general se suele utilizar la simulación de eventos discretos, DE. La utilización de la simulación como DE en el sistema de producción ha generado efectos económicos muy positivos. La simulación de DE también puede ser compatible con una herramienta de optimización de algoritmos genéricos para determinar el pedido y el tamaño del producto (Gajdzik et al., 2021).

El pensamiento sistémico y los sistemas dinámicos

Dada la importancia de los sistemas dinámicos en los modelos de simulación se justifica unas palabras adicionales sobre este tema.

Un sistema no es tan sólo un conjunto de cosas; un sistema es un conjunto de elementos interconectados que están coherentemente organizados de manera de alcanzar un objetivo (Meadows, 2008). Cuando se analiza una situación evaluando el contexto completo, los posibles resultados de la interacción lógica, entre los diferentes agentes, se pueden comprender y analizar de mejor manera. Esto demanda un pensamiento sistémico aplicado que tiene tres componentes críticos: (1) las herramientas (modelos científicos de sistemas), (2) la comprensión de los agentes (entendimiento de los procesos cognitivos de los seres humanos) y (3) la apropiada utilización de dichas herramientas y entendimientos (Jolly Rich, 2015).

Por su parte, Ghosh (2017) asegura que se está rodeado de sistemas, de conjuntos interrelacionados de objetos o entidades que interactúan entre sí. Ellos pueden ser sistemas vivos tales como los humanos, animales o vegetales; pueden ser entidades mecánicas, tales como barcos, automóviles, aviones o plantas industriales y otras como los sistemas sociales, políticos y empresariales. El pensar y analizar los diferentes entornos y situaciones como sistemas, y no como actividades individuales, enriquecen y tornan más real los escenarios y resultados.

El método de la dinámica de sistemas, SD, fue creado en la década de 1950 por el profesor del MIT Jay Forrester. Basándose en su experiencia en ciencia e ingeniería, Forrester buscó utilizar las leyes de la física, en particular las leyes de los circuitos eléctricos, para investigar los sistemas económicos y sociales. Hoy en día, la SD se usa típicamente en modelos estratégicos a largo plazo y asume altos niveles de agregación de objetos; representan personas, productos, eventos y otros elementos discretos por sus cantidades. Es una metodología para estudiar sistemas dinámicos y sugiere: (a) modelar el sistema como una estructura causalmente cerrada que define su propia conducta, (b) descubrir los bucles de retroalimentación del sistema (causalidad circular) que se equilibran o refuerzan y (c) identificar stocks (acumulaciones) y flujos que les afectan. En la Figura 30 se representa gráficamente un sistema logístico a partir de la SD.

Logistic Model

Model | Graph

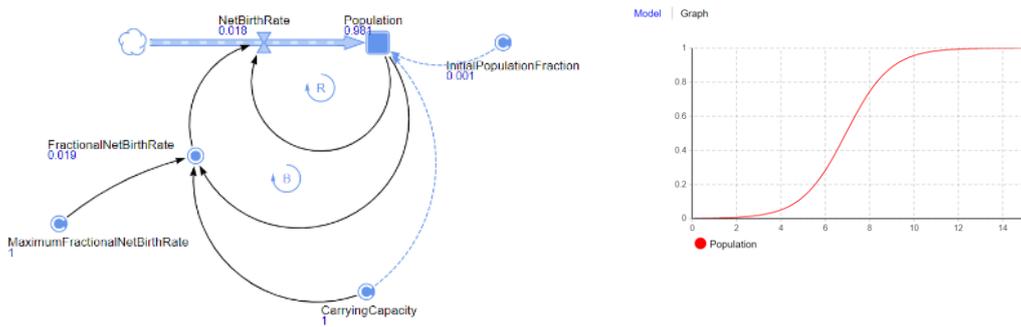


Figura 30 - Sistemas dinámicos. Fuente: propia del autor

3.3.6.2. Gemelos Digitales -: - DT – Digital Twins

Según el “Digital Twin Market report” (informe del mercado de gemelos digitales), el mercado global que en 2020 fuera estimado en \$ 3,1 mil millones, alcanzaría los \$ 48,2 mil millones en 2026 (Rodionov & Tatarnikova, 2021), es decir que se está frente a una de las tecnologías exponenciales con mayor crecimiento en la actualidad. Los DT son considerados tan importantes para las empresas que fue nominado durante tres años consecutivos entre las 10 principales tendencias tecnológicas estratégicas por Gartner™.

En esta nueva era industrial, los mundos físico y virtual se construyen juntos en sistemas ciberfísicos y el DT allanando el camino para la integración ciberfísica. Un DT recopila y evalúa la información del mundo físico, lo que respalda la simulación en tiempo real. Este concepto se basa en las ideas de IoT y la I4.0 (Durão et al., 2021). Para van der Valk et al. (2021) el DT es una construcción virtual que representa una contraparte física, integra varias entradas de datos con el objetivo de manejarlos y procesarlos y proporciona un vínculo bidireccional de los datos entre el mundo virtual y el físico. La sincronización es crucial para el DT con el fin de mostrar cualquier cambio en el estado del objeto físico. Por su parte, Chakraborty et al. (2021) aseveran que el DT es un modelo virtual de un sistema físico, que se diferencia de un modelo de simulación computacional porque se “actualiza” sólo siguiendo los movimientos de su gemelo físico a través del uso de sensores, análisis de datos, Machine Learning (ML) e IoT (Figura 31).

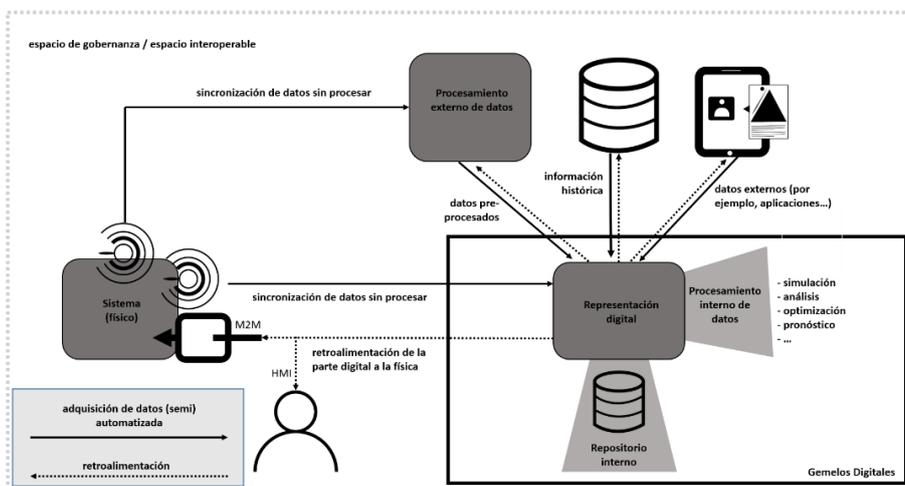


Figura 31 - van der Valk (2021) – Arquetipos de Gemelos Digitales

El concepto DT fue introducido originalmente en 2003 por Michael Grieves y hecho público por primera vez por la NASA en 2012 (Hartmann & Auweraer, 2022). Por su parte, según los autores dos Santos et al. (2020) el concepto DT fue creado por Shafto y se refirió principalmente a copias virtuales de sistemas físicos pertenecientes al contexto aeroespacial norteamericano a través de la NASA.

Según su primera definición, el DT es una herramienta de simulación de sistemas probabilísticos, multifísicos y multiescala que utiliza datos reales recopilados automáticamente para reflejar el comportamiento físico a través de un modelo virtual con el objetivo de evaluar y recomendar cambios para optimizar los sistemas reales.

Los gemelos digitales integran toda la información y el conocimiento generado durante la vida útil de un producto, desde la definición y el diseño de este hasta el final de su utilización. Ellos establecen un puente entre el mundo virtual y el real con el objetivo de modelar, comprender, predecir y optimizar sus correspondientes activos. Está ampliamente aceptado que los DT generen grandes ahorros a lo largo de todo el ciclo de vida del producto, y, al mismo tiempo, permitan servicios novedosos, tales como el diagnóstico in situ, el mantenimiento prescriptivo o la optimización operativa.

Un DT es una representación digital de un objeto único, que comprende sus características, propiedades, condiciones y comportamientos seleccionados por medio de modelos, información y datos dentro de una sola o incluso en múltiples fases del ciclo de vida de un producto (Durão et al., 2021).

Lutters (2018) asevera que el concepto de DT abarca mucho más que la mera reproducción de los activos existentes. El concepto combina las nociones de gemelo digital, maestro digital y prototipo digital.

El DT se compone de tres componentes; ellos ellas son: (1) las entidades físicas en el mundo físico, (2) los modelos virtuales en el mundo virtual y (3) los datos conectados que unen los dos mundos (Qi & Tao, 2018).

Un aspecto muy importante para tener en consideración es que se suele confundir un Modelo de Simulación con un DT; debido a ello, Rodionov & Tatarnikova (2021) establecen un criterio de diferenciación que dice que un DT es un modelo de simulación que debe proporcionar una diferencia entre los resultados de las pruebas virtuales y físicas dentro de un rango de error $\pm 5\%$. En ese caso tiene derecho a ser llamado DT, de lo contrario, la tecnología sigue siendo un modelo electrónico o maqueta o un prototipo digital, que se crean en el marco del desarrollo de software iterativo tradicional. Según el mismo autor, de este modo el DT tiene potencial predictivo, en contraste con un simple conjunto de sensores que sólo ayudan a generar datos sobre procesos que ya han tenido lugar y no permiten predecir situaciones y fenómenos complejos.

Es importante también distinguir a los DT de las sombras digitales, las cuales son sistemas de conexiones y dependencias que describen en forma aproximada el comportamiento de un objeto o producto real en determinadas condiciones de su funcionamiento, pero que no son capaces de simular situaciones en las que no se utilizó el objeto. El DT proporciona monitoreo en tiempo real de sistemas y procesos, así como análisis de datos oportunos para prevenir problemas antes de que ocurran, planificar el mantenimiento preventivo, reducir o prevenir el tiempo de inactividad, agregar nuevas funciones, planificar actualizaciones futuras y nuevos desarrollos.

Asimismo, el análisis automático de BD utilizando la AI del DT, brinda opciones para un cálculo más preciso de diversas situaciones y tareas en producción, lo que repercute positivamente en el producto final optimizando también los principales aspectos del ciclo de vida del producto. Al mismo tiempo, la tecnología de DT permite reducir el costo de verificación y prueba de un sistema.

Como se acaba de explicar el DT se puede caracterizar por tres componentes principales: (1) los sistemas físicos que se quieren reflejar, (2) los sistemas virtuales que representan lo físico de manera detallada y suficiente y (3) el sincronismo entre ambos sistemas. Ello se representa en la siguiente Figura 32.

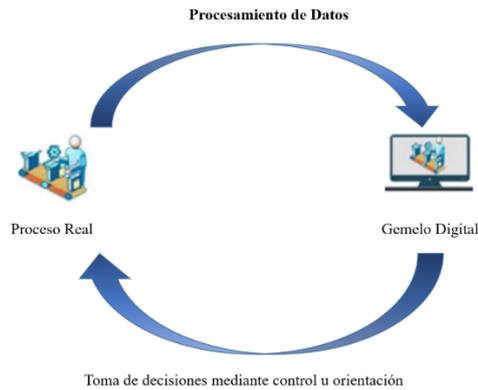


Figura 32 - El Gemelo Digital como base para la toma de decisiones

También los autores Duan & Tian (2020) destacan que la característica fundamental que diferencia un DT de una simulación tradicional es la bidireccionalidad en tiempo real de datos de monitoreo y control entre el objeto físico y el virtual. De acuerdo con este concepto de DT, los datos obtenidos de la Entidad Física se analizan y procesan a través de uno o más algoritmos con el fin de percibir, diagnosticar o predecir el estado de ella y luego sincronizarlos, entre los modelos digitales y la contraparte física, de modo de generar información de control con el fin de optimizar el comportamiento del componente real.

Cuatro perspectivas de los Digital Twin

Los autores dos Santos et al. (2020) han realizado un minucioso análisis bibliográfico y han categorizado las definiciones del DT en cuatro grupos, a saber:

- Grupo 1: describe al DT como una “representación virtual de lo que se ha producido”. En este grupo los autores definen el DT como un nuevo paradigma de modelo de simulación. DT no es sólo una herramienta de simulación sino también una herramienta para monitorear todo el ciclo de vida del producto.
- Grupo 2: los sistemas inteligentes necesitan tecnología de simulación para implementar su funcionalidad. La simulación es un método común para la planificación industrial que depende principalmente de la interfaz adecuada. Los datos se recopilan a través de sensores interconectados en un sistema de IoT que proporciona una fuente reutilizable para la simulación. El DT es fundamental para proporcionar, a los subsistemas, toda la información necesaria pudiendo además coleccionar datos, información de componentes e información de configuración del componente físico. El DT se utiliza para integrar diferentes sistemas de IT existentes, es decir, gestión del ciclo de vida del producto (PLM) y sistemas de ejecución de fabricación (MES), entre otros. El producto físico y el conocimiento ambiental también están integrados en el modelo 3D del producto que forma el inicio del DT. También se puede implementar un modelo digital 3D basado en la realidad virtual. Puede facilitar a los diseñadores la realización de actividades de diseño.
- Grupo 3: analiza cómo utilizar los datos del modelo físico para mejorar las operaciones y el desarrollo en el modelo virtual. Según los autores, es un desafío identificar rápidamente los problemas en la fabricación inteligente. Una forma de hacerlo de manera eficiente sería utilizar la gran cantidad de datos coleccionados en el modelo físico. Por lo tanto, el BD se considera una parte esencial de DT. Sin esa propiedad de transitar entre lo físico y lo digital, el uso de los datos capturados no sería factible. En este Grupo 3, los autores también discuten el uso de los datos recopilados para predecir acciones en el mundo físico. El DT contribuye a crear un proceso de adquisición de datos multimodal que utiliza la analítica para predecir los resultados futuros del objeto físico que se está estudiando.

- Grupo 4: considera al DT como un modelo muy realista del estado del producto y su comportamiento en la interacción con el mundo físico. Para estos autores, la simulación es una funcionalidad central de un DT. Muestran diferentes aplicaciones que capturan datos utilizando tecnologías de IoT y las utilizan para simular comportamientos, utilizando modelos de predicción, planes de fabricación simulados, para pronosticar los resultados del producto en diferentes entornos y proporcionar ideas para actividades futuras.

Aplicaciones del DT

Las aplicaciones del DT se pueden clasificar en cuatro categorías (Durão et al., 2021):

1. Adquisición de datos: el DT se utiliza como un sistema de captura, como una función de IoT.
2. Integración de datos: el DT se aplica como un marco de integración para diferentes tipos de datos.
3. Procesamiento de datos: se aplica DT para predecir información.
4. Gestión del ciclo de vida: el DT se utiliza para gestionar el ciclo de vida del producto.

Cualquier situación de la vida real, ya sea de un sistema socioeconómico, empresarial, de las ciencias de la salud o en la manufactura, puede modelarse como un DT, obviamente con distintos grados de dificultad. Un caso de aplicación muy interesante para su estudio es el de desarrollo de productos, donde tradicionalmente las dimensiones de tiempo, calidad y costo, son las tres variables principales de optimización, siendo situaciones de toma de decisiones multiobjetivo. La diferencia en la percepción de la calidad, como calidad del producto o calidad del proceso, puede causar una incompatibilidad entre las decisiones de diseño y las decisiones de producción. Incluso una noción como "la primera vez es correcta" se relaciona con esa diferencia, abordando que la primera vez que se ejecuta un paso de producción, el proceso cumple con las especificaciones, o que el primer producto pasará el control de calidad (Lutters, 2018).

El DT en el Diseño, Fabricación y Monitoreo

Qi & Tao (2018) señalan que en la fase de diseño de un producto, las interacciones entre los mundos esperado, interpretado y físico son múltiples. Basado en el DT, la representación digital se crea en el mundo interpretado, es decir, en el mundo virtual, o sea los modelos virtuales del producto físico. Los modelos virtuales reflejan tanto las expectativas en la mente del diseñador como las limitaciones prácticas en el mundo físico. Los mismos autores señalan que, en el caso de la fabricación inteligente, el diseño probado del producto se introduce en el taller o fábrica inteligente que se va a fabricar. Desde la entrada de la materia prima hasta la salida de los productos terminados todo el proceso de fabricación se gestiona y optimiza a través del DT. El taller o fábrica virtual incluye los modelos geométricos y físicos de operadores, material, equipos, herramientas, entorno, así como los comportamientos, reglas, modelos dinámicos y otros. Antes de que se comprometan los productos y los recursos de fabricación, se asignan capacidades y se diseña un plan de producción para predefinir dicho proceso de manufactura.

El modelo virtual del producto se crea para establecer el DT. Éste siempre debe estar acompañado del producto físico, de modo de analizar y poder ofrecer servicios de valor agregado. En primer lugar, el producto en uso se monitorea en tiempo real, ya que el DT del producto físico registra continuamente los datos de estado de uso del producto, los datos del entorno de uso y los parámetros operativos, entre otros. En consecuencia, los usuarios pueden mantenerse al tanto del estado más reciente del producto. En segundo lugar, el modelo virtual puede simular las condiciones de funcionamiento del producto en diferentes entornos. Como resultado, puede confirmar qué efectos tendrían los diferentes parámetros ambientales y comportamientos operativos sobre la salud, la vida útil y el desempeño, para controlar el estado y los comportamientos del producto físico, por ejemplo, cambiando los

parámetros operativos. En tercer lugar, según los datos en tiempo real del producto físico y los datos históricos, el producto digital es capaz de predecir con precisión la vida útil restante del producto físico, las fallas y otros parámetros.

DT como habilitador de Mantenimiento, reparación y revisión inteligentes

Smart MRO (Smart Maintenance, Repair, and Overhaul - Mantenimiento, reparación y revisión inteligentes) está basado en la predicción del estado de salud, vida restante y fallas, pudiendo llevar a cabo el mantenimiento proactivo de un elemento con el fin de evitar el tiempo de inactividad repentino. Además, cuando ocurre una falla, con el modelo virtual del producto, la falla se diagnostica y analiza visualmente de modo que la posición de la pieza defectuosa y la causa raíz de la falla se muestren a los usuarios. Por lo tanto, se desarrollan estrategias de MRO, como por ejemplo, secuencia de desmontaje, repuestos y herramientas necesarias, con el fin de recuperar el producto. Sin embargo, antes de comenzar el MRO real, tanto proactivo como pasivo, el MRO se ejecutaría en el mundo virtual basado en la realidad virtual y la realidad aumentada. Como la estructura mecánica de las piezas y el acoplamiento entre sí se reflejan fielmente en los modelos virtuales, puede identificar si las estrategias de MRO son efectivas, ejecutables y óptimas. Una vez determinadas las estrategias de MRO se ejecutarán para recuperar el producto. Por último, los datos de las diferentes etapas del ciclo de vida del producto se acumulan y heredan para contribuir a la innovación del producto de próxima generación. Esto se relaciona con el eje del Ciclo de Vida del Flujo de Valor de la RAMI4.0, tal lo desarrollado en la introducción.

Beneficios del DT

Se espera que los DT se conviertan en una herramienta estratégica empresarial, cubran todo el ciclo de vida de un activo o proceso y conformen la base de los productos y servicios conectados (Hartmann & Auweraer, 2022).

Con el objetivo de proporcionar a los ingenieros una base sólida para tomar las decisiones correctas de la manera correcta, se requiere una combinación de modelos de desarrollo, simulaciones y datos de la vida real. El concepto de DT integra estos aspectos de manera coherente y consistente replicando el estado actual del producto o el entorno de producción, al tiempo que puede representar los estados futuros. El DT evoluciona con el ciclo de desarrollo a lo largo de toda la cadena de valor, brindando estructura al mismo tiempo que brinda acceso significativo a herramientas, métodos y datos capturados (Lutters, 2018).

En conclusión, el DT reúne los datos de todos los aspectos del ciclo de vida del producto, sentando las bases para el diseño de objetos innovadores y la trazabilidad de la calidad. El DT promueve las sinergias eficientes entre las diferentes etapas del ciclo de vida del producto, logrando la optimización iterativa; además, el DT reduce el ciclo de desarrollo del producto, mejora la eficiencia de fabricación y garantiza la precisión, estabilidad y calidad (Qi & Tao, 2018).

.....

3.3.7. Big Data y Analítica

Los datos y sus implicancias con el conocimiento

Hoy en día, la importancia del conocimiento es un hecho innegable. Los tomadores de decisiones necesitan el conocimiento adecuado para tomar decisiones con el mínimo de errores con el fin de desarrollar estrategias y modelos de negocios efectivos.

El conocimiento debe revelarse haciendo el máximo uso de los recursos disponibles. Para este propósito la fuente más importante son los datos, piedra angular del conocimiento. Los datos, provenientes de varias fuentes, se registran y analizan de la mejor manera posible (Koçoğlu & Demirkol, 2020).

Antes del concepto de BD, se deben considerar los conceptos de datos-información-conocimiento. Los datos son una colección de caracteres sin procesar que describen cualquier estado, objeto o evento y mantienen sus valores. La información se define cuando su forma y beneficio aumentan como resultado de varios procesos como el cálculo, la fusión, la categorización y el resumen. Los datos, por sí solos, no tienen ningún sentido. El valor y el beneficio de los datos son limitados, por lo tanto, ellos deben transformarse en información y luego en conocimiento para que sean significativos, es decir, útiles para predecir, desarrollar estrategias o tomar decisiones. Se ilustra a continuación la idea de datos, información y conocimiento (Figura. 33). Es por ello por lo que, una evaluación integral mediante la recopilación de datos de muchas fuentes diferentes con BD y analítica de datos se convierte en el estándar para respaldar la toma de decisiones en tiempo real (Ates et al., 2020).



Figura 33 - Pirámide jerárquica del conocimiento. Fuente: Chaffey and Wood 2005

BD – Grandes Volúmenes de datos:

Con el gran impulso de Internet y del IoT, los datos se están volviendo cada vez más accesibles en muchas industrias, lo que resulta en un problema para el manejo de grandes volúmenes. Los grandes volúmenes de datos, generalmente, provienen de varias fuentes, incluidos sensores, dispositivos, redes, archivos de registro, aplicaciones transaccionales, la web y de redes sociales. En estas circunstancias se han ido configurando gradualmente en un “entorno de BD” en el sector manufacturero (Zhong et al., 2017b).

El BD atrae y preocupa, a la vez, a las personas en los sectores público y privado de todas las actividades y no existe una definición universalmente aceptada para él (J. Wang et al., 2018).

Para IBM™ (International Business Machines Corporation), el BD es “un término aplicado a conjuntos de datos cuyo tamaño o tipo está más allá de la capacidad de las bases de datos relacionales tradicionales para capturar, administrar y procesar los datos con baja latencia” (J. Lee et al., 2018).

BD es un término para un gran conjunto de datos. Los grandes conjuntos de datos son aquellos que superan el tipo simple de base de datos y arquitecturas de manejo de datos que se usaban en épocas anteriores cuando los grandes volúmenes de datos eran más costosos y menos factibles (Gautam & Singh, 2018).

No hay duda de que el BD es cada vez más importante, sin embargo, no hay aún opiniones unificadas sobre su definición. En general, el BD describe una gran cantidad de datos estructurados, semiestructurados y no estructurados, creados por fuentes de datos que requerirían demasiado tiempo y dinero para ser almacenados y analizados para obtener un gran valor. Por lo tanto, para los datos en sí mismos, los macrodatos se refieren a los datos masivos que no pudieron ser recopilados, almacenados, administrados, compartidos,

analizados y computados por herramientas de datos habituales dentro de un tiempo tolerable (Chang, 2018).

Recientemente, el análisis del BD industrial ha atraído amplios intereses de investigación, tanto de la academia como de la industria. Según un informe del instituto McKinsey, el uso eficaz del BD industrial tiene los beneficios subyacentes para transformar las economías y generar una nueva era de crecimiento productivo.

Finalmente, el BD con respecto a la I4.0, se refiere al análisis del comportamiento del usuario, el análisis predictivo y otros medios que utilizan grandes conjuntos y tipos de datos para producir métricas y resultados significativos (Oluwaseun & Numbu, 2019).

Características: las 5 Vs del BD

Con el fin de definir mejor el concepto de BD, se puede utilizar la regla 5V: Volumen, Velocidad, Variedad, Veracidad y Valor, la cual es aceptada en la literatura y define el BD.

1. **Volumen:** se refiere a la cantidad de datos en continuo aumento. El aumento en la cantidad de datos dificulta el acceso a información significativa de BD. Se refiere a que la escala de datos es muy grande y va desde varios petabytes PB (1000 TB) hasta ZB (mil millones de TB) (J. Wang et al., 2018).
2. **Velocidad:** se refiere a los datos cuya tasa (velocidad) de crecimiento aumenta continuamente. BD son estructuras en las que los datos aumentan en forma continua.
3. **Variedad:** se refiere al hecho de que la mayoría de los datos que constituyen el BD se producen en diferentes entornos y formatos no estructurales. El análisis de los datos recibidos de diferentes formatos y fuentes también es más difícil que en los métodos clásicos. La variedad significa que el tamaño, el contenido, el formato y las aplicaciones de los datos están diversificados (R. N. Y. Chang, 2018).
4. **Veracidad o verificación:** se refiere a la protección de los datos obtenidos mediante medidas de seguridad de alto nivel y la imposibilidad de modificarlos por intervenciones no autorizadas (Jin *et al.*, 2015).
5. **Valor:** define la transformación de los datos en información significativa por las evaluaciones que se realizarán dentro del BD y sus unidades de apoyo a la decisión. La importancia de los grandes datos no es el gran volumen, sino su enorme valor. Cómo extraer el valor de los datos masivos a través de potentes algoritmos es la clave para mejorar la competitividad (Assunção *et al.*, 2015).

Adicionalmente las características del BD se extienden. Algunos autores consideran hasta 10V: Volumen, Variedad, Velocidad, Valor, Veracidad, Visión, Volatilidad, Verificación, Validación y Variabilidad (Qi & Tao, 2018).

La analítica y su evolución.

La analítica es un campo global y multidimensional que utiliza técnicas de las matemáticas, estadísticas, modelado predictivo y aprendizaje automático para encontrar patrones y conocimientos significativos en los datos registrados. Es una combinación de procesos y herramientas que incluyen estadísticas, minería de datos, inteligencia artificial y procesamiento del lenguaje. También se utiliza para conjuntos de datos grandes y dispersos para obtener conocimientos invaluable con el fin de mejorar la toma de decisiones.

Considérese el ejemplo de una demanda de un producto personalizado. El bloque de análisis del BD lo sabe y traslada su conocimiento hacia las áreas de coordinación. Ellas entonces ayudan a los activos de fabricación a interpretar estos datos. Los activos de fabricación, a su vez, intentan lograr por ejemplo, la máxima eficiencia y calidad. Con los datos de retroalimentación, el bucle vuelve a transferirse al análisis que intenta optimizar los datos nuevamente (B. Chen *et al.*, 2018; Lee, Kao y Yang, 2014; Wang, Wan, Zhang, Li y Zhang, 2016).

Grandes volúmenes de datos industriales - Industrial BD (IBD)

En comparación con el BD tradicional, el IBD tiene el potencial de crear valor en diferentes secciones de la cadena de flujo de valor (Wang *et al.*, 2018). Los grandes volúmenes de datos en términos industriales son importantes en áreas como el desarrollo de productos y mercados, la eficiencia operativa, la toma de decisiones, las previsiones de demanda del mercado y la experiencia del cliente (Ates *et al.*, 2020).

Los IBD han sido producidos por diversas fuentes en espacios de fabricación, como sensores, dispositivos, vehículos de logística, edificios, personas humanas, elementos del proceso de fabricación (mayor eficiencia de producción, contaminación de fábrica, consumo de energía reducido y reducción del costo de producción). Esas fuentes de datos altamente distribuidas incluyen: (1) datos de dispositivos a gran escala, (2) datos del ciclo de vida de producción, (3) datos de operaciones empresariales, (4) cadena de valor de fabricación, y (5) datos de colaboración externa incluyendo economía, industria, mercado, competidores y otros.

Aplicaciones del BD industrial:

Se ejemplifican, a continuación, algunas de las posibles aplicaciones.

- Visibilidad de fábrica inteligente. Se basa en que en las industrias de manufactura los sensores, los controladores lógicos programables y los controladores y sistemas de gestión basados en computadoras personales están conectados en gran medida desde IT y sistemas operativos en línea mediante tecnologías de IIoT.
- Máquinas en entorno Industrial. Es muy común que máquinas idénticas estén expuestas a condiciones de trabajo completamente diferentes para diferentes tareas. Por el contrario, la mayoría de los métodos predictivos y de pronóstico están diseñados para admitir una sola máquina o un número limitado de máquinas y condiciones de trabajo.
- Gestión de la energía. En muchas industrias la energía suele ser el segundo costo operativo, pero muchas empresas carecen de sistemas de medición costeables y herramientas de modelado o de desempeño y gestión para optimizar el uso de energía en operaciones de producción individuales y mucho menos en tiempo real, en múltiples operaciones, instalaciones o en toda una cadena de suministro.
- Mantenimiento proactivo. Los fabricantes han aceptado ampliamente el concepto de monitoreo preventivo y basado en *estados*, pero muchos aún están en el proceso de implementar estos programas de costo más bajo. Los sensores, la conectividad inalámbrica y las herramientas de procesamiento del BD&A disminuyen los costos y facilitan la recopilación de datos y el control del estado del equipo.
- Cadena de suministro justo a tiempo. La fabricación justo a tiempo ha sido un concepto importante para la cadena de suministro inteligente. La plataforma de análisis de BD puede ayudar a los fabricantes a obtener una mejor adquisición de la información de la cadena de suministro que se puede entregar en tiempo real. Al integrar la línea de producción con los proveedores, todas las partes pueden comprender las interdependencias, el flujo de materiales y los tiempos del ciclo de fabricación. El análisis de BD puede servir para el seguimiento de la ubicación, el control remoto del estado del inventario y la generación de informes de piezas y productos a medida que avanzan en la cadena de suministro. El análisis de BD también puede recopilar y alimentar información de un sistema ERP y proporcionar información contable actualizada. El proceso de información en tiempo real en el análisis de BD ayuda a los fabricantes a identificar problemas antes de que sucedan, reducir sus costos de inventario y reducir potencialmente las inversiones de capital.

Analítica: – El análisis de datos

Se está transitando la era de los grandes datos, llena de desafíos y oportunidades. Las organizaciones ya han comenzado a lidiar con colecciones de datos a escala de petabytes (10⁶ GB) y están a punto de enfrentar la escala de exabytes (10⁹ GB) de los grandes datos y

los beneficios y desafíos que los acompañan. El BD está jugando un papel crucial en el futuro en todos los aspectos de la vida.

El descubrimiento de conocimientos en bases de datos (Knowledge Discovery in Databases - KDD) es el responsable de encontrar los diseños, reglas y datos ocultos de los grandes conjuntos de datos y los métodos de minería de información no están restringidos a estrategias particulares de emisión de información (Tummala & Kalluri, 2018).

La analítica es un campo integral y complejo que implica análisis estadístico, lingüística computacional y aprendizaje automático con el objetivo de descubrir patrones y conocimientos significativo (Szabó-Szentgróti et al., 2021).

(Wang et al. (2018) describen los desafíos del análisis del IBD; ellos son: (1) la falta de representación espacio - tiempo de datos a gran escala; (2) falta de aprendizaje automático a gran escala en línea efectivo y eficiente; (3) falta de gestión del ciclo de vida de datos de procesos completos; (4) falta de visualización de datos y (5) falta de mecanismo de confidencialidad de datos industriales.

Con respecto a los modelados descriptivo, predictivo y prescriptivo, se rastrea la procedencia de los datos de fabricación desde la generación hasta su preparación y se explica el pasado prediciendo el futuro y recomendando la próxima mejor acción mediante el uso de algoritmos de ML o Data Mining. Se pueden realizar análisis tales como: clasificación, regresión, estadísticas resumen, análisis de correlaciones, muestreo estratificado, árboles de decisión potenciados, descenso de gradiente estocástico, mínimos cuadrados alternos, búsqueda de coincidencias ortogonales, selección avanzada codiciosa, agrupación, patrones, análisis estadístico, y análisis descriptivo y predictivo.

Todo lo anterior es de vital importancia para la Toma de Decisiones. Esta precisa de conocimiento, el cual proviene de la información que el centro decisor posea. Dicha información surge del análisis de datos específicos y necesarios. Como se dijo, la minería o exploración de datos es la etapa de análisis del KDD; es un campo de la estadística y las ciencias de la computación y se refiere al proceso de detección de patrones en grandes volúmenes de datos.

Minería de datos

La minería de datos se refiere a la actividad de revisar grandes conjuntos de datos para buscar información relevante o pertinente. Intenta implementar procesos básicos que faciliten la extracción de información y conocimientos significativos a partir de datos no estructurados.

La minería de datos es un proceso interactivo e iterativo que implica el preprocesamiento de datos, la búsqueda de patrones, la evaluación del conocimiento y el posible refinamiento del proceso en función de los aportes de expertos en el dominio o la retroalimentación de uno de los pasos. (Gautam & Singh, 2018). Extrae patrones, cambios, asociaciones y anomalías de grandes conjuntos de datos. El objetivo de la minería de datos es identificar correlaciones y patrones válidos, novedosos, potencialmente útiles y comprensibles en los datos existentes (Dutta et al., 2021).

Los dos objetivos principales son la predicción y la descripción: (1) la predicción involucra el uso de algunas variables o campos en la base de datos para predecir valores desconocidos o futuros de otras variables de interés y (2) la descripción se enfoca en encontrar patrones interpretables por humanos que describen los datos.

Se suelen seguir los siguientes pasos para la minería de datos; estos son iterativos con el proceso moviéndose hacia atrás cuando sea necesario: (1) desarrollar una comprensión de la aplicación, el conocimiento previo elevado y los objetivos del usuario final, (2) crear un conjunto de datos de destino que se utilizará para el descubrimiento, (3) limpiar y preprocesar datos, (4) reducir el número de variables y encontrar representaciones invariantes de datos, si fuera posible, (5) elegir la metodología de minería de datos (clasificación, regresión, agrupamiento), (6) elegir el algoritmo de minería de datos, (7) buscar patrones de interés, (8) Interpretar el patrón extraído y (9) consolidar los conocimientos descubiertos y elaborar un informe.

La minería de datos puede ser utilizada en investigaciones supervisadas o no supervisadas. En una investigación supervisada los usuarios pueden plantear una pregunta y esperar una respuesta que pueda impulsar su toma de decisión. En cambio, una investigación no supervisada es un ejercicio puro de descubrimiento de patrones en el que se permite que emerjan y luego se los considere para las decisiones empresariales.

La meta y el alcance de la minería de datos se establecen, ya sea, en términos de requisitos de decisión para una importante decisión empresarial identificada, o en términos de un área funcional, donde se extraerán datos relevantes para el descubrimiento de patrones específicos de dominio. Esta estrategia de minería descendente versus una ascendente permite a los analistas elegir el conjunto correcto de técnicas de minería de datos.

Preparación de datos

Las herramientas de minería de datos funcionan en un conjunto de datos analíticos. Esto se forma generalmente mediante la fusión de registros de varias tablas o fuentes en un conjunto de datos único y amplio. Los grupos de repetición suelen incorporarse en varios conjuntos de campos. Los datos pueden extraerse físicamente en un archivo real o puede ser un archivo virtual que se deja en la base de datos o almacén de datos para que pueda ser analizado. Los conjuntos de datos analíticos se dividen en un conjunto que se utiliza para el análisis, un conjunto completamente independiente para confirmar que el modelo desarrollado funciona sobre datos no utilizados para su desarrollo y un conjunto de validación para la confirmación final.

Análisis de datos

Una vez que los datos están disponibles se los analiza. Se suele aplicar una amplia variedad de medidas estadísticas y se utilizan herramientas de visualización para ver cómo se distribuyen los valores de los datos, cuáles faltan, y cómo se comportan las diversas características calculadas. Este paso es a menudo el más extenso y complejo en un trabajo de minería de datos y es cada vez más el foco de la automatización.

Gran parte del trabajo de la minería de datos viene típicamente de la identificación de características útiles en los mismos. Por ejemplo, una característica puede ser el número de veces que un cliente ha visitado un comercio en los últimos 80 días. En este ejemplo, determinar que el recuento de los últimos 80 días es más útil que el recuento de los últimos 70 o 90, esto es clave para el análisis.

Técnicas de Minería de Datos

Hay una gran variedad de técnicas de minería de datos. Algunos ejemplos son: árboles de clasificación y regresión (CART) y otros árboles de decisión de técnicas de análisis, regresión lineal y logística, redes neuronales y tablas predictivas de puntuación. El conjunto de datos analíticos y las características calculadas se introducen en estos algoritmos que son no supervisados (el usuario no sabe lo que están buscando) o supervisados (el usuario está tratando de encontrar o predecir algo específico). A menudo se utilizan técnicas múltiples para ver cuál es más eficaz. Algunos datos del modelo se conservan y se utilizan para confirmar que el resultado se pueda replicar con datos que no se utilizaron en la creación inicial.

Implementación

Una vez que un modelo ha sido construido debe ser utilizado y desplegado para ser de utilidad. Los modelos de minería de datos se pueden implementar de varias maneras, ya sea para apoyar a un tomador de decisiones humano o para apoyar los sistemas automatizados de toma de decisiones. Para los usuarios humanos, los resultados de minería de datos pueden presentarse utilizando metáforas visuales o como simples campos de datos. Muchas técnicas de minería de datos identifican las posibles reglas de negocio que se pueden

implementar utilizando un sistema de gestión de reglas empresariales. Tales reglas ejecutables de negocios se pueden ajustar en un modelo de decisión junto con reglas de expertos según sea necesario. Algunas técnicas de minería de datos, especialmente las descritas como técnicas analíticas predictivas, dan como resultado fórmulas matemáticas. Pueden ser también implementadas como reglas de ejecución de negocios o pueden ser utilizadas para generar un SQL (Structured Query Language) o código para la implementación. Sus mayores bondades son: revelar patrones ocultos y crear información útil durante el análisis, ayudando a determinar qué datos pueden ser útiles para capturar o cuántas personas podrían verse afectadas por sugerencias específicas; puede integrarse en un diseño de sistema para aumentar la precisión de los datos y que puede usarse para eliminar o reducir el sesgo humano, usando los datos para determinar los hechos. Dentro de sus limitaciones se puede decir que, la aplicación de algunas técnicas, sin una comprensión de cómo funcionan, puede dar lugar a correlaciones erróneas y una conclusión incorrecta; el acceso a BD y a conjuntos de herramientas y software sofisticados de minería de datos puede conducir a un uso indebido accidental. Una falta de transparencia percibida puede provocar resistencia de algunas de las partes interesadas, y, por último, que los resultados de la extracción de datos pueden ser difíciles de implementar si la toma de decisiones a la que pretenden influir es poco comprendida.

3.3.8. Inteligencia Artificial

Introducción

En el contexto del paradigma I4.0, la inteligencia artificial (AI – Artificial Intelligence) se considera como una de las tecnologías habilitadoras clave para lograr capacidades y redefinir, de forma disruptiva, la manera en que se estructuran los procesos de fabricación y los modelos de negocio (Peres et al., 2020).

Las empresas manufactureras se enfrentan a importantes desafíos en los entornos de los mercados actuales. Existe una tendencia hacia la reducción de los tiempos de desarrollo de productos con ciclos de vida más cortos. Hay además una creciente demanda de personalización, estando al mismo tiempo en una competencia global. Esta tendencia, que está induciendo el desarrollo de macro a micro mercados, genera como resultados tamaños de lote reducidos. Es por ello por lo que el PLM toma más importancia. Se ocupa de muchos tipos de actividades de ingeniería, comerciales y de gestión relacionadas con un producto a lo largo de todo su ciclo de vida, desde el inicio de un concepto intangible hasta la eliminación de un producto terminado. El rápido avance de la fusión de tecnologías de la información, como la CC, IoT, BD y AI, está transformando el paradigma de la fabricación avanzada (L. Wang et al., 2021). Es posible crear nuevos modelos de negocios a partir del uso de la AI transformando las fábricas actuales en fábricas más inteligentes, empoderando también al personal en planta a partir de la información con que podrían contar en la nueva fábrica digital (Redchuk & Mateo, 2021).

La AI procura emular la inteligencia natural y mucha gente está convencida de que, con el tiempo y los avances que se están llevando a cabo en este campo las máquinas podrán igualar e incluso superar a la inteligencia humana (Acosta, 2019). La AI surge a partir de algunos trabajos publicados en la década de 1940 que no tuvieron gran repercusión inicial, aunque sus raíces se las puede encontrar en la antigüedad. El enfoque de Turing, de ver a la Inteligencia Artificial como una imitación del comportamiento humano, no fue tan práctico a lo largo del tiempo y el enfoque predominante actual es el de agente racional (Russell, Norvig, & Intelligence, 1995).

La AI es una ciencia cognitiva con interesantes actividades de investigación en las áreas de procesamiento de imágenes, de lenguaje natural, robótica y aprendizaje automático, entre otros. La AI definida como la capacidad de un sistema para interpretar correctamente datos externos, aprender de dichos datos y utilizar esos aprendizajes para

lograr objetivos y tareas específicas a través de una adaptación flexible, ha atraído una inmensa atención entre académicos, empresas, directivos, empresarios y políticos. Esta disciplina estudia las características de las actividades humanas, la construcción de un determinado sistema inteligente, para hacer que las computadoras completen las tareas que sólo los humanos podían hacer en el pasado, y para aplicar hardware y software de computadora para simular las teorías, enfoques y técnicas subyacentes del comportamiento humano.

Es por ello por lo que uno de los pilares de la 4IR y la fabricación inteligente es la AI y, en especial, sus enfoques de Machine Learning (ML). Hoy en día, estas técnicas son ampliamente adoptadas en el entorno industrial debido a su eficiencia para el análisis de datos (Chouchene et al., 2020).

Machine Learning y Deep Learning

Los métodos de análisis, como el aprendizaje automático, se pueden aplicar a los datos de los dispositivos IoT. Como parte de la I4.0, el ML o la AI son una tendencia creciente en muchas empresas, especialmente en las de software. Por su parte, el aprendizaje profundo (Deep Learning – DL) se ha convertido en un método popular con el aumento de la potencia computacional, habiendo superado a los métodos anteriores en, por ejemplo, clasificación de imágenes (Hansen & Bøgh, 2021).

El DL es el empleo de la inteligencia artificial que permite que un sistema aprenda y mejore de forma autónoma a partir de la experiencia sin programación explícita. Por lo tanto, en lugar de escribir programas que instruyan explícitamente a las computadoras sobre cómo realizar tareas, los sistemas de AI utilizan algoritmos de aprendizaje automático que acceden a los datos y los utilizan para aprender por sí mismos.

El ML, como subconjunto de la AI, es una tendencia muy importante, tanto en la investigación como en las aplicaciones industriales. Aunque muchas de las ideas de ML han existido durante muchos años, los avances recientes se basan en varios frentes. Uno de ellos es la disponibilidad de grandes conjuntos de datos con datos etiquetados, otro es la disponibilidad de procesadores especializados rápidos, como unidades de procesamiento de gráficos (GPU). El progreso se ve impulsado por una comprensión más profunda de la construcción de modelos y el aprendizaje de los datos, así como algunas técnicas nuevas que lo han unido (M. Sommer & Stjepandić, 2022). Entre las diferentes técnicas que se encuentran regularmente en la literatura, pueden destacarse tres tipos de técnicas de aprendizaje automático: aprendizaje supervisado, no supervisado y de refuerzo.

Aprendizaje supervisado

Es la técnica utilizada en aplicaciones que tienen una gran cantidad de datos de entrada disponibles (el conjunto de entrenamiento), y donde los expertos proporcionan respuestas correctas (etiquetas). El sistema utiliza estos datos etiquetados para el entrenamiento y su función es clasificar cada punto de datos en uno o más grupos. Luego, el sistema aprende cómo se estructuran estos datos de entrenamiento y los usa para predecir en qué categorías clasificar los nuevos datos de salida. Por lo tanto, el objetivo principal del proceso de aprendizaje supervisado completo es que la salida sea lo suficientemente cercana como para ser útil para todos los conjuntos de entrada (Lins & Givigi, 2021).

Las tareas de aprendizaje automático supervisado más habituales son la clasificación y la regresión. En la técnica de clasificación, el algoritmo debe aprender a predecir la clase, categoría o etiqueta más probable de los valores de salida discretos de uno o más conjuntos de datos de entrada. Similar a la clasificación, los problemas de regresión también requieren técnicas de aprendizaje supervisado. La diferencia es que el programa debe prever y predecir el valor de salida por sí mismo.

En la fabricación inteligente, el aprendizaje supervisado se usa en variadas aplicaciones, por ejemplo, para estimar con precisión el espesor de placas de acero en una máquina de laminación, para predecir problemas en la planta usando datos provenientes de

sensores en ella incluidas, o para controlar, a través de imágenes digitalizadas, la calidad de soldaduras de caños de acero, entre otras aplicaciones.

Aprendizaje no supervisado

En esta categoría de algoritmo de aprendizaje no hay expertos involucrados en el proceso y la evaluación de las acciones no se basa en ellos. A diferencia del aprendizaje supervisado, no aprende de datos etiquetados. En su lugar, buscará encontrar patrones en los datos. La tarea del aprendizaje no supervisado es encontrar los grupos de observación relevantes de los datos de entrada, es decir, la agrupación. Tal agrupación se basa en conclusiones extraídas de medidas similares que categorizan puntos similares en distintas clases. El objetivo principal del aprendizaje no supervisado es utilizar el análisis de conglomerados para descubrir relaciones desconocidas entre clases. Otra tarea de aprendizaje no supervisado es la reducción de la dimensionalidad, es decir, el proceso de descubrir relaciones entre variables de datos de entrada para eliminar posibles dimensiones redundantes. Teniendo en cuenta que algunos problemas pueden contener miles de dimensiones de datos de entrada, los problemas de BD se vuelven imposibles de visualizar y la reducción puede ayudar a visualizar mejor los resultados.

Los algoritmos no supervisados se han implementado en muchos procesos de fabricación, como por ejemplo, con el objetivo de detectar anomalías en fabricación inteligente utilizando datos reales colectados de los dispositivos de detección de una línea de producción de fábrica. Mediante el uso del algoritmo de codificación automática basado en "long short-term memory" (LSTM), se desarrollaron sistemas en tiempo real no supervisado para patrones de anomalías limitados e irregulares encontrados a partir de un conjunto de datos de sensores multivariados cuya precisión de detección es superior al 90 %.

Aprendizaje reforzado

Es una técnica de aprendizaje automático enfocada en aprender de la experiencia. Según el informe de la Royal Society, los algoritmos de aprendizaje reforzado se encuentran entre las técnicas de aprendizaje no supervisado y supervisado, ya que utilizan interacciones con un entorno para el aprendizaje.

Los algoritmos de aprendizaje por refuerzo observan el estado del entorno utilizando, generalmente, sensores mientras ejecutan acciones que cambian el mismo. En las aplicaciones de fabricación, los sensores observan el estado de la producción (o de las propias máquinas) y se toman decisiones secuenciales para maximizar los desempeños futuros. La maximización de los rendimientos se denomina "recompensa". Por lo tanto, el algoritmo no recibe una acción correcta etiquetada, sino que trata de encontrar las mejores acciones que maximizarán las recompensas a largo plazo. El aprendizaje por refuerzo se ha utilizado en varias aplicaciones en la fabricación inteligente. Por ejemplo, la capacidad de toma de decisiones brinda a los operadores de robots una mayor adaptabilidad al permitir que su comportamiento cambie en función de la información observada, tanto de su entorno como de sus colegas humanos. La evaluación final indica que la técnica de refuerzo puede aprender efectivamente a realizar ajustes en el comportamiento del robot en función del conocimiento extraído de la información observada equilibrando las demandas de la tarea.

Entre las técnicas disponibles, sólo algunas de ellas se han utilizado de manera eficiente en la fabricación, a saber:

- SVM (Support Vector Machine - Máquina de vectores de soporte).
- Árbol de decisiones: es un algoritmo gráfico fácil de entender y explicar. El problema es encontrar el mejor tipo de árbol de decisión para el conjunto de datos de entrenamiento.
- K-vecino más cercano (k-NN K-Nearest Neighbor): este es un algoritmo de aprendizaje automático utilizado para problemas no lineales, es decir, clasificación y reconocimiento de patrones.

- **CNN Red Neuronal Convolutiva (Convolutional Neural Network):** Se trata de una red neuronal artificial multicapa “feedforward”, que se propuso por primera vez para el procesamiento de imágenes bidimensionales.

Si los modelos basados en aprendizaje automático se fueran a utilizar desde el punto de vista del control de retroalimentación para identificar fallas, la incapacidad de vincular los resultados del modelo con el sistema físico haría difícil determinar la causa raíz de éstas y ajustar los parámetros del sistema en consecuencia (Hernandez-de-Menendez et al., 2020).

El uso del aprendizaje automático es capaz de cumplir con la tarea de pronóstico y predicción de fallas, por ejemplo, estimar el tiempo de vida de una máquina utilizando una gran cantidad de datos para entrenar un algoritmo de ML, además de ser utilizado para diagnosticar fallas (Dalzochio et al., 2020).

Elementos clave en AI Industrial

Conforme los autores Lee et al. (2018), los elementos clave en la IA industrial se pueden caracterizar por el ABCDE. Estos elementos fundamentales incluyen tecnología de análisis (A), tecnología de BD (B), tecnología de nube o cibernética (C), conocimiento del dominio (D) y evidencia (E). La analítica es el núcleo de la AI, que sólo puede aportar valor si hay otros elementos presentes. La tecnología de BD y Cloud son elementos esenciales que proporcionan la fuente de información (datos) y una plataforma para la AI industrial.

Si bien estos elementos son esenciales, el conocimiento del dominio y la evidencia también son factores importantes que en su mayoría se pasan por alto en este contexto. El conocimiento del dominio es el elemento fundamental de los siguientes aspectos:

1) comprender el problema y enfocar el poder de la AI industrial para resolverlo, 2) comprender el sistema para que se puedan recopilar los datos correctos con la calidad adecuada, 3) comprender los significados físicos de los parámetros y cómo se asocian con las características físicas de un sistema o proceso y 4) comprender cómo estos parámetros varían de una máquina a otra.

La evidencia también es un elemento esencial para validar los modelos de AI industrial e incorporarlos con capacidad de aprendizaje acumulativo. Al recopilar patrones de datos y la evidencia (o etiqueta) asociada con esos patrones, sólo se puede mejorar el modelo de AI para que sea más preciso, completo y sólido a medida que envejece.

Una inspección de muestra aleatoria de las piezas producidas ya no es suficiente y se requiere una inspección del 100%. Esta inspección al 100% es una inspección de calidad de todos los componentes del lote de inspección. Resolver esta tarea con la inspección visual manual por parte de los trabajadores es costoso y, en muchos casos, no se puede integrar en las líneas de producción. En la Figura 34 se observa el modelo de AI industrial de Lee (2018).

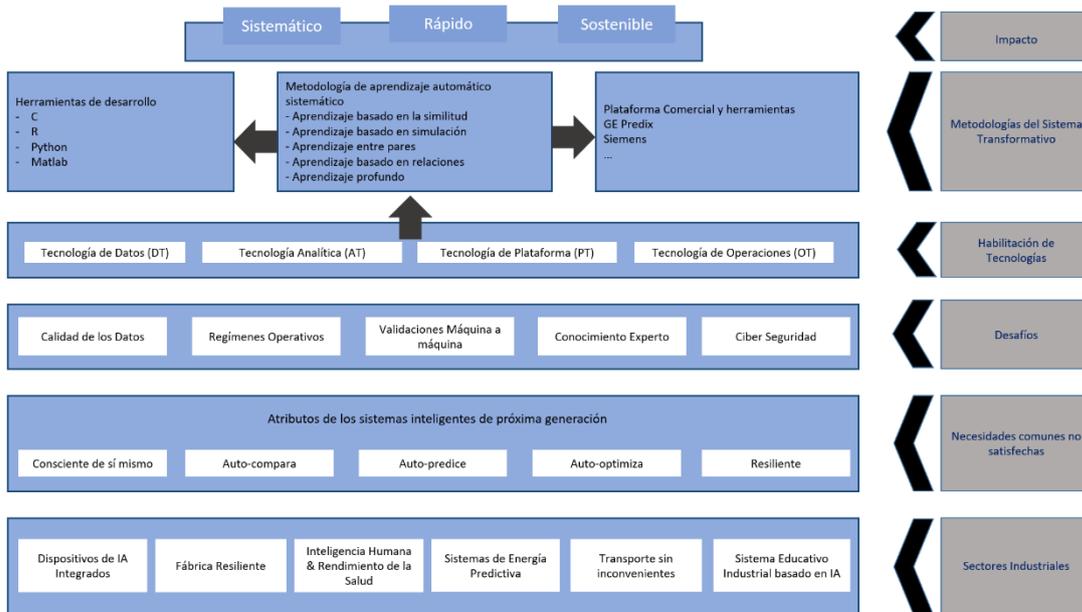


Figura 34 – Industrial AI. Fuente: adaptado de Lee, 2018

Inteligencia Artificial en el Internet de las cosas (AIoT) y los requisitos de calidad

La Inteligencia Artificial en el Internet de las cosas (AIoT) está creando un nuevo valor para las organizaciones en un amplio espectro de industrias, desde fabricantes y minoristas hasta energía, ciudades inteligentes, cuidado de la salud, y otros (Dalzochio et al., 2020). Se predecía que para el 2022 más del 80 % de los proyectos empresariales de IoT incluirían un componente de AI, frente a sólo el 10 % en 2019 (Learning et al., 2019).

Más allá de la infraestructura física del IoT inteligente, como sensores, cámaras, infraestructura de red y computadoras, las implementaciones exitosas de IoT vincularán las siguientes cinco capacidades de soporte a lo largo del análisis del ciclo de vida completo:

1. **Análisis de datos en tiempo real:** esta es la pieza de procesamiento de flujo de eventos. El procesamiento de flujo de eventos analiza grandes volúmenes de datos a velocidades muy altas, con una latencia extremadamente baja, para identificar eventos de interés.
2. **Toma de decisiones y gestión de interacciones en tiempo real:** los datos de transmisión sobre un evento de interés, como la ubicación, la dirección, el destino, el entorno y más en constante cambio de un automóvil, ingresan en un motor de recomendaciones que desencadena la decisión correcta o acción.
3. **Análisis de BD:** obtener inteligencia de los dispositivos IoT; comienza con la capacidad de adquirir y procesar rápidamente cantidades masivas de datos, muy probablemente en un entorno informático distribuido. Ser capaz de ejecutar más similitudes y usar todos sus datos, no sólo una muestra.
4. **Gestión de datos:** los datos de IoT pueden ser muy pocos o demasiados y ciertamente en múltiples formatos que deben integrarse y reconciliarse. La gestión sólida de datos puede tomarlos del IoT desde cualquier lugar y hacerlos limpios, confiables y listos para análisis.
5. **Gestión de modelos analíticos:** la gestión de modelos proporciona una gobernanza esencial durante todo el ciclo de vida de los modelos analíticos, desde el registro hasta el retiro. Esto garantiza la coherencia en la forma en que se gestionan los modelos: los medios para realizar un seguimiento de la evolución y garantizar que el rendimiento no se degrade con el tiempo.

.....

3.3.9. *Manufactura aditiva (AM)*

La manufactura aditiva (additive manufacturing - AM) o impresión tridimensional, ha evolucionado enormemente durante los últimos años y está demostrando su potencial en la generación de prototipos, la ingeniería de tejidos, apósitos para heridas, modelos de cultivo celular para pruebas de drogas y prótesis, por nombrar algunos casos de aplicación (Chinga-Carrasco, 2021).

La impresión en tres dimensiones parecería no tener límites; es sólo un comienzo. El mundo está cambiando totalmente con la ayuda de ella. Es ecológicamente benévola y mejoraría el trabajo y reduciría los costos (Shanmugam, 2020).

La AM es un proceso que toma una representación digital en tres dimensiones y fabrica el objeto físico asociado adicionando pequeñas capas, una tras otra, hasta finalizar el objeto (Kuila et al., 2021). A diferencia de las técnicas tradicionales de fabricación sustractiva, la AM es un nuevo método de fabricación constructiva, mediante el cual las capas de los materiales correspondientes se depositan entre sí en determinadas condiciones para dar forma al producto final (Azarian et al., 2021). El modelo digital 3D original, se convierte en archivos digitales el cual luego es “cortado” en finas capas horizontales. Estas capas de corte horizontal son las “imágenes fuente” para las impresoras 3D. De este modo, la AM permite la producción de objetos con geometrías complejas, muy difíciles o casi imposibles de lograr por cualquier otra tecnología de fabricación por sustracción. Su velocidad, flexibilidad, calidad y bajo costo, está produciendo enormes cambios en las estrategias de manufactura. Es por ello que, como destaca (Ates et al., 2020), la AM se utiliza especialmente en la producción de productos personalizados, prototipos, componentes y repuestos de máquinas.

La rápida evolución de la electrónica y las computadoras personales, como componentes principales de los escáneres 3D, ha llevado a la creación de una solución de escaneo rentable al ofrecer una adquisición de datos en tiempo real más rápida y con una gran capacidad para manipular y procesar una gran cantidad de información (Piperi & Bodi, 2021).

Las impresoras 3D se pueden también utilizar para producir bienes personalizados de bajo costo que son importantes para las sociedades modernas, proporcionando así un acceso más uniforme a herramientas y materiales, permitiendo la fabricación a pequeña escala, reduciendo el desperdicio y apoyando la innovación. Sin embargo, la revolución de las impresoras 3D sólo comenzó en 2009, cuando ella se volvió accesible para el uso público. El proceso de impresión 3D consiste en diseñar un modelo 3D del objeto, generalmente utilizando un software de diseño asistido por computadora (CAD) o un escáner 3D, y enviar el archivo CAD 3D a una impresora 3D que crea el objeto formando capas de material. Hay disponibles una amplia variedad de tecnologías CAD para usuarios con diversas habilidades y necesidades, que van desde aplicaciones simples para usuarios novatos hasta software de modelado y escultura 3D más sofisticados (Novak, 2022).

Haciendo historia, Azarian et al. (2021) explican que, en 1951, un sistema similar a la técnica de estereolitografía actual fue introducido por primera vez para producir las partes de un objeto 3D utilizando una foto escaneada. El siguiente avance revolucionario fue el uso de sinterización en polvo en 1971. Este método experimentó una mejora significativa en 1979 cuando se utilizó un lecho de polvo plano para sinterizar formas opcionales en capas delgadas. Estas acumulaciones tecnológicas ayudaron al profesor Kodama a llevar a la práctica la idea de la creación rápida de prototipos (RP – Rapid Prototyping), con el que construyó el primer modelo de plástico 3D, el cual constaba de 27 capas de polímero fotoendurecible de 2 mm. Tiempo después, Charles Hull hizo un enorme desarrollo en 1984, inventando la técnica del aparato de estereolitografía (SLA - stereolithography apparatus) para crear un objeto 3D mediante la adhesión de capas extrafinas. Debido a sus logros, Kodama y Hull, son conocidos como los padres del RP moderno. Sin embargo, en este período, la AM se utilizó principalmente como un método de RP en lugar de una tecnología

de fabricación debido a su capacidad limitada, alto costo y falta de conocimiento de procesamiento.

Para permitir el uso de AM en los sistemas de fabricación modernos, las mejoras se centraron ampliamente en tres aspectos, a saber: el material de partida, el proceso de formación de capas y el modo de operación. En este sentido, se considera que el material de partida es el factor más importante para diferenciar varias tecnologías AM, tal como se muestra en la siguiente Tabla 4.

Tabla 4 - Clasificación AM

Material de partida	Sistema de fabricación aditiva
Polímero líquido	Estereolitografía (SL)
	Estereolitografía de proyección de máscara (MPSL)
Polvos	Sinterización selectiva por láser (SLS)
	Impresión tridimensional (3DP)
Material fundido	Fabricación por deposición fundida (Fused Deposition Manufacturing - FDM)
	Fabricación por deposición de gotas (Doplet Deposition Manufacturing - DDM)
Hojas sólidas	Fabricación de objetos laminados (LOM)

Una de las técnicas de impresión más utilizadas es el Modelado por Deposición Fundida, FDM por sus siglas en inglés. El FDM es una de las técnicas de impresión más utilizadas para crear prototipos. Utiliza un carrete de filamento de plástico que luego se funde y extruye a través de una boquilla con alta temperatura y se coloca, capa por capa, en una plataforma. Esta técnica es relativamente económica, fácil de usar y puede reducir el tiempo de fabricación hasta en un 85 % (Centobelli et al., 2016).

El avance tecnológico en I4.0 brinda, actualmente, oportunidades para transformar un FMS (flexible manufacturing system) o RMS (reconfigurable manufacturing system) tradicional, en un sistema de fabricación inteligente y altamente conectado, que tiene como objetivo tratar de manera efectiva y eficiente las demandas de personalización de los clientes. La literatura muestra que a pesar de que la AM se introdujo inicialmente como un medio de creación de prototipos, la aplicación exitosa en varias industrias como la aeroespacial, la construcción y la atención médica, han demostrado su gran potencial para mejorar la capacidad de respuesta y la rentabilidad en los procesos de fabricación (Azarian et al., 2021). Cabe destacar además que, como tecnología clave de la I4.0, las tecnologías virtuales (VT - virtual technologies) brindan oportunidades para probar, monitorear y controlar en tiempo real un sistema de producción altamente inteligente y automatizado, como podría ser la inclusión de una impresora 3D en una línea de producción.

.....

3.3.10. Realidad Virtual y Aumentada - (VR / AR)

La Realidad Virtual (Virtual Reality – VR) es una experiencia que coloca al usuario en un entorno simulado destinado a reproducir los sentimientos que se experimentan en la vida real. Utiliza la tecnología informática para colocar al usuario dentro de esa realidad a través de una pantalla. Intenta simular tantos sentidos como sea posible, como el sonido, el olfato, la visión y el tacto para ofrecer la sensación de estar dentro de ese mundo virtual (Acharya, 2021). Ya es posible ofrecer diversos servicios, tales como sistemas basados en realidad aumentada (Augmented Reality - AR), selección de piezas en un almacén y envío de instrucciones de reparación a dispositivos móviles. La creación de la réplica del entorno físico en el entorno virtual reducirá costos (Ates et al., 2020). Es un sistema interactivo de simulación por computadora con fusión de información de múltiples fuentes. Al simular información visual, táctil, auditiva y otra información sensorial, los usuarios pueden interactuar con objetos reales en el mundo virtual en tiempo real; tiene requisitos

extremadamente estrictos sobre el desempeño de los gráficos por computadora para lograr un alto grado de realismo y desempeño (Pan, 2021).

La AR es un tipo de VR que tiene como objetivo identificar el entorno del mundo en una computadora. Una estructura de AR genera una vista compleja que es la agrupación de la división real vista por el operador y una parte virtual generada por la PC mejorando el escenario con información complementaria. La AR muestra datos superpuestos y puede llevarlos a un mundo diferente, donde los mundos real y virtual están fuertemente entrelazados (Bhosale et al., 2016).

El principal valor de la AR es el método mediante el cual los mecanismos del mundo digital se mezclan con la conciencia de una persona en el mundo real, no como una simple muestra de información, sino como la integración de entornos inmersivos que se suponen como partes ordinarias de una situación.

La AR se presenta frecuentemente como una de las nuevas tecnologías habilitadoras. Algo similar se ha realizado durante años; por ejemplo, los simuladores para pilotos de avión de la década de 1990 donde se muestra la dirección, altitud y la velocidad del mismo (Bhosale et al., 2016).

Pan, (2021) opina que, en términos de la aplicación de la tecnología de VR inmersiva, el concepto de tecnología VR fue propuesto por primera vez por el fundador de "VPL Exploration Company" en los Estados Unidos. Más tarde, en el campo relacionado con el desarrollo de la tecnología de VR, Estados Unidos, como país fundador, siempre ha estado en una posición de liderazgo. En términos militares y aeroespaciales, la NASA y la ESA han establecido el Centro de Investigación Experimental de VR en el Centro Espacial Johnson, y el laboratorio se centra en la tecnología de simulación en tiempo real del funcionamiento de la estación espacial.

Algunas de las características básicas de la VR son la realidad visual, la visión espacial y el seguimiento de la dirección de la posición.

La realidad visual se refiere a la reproducción de imágenes visuales en el mundo real con tecnología de VR.

Por su parte, la visión espacial significa que los seres humanos pueden formar un sentido de profundidad espacial en el cerebro a través de la visión, a fin de juzgar la distancia espacial entre ellos y el objeto de interés. Es importante destacar el concepto de seguimiento de la dirección de la posición; este es la imitación de la VR de las reglas visuales del mundo real y la respuesta dinámica de las imágenes de VR a los comportamientos de los usuarios, lo que les brinda una sensación de inmersión en el sistema conductual.

Parte de la computación es la interacción efectiva entre humanos y computadoras, y es en este área donde se puede ver grandes avances en la tecnología. El mundo virtual es una representación digital irreal del mundo real (Klačková et al., 2011).

En sistemas más complejos, otros sentidos humanos como la audición, el olfato y el tacto también participan en la interacción con la VR. Como se mencionaba, la VR es la simulación de un entorno irreal, real o ficticio, utilizando una computadora y sus dispositivos de entrada y salida. Es un término utilizado para describir un entorno tridimensional generado por la computadora que puede ser explorado por humanos. Una persona se convierte en parte de un entorno virtual y puede manipular objetos o realizar una variedad de acciones. Se puede percibir el entorno de la VR en todas las direcciones del espacio. Los más conocidos, desde los más simples hasta los más complejos, incluyen: realidad no absorbente, absorción completa de la realidad, realidad colaborativa y realidad aumentada.

VR no absorbente

Entre la simple realidad no absorbente, se puede incluir, por ejemplo, un simulador de vuelo, pero también un simulador en una autoescuela.

Absorción completa de la realidad

Se necesitan tres cosas para sumergirse por completo en la VR: (1) un mundo de calidad y muy detallado que se pueda explorar, o sea, una simulación o un modelo informático perfecto, (2) tener una computadora de alto desempeño que pueda decidir lo que se hace y ajustar la imagen en tiempo real, o sea, que cambie lo que se ve o escucha lo más rápido posible en tiempo real y (3) el hardware conectado a la computadora, que lleva por completo al mundo virtual.

Realidad colaborativa

Un entorno virtual colaborativo es un espacio en el que muchas personas interactúan entre sí desde diferentes lugares. La realidad colaborativa se puede utilizar en diversos sectores, tales como: marketing, comunicación con el consumidor, entrenamiento en un área peligrosa y dañina, entretenimiento social, por ejemplo, interactividad en juegos de mesa, educación, aprendizaje a distancia o medicina y simulación quirúrgica.

Realidad aumentada - AR

Como se mencionó anteriormente, un pariente muy cercano de la VR es la realidad aumentada. La AR funciona en el mundo real en el que se embeben y proyectan imágenes, proyecciones y sonidos digitales. En pocas palabras, se está expandiendo el mundo real con objetos digitales. De esto se puede deducir que muchas cosas se pueden considerar como realidad aumentada. Ellas incluyen, por ejemplo y como ya se ha dicho, pantallas en un avión o en automóviles, las cuales pueden proporcionar información como la distancia a un destino, la ubicación geográfica o la velocidad real. El dispositivo, es decir, las lentes, suelen enfocarse en un objetivo. Utilizando algoritmos inteligentes y otros sensores, tales como acelerómetros y giroscopios, el dispositivo proporciona y mantiene una imagen equilibrada con el mundo real. El dispositivo mantiene una imagen equilibrada con el mundo real, es decir, las lentes, suelen enfocarse en un objetivo utilizando algoritmos inteligentes y otros sensores, tales como acelerómetros y giroscopios.

Aplicaciones

En relación con otro tipo de aplicaciones, la tecnología de VR permite a los ingenieros ver sus proyectos en 3D para obtener una mejor comprensión y conocimiento del mismo, pueden detectar y prevenir errores o riesgos potenciales antes de instalar el dispositivo, o realizar monitoreo y controles desde un lugar seguro. Actualmente, a medida que el software de VR es más accesible, las empresas pueden comenzar a construir sus propias aplicaciones y resolver problemas en ingeniería, medicina, biología y tantas otras aplicaciones.

VR y Sistemas CAD

La VR, en interacción con el sistema CAD (Computer Aided Design) permite a los diseñadores ver y examinar rápida y fácilmente sus modelos. Ofrece la capacidad de detectar errores antes de diseñar y fabricar un producto determinado, lo cual es una gran ventaja (Figura 35).



Figura 35 - VR y CAD

VR y la programación de robots

Los robots industriales, en el pasado, no eran tan seguros como lo son actualmente. Con algunas excepciones y el advenimiento de los robots cognitivos y colaborativos, los robots industriales se alojaban principalmente en jaulas de seguridad utilizando varios tipos de elementos de hardware y software, sobre todo sensores y escáneres 3D. En consecuencia, el diseño de estos robots industriales y las jaulas donde se alojan son muy importantes y la VR y la AR pueden colaborar fuertemente en este tipo de análisis (Figura 36).



Figura 36 – Robot y VR

3.3.11. Ciberseguridad

Introducción

La seguridad informática o ciberseguridad es la disciplina que se ocupa de la protección de la información contenida en una computadora, en redes de datos o en la nube, o sea, en todo sistema informático. Se entiende por sistema informático al conjunto de partes identificadas como dispositivos electrónicos, tales como el hardware, el software y el humanware que funcionan relacionados con un objetivo común. Ellos se integran a la infraestructura conformando dicho sistema informático. La seguridad de la información es la disciplina que diseña las normas, procedimientos, métodos y técnicas orientados a proveer condiciones seguras y confiables para el procesamiento de datos en sistemas informáticos. Tal como fuera ya explicado, la información es el resultado del procesamiento de datos, es significativa para el usuario, puede ser confidencial, no estar centralizada y en general es de gran valor. El problema radica en que dicha información podría ser alterada, destruida o mal utilizada. Como consecuencia de la amplia difusión de la tecnología informática, la información se almacena y procesa en sistemas que podrían ser independientes o estar conectados a sistemas de redes. Se fundamenta en tres principios: Confidencialidad, Integridad y Disponibilidad. También a la seguridad se la puede clasificar conforme a si es física o lógica, de acuerdo con en la forma en que se trabaja (activa o pasiva) y según el momento (antes o después del incidente). Por su parte, los factores de riesgo pueden ser impredecibles o predecibles. Debido a todo lo anterior, se puede clasificar a los mecanismos de seguridad como preventivos, detectivos y correctivos.

Existen diversos mecanismos para preservar la información, entre ellos se encuentran la encriptación o cifrado de datos, los antivirus, los firewalls, y el respaldo de datos. Las normas ISO 27001 describen los objetivos de seguridad y cómo se evalúan los riesgos a los que está sometida la información de la organización.

La Seguridad Informática y la I4.0

La I4.0 genera un cambio social en muchos ámbitos, entre ellos la criminalidad. Esto se debe a que se espera que la alta rentabilidad en el entorno de la I4.0 motive a los delincuentes a tomar medidas en su propio beneficio. Se espera que el entorno delictivo resultante aumente gradualmente el papel de la ciberseguridad (Ates et al., 2020).

Uno de los ejemplos de estos riesgos se encuentra en un sistema de comunicación doméstico, en donde los dispositivos están interconectados a través de una red local y luego a Internet con el fin de poder controlar de forma remota artefactos domésticos. Los dispositivos en una red doméstica permiten la autenticación de un usuario para controlar diferentes tareas, como el control de la temperatura, el ajuste de iluminación, bloqueo-desbloqueo de puertas y acceso de seguridad al hogar desde la distancia. Se pueden instalar diferentes aplicaciones en un teléfono inteligente u otros dispositivos conectados a la red, o

el usuario puede usar un programa de temporizador y configurar un horario. Algunos electrodomésticos inteligentes vienen con AI para que puedan aprender el comportamiento del propietario con el tiempo y alertar al usuario o reaccionar haciendo los cambios necesarios cuando sucede algo fuera de lo común. Alertarán al usuario si detectan actividades sospechosas, por ejemplo, cuando se detecta movimiento en la casa cuando el usuario no está (Hussain & Qi, 2021). En forma análoga, aunque más sofisticada, lo mismo sucede en las empresas tanto de servicios como más aun en las industriales. Por ejemplo, la IEC 62443, estándar conocido y ampliamente utilizado dentro de la automatización industrial, describe los requisitos y las mejores prácticas para el desarrollo, la integración y las evaluaciones de componentes y sistemas relacionados con la ciberseguridad (Leander et al., 2019).

Áreas de seguridad en la I4.0

La I4.0 se puede examinar desde siete perspectivas diferentes cuando se habla de seguridad (Figura 37) (Ates et al., 2020). Ellas son:

1. Seguridad de BD y sistemas de almacenamiento en la nube.
2. Ciber espionaje.
3. Análisis forense digital.
4. Ciberterrorismo.
5. Seguridad de la cadena de suministro.
6. Internet de las cosas y
7. Normativas.

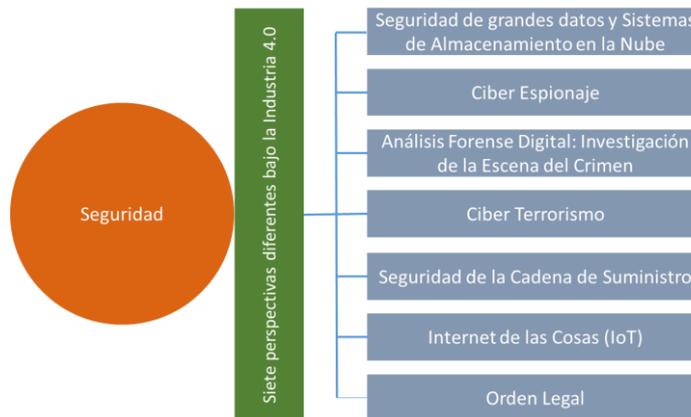


Figura 37 - Áreas de seguridad en la I4.0. Fuente: propia del autor

1. Seguridad de BD y CC

Hoy en día, junto con el aumento continuo de la cantidad de datos y la capacidad de las máquinas para comunicarse entre sí, gracias a IoT, se hace necesaria la transición de los datos de un entorno particular y cerrado en entornos de almacenamiento en la nube. Esta transición trae consigo una serie de cambios en los hábitos de protección de datos en el ámbito de la seguridad y en el almacenamiento de datos basado en la nube. Ella debe ser segura, escalable y autónoma. Los sistemas de almacenamiento en la nube utilizan métodos de autenticación. Las áreas de almacenamiento en cuestión permiten el tratamiento de los datos mediante el almacenamiento del BD. Las áreas de almacenamiento en la nube son el centro del sistema de producción industrial, por lo que sólo las personas adecuadas deben tener acceso al mismo, de lo contrario, toda la información puede ser recuperada, modificada o destruida en ataques ciberfísicos realizados por empresas o individuos con diferentes propósitos. En este contexto, medidas tales como el control de acceso privilegiado, especialmente a través de métodos de autenticación flexibles, se consideran muy eficaces para gestionar el acceso a los datos.

2. Ciber espionaje

La principal tarea del ciber espionaje es la captura, sabotaje y adquisición desleal de la información en entornos virtuales. En el ámbito de la I4.0, la información que el sector manufacturero define como secreto comercial es de interés para el ciber espionaje, especialmente con el tipo de ataque definido como "Amenaza Persistente Avanzada"; personas y grupos no autorizados pueden acceder a la red, pasar desapercibidos durante mucho tiempo y obtener toda la información sobre la producción. El espionaje cibernético es también una amenaza para las actividades y bases de datos de investigación y desarrollo de las fábricas. La I4.0 es, en general, más vulnerable al ciber espionaje que la fabricación convencional, debido a la gran cantidad de procesos comerciales inteligentes y conectados lo cual aumenta las amenazas cibernéticas.

3. Análisis forense digital. - Investigación de la escena del crimen

En los métodos clásicos de investigación es mandatorio, para las fuerzas de seguridad, determinar la identidad de los autores y conducirlos a comparecer ante las autoridades judiciales una vez cometido el delito. En este contexto, la investigación y detección de redes informáticas atacadas y entornos de almacenamiento de datos requieren conocimientos técnicos. La necesidad de información técnica trae consigo la necesidad de capacitación regular de las fuerzas de seguridad y la necesidad de personal especializado en delitos digitales relacionados con la I4.0.

4. Ciberterrorismo

El ciberterrorismo es el ataque a computadoras, redes e información almacenada en ellas que incluyen los objetivos sociales y políticos de un gobierno. Está en la naturaleza del terrorismo cibernético que el ataque cree un impacto en la sociedad e intimide a las personas ejerciendo violencia. Por esta razón, las instalaciones de producción críticas se encuentran dentro del área objetivo del terrorismo cibernético. El ciberterrorismo es un tipo de ataque en el que los ciberdelincuentes se convierten en terroristas digitales con consideraciones políticas. Dado que la I4.0 se basa fundamentalmente también en la eficiencia, poseen bajo nivel de seguridad debido a la búsqueda de simplicidad de sus sistemas, y es por ello por lo que el sistema es vulnerable a los ataques de los terroristas ciberfísicos.

5. Seguridad de la cadena de suministro

Con la aparición de las fábricas inteligentes muchas de las brechas de seguridad comienzan al principio de la cadena de suministro con un proveedor. De ese modo, por ejemplo, los delincuentes pueden ingresar a la cadena de suministro y acceder a la fábrica inteligente teniendo más oportunidades para delinquir. Estos ataques generalmente ocurren interfiriendo con el sistema y destruyendo datos o modificándolos intencionalmente para arruinar el sistema.

6. Seguridad en IoT

El IoT es un eslabón indispensable en los nuevos procesos de la I4.0. Es un hecho que, la eficiencia de la producción y la calidad de vida de las personas aumentarán juntas con la distribución de datos de red en la tecnología de IoT; sin embargo, este sistema contiene una gran cantidad de puntos de entrada que son vulnerables. Se sabe que los dispositivos IoT, en especial, poseen vulnerabilidades debido al envío no encriptado, interfaces web inseguras, protecciones de software de baja seguridad y autorizaciones inadecuadas. Existen actualmente trabajos académicos en referencia a criptografía liviana en IoT.

7. Normativas

La mayor rentabilidad de las empresas, aparejada a la adopción de la I4.0, motivará a los delincuentes a realizar nuevos tipos de delitos. En este contexto es necesario revisar las leyes para luchar contra los nuevos tipos de delincuencia porque uno de los pasos más importantes de la lucha es la fuerza disuasoria de las mismas. Es importante que éstas se revisen periódicamente, al igual que el tipo y los métodos delictivos, y que la conducta delictiva esté definida en la ley. Con los cambios que se pudieran realizar en las leyes, las fuerzas de seguridad estarían obligadas a intervenir de manera reactiva y para prevenir proactivamente posibles delitos. La mayor incertidumbre en el futuro cercano es que no existe un acuerdo universal sobre qué legislación se aplicará si los datos dentro de las empresas de almacenamiento en la nube que operan en diferentes países se someten a revisión judicial (Ates et al., 2020).

Tipos de Ataques

Existen diferentes tipos de ataques, entre ellos de espionaje, de denegación de servicios y de interferencia entre partes. Se explica brevemente cada uno de ellos a continuación.

1. Ataque de espionaje:

Esto también se conoce como ataque de rastreo o suplantación de identidad. Se utiliza para rastrear el tráfico de red en redes inalámbricas que conectan dispositivos IoT a través de Bluetooth, IEEE 802.11x o RFID. Se lleva a cabo haciéndose pasar ilegalmente por un dispositivo IoT legal para recopilar información a través del “sniffing” (olfateo).

2. Ataques de autenticación de denegación de servicio:

Los ataques de autenticación de denegación de servicio (DoS) en redes 802.11, es un ataque desafiante a dispositivos informáticos causado al bombardear con solicitudes durante un cierto período, lo que obliga a los dispositivos de destino a fallar, ralentizarse o apagarse por completo. Como los dispositivos IoT tienen recursos limitados, los ataques DoS pueden causarles grandes daños. La mayoría de los dispositivos IoT utilizan hardware de bajo costo con una implementación de bajo costo de redes basadas en IEEE 802.11.

3. Ataque MITM (Man-In-The-Middle):

Este tipo de ataque es aquel en el que el atacante cambia con éxito la comunicación entre dos partes, el remitente y el receptor, donde el remitente y el receptor creen que se están comunicando con una parte genuina pero el atacante controla toda la comunicación. El ataque MITM se puede implementar de diferentes maneras, tales como usando un punto de acceso falso o el “envenenamiento”. El punto de acceso falso se puede configurar utilizando la información como la dirección MAC, el canal y el SSID, que se recopiló al “olfatear” y “desuplantar” la identidad (Hussain & Qi, 2021).

BlockChain

El BlockChain (BC) se define como un libro mayor digital, descentralizado y distribuido en el que las transacciones se registran y agregan en orden cronológico con el objetivo de crear registros permanentes y a prueba de manipulaciones. Esencialmente es un mecanismo novedoso para almacenar, asegurar y compartir datos entre múltiples nodos en una red. Un BC rompe con el enfoque centralizado tradicional al administrar los datos de la cadena a través de una red de nodos distribuidos e interconectados. Las principales características de BC son el mantenimiento de registros compartidos, la inmutabilidad, la descentralización, la confianza distribuida, el consenso de múltiples partes, la validación independiente, la evidencia de manipulación y la resistencia a la manipulación. El término BC ganó popularidad como resultado de una combinación de tecnologías, herramientas y métodos configurados que sustentan la criptomoneda Bitcoin (Abderahman Rejeb, 2019).

BC proporciona herramientas para la trazabilidad en diversos escenarios, como la lucha contra la falsificación, la financiación y la gestión de la cadena de suministro (Zhang et al., 2020).

Satoshi Nakamoto fue quien propuso el concepto de BC como una tecnología fundamental en una moneda digital, es decir, Bitcoin. Tiene la ventaja de la alta seguridad, irreversibilidad, distributividad, transparencia y precisión. También realiza la minería y el comercio de Bitcoins mediante la construcción de una estructura de datos y el cifrado de la transmisión de la información negociada. El cifrado de datos se utiliza para garantizar que, actualizar o eliminar transacciones existentes, sea prohibitivamente costoso, lo que hace que la cadena de bloques sea a prueba de manipulaciones. El bloque de datos es mantenido por los nodos con la función de mantenimiento. No existen agencias de gestión centralizadas, ya que los derechos y obligaciones de cualquier nodo son iguales. Es adecuado para el almacenamiento de datos que requieran identificación y verificación; permite a los participantes establecer un consenso descentralizado con la secuencia de eventos y el estado de la transacción. Más allá del campo de las finanzas, BC ha demostrado el potencial para transformar recursos y servicios en muchos otros campos (Liu et al., 2020).

Los sistemas e infraestructuras electrónicos son susceptibles del mal uso, abuso o de diferentes tipos de fallas, lo cual puede perjudicar profundamente el funcionamiento de los nuevos procesos tanto de negocios como de fabricación. Desde el punto de vista de la empresa, algunas de sus más importantes consecuencias podrían ser las que se mencionan a continuación (Ford & Baum, 1997): pérdidas financieras resultante de fraude, robo de información valiosa y confidencial, pérdida de oportunidades de negocios debido a las interrupciones de servicio y / o de fabricación, utilización no autorizada de recursos, pérdida de confianza por parte de los clientes, costos adicionales resultantes de las incertidumbres y cuestiones regulatorias y legales.

Por su parte, el BC se puede integrar con contratos inteligentes programables, lo que garantiza que el programa cargado pueda ejecutar de manera creíble y automática la lógica preestablecida a través de la autolimitación y el cifrado de seguridad (Leng et al., 2020).

Finalmente, se puede decir que el "Blockchain France Hub" define una cadena de bloques como una tecnología transparente y segura de almacenamiento y transferencia de datos que funciona sin un organismo de control central. Por extensión, una cadena de bloques es una base de datos que contiene un registro de todas las transacciones realizadas entre usuarios desde que se instaló. La base de datos es segura y está distribuida y compartida por sus distintos usuarios, sin intermediarios, lo que significa que cada miembro puede comprobar la validez de la cadena (J. H. Lee & Pilkington, 2017).

En un estudio realizado por Elhidaoui et al. (2022) se definen los diez factores críticos del BC. El estudio indica que el "registro, seguimiento y comercio", puede ser descrito como el factor de mayor influencia. En el segundo nivel, se encontraron cuatro factores críticos de éxito con influencia moderada, a saber, la trazabilidad, la transparencia, el conocimiento y la gestión de la organización, seguido por el nivel 3 con 5 factores con menor influencia, inteligente, confianza y confiabilidad, tokenización, prácticas verdes y logística colaborativa.

Finalmente, se puede decir que, el mecanismo de seguridad bajo el sistema BC mitiga el riesgo de un punto único de falla debido a su enfoque de descentralización (Abderahman Rejeb, 2019).

.....

3.3.12. El futuro de las nuevas tecnologías

Los investigadores Rauch & Vinante (2021) han desarrollado un modelo de radar tecnológico tridimensional para evaluar las tecnologías emergentes de la I4.0. Éste está basado en el "Gartner Hype Cycle Curve" y se muestra a continuación en la Figura 38.

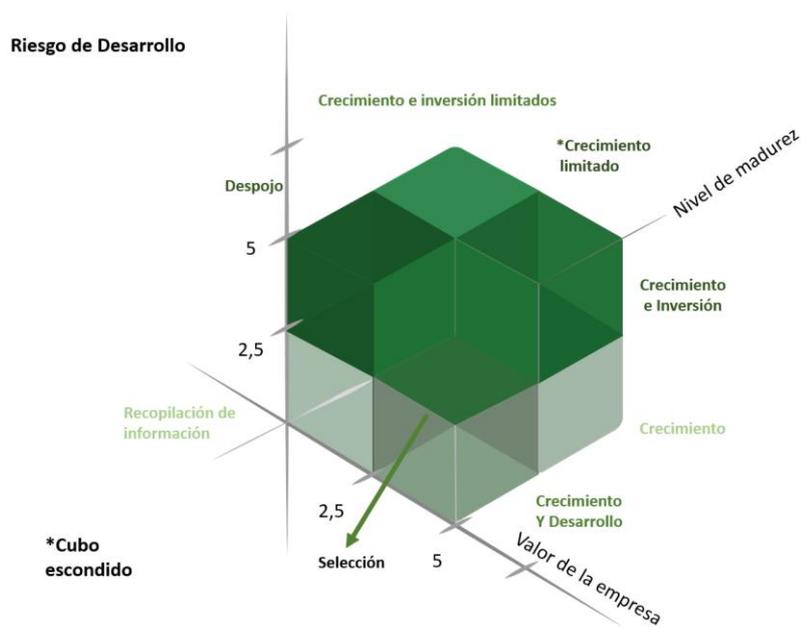


Figura 38 - Gartner 3d radar. Fuente: Rauch (2021)

El modelo indica que, tomando en consideración sus tres dimensiones, nivel de madurez de la tecnología bajo análisis, el valor de dicha tecnología para la empresa y el nivel de riesgo de desarrollo, se pueden posicionar cada una de las nuevas tecnologías tal como se muestra a continuación en la siguiente Tabla 5.

Tabla 5 - Ranking de nuevas tecnologías. Fuente: Rauch (2021)

Pos.	Tecnología	Nivel de madurez	Valor de la empresa	Riesgo de despliegue	Puntaje total
1	Gemelos digitales	2	4.25	3	9.25
2	Realidad aumentada	3	3	2.75	8.50
3	Robots móviles autónomos	1	3.75	3.75	8.50
4	Taxonomía empresarial	3	2.5	3	8.50
5	Robots inteligentes	1	4	3.5	8.50
6	Impresión 4D	1	3.25	4	8.25
7	Realidad mixta	3	3	2.25	8.25
8	Impresión 3D a nanoescala	1	3	4.25	8.25
9	Realidad virtual	4	2.25	2	8.25
10	Cámaras de detección 3D	3	2.5	2.5	8.00
11	Plataforma IoT	2	3.25	2.75	8.00
12	Vehículos autónomos voladores	1	2.25	4.25	7.50
13	Operaciones digitales	1	2.75	3.5	7.25
14	Cadena de bloques	2	2	3	7.00
15	Organizaciones autónomas descentralizadas	1	2.25	3.75	7.00

Se demuestra en este estudio el potencial de los DT, la AR y los Cobots, entre los más destacados.

.....

3.4. Componentes 4.0 y Productos Inteligentes

3.4.1. Introducción

La digitización de las “cosas”, desde elementos intangibles hasta inclusive de objetos aplicados o conectados a las personas, son denominados activos (assets) en el ámbito de la I4.0. Estos “assets” poseen en general tecnología como para ser identificados en forma individual, pueden recibir datos, entregar información e inclusive hasta tomar decisiones autónomas. Bajo ciertas circunstancias, las cuales se describirán a continuación, suelen denominarse “Objetos Inteligentes” o “Componentes 4.0” y son la base del desarrollo de procesos y productos innovadores.

La DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE, (2018) define que la información en formato binario obtenida como resultado del proceso de “espejo”, caracteriza el objeto del mundo físico como una lista de propiedades en el mundo de la información; esto es en vista de que en la I4.0 no se utilizan objetos aleatorios sino sólo objetos que tienen valor para una organización. Estos objetos inteligentes no sólo colaboran con los procesos industriales y de negocios, sino que pueden también interactuar con las personas.

Tal como se acaba de mencionar la digitalización está presente, no sólo en las líneas de producción, sino también en los productos, los insumos, los servicios y prácticamente en todo lo que respecta a los procesos industriales y de negocios.

La conectividad e interoperabilidad entre dispositivos, tal como se explicara en la introducción de este trabajo, es tal vez una de las características más importantes de la DX, fundamentalmente de la DX aplicada a la industria.

Entre otros aspectos a considerar, los objetos inteligentes conectados en red conducen a una delimitación no muy bien definida de los límites entre el producto, el sistema y los servicios. Como consecuencia de ello, pueden surgir nuevas interacciones entre máquinas o máquinas y humanos que supongan un desafío para la evaluación de posibles peligros y por ende del diseño ergonómico (Standardization-Council-Industry, 2020).

Describir un activo en forma de propiedades no es suficiente. Cada uno tiene funciones técnicas específicas y propiedades especiales que se describen en las capas de la RAMI4.0 e identifican el propósito real para el que se utiliza.

Como se describió en la RAMI4.0, el eje del “Ciclo de vida de Flujo de Valor” caracteriza el activo con estados específicos, en una ubicación específica, en un momento específico y durante toda su “vida”. Esto permite mantener una especie de “registro de ciclo de vida” para cada activo que permanecerá con él durante toda su vida y que incluirá, como mínimo, los parámetros: “hora”, “ubicación” y “estado” y los estados mínimos de “tipo” e “instancia”. Finalmente, un activo siempre está asignado a alguien o algo tal como se puede observar en el eje Jerarquía. Es por ello por lo que la RAMI4.0 permite describir un activo con suficiente precisión como para permitir la generación de una “imagen virtual” del mismo, el cual se puede utilizar en el mundo de la información. El uso de términos como “IoT ready” (listo para IoT), “RAMI4.0 compliant” (cumplimiento RAMI4.0) o “Industrie 4.0 Siegel” (sello de I4.0) continúan creciendo; además, las compañías, ofrecen probar productos y empresas enteras para el cumplimiento de dichas normas I4.0. Las directrices que se brindan se refieren a criterios para productos, entendiéndose por producto a cualquier dispositivo, sistema, máquina o software, en el sentido de un componente de I4.0. Lo explicado anteriormente se ilustra a continuación en la Figura 39.

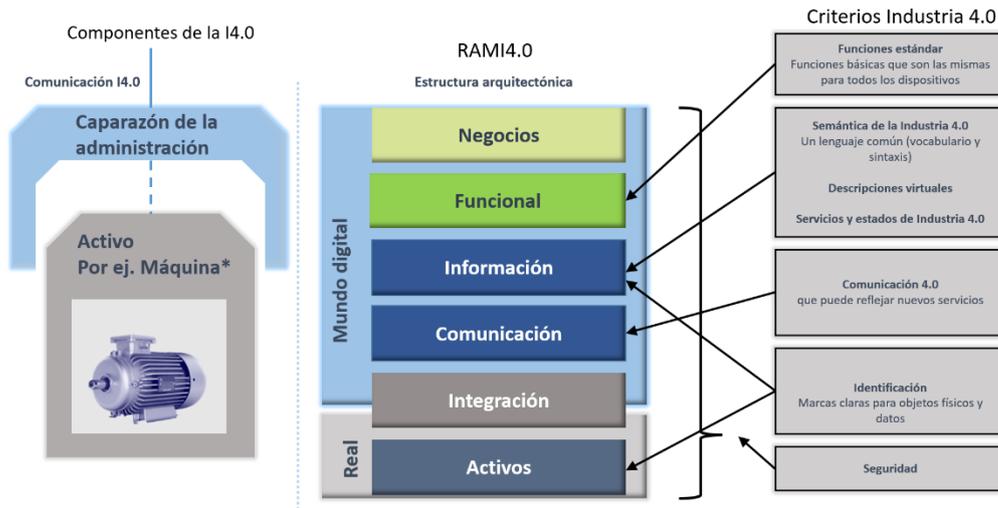


Figura 39 - Componente I4.0. Fuente: adaptado de Roadmap I4.0 v.4

Existe una fuerte relación entre las aplicaciones de la I4.0 y el ciclo de vida completo de un producto por lo que se están convirtiendo, gradualmente, en parte fundamental y esto es gracias a la ayuda del IoT (Mourtzis et al., 2019). La I4.0 representa la interconexión de alta densidad de todos los objetos durante todo el ciclo de vida de un producto. En otras palabras, desde el momento en que los ingenieros lo conciben por primera vez, pasando por su producción, hasta el final del ciclo de vida del producto, después de lo cual un objeto se desecha o recicla (DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE, 2018). Se observa en la siguiente Ilustración la síntesis de un componente 4.0 (Figura 40).

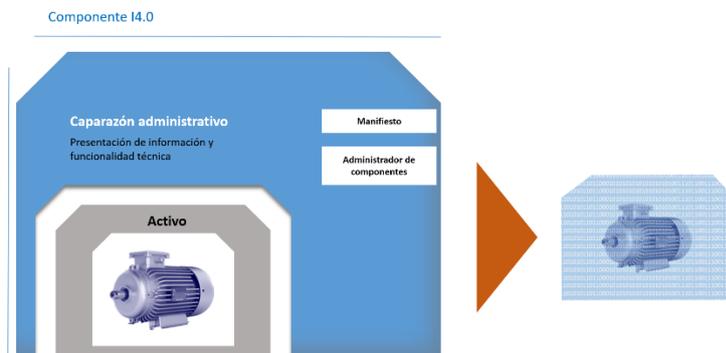


Figura 40 – Activos. Fuente: adaptado de Roadmap I4.0 v.4

La demanda de los consumidores está cambiando y la agilidad y personalización del producto son dos de los más importantes atributos en miras de la competencia que es cada vez mayor. Como consecuencia, los productos y los servicios se transforman en “commodities”, como por ejemplo en la industria automotriz, donde el 80% de los componentes son así considerados (Beste et al., 2019).

Los fabricantes se enfrentan entonces a una fuerte competencia debido a los cambios continuos en el mercado, la necesidad de ciclos de vida de productos más breves y el cumplimiento de las expectativas del cliente. Dichas fábricas deben elaborar productos de calidad a un costo más bajo, lo que las obliga a la adopción de nuevas estrategias de desarrollo de productos. Con el objetivo de dar respuesta a las nuevas características del mercado, la utilización de las nuevas tecnologías habilitadoras de la I4.0 facilita la búsqueda de la diferenciación y la personalización.

La capacidad de capturar datos y generar información para la toma de decisiones ha aumentado exponencialmente. Esto es debido a la conexión de productos a la nube y / o a la colecta de datos durante su funcionamiento. Por tal motivo, la I4.0 permite una amplia

variedad de mejoras a los productos existentes, abriendo la posibilidad de hacerlos digitales y, por ende, conectados entre sí (Gaiardelli et al., 2021).

Unterhofer et al. (2019) aseguran que durante los últimos años la economía global se ha convertido en un fuerte competidor de la industria en Europa. Ya no es suficiente producir más rápido, más barato y con mayor calidad que los competidores, la industria necesita incluir nuevos tipos de estrategias de producción innovadoras y digitales para mantener la ventaja competitiva actual en el largo plazo. Dicha innovación es otra de las claves de los productos inteligentes. Los autores Beste et al. (2019) la definen como el intento de probar productos, procesos o formas nuevas de hacer las cosas, o, simplemente, mejorarlas radicalmente. Es importante destacar que las empresas se están transformando en proveedores, no sólo de productos, sino también de soluciones y servicios. Como dicen Jussen et al. (2019) el enfoque en los procesos de cambio de las empresas está actualmente apoyado en las soluciones digitales, tales como los servicios basados en datos.

Un primer paso para integrar toda esa información es la interconexión e interoperabilidad de dichas “cosas” a través del IoT o, en el caso particular de las empresas industriales, en el IIoT. Se esquematiza a continuación la manera en que los datos fluyen a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto (Figura 41).

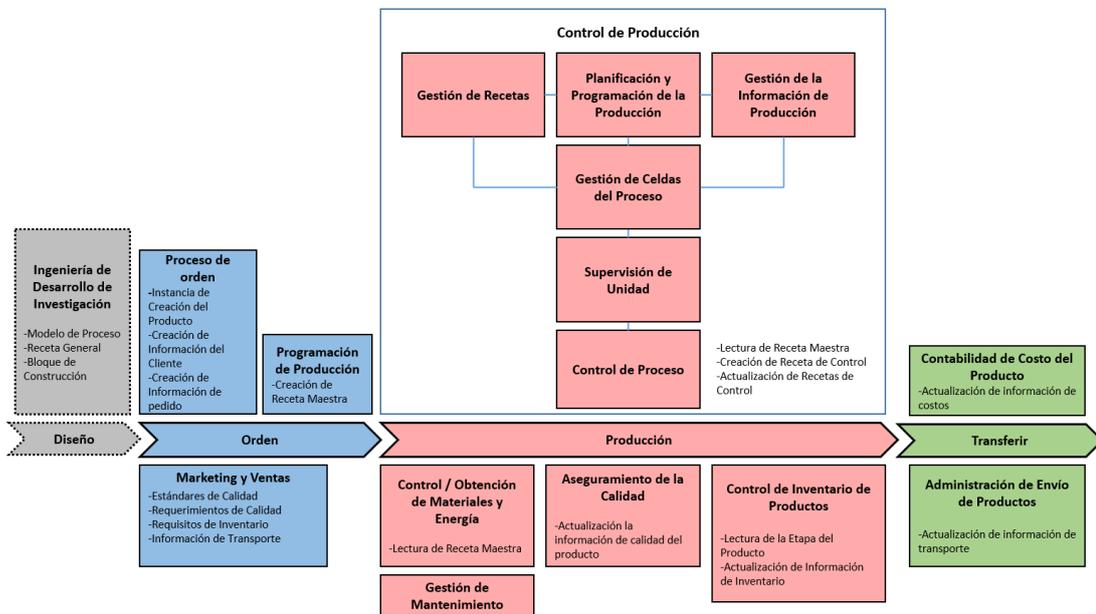


Figura 41 - Información sobre el producto durante el ciclo de vida.

Fuente: Integración end-to-end a través del modelo del Producto 4.0. Sarachaga. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela de Ingeniería de Bilbao.

La 14.0 no sólo busca la integración vertical y horizontal dentro de la empresa, sino también la interconexión de los sistemas de producción a lo largo de toda la cadena de valor. Con esta integración, las empresas pueden alcanzar soluciones flexibles, optimizar la producción y obtener ventajas en un entorno competitivo, así como facilitar la toma de decisiones (Gerekli et al., 2021). La interconexión e interoperabilidad entre las “cosas”, prescindiendo en gran parte de la intervención humana, mejora también la eficiencia y efectividad de los procesos, es decir, su productividad. Sin embargo, ello demanda una mejor preparación en la organización y en las competencias y habilidades de las personas. Por otra parte, es de destacar que, las características de los objetos inteligentes son el alto grado de personalización y autonomía, gran cantidad de componentes multidisciplinarios, capacidad de reacción en tiempo real y su potencial de reconfiguración dinámica durante todo su ciclo de vida (Abramovici et al., 2017).

Estudios realizados en Alemania comprueban la mejora en la productividad de las empresas gracias a su digitalización y automatización. Los autores Rößmann et al. (2015)

aseguraban que en los siguientes cinco a diez años la I4.0 sería adoptada por un mayor número de empresas, y como consecuencia aumentaría la productividad en todos los sectores manufactureros alemanes.

Cuando apenas era incipiente el concepto de objeto inteligente, Sommer (2015) había definido a los CPS como objetos inteligentes que se comunican entre sí, creando un Internet de objetos y servicios, con el fin de integrar lo físico con lo virtual en un único mundo sólidamente conformado. Estos sistemas CPS son una de las bases de la I4.0. Sin embargo, una preocupación que surge es desde el punto de vista de los recursos humanos, es que este tipo de automatización generalizada produce incertidumbre, ya que las personas se inquietan por el efecto que la I4.0 podría generar en el largo plazo, resultando de ese modo en un posible aumento del índice de desempleo debido a causas tecnológicas.

3.4.2. Producción 4.0

El término "*Productive 4.0*" surge de una iniciativa científica directriz dentro de la Unión Europea (UE). Su objetivo principal es mejorar el diseño, fabricación y distribución de productos a partir de la puesta en práctica de la I4.0. Lo importante en este proyecto es el concepto de gestionar la cadena de valor a lo largo del ciclo de vida completo del producto. Con dicho fin, se han agrupado las actividades de I+D en tres grupos (Kozma et al., 2019):

1. Fabricación digital o inteligente.
2. Gestión de la cadena de suministro.
3. Gestión del ciclo de vida del producto.

Tal como afirma el autor Martínez-Olvera (2022) la idea central detrás del paradigma de la I4.0 es la implementación de un entorno de producción completamente automatizado y digitalizado, que está directamente relacionado con el concepto de personalización masiva, teniendo claras implicaciones de sostenibilidad. Esto ha obligado a las empresas manufactureras a encontrar nuevas formas de producir "más con menos" mediante el uso de procesos de fabricación energéticamente eficientes.

Fabricación Inteligente

Existe una fuerte relación entre la manufactura inteligente y los objetos inteligentes, ya que la primera no podría existir sin la segunda. La manufactura inteligente se refiere a la combinación de capacidades de fabricación avanzadas y tecnologías digitales para mejorar la productividad, la agilidad y la sostenibilidad de los sistemas de fabricación. Utiliza el concepto de CPS a través de la colaboración de elementos computacionales para controlar varias entidades físicas en el entorno de fabricación. Asimismo, el concepto de fabricación inteligente también está estrechamente relacionado con la toma de decisiones basada en datos y consecuentemente en información y conocimiento, de manera de satisfacer los nuevos requerimientos de los clientes.

La creciente demanda de bienes y servicios personalizados y las frecuentes fluctuaciones del mercado provocan dificultades en la gestión operativa. La integración vertical de la I4.0 transforma la fábrica tradicional en un sistema de producción más flexible y reconfigurable y los recursos y su distribución se pueden reestructurar automáticamente y en tiempo real (Gerekli et al., 2021).

La I4.0 y sus objetos inteligentes permiten mejoras notables en las etapas de diseño, producción, distribución e, inclusive, servicios de posventa, lo cual genera un impacto en todo el ciclo de vida del producto. Se toman mejores decisiones también durante el desarrollo de un producto, debido al hecho de disponer de un conocimiento completo de cada proceso de fabricación y sus posibles resultados (Ahmed et al., 2019). Para la etapa de diseño se deben conocer, no sólo el producto en sí mismo, sino los costos, la calidad y su tiempo de desarrollo (Jaiswal et al., 2019).

Gestión de la cadena de suministro.

La I4.0 puede afectar todos los procesos que ocurren en las plantas de fabricación: ingeniería, producción, logística y gestión entre otros (Markov & Vitliemov, 2020). Los términos Logística 4.0, Logística Inteligente y Cadena de Suministro 4.0 se han introducido a partir de la aparición de la I4.0. Estos términos se refieren al uso de la logística junto con los CPS y el IoT. Desde el punto de vista tecnológico, la implicación de Logística 4.0 no apunta a reemplazar a los humanos sino a evitar imprecisiones y tener procesos más rápidos con información fácil de compartir en tiempo real.

La logística podría resumirse como la entrega de productos correctos a los clientes correctos en los lugares y en el tiempo correcto. La introducción de la Logística 4.0 puede cambiar el proceso de diferentes maneras, alcanzando una mayor velocidad con el uso de vehículos autónomos y drones, mayor confiabilidad, menores costos operativos mediante el uso de monitoreo de inventario y recarga (estantes inteligentes con sensores inteligentes), mejora de la eficiencia debido a retrasos, transporte inteligente con reducción de tiempo de entrega y reducción de emisiones de vehículos. Las principales aplicaciones de la Logística 4.0 pueden estar en la planificación de recursos, sistemas de gestión de almacenes, sistemas de gestión de transporte, sistemas de transporte inteligente y seguridad de la información. El modelo de aplicación de la Logística 4.0 se muestra en la siguiente ilustración (Figura 42).

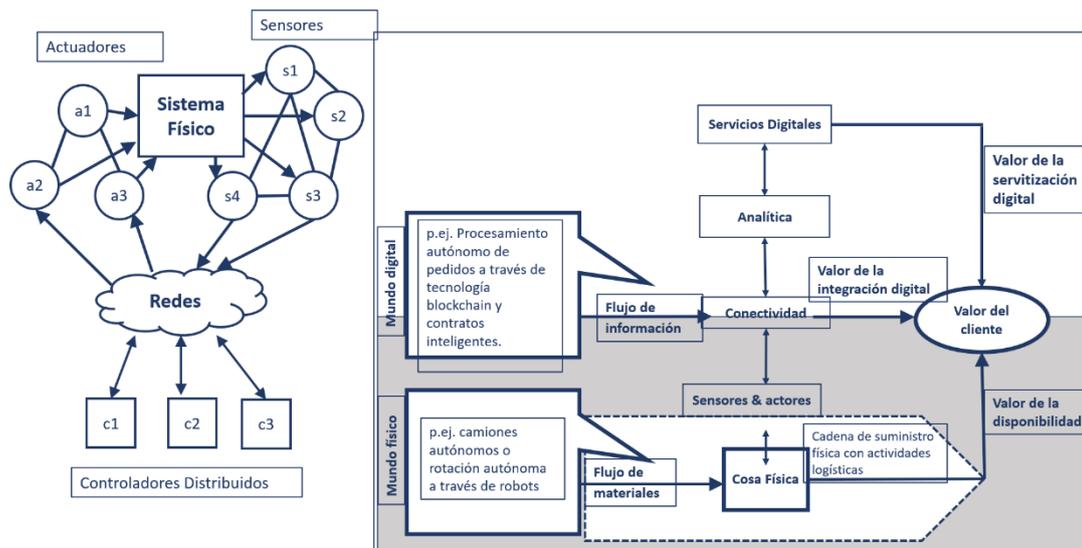


Figura 42 - Logística 4.0. Fuente: adaptado de Jaiswal et al. (2019)

Algunos de los sensores más utilizados en aplicaciones de Logística 4.0 incluyen RFID, LIDAR, acelerómetros, GPS, cámaras y sensores de humedad. Los conceptos de logística existentes como JIT/JIS y Kanban podrían mejorar con la implementación de la Logística 4.0.

La cadena de suministro 4.0 (SCM4.0) tiene como características distintivas el uso extensivo del IoT, visibilidad constante de la cadena completa de todos los interesados, posibilidad de verificación precisa de la coherencia de la cadena de suministro mediante la tecnología BC y la posibilidad de optimización dinámica de las cadenas de suministro y proveedores.

Como se explicó en el apartado 3.3.11 correspondiente, la tecnología BC tiene un potencial significativo para mejorar los procesos de la SCM4.0. La razón principal de esto es la posibilidad de compartir simultáneamente la información y los documentos entre todas las empresas interesadas, pudiendo, adicionalmente, reducir las demoras y los datos incorrectos en los documentos.

La introducción de la SCM4.0 reduce el tiempo de entrega de toda la cadena, pudiendo impactar en las industrias de ingeniería bajo pedido, que también incluyen el

tiempo de entrega del proyecto. La cadena de suministro sostenible 4.0 sólo se puede conformar si todo el negocio está conectado digitalmente.

Dossou (2018) por Markov & Vitliemov (2020) sugiere un modelo de referencia para la transición a la SCM 4.0 de pequeñas y medianas empresas donde la sostenibilidad se sitúa como núcleo de mejora.

3.4.3. Productos Inteligentes

Un estudio detallado llevado adelante por los investigadores Raff et al. (2020), propone una clasificación de los Productos Inteligentes de acuerdo con el nivel de “inteligencia” que ellos posean. Conforme el autor, se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Digital (*Digital*). Por ejemplo, una cámara fotográfica digital.
- Conectado (*Connected*). Por ejemplo, iluminación por domótica.
- Responsivo (*Responsive*). Por ejemplo, bota de ski digitalizada.
- Inteligente (*Intelligent*). Por ejemplo, termostatos inteligentes, robots con AI.

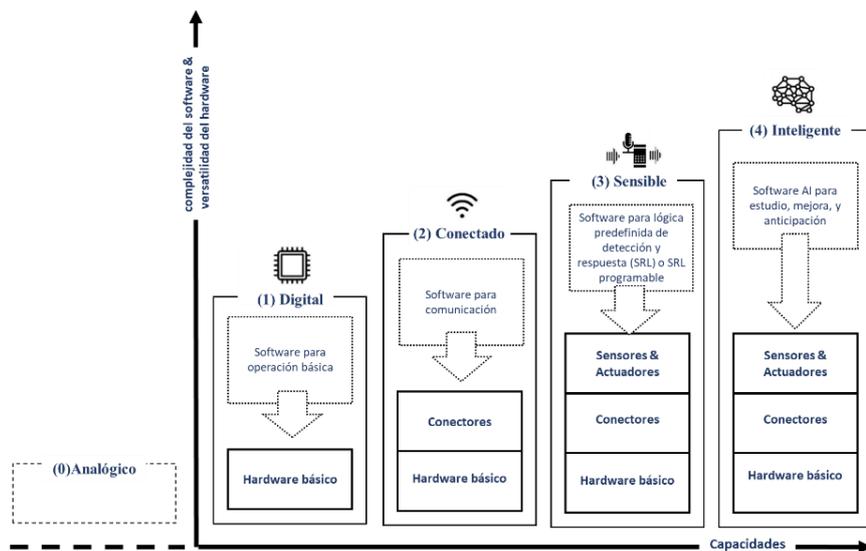


Figura 43 - Niveles de inteligencia de los productos

a. Digital:

Equipado con IT

Son los objetos físicos, equipados con sensores y / o actuadores, los cuales poseen un sistema operativo integrado. Los sensores que recopilan datos y los actuadores que transmiten esos datos se incorporan cada vez más en todo tipo de objetos de consumo que se encuentran comúnmente en el hogar, en edificios o en el cuerpo humano, y se utilizan en actividades de consumo que involucran compras, entretenimiento, transporte, bienestar y similares.

Con almacenamiento de datos: este tipo de producto inteligente, “digital con almacenamiento de datos”, es el que retiene y guarda los datos en el mismo “asset”, es decir, puede retener o almacenar datos sobre sí mismo.

Con procesamiento y análisis de datos: son aquellos que, no sólo guardan sus datos, sino que tienen la capacidad de procesarlos, analizarlos y utilizarlos.

Con provisión y transmisión de datos: en este caso, el Producto Digital suministra información de identificación de sí mismo. Tiene también acceso a los datos generados por los usuarios u otros sistemas y puede poner a disposición de entidades externas su identificación, medidas de sensores y otros atributos. Posee una auto descripción semántica. En resumen, son aquellos objetos que pueden hacer que su identificación, mediciones de los

sensores y otros atributos estén disponibles para entidades externas como otros objetos o sistemas.

b. Conectado

Con identificación única: el producto inteligente conectado con identificación única es legible para los humanos, o sea se describe. Puede identificarse a sí mismo a lo largo de su vida, posee una identidad única e inmutable. El concepto central es que los objetos cotidianos pueden equiparse con capacidades de identificación.

Con conectividad: este tipo de “productos inteligentes” son parte de una infraestructura. Interactúan con el entorno y otros objetos, trabajan en conjunto, poseen redes de comunicación con conectividad pudiéndose conectar a otros dispositivos. Poseen diferente tipo de conectividad: conectividad uno a uno, uno a muchos o muchos a muchos.

Con comunicación e intercambio de información: poseen interfaces para intercambiar información con su entorno incluyendo con otros equipos y con a otros objetos. En general poseen tecnología de comunicación inalámbrica. Pueden informar su ubicación, condición y/o estado.

c. Responsivo

Con detección: recopilan y retienen datos. Brindan su ubicación y estado.

Con conocimiento del contexto en tiempo real: Situacionalidad. Interacción a través de la conciencia del contexto. Uso de información sobre el entorno en el que se desarrollan.

Con reactividad y adaptabilidad: adaptabilidad tras su ubicación, condición y/o estado. Adaptación de sus acciones a diferentes situaciones. Independiente. Mejoras en su desempeño. Reactividad.

Con actuación automatizada: poseen actuadores. Influencia en la condición o estado del ambiente. Alteración de su ubicación, condición y/o actuadores de estado.

Con funcionalidad y personalización: multifunción y personalización. Es la adaptación de los productos de acuerdo con las necesidades y afectos del comprador y del consumidor.

d. Inteligente

Con razonamiento y capacidad de toma de decisiones: razonamiento es poder tomar decisiones sobre sí mismo y sus interacciones. Toma decisiones y / o participa en ellas.

Con autonomía y autogestión: estos elementos actúan de manera inteligente e independiente. Accionan y trabajan de manera totalmente autónoma. Toman decisiones relevantes para su propio destino.

Con proactividad: estos actúan frente a una situación futura. Se refiere al comportamiento anticipatorio, orientado al cambio y autoiniciado en diversas situaciones. El comportamiento proactivo implica actuar antes de una situación futura, en lugar de sólo reaccionar.

Se ilustran los cuatro niveles y sus principales características en la Figura 44 - Clasificación de objetos inteligentes.

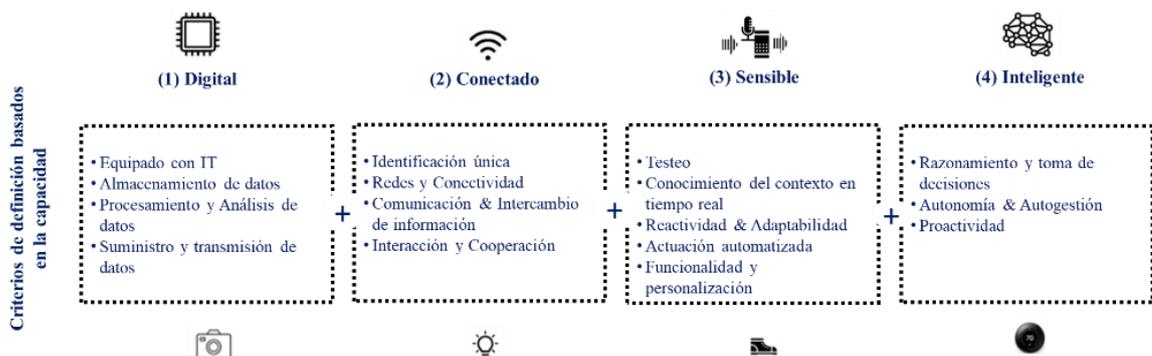


Figura 44 - Clasificación de objetos inteligentes

Finalmente, desde una perspectiva industrial y utilizando varias tecnologías diferentes combinadas entre sí, se los puede clasificar en dos tipos. Ellos son:

- P2P (producto a producto), y
- P2U (producto a usuario).

3.4.4. Tecnologías utilizadas en productos inteligentes

Existe una gran variedad de tecnologías habilitadoras en los productos inteligentes, pero las más utilizadas actualmente son las tecnologías de detección global, como por ejemplo las tecnologías basadas en GPS, tecnologías locales de detección óptica, magnética o de radio, como por ejemplo, códigos de barras, códigos QR y sensorización basada en video; tecnologías de detección de corto alcance, así como WLAN o Bluetooth; representaciones de contexto enriquecido, tal como los datos de contexto y tecnologías semánticas, es decir, conseguir que las computadoras comprendan el significado y el contexto detrás de todos los datos.

En la actualidad, varios productos se están convirtiendo, de algún modo, en servicios. El hardware y el software convencionales se transforman en servicios basados en la nube, como por ejemplo la infraestructura de Software como Servicio (SaS). Sin embargo, los servicios inteligentes van más allá de un modelo de negocio, permiten servicios personalizados basados en productos inteligentes adaptados al usuario.

Entre las áreas de aplicación más importantes de estos nuevos servicios están la manufactura aditiva o impresión 3D; ésta hace que el desarrollo y la producción sean más flexibles e individualizados. Por ejemplo, para la producción de repuestos para máquinas.

Otras aplicaciones son los servicios digitales personales, como la medición del desempeño físico en deportes y salud; los servicios de logística y movilidad, conocido también como movilidad inteligente, y aplicaciones domóticas e inmóticas para monitorear y controlar consumos de energía, hábitos de uso de equipos o máquinas, la seguridad física, o los mismos servicios, pero a mayor escala para el caso de las ciudades inteligentes.

Otro de los puntos que se deben destacar es que los productos inteligentes se integran con todo el ciclo de fabricación, participando activamente en su proceso y controlando las etapas de producción individuales de forma autónoma. Estos objetos, componentes y productos son conscientes de sus parámetros ya que proporcionan información sobre su estado durante todo su ciclo de vida. Estos sistemas embebidos se pueden gestionar en tiempo real a lo largo de toda la cadena de valor, optimizando la producción, logística, mantenimiento y gestión empresarial. La computación, el almacenamiento de datos, la comunicación y la interacción con su entorno son las características claves de los productos inteligentes, los cuales son capaces de identificarse y proporcionar información sobre su progreso a lo largo de su cadena de valor, almacenando información sobre los pasos anteriores y proporcionando información sobre los pasos del proceso futuro relacionados con la producción y el mantenimiento. Los productos inteligentes, a su vez, pueden percibir e interactuar con su entorno físico sin ninguna intervención humana, lo cual que ofrece un espectro de potenciales servicios de valor agregado.

Finalmente se puede decir que, para comenzar la digitización e inteligencia de procesos y objetos, la manera más simple es escanear los procesos comerciales y automatizar las tareas manuales, total o parcialmente, con el objetivo de mejorar los indicadores operativos y el retorno sobre las inversiones (Marciniak et al., 2020); de este modo la efectividad mejora en la medida que las tecnologías respaldan una mejor toma de decisiones basada en datos.

3.4.5. Servicios inteligentes - Servicios 4.0

Si bien muchas empresas ven sólo a la digitalización desde una perspectiva de producto, la DX tiene también un impacto significativo en el negocio de servicios.

La digitalización permite que la tecnología automatice actividades y tareas repetitivas, lo que permite a los trabajadores abocarse a habilidades del conocimiento; esto es parte de la 4IR.

Análogamente a lo que sucede en la I4.0, la aplicación de la digitalización a los servicios da como resultado un enfoque de Servicio 4.0 (S4.0) aparejando considerables ventajas en la cadena de valor.

S4.0 se enfoca en una mayor productividad e innovación en el sector de servicios a través de la tecnología digital en la empresa. Existen cinco elementos clave con tecnologías subyacentes procesables para el soporte tecnológico (Rathgeber, 2018). Las tecnologías, el comportamiento del cliente y la competencia son también impulsores externos de la DX y permiten: (1) aumentar la eficiencia, (2) mejorar las experiencias y el compromiso de los clientes, (3) mejorar la toma de decisiones, (4) mejorar la innovación y (5) transformar el negocio en uno digital.

En el entorno virtual, la automatización es realizada por robots de software (softbots o Bots) que podrían categorizarse por sus capacidades. El nivel básico de automatización implica programas de software simples y, por lo general, realizan una secuencia fija de actividades apoyadas en bases de datos bien estructuradas.

El siguiente nivel de automatización de software, que ahora es la solución más popular en el entorno de servicios empresariales, es la automatización robótica de procesos (RPA). En el caso del RPA, la automatización la realiza un Bot que imita a los trabajadores humanos que usan software como sistemas ERP. Su funcionamiento no se limita a una aplicación de IT específica, sino que puede unir varios entornos de software y bases de datos diferentes integrando así muchos pasos fragmentados de un proceso comercial completo.

Se mencionan a continuación, y sólo a modo de ejemplos, algunos de los S4.0 más habituales:

Logística optimizada

La planificación, la distribución y la trazabilidad de piezas, la organización del personal de servicio y la transparencia en toda la cadena de suministro. Sus objetivos son la optimización del uso de componentes y la disponibilidad de éstos mientras se equilibran los costos de almacenamiento. Algunos casos, tal como en la detección de fraudes, implican el seguimiento de piezas desde la fabricación hasta el desuso. Las tecnologías típicas utilizadas en esta área son técnicas de análisis, BC y visualización.

Mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo ayuda a evitar interrupciones y “apagones”. Si bien el concepto no es nuevo, las tecnologías recientes como la computación de borde (*Edge computing*), los modelos estadísticos multivariados y el ML juegan un papel importante y permiten una adopción más amplia.

Experiencia superior

La gestión del conocimiento, incluidas las formas de crear, recopilar y compartir conocimiento, es fundamental para el marco del S4.0. Esto incluye extraer información de datos no estructurados de situaciones de falla, como videos e imágenes o documentación técnica disponible. Existen métodos sofisticados para interactuar y comunicarse con los usuarios de servicio. Se aplican AI y Chatbots con comprensión, procesamiento del lenguaje natural, aprendizaje automático, AR y VR.

Comunicación y control

Los servicios tecnológicos van más allá de respaldar un producto y, como es sabido, el servicio es el producto. El acceso transparente a los servicios es primordial. Con el fin de lograrlo, las empresas de servicios, a menudo, usan tecnologías de análisis y visualización para

proporcionar informes y tableros y que puedan agregar simulaciones para ofrecer recomendaciones para las próximas acciones mejoradas.

Entrega de servicios a distancia

La entrega de servicios a distancia o RSD (Remote Service Delivery) permite la instrumentación del producto para que las acciones se puedan realizar de forma remota. Las acciones se pueden dividir en tareas de diagnóstico y reparación. Desde el punto de vista de la tecnología se necesitan varios elementos, incluidos sensores y dispositivos informáticos de borde, capacidades de análisis, redes 5G, plataformas IoT y la nube.

Servitización

La servitización, servicios y soluciones integradas en el modelo de negocio de las empresas, ha sido abordado por un número creciente de estudios científicos. La literatura coincide en que esta transformación puede traer varios beneficios económicos, organizativos, y medioambientales. Otra tendencia es la introducción de tecnologías digitales que permiten nuevas oportunidades para desarrollar relaciones más profundas con los clientes con el fin de personalizar las ofertas de productos y servicios para la creación conjunta de valor. Estas tecnologías son factores que facilitan la migración al negocio de servicios, ya que remodelan radicalmente la forma en que las empresas crean valor a través de servicios digitales existentes y nuevos (Paschou et al., 2018).

La servitización es definida por Ennis et al. (2020) como la innovación de las capacidades y procesos de una organización para crear mejor valor mutuo a través de un cambio de la venta de productos a la venta de Sistemas de Producto-Servicio (PSS). Ejemplos de servicios ofrecidos junto con el producto son: garantías, mantenimiento y contratos de ingresos por uso. Con base en una clasificación desarrollada por Baines y Lightfoot (2013), los dos primeros representan servicios básicos e intermedios respectivamente, mientras que el último es un ejemplo de un servicio avanzado.

Las 9 tecnologías habilitadoras del Servicio 4.0

La reconfiguración de la producción ha sido articulada proporcionando una indicación de los tipos de tecnología y la forma en que se implementan en relación con la I4.0. Se señala que más allá de mejorar los procesos internos, una empresa debe explorar oportunidades para utilizar I4.0 para integrar mejor sus operaciones con las de los clientes y proveedores han considerado cómo las empresas pueden beneficiarse del poder del S4.0 describiendo la gama de prácticas que tienen lugar a través del despliegue de tecnologías.

La siguiente Tabla 6 muestra cómo la perspectiva de servicio podría corresponder a la perspectiva de producción. Estas perspectivas de producción y servicio parecen proporcionar un marco de práctica para las empresas en la I4.0. Una consideración más refinada para la investigación tendría que tratar de relacionar aspectos de estas prácticas con la estrategia organizacional, como la colaboración entre proveedores y la estrategia operativa de las empresas. Se podría buscar comprender más profundamente el valor que aportan cuando cooperan dentro del ecosistema empresarial y cómo se aplican en relación con los sistemas de productos y servicios en una era de servitización.

Tabla 6 - Servicios 4-0. Adaptado de Ennis et. al. (2020)

	Tecnologías de la producción	Nueve tecnologías habilitadoras de los Servicios 4.0	Aplicaciones
1	Robótica avanzada	RPA	Reemplazar a los humanos en procesos enteramente basados en reglas.
2	AR	AR	Proporcionar la información necesaria cuando sea necesario en áreas tan variadas como manuales, precios y alertas.

3	Simulación	Computación Cognitiva y simulación.	Simule procesos de pensamiento humano y brinde asistencia virtual inteligente.
4	Integración vertical y horizontal	Bionic computing	Integraciones tecnológicas.
5	IIoT	IIoT	Crear una conexión continua en áreas tan variadas como la provisión de servicios en el lugar y el monitoreo remoto.
6	CC	CC	Administrar un gran volumen de datos en sistemas abiertos y brindar servicios a pedido.
7	BD y Analítica	BD y Analítica	Desarrollar una visión más profunda del comportamiento, las preferencias y las rutas de los clientes.
8	Dispositivos inteligentes	Dispositivos y Servicios inteligentes	Desarrollar un ecosistema de aplicaciones y servicios en la nube que utilicen dispositivos de alto rendimiento.
9		Virtualization	Servicios gratuitos que dependan de software y hardware específicos y garanticen flexibilidad, adaptabilidad y solidez.

El conocimiento y los productos inteligentes

Otro de los autores plantea una clasificación de los productos inteligentes, pero en este caso de acuerdo con el conocimiento que posean. Según este autor, Mühlhäuser, el conocimiento que un producto inteligente posee se puede clasificar en tres clases:

1. Conocimiento sobre sí mismo: se refiere al conocimiento de sus características y funcionalidades, así como del historial del producto en sí mismo.
2. Conocimiento sobre su entorno: se refiere a su capacidad para interactuar con su entorno, componentes y objetos.
3. Conocimiento sobre sus usuarios: se relaciona con la capacidad de interactuar con sus usuarios durante todo su ciclo de vida, proporcionando información relevante sobre su estado y mantenimiento. Esta es una de las características más importantes para el desarrollo de nuevos servicios de valor agregado a los usuarios finales.

Aplicación de diseño y prototipado

Una de las aplicaciones más importantes de los objetos inteligentes se ubica para el diseño y desarrollo de nuevos productos.

Desde la fase de conceptualización, diseño (y ahora también simulación), prototipado, producción y operación, todo puede ser monitoreado y controlado.

La fundación italiana MADE4.0 expuso un caso práctico del desarrollo de una bicicleta y la relación de los objetos inteligentes en cada una de las fases. No sólo durante el proceso de desarrollo de concepto, CAD, grupo de opinión de clientes, sino en pruebas en campo (la bicicleta funcionando en el terreno para la cual fue pensada), una serie de sensores transmiten en tiempo real los diferentes valores de los parámetros de estudio. Esta comunicación establecida en tiempo real es inclusive bidireccional, o sea, desde la mesa de control se pueden accionar ciertos actuadores para modificar las características de funcionamiento de la bicicleta; un verdadero gemelo digital (Figura 45).

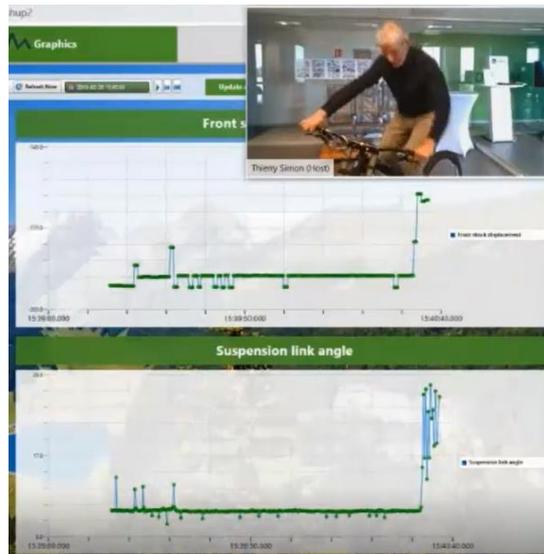


Figura 45 - Producto Inteligente durante fase de prototipado. Fuente: MADE Center

3.4.6. Productos inteligentes y ciclos de vida

3.4.6.1. Desarrollo de Productos Inteligentes

Algunas de las características más importantes de los productos inteligentes, según Nunes et al. (2017), es que ellos pueden almacenar una gran cantidad de datos, autoprocesar información y comunicarse con otro sistemas. Son capaces de recopilar información e interactuar con su entorno sin intervención humana durante todo su ciclo de vida (Schmidt & Adler, 2019).

Las empresas que avanzan hacia la I4.0 se enfrentan al desafío de diseñar e introducir productos inteligentes innovadores que sean capaces de satisfacer las necesidades de las empresas y del mercado. Ellas deben adoptar enfoques de Desarrollo de Productos Inteligentes (Smart Product Development - SPD) para garantizar la innovación en sus procesos, productos y servicios. La introducción de tecnologías avanzadas como la AR, la VR y la AM aplicadas a la creación de prototipos y el desarrollo de productos, representa un enorme potencial en SPD, permitiendo la creación de productos altamente flexibles y a un costo accesible.

Enfoques de desarrollo de productos inteligentes para la I4.0

Tal como se ha remarcado en varias oportunidades, la economía mundial y los requerimientos del mercado están cambiando rápidamente. La creciente demanda de alta complejidad y tecnología han convertido el proceso de desarrollo de productos en algo más complejo. La creación de valor, la competitividad, el crecimiento y la sostenibilidad están muy relacionados con la adopción y el desarrollo de nuevas tecnologías. Para seguir siendo competitivas y satisfacer los requisitos del mercado en un entorno cambiante, las empresas deben afrontar grandes desafíos introduciendo constantemente nuevos productos, procesos y tecnologías, lo que les permitirá ser más efectivas en el desarrollo de sus productos (Nunes et al., 2017). Respecto de este proceso, los factores más importantes para el desarrollo exitoso de un producto son: (1) el uso de métodos para identificar los requisitos de los clientes, y (2) el uso de representaciones de productos adecuadas para apoyar la comunicación en la evaluación temprana del producto.

Con el fin de garantizar la efectividad en este proceso, hay tres aspectos clave para tener en cuenta: (1) la iteración, (2) la integración y (3) la innovación.

Realidad Aumentada en el desarrollo de Productos Inteligentes

Los nuevos requisitos del mercado con respecto a productos complejos, innovadores y más inteligentes han mejorado la aparición de alternativas virtuales para el desarrollo de

productos inteligentes. El uso de herramientas de simulación y modelado de productos digitales durante el desarrollo permite reducir los tiempos de desarrollo y optimizar el consumo de recursos.

La I4.0, que significa integración de información y personas en varios niveles y de formas diferentes, ha revolucionado todas las cadenas de valor, desde la organización de la producción hasta los sistemas de diseño de producción, abriendo un conjunto de nuevas soluciones para personalizar el ciclo de vida del producto. El uso de tecnologías como la AR o la AM es un ejemplo de ello.

Otros factores importantes en el SPD.

Uno de los factores más importantes en la toma de decisiones con respecto a los enfoques que el SPD puede utilizar es el costo asociado con este proceso. Por lo tanto, debería realizarse un análisis exhaustivo sobre el costo de los recursos utilizados, tanto para el fabricante como para el usuario, así como el impacto medioambiental de los productos durante su ciclo de vida. A pesar de que tecnologías como la VR, la AR y la AM que brindan el conocimiento más completo sobre el producto en desarrollo y son más rentables, generalmente requieren inversiones costosas y personal altamente capacitado. Este es uno de los motivos por los cuales muchas empresas no eligen estos enfoques de SPD.

3.4.6.2. Diseño de productos en la I4.0

Conforme la clasificación de Schuh et al. (2016), existen diferentes características para el diseño de productos en la I4.0. Las empresas enfrentan los desafíos de los ciclos de vida más cortos de los productos, individualizados en nichos de mercado y la demanda de los clientes de integrar software y hardware. Las empresas necesitan acortar su tiempo de comercialización pudiendo ofrecer productos altamente personalizados e integrando al cliente en el proceso de desarrollo con el fin de seguir siendo competitivas.

Los productos inteligentes requieren de un conjunto completo de nuevos principios de diseño (Porter *et al.*, 2014), por lo tanto, el desarrollo del producto debe adaptarse, fundamentalmente, al contexto de I4.0.

Considerando la curva "S" de costos, la cual muestra que los costos finales de los productos pueden verse afectados especialmente en la fase inicial de desarrollo, la I4.0 debe integrarse lo antes posible en el ciclo de vida del producto para lograr beneficios significativos. Esto no significa que el progreso de la I4.0 en la producción no sea beneficioso, sino que la integración también debe emplearse en las primeras etapas del desarrollo del producto. Esto se representa en la siguiente ilustración (Figura 46).

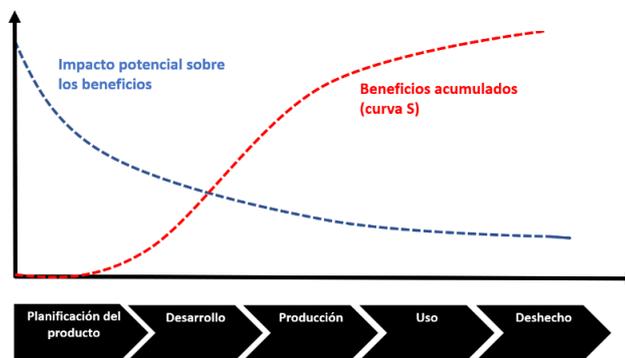


Figura 46 - Beneficios a lo largo del ciclo de vida del producto. Fuente: propia del autor

3.4.6.3. Diseño para la Excelencia (DfX)

Abordando el tema del desarrollo de productos, especialmente de productos inteligentes, cobra vital importancia la denominada metodología "Design for X" (DfX), la cual establece una serie de pautas de diseño para alcanzar los objetivos del producto.

DfX es una metodología de diseño que considera todos los requisitos del producto, generalmente objetivos y a veces contradictorios, encontrando la mejor solución de entre ellos. La idea central de esta metodología es revisar y mejorar el proceso y el diseño del producto antes de fabricarlo.

Muchos diseñadores de productos lo hacen teniendo en cuenta sólo la funcionalidad y la estética, pero las preguntas que deberían hacerse son si se puede lograr ello con procesos maduros o dentro del presupuesto y si se puede ensamblar fácilmente y sin errores. Hacer todos los cuestionamientos al diseño inicial del producto y luego en cada hito importante del desarrollo es una forma de detectar problemas que puedan ser abordados sin costos ni demoras excesivas.

Se han desarrollado muchas formas diferentes de DfX, las cuales abarcan todo el ciclo de vida del producto, desde el desarrollo hasta el reciclaje. Ejemplo de ello son el Diseño para la Calidad, Diseño para Fabricación y Ensamblaje, Diseño para Facilidad de Servicio o Diseño para Medio Ambiente. Se describen brevemente a continuación las diferentes perspectivas para el diseño.

Diseño para la Fabricación (DfM)

Representa el diseño para facilitar la fabricación del conjunto de piezas que formarán el producto después del montaje (Boothroyd et al., 2010, como citó en (Mysen, 2007).

El DfM representa el enfoque más habitual y fundamental del "DfX". Asegura que las piezas que compondrán el producto completo se puedan fabricar con materiales y procesos que sean relativamente comunes, de manera de mantener la intención general del diseño. Se debe para ello observar los procesos de fabricación, por ejemplo: fundición a presión, moldeo por inyección de plástico, extrusión, entre otros. También es de considerar los tratamientos de la superficie, por ejemplo: recubrimiento en polvo, enchapado, otros. ... Es muy probable que ciertas combinaciones provoquen problemas, tales como fundir aluminio y anodizarlo por lo cual se deberá prestar suma atención en dicho proceso.

Diseño para ensamblaje (DfA):

Es también es un enfoque muy frecuente del "DfX". Un producto simple, con pocas piezas y ninguna operación incómoda o complicada, será más fácil y rápido de ensamblar con muchos menos errores mejorando la capacidad de mantenimiento. Una configuración de montaje simplificada, así como un menor número de inspecciones de calidad necesarias, significarán también menores costos. Por ejemplo: el ajuste encastrado en lugar de atornillar o pegar, y pensar en cómo las operaciones manuales se podrían corregir en caso de errores.

Diseño para la calidad (DfQ):

El DfQ a menudo se planifica al mismo tiempo que el DfM y DfA, dado que los procesos más simples y maduros conducen a una mejor calidad. Si, por ejemplo, un fabricante no puede demostrar que su capacidad inicial es muy alta para una pieza personalizada que está a punto de comprar, es posible que se deba trabajar con ese proveedor encontrando formas de aumentar la capacidad. Por lo general, también se revisa el plan de inspección y de prueba. Cualquier especificación que carezca de tolerancias, cualquier requisito que no se pueda cumplir fácilmente y cualquier prueba que obviamente falte, deberá ser señalada.

Diseño para pruebas (DfT):

El Diseño para Pruebas representa la integración de atributos de desempeño medibles en el mismo diseño del producto. Esto significa que los prototipos y las muestras de producción tengan características que permitan ejecutar las pruebas sin dificultades. Los objetivos consisten en detectar problemas y tener muy pocas dudas sobre el desempeño, la funcionalidad y, si es posible, la seguridad de un lote completo.

Otro concepto de DfT es facilitar la prueba de las piezas y el producto terminado. Un ejemplo, en la industria electrónica, sería dejar espacio en las placas de PCB (Printed Circuit Boards)

para las puntas de prueba de los testeadores automáticos, probando cada módulo antes de ensamblarlos a otros.

Diseño para el embalaje (DfP):

Es posible también pensar el diseño desde el punto de vista del embalaje, teniendo presente que se debe diseñar y desarrollar uno que sea también atractivo y suficientemente resistente como para proteger al producto durante su transporte y almacenamiento. Debe también tener un bajo costo. Por otra parte, el tamaño y las proporciones del producto afectarán al envase. Es conveniente trabajar en un embalaje que sea rentable, reciclable y sostenible, y que se construya y empaque fácilmente antes del envío. Por último, es importante idear y planificar los tipos de envases que puedan ser adecuados desde el inicio del diseño del producto.

Diseño para la confiabilidad (DfR):

Debido a que es fundamental anticipar las posibles fuentes de falla del producto, se deben considerar las distintas formas de hacerlo. Se pueden usar herramientas de análisis de riesgo como el FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) para examinar cómo distintos diseños podrían fallar. Los hallazgos anteriores sobre productos y piezas similares también son útiles, y las pruebas de confiabilidad aceleradas generalmente se pueden realizar tan pronto como los primeros prototipos estén disponibles de modo de encontrar los puntos débiles para luego solucionarlos. Esa prueba tiene que reproducir algunas fuentes comunes de falla o debe reproducir la forma típica en que se usará el producto. Una vez que se tenga una teoría sólida de las maneras en las que el producto tendrá más probabilidades de fallar, y después de cuánto tiempo, se debe pensar en cómo prevenir dichas fallas, abordando con prioridad las fallas catastróficas.

Diseño para la custodia o mantenimiento (DfU): *upkeep, conservation*

El diseño para la custodia está estrechamente relacionado con lo anteriormente mencionado, el DfR. El producto tiene que funcionar según lo esperado por el usuario durante su vida útil esperada, y eso puede requerir algún tiempo de inactividad periódico y planificado. Si es posible, debe evitarse tener que realizar un desmontaje y montaje complejo o tener que reemplazar parte del producto cuando sólo una parte tiene un problema.

Diseño para la Ergonometría (DfE)

Uno de los objetivos que se debe procurar es que el producto sea sumamente apropiado para el cuerpo humano del usuario, con el fin de conseguir que su uso sea predominante por sobre los otros. Se puede desarrollar un producto muy amigable y ergonómico teniendo en cuenta los atributos físicos de los usuarios a la hora de diseñarlo evitando o dificultando el uso erróneo, haciendo que los componentes y tareas sean claros, señalando cómo acceder a ellos y haciendo que los controles sean fáciles de leer e implementar.

Diseño para unidades de mantenimiento de *stock* (DfK)

DfK (stock-keeping unit) generalmente no es mencionado y, sin embargo, algunas veces es crítico. En el momento del primer pedido es posible que no se tenga una idea precisa de lo que su mercado objetivo demandará; eso es bastante crítico, ya que algunas empresas inician la fabricación de demasiados colores, tamaños y/u otras variaciones cargando luego con un inventario de muy baja rotación. Se querrá mantener el nivel de stock bajo, para evitar una complejidad y costos excesivos aún luego de esa fase inicial.

Diseño para la sustentabilidad (DfS):

Es necesario reducir el impacto ambiental durante la producción, el uso y el reciclado o eliminación del producto. Esto puede lograrse reduciendo la cantidad de recursos consumidos y la cantidad de contaminación emitida. La recolección de materiales reciclados

y/o reciclables para el producto y el empaque también es un enfoque de sustentabilidad. Es por ello por lo que es muy importante facilitar la reutilización del producto.

3.4.6.4. Desafíos del Desarrollo de Productos en el contexto de la I4.0

Los desafíos que deben enfrentarse en el contexto de I4.0, durante el desarrollo de productos, son la orientación a las nuevas condiciones, los datos del producto, la Interacción en tiempo real y los recursos.

Orientación a las nuevas condiciones

Muchos productos que han sido "inservibles" en el pasado serán convertidos y conectables en el futuro. Esto significa que los productos podrán comunicarse entre sí generando importantes beneficios para el cliente. En comparación con un producto convencional, la funcionalidad y las posibilidades del nuevo modelo de negocio con productos inteligentes son múltiples. Debe tomarse en consideración que la aplicación de lo que debería poder hacer un producto y la orientación del desarrollo necesario no se adapta, a menudo, a las nuevas condiciones.

Datos del producto

Los tiempos, duraciones de transporte o la ubicación de las piezas se pueden rastrear, por ejemplo, mediante dispositivos RFID. Sin embargo, debe considerarse qué datos se pueden generar y utilizar en el desarrollo de productos. Hay diversos planes, datos de diseño, mapeo de flujo de valor, pero prácticamente no hay, a la fecha, datos de alta resolución, lo que significa que no se dispone, en general, de información muy precisa sobre el producto o su desarrollo. Por lo tanto, otro desafío de la I4.0 es que exista un enfoque sistemático para la generación y análisis de datos de alta resolución y calidad para productos y su desarrollo.

Interacción en tiempo real

El tercer desafío se puede explicar usando el ejemplo de la misión Apolo 8. Cuando entró en la órbita lunar como la primera nave espacial en la historia, el 24 de diciembre de 1968, el Control de Misión de la NASA sólo podía esperar que saliera de la sombra de la Luna en el momento adecuado y a la velocidad adecuada y que luego aterrizara con éxito. En efecto, la misión fue exitosa, pero hubiera sido mucho más beneficioso tener una conexión con la nave espacial todo el tiempo y en tiempo real. Algo similar les ocurre a muchas empresas en la actualidad, las cuales permanecen en contacto con el producto sólo hasta el punto de venta y/o si el dispositivo se avería o el cliente se queja (Mysen, 2007). En tiempos de I4.0 y su integración horizontal, esta situación puede modificarse, tanto desde el punto de vista del proceso como del producto.

Recursos

Uno de los supuestos básicos de la I4.0 conduce al cuarto y último desafío: la fusión del mundo físico y virtual. Los recursos para esto a menudo están poco definidos u organizados. Un estudio de la consultora PWC revela que las empresas manufactureras suelen tener más de 100 sistemas de transporte de datos. Por lo tanto, estas complejas y heterogéneas estructuras de IT impiden la plena implementación de los beneficios potenciales. Lo mismo ocurre con el aspecto físico. Los recursos de la impresión 3D aún no se utilizan en forma generalizada ni se integran sistemáticamente en el proceso de desarrollo, ya sea por costos relativamente altos o por la ausencia de un enfoque sistemático. En conclusión, a menudo faltan recursos, métodos y herramientas adecuados para implementar la I4.0 en el desarrollo de productos.

3.4.6.5. Marco de referencia para diseño en la I4.0

Existe la necesidad de un enfoque holístico para el desarrollo de productos en el marco de la I4.0. Diseñar y desarrollar productos 4.0 es diferente al del diseño a nivel de sistema. Si bien el diseño a nivel de sistema también considera varios dominios (como por ejemplo mecánica, electrónica, ergonometría), no tiene en cuenta la conexión en red entre diferentes elementos, como pueden ser los productos y/o las máquinas.

Sobre la base de los conceptos básicos presentados sobre DfX y los desafíos en el contexto de I4.0, se pueden derivar las dos dimensiones de un marco holístico para el diseño en la I4.0. Cada una de las dimensiones del marco debe responder a diferentes preguntas y ellas son:

Dimensión I

Perspectivas de diseño para enfoques X

- **Producto:** ¿cómo debe diseñarse un producto en el contexto de I4.0?
- **Proceso:** ¿cómo debería ser el proceso de desarrollo en el contexto de I4.0?

Dimensión II

Para los desafíos del Desarrollo de Productos en contexto de la I4.0, las preguntas derivadas serían:

- **Orientación:** ¿cómo se deben orientar los productos y su desarrollo en el contexto de la industria?
- **Datos:** ¿qué datos están disponibles y qué papel desempeñarán?
- **Interacción:** ¿cómo se define una comunicación y colaboración específicas de I4.0?
- **Recursos:** ¿qué recursos, métodos y herramientas se necesitan en este contexto?

Las dos dimensiones abarcan, entonces, un marco que consta de 8 campos. Cada campo aborda el aumento del desempeño del producto y del proceso y ofrece recomendaciones fundamentales para el desarrollo 4.0, tal como se observa a continuación en la Figura 47.

Desafíos en el desarrollo de productos en el contexto de la industria 4.0

		Orientación	Datos	Interacción	Recursos
Niveles de Diseño para enfoques X	Producto	1.	2.	3.	4.
	Proceso	5.	6.	7.	8.

Figura 47 - Diseño de Marco de Referencia para la I4.0. Fuente: adaptado de Schuh et al., (2016)

Los productos inteligentes deben poder comunicarse entre sí, lo cual demanda también tomar en consideración la ciberseguridad, además de una seguridad funcional, deben brindar información sobre ellos mismos y deben poder ser mantenidos y actualizados a distancia. Por lo tanto, los diferentes enfoques de DfX deben examinarse en detalle con respecto a la inclusión de los detalles de I4.0, por lo que es necesario el uso de datos de calidad para la optimización del producto. Los datos del producto son muy importantes para la creación de valor para el cliente mediante productos inteligentes y conectados en el contexto de I4.0, pero, por otro lado, la recopilación de datos requiere sensores y elementos de comunicación los cuales agregan costos de producción. Se ilustran a continuación los diferentes factores que se deben considerar para el desarrollo de un producto inteligente con la metodología DfX en la I4.0 (Figura 48).



Figura 48 - Diseño para enfoques X en el contexto de la I4.0. (Schuh et al., 2016)

Los sensores requieren la transmisión, el almacenamiento, la protección y el análisis de datos. Para determinar qué tipos de datos entregados por los sensores, por ejemplo: altitud, proximidad, aceleración, humedad, gravedad, PH, etc. proporcionan un valor suficiente en relación con el costo, las empresas deben considerar si dichos sensores ofrecen datos de un valor tangible para su funcionalidad o eficiencia en la cadena de valor o si ayudarán a la empresa a mejorar el desempeño del sistema o cómo podría mejorarse. La figura siguiente muestra la relación entre la cantidad de sensores y el impacto en los costos y beneficios (Figura 49).

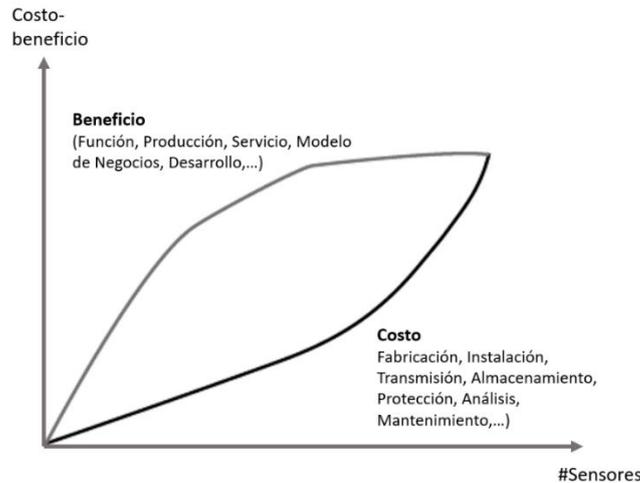


Figura 49 - Curvas de costo-beneficio por la incorporación de sensores en los productos. Fuente: propia

3.4.6.6. Uso de productos inteligentes como soporte de información y medio de comunicación

Especialmente en la fase inicial del desarrollo del producto, los datos sobre el uso del mismo revelan información importante sobre las funciones o elementos de diseño. La recopilación de información del cliente y del producto en la fase de prueba y uso de los ellos permite una visión completa.

La construcción de un DT de cada producto en campo podría ser un primer paso hacia la optimización del producto basada en datos. La siguiente figura 50 expone los tipos de interacción entre proveedores, productos inteligentes y clientes (Figura 50).

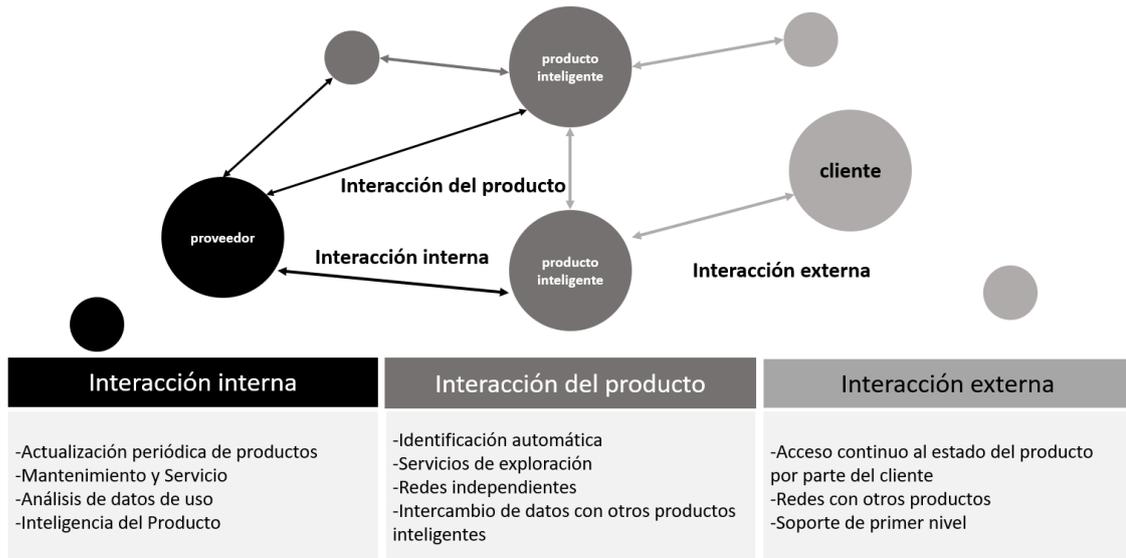


Figura 50 - Tipos de interacción. Fuente: adaptado de Schuh et al., (2016)

3.4.6.7. Gestión del ciclo de vida del Producto

La Gestión del Ciclo de Vida del Producto (Product Life cycle Management o PLM) comienza con el relevamiento de los requisitos del potencial cliente, la etapa de generación de ideas y hasta el reuso o eliminación de éste. Es muy difícil y lleva mucho tiempo gestionar todo el ciclo de vida de un producto. Tradicionalmente estas etapas se gestionaban manualmente utilizando un enfoque secuencial (Kulkarni et al., 2021).

Los softwares PLM han evolucionado desde sistemas dedicados a la gestión de datos técnicos a hacia un concepto mucho más amplio. Las fábricas de primera clase mundial han ampliado sus sistemas PLM y sus metodologías para garantizar una mejora en la trazabilidad del ciclo de vida del producto. Hoy en día, los sistemas PLM gestionan los datos de los productos y los procesos, pero la visión es desarrollar soluciones para productos y servicios inteligentes y con un enfoque integrado.

El paradigma de la I4.0 impone nuevos desafíos, tales como el desarrollo de productos, fábricas y procesos inteligentes y su integración a través de modelos digitales. Se prevé que el futuro de la producción incluya personalización en masa, sistemas de producción flexibles, redes de fabricación colaborativa y alto nivel de servitización; a la fecha ya se ha comenzado a observar la concreción de alguno de ellos. Es por ello que la creación de valor agregado se alcanza mediante la inversión en software de y servicios basados en la nube.

La RAMI4.0 introduce el concepto de componente I4.0. Como ya se ha explicado, es un modelo para describir en detalle las propiedades de los sistemas ciberfísicos, es decir, objetos reales en un entorno de producción vinculado a objetos virtuales. Los objetos reales necesitan, necesariamente, contener un conjunto de propiedades definidas para ser considerados compatibles. Una de esas propiedades es la capacidad de comunicarse en tiempo real y la exposición de datos y funciones. Un requisito previo importante es que un componente 4.0 recopile todos los datos relevantes a lo largo de su ciclo de vida, proporcionándolos a la red de empresas involucradas en el sistema de valor agregado. El almacenamiento de datos y los respectivos métodos de comunicación se agregan en lo que se denomina "caparazón administrativo" (Ferreira et al., 2016). Los datos registrados y analizados deben almacenarse en un único repositorio. Actualmente, los datos se almacenan en muchos sistemas de IT diferentes, lo que genera información redundante o incompleta. En este contexto, el enfoque de PLM es una herramienta importante para aumentar la

productividad y reducir los costos, tanto en el desarrollo de productos como en todas las demás áreas de la cadena de valor. En un futuro el sistema PLM debería funcionar como una columna vertebral de datos a la que accedan todos los demás sistemas de transporte. Un PLM integrado evitaría la aparición de redundancias e inconsistencias en los datos para que fuera posible un trabajo específico y eficiente. Se ilustra cómo la I4.0 impulsa al PLM y actúa en la Cadena de Valor y Procesos de Calidad (Figura 51).

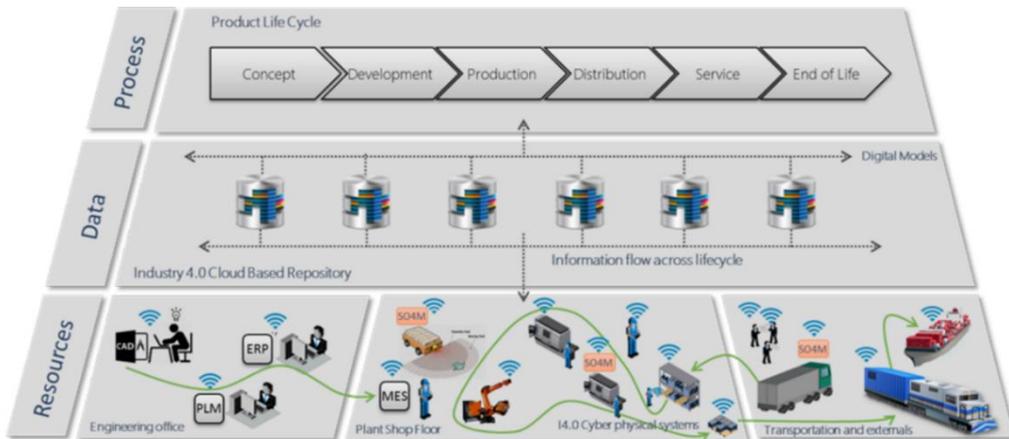


Figura 51 - La I4.0 como habilitador clave para la PLM. Fuente: Ferreira (2016)

Como ejemplo práctico se puede citar al autor Dutta (2021) quien suministró una nueva máquina con un objeto inteligente incorporado e instalado en la planta del cliente. Cuando la máquina comenzó a producir, dicho componente integrado a la máquina envió un mensaje de "nueva máquina agregada", y activó la creación de una nueva instancia de proceso de monitoreo para dicho cliente. De ese modo, el proceso monitorea en forma continua el funcionamiento de la máquina nueva (Figura. 52).

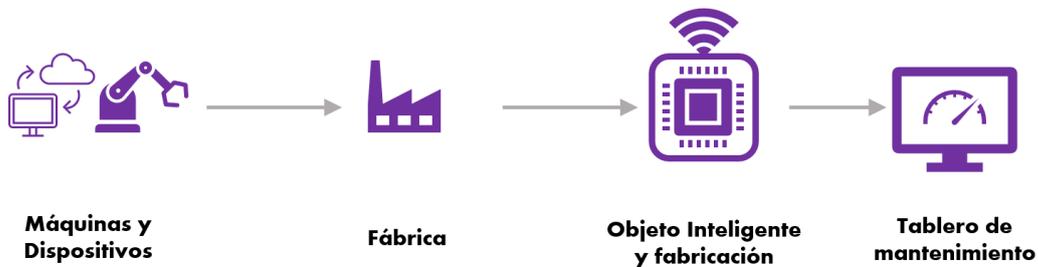


Figura 52 - Flujo de información global a través de objetos inteligentes. Fuente: adaptado de Ferreira (2016)

Lo interesante fue que como el equipo se instaló en Australia y esta fábrica no tenía un ERP, el trabajo realizado se monitoreó a través de la nube y toda la información se compartió a través de ésta en un punto de control remoto.

3.4.7. Desarrollo de modelos de negocio y productos integrados de forma simultánea, horizontal y vertical

En el pasado, muchas empresas sólo se centraban en la innovación de productos, descuidando las posibilidades de innovación en el modelo de negocio. Es por ello por lo que el desarrollo en ecosistemas puede ser útil para la integración necesaria de la cadena de valor entre proveedores y clientes. Es importante destacar que con esto se busca una integración de la cadena de valor y a una mejor comunicación y colaboración sin pensar ni actuar en "silos"². El desarrollo del modelo de negocio necesita integrar especialmente a los empleados

² Silos: repositorios comunes sin vinculación entre sí.

de todos los niveles jerárquicos para incorporar las diferentes perspectivas sobre las especificaciones del producto; esta es la denominada integración vertical.

En el contexto de I4.0, cada vez más innovaciones de modelos de negocio obtienen un éxito significativo en el mercado. Las empresas tradicionales necesitan un cambio en la capacidad de desarrollo por disciplina, tal como se muestra en la siguiente Figura 53.

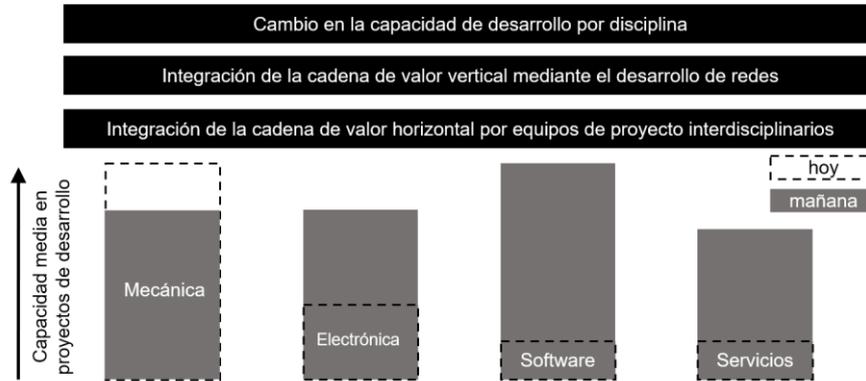


Figura 53 - Implicancias en el desarrollo de modelos de negocios y productos 4.0. Fuente: Dutta (2021)

Ingeniería inteligente mediante análisis de datos para la ejecución efectiva de las tareas de desarrollo

Es muy importante ocuparse del análisis e interpretación de datos para la ejecución eficiente y eficaz de las tareas de desarrollo. Para ello se sugiere utilizar los diferentes pasos del proceso de descubrimiento de conocimiento en bases de datos, KDD, para el análisis y la dirección del proceso de desarrollo. En un primer paso, las empresas y los investigadores deben trabajar en el tema de la visibilidad. Es necesario aumentar la disponibilidad de datos mediante un análisis descriptivo. En el segundo paso, en el análisis de diagnóstico, se necesita comprender por qué ocurren varios problemas en los proyectos de desarrollo, tales como los habituales retrasos e interrupciones. Por lo tanto, es necesario desarrollar metodologías para aumentar la interpretabilidad de grandes conjuntos de datos. El tercer paso, el análisis predictivo, se ocupa de la capacidad de pronóstico mediante patrones conocidos y modelos realistas. Estas herramientas responden a la pregunta: ¿qué sucede durante el proceso de desarrollo actual basándose en datos históricos de procesos y actividades de desarrollo similares? (Schuh et al., 2016). Finalmente, la analítica prescriptiva aborda la adaptabilidad a diferentes puntos de partida mediante una reacción autónoma. Las decisiones se pueden tomar automáticamente basándose en la interpretación de datos inteligentes, es decir, sobre la definición de las próximas actividades en la siguiente fase del proceso de desarrollo.

Desarrollo iterativo e investigación de mercado basada en datos

El desarrollo de productos físicos se percibía como un proceso continuo destinado a ejecutar y resolver una única tarea compleja. Las empresas deben considerar y adaptar técnicas de otras disciplinas, como en el desarrollo de software, para reaccionar a los ciclos de desarrollo de productos más rápidos y al tiempo de comercialización más corto requerido. Es por lo que las empresas están utilizando metodologías ágiles, las cuales son ampliamente usadas por los equipos de desarrollo de productos en las industrias de software.

La I4.0 facilita el uso de datos inteligentes para un mejor análisis de los prototipos probados y una mejor comprensión y predicción de las necesidades futuras de los clientes. El proceso de desarrollo altamente iterativo se basa principalmente en la rápida realización de innovaciones en prototipos y la optimización para lograr una madurez temprana del producto. Se podría decir que el desarrollo se ejecuta mientras el cliente ya está utilizando el producto.

Ingeniería virtual y creación rápida de prototipos

Las propuestas de optimización presentadas sólo pueden realizarse mediante la integración sistemática de nuevas tecnologías en el proceso de desarrollo. La realización física o virtual de prototipos es necesaria para los ciclos de retroalimentación temprana y la integración de los clientes en el proceso de desarrollo. Desde la perspectiva de lo virtual, la Ingeniería virtual que permite la interacción intuitiva con el objeto, está orientada a la toma de decisiones y funciona en tiempo real. En comparación con la ingeniería digital, las personas están en el centro (human-centered). En el aspecto físico, el prototipado rápido (Rapid Prototyping), está respaldado por los últimos desarrollos relacionados con la AM que permiten una rápida realización de prototipos sin un desarrollo de herramientas lento y costoso. A lo largo del proceso de desarrollo del producto existe la necesidad de un prototipo virtual y / o físico.

.....

3.5. La I4.0, la economía circular y las organizaciones

La primera fase del Libro Blanco de Economía Circular fue publicada por el Ministerio de Ambiente y la UE en junio de 2020. El cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sustentable (SDG) como parte de la Agenda 2030, representa una oportunidad única a nivel mundial para lograr la erradicación de la pobreza, la protección del planeta y la prosperidad para toda la humanidad (Ridaura, 2020).

Existen necesidades, oportunidades o problemas a los cuales las empresas deben dar respuesta. Como se ha reiterado en varias oportunidades, las empresas deben adaptarse a las nuevas características de la demanda, como la baja fidelidad a las marcas, los ciclos de vida de los productos más breves y la personalización de productos y servicios. Pero ahora se agrega un nuevo concepto; los actuales procesos de manufactura no dan una respuesta adecuada a ello y deben reconvertirse, pero se debe también tomar en consideración una nueva demanda de los consumidores: el cuidado del medio ambiente (Malhotra, 2009).

El proceso de desarrollo de un producto o servicio comienza con la detección de una necesidad de la demanda la cual es interpretada generalmente por los departamentos de Marketing y Ventas y llevada a la práctica por las áreas de Investigación y Desarrollo de las empresas, todo ello antes de pasar a Producción. En el otro extremo de esta extensa serie de actividades productivas, y ya con el producto en manos del cliente, llega el momento del desuso y desecho de éste, obligando a la empresa a hacerse responsable y completar el proceso mediante la reutilización de dicho producto o sus partes, generando de este modo una Economía Circular (CE) (Figura 54).

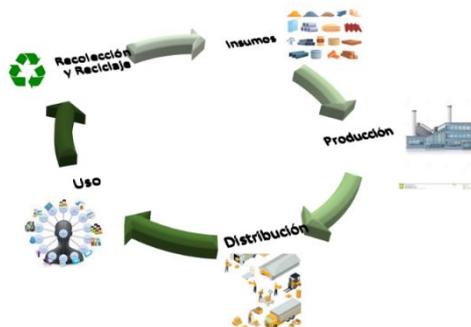


Figura 54 - Economía Circular. Fuente: propia

La CE es la gestión de residuos y recursos mediante la toma de conciencia de su reciclaje que tiene como objetivo ofrecer una alternativa a las prácticas de tomar, hacer y desechar. Uno de los principales desafíos que la CE debe resolver es cómo las empresas pueden reducir su consumo total de recursos y al mismo tiempo satisfacer las necesidades de los clientes.

La mayoría de las empresas utilizan un modelo lineal de consumo de recursos, definida como una economía de “tomar-hacer-desechar”. Esto significa que los productos llegan al final de su vida útil y los materiales se recuperan mediante el reciclaje en una medida limitada y rara vez se reutilizan.

Los SDG ponen de manifiesto que el sistema actual de producción y consumo, considerado lineal, tiene deficiencias desde una perspectiva medioambiental, social y económica y amenazan su sostenibilidad en el largo plazo (Rubio Mateos, 2021).

La CE, por el contrario, propone mantener los recursos en el círculo a través de la reutilización, reparación, renovación y reciclaje a lo largo de toda la vida de un producto disminuyendo la dependencia de recursos y permitiendo su mayor longevidad (Hankammer et al., 2019). La CE va de la mano con la sostenibilidad. Según el Foro Económico Mundial el “desarrollo sostenible” se define como el que aumenta el nivel de vida de las generaciones actuales sin sacrificar el de las generaciones futuras. Se debe tener en cuenta que el término *Sustentabilidad* se refiere no solamente a lo ambiental, sino también a lo social y económico (Zito, 2018). Esto aborda cuestiones como la eficiencia económica y de los recursos, la responsabilidad ambiental y la equidad social. Por su parte, la sustentabilidad industrial se refiere a la práctica y al estudio de cómo la industria responde a los desafíos actuales de sustentabilidad y eventualmente se convierte en parte de un sistema más grande y completamente sustentable.

Se espera que para 2050 la fabricación produzca cuatro veces más valor agregado de bienes y servicios que en 2017, tendiendo a cero desperdicios, cero emisiones y utilizando tan sólo una porción de los recursos actuales.

Las tecnologías digitales desempeñan un papel importante en el desarrollo de una base industrial eficiente en el uso de los recursos. Su adopción puede ayudar a generar beneficios tales como establecer qué cambio es necesario a nivel de empresa para permitir mejoras en el desempeño de la sustentabilidad, mejorar los procesos de planificación de las empresas para dar cuenta mejor de las demandas y oportunidades que ofrece la sustentabilidad industrial y permitir el desarrollo de nuevos modelos de negocio (Demartini et al., 2019). En el caso de cadenas de suministro, por ejemplo, cuando se consideran la sostenibilidad en el diseño y operación, se les suele llamar “cadena de suministro verde” (GSC). Además de la participación de la alta dirección de la empresa y la regulación gubernamental, los ejemplos de prácticas de GSC incluyen empaques y compras ecológicos, prevención de la contaminación, estándares de eliminación de desechos, logística inversa, reciclaje, gestión del ciclo de vida, certificación de sustentabilidad ambiental, fabricación ecológica y colaboración ambiental con proveedores y clientes (Banik et al., 2020).

La CE exige una buena planificación desde el inicio, debiendo incluir una cantidad significativa de materiales reciclados. En la fase de diseño se sientan las bases para la eficiencia energética, la capacidad de reparación, la durabilidad, actualización y el reciclaje, entre otros. Para su mejor estudio se los ordena como fases de: Compra, Preparación, Uso, Reparación y Eliminación (Hankammer et al., 2019).

Los trabajos de investigación destacan que la fase de diseño es, actualmente, demasiado tardía en el proceso de desarrollo y que los diseñadores no son los principales responsables de la toma de decisiones con respecto a lo que hace un producto o cómo lo hace, sino que más bien se enfocan en usar la creatividad para cumplir con los requisitos del producto, especificaciones que se definen mucho antes en el proceso de desarrollo del mismo producto (Diaz et al., 2021).

Muchos desafíos tecnológicos afectan negativamente el desempeño empresarial sostenible de las pyme. Debido a la falta de recursos la adopción de tecnología siempre es una tarea difícil para las pyme. Sin embargo, la incorporación de la I4.0 ayuda a superar varios de esos problemas. Justamente, uno de sus objetivos es alcanzar un alto nivel de productividad por medio de un mayor nivel de automatización (Haseeb et al., 2019).

Las características de la I4.0 relacionadas con la fábrica inteligente tienen un efecto directo en la implementación de la tecnología, lo que afecta positivamente la sustentabilidad

del negocio, ya que una fábrica inteligente ayuda a desarrollar un sistema de producción pequeño y flexible que en última instancia respalda la sostenibilidad en la producción (Haseeb et al., 2019). Desde el punto de vista de su contribución al medioambiente, la I4.0 ofrece una gran oportunidad para la creación de valor sostenible en las tres dimensiones de la sostenibilidad: económica, social y ambiental (Stock & Seliger, 2016). Ofrece también un gran potencial de desarrollo en el impulso de lograr una CE y un uso fundamentalmente más eficiente y sostenible de todo tipo de materiales; esto es lo que hoy se está conociendo como Industria 5.0 (I5.0).

Durante la transición de un producto a la fase de uso y la posterior fase de eliminación se pierde información clave sobre él, aunque esto es fundamental para garantizar que se utilice de forma sostenible y se someta a un reciclaje de alta calidad al final de su vida útil. La introducción de un registro del ciclo de vida y el traslado continuo asociado de información específica del producto significaría que, en el futuro, la información clave de este éste estaría disponible para el usuario durante todo su ciclo de vida. Tan importante es este concepto que la DIN DKE ROADMAP I4.0 v3³ recomienda en su punto 3.5-2 “El uso estandarizado del registro del ciclo de vida tiene el potencial de contribuir a una mayor integración entre las diversas partes interesadas y disciplinas involucradas en la Industria 4.0.”

La I4.0 ofrece posibilidades para modelos de negocio completamente nuevos e ideas innovadoras. Por ejemplo, sería posible concebir una plataforma de comercio de materias primas secundarias automatizada basada en la web que, con la ayuda del registro del ciclo de vida, pudiera ofrecer a sus clientes datos específicos del producto y, por lo tanto, ofrecer y garantizar calidades definidas de materias primas secundarias. Los materiales reciclables podrían entonces permanecer en circulación mayor tiempo, aumentando la eficiencia y logrando el objetivo de una CE (Standarization-Council-Industry, 2020).

Entre los desperdicios se encuentran también el de las capacidades ociosas; su costo es también una información fundamental para las empresas y su gestión es clave en los sistemas productivos modernos.

Se espera que las tecnologías digitales brinden muchas capacidades innovadoras al sistema industrial. Estos han sido estudiados para analizar su potencialidad con el fin de contribuir con un futuro industrial sostenible (Demartini et al., 2019). Dichas T4.0 impactarán en la productividad, resiliencia y sostenibilidad.

- Productividad: las fábricas podrían hacer más con menos.
- Resiliencia: la industria podría volverse más resistente a condiciones adversas.
- Sostenibilidad: los sistemas industriales operan dentro de los límites planetarios.

Por su parte, la sostenibilidad, como criterio de compra para los consumidores, está ganando una mayor atención. Las empresas enfrentan una presión cada vez mayor por parte de los consumidores y los gobiernos para administrar mejor los recursos y actuar de manera más responsable con el medio ambiente (Hankammer et al., 2019).

.....

3.6. La I4.0 y los Objetivos de Desarrollo Sustentable

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible o Sustainable Development Goals (SDG) son 17 objetivos que se han establecido con el fin de acabar con la pobreza, mejorar la salud y la educación y promover la prosperidad y el bienestar a través de la sostenibilidad ambiental. Fueron formulados en 2015 por la Asamblea General de las Naciones Unidas (AG-ONU) con la propuesta de alcanzarlos en 2030. La filosofía de la Agenda 2030 es que “nadie se queda atrás”; esto requiere, por una parte, alianzas globales y por otra, la integración de las dimensiones ambientales, sociales, económicas y de gobernanza.

³ DIN DKE ROADMAP I4.0

El concepto de desarrollo sostenible se concibe como un equilibrio entre el crecimiento económico sostenible y la regeneración ecológica; requiere de la implementación de tecnologías apropiadas respetuosas con el medio ambiente que sean eficientes y adaptables a las condiciones locales; en esta situación, la ecotecnología puede facilitar la conservación y restauración del medio ambiente a través de la integración de principios ecológicos y de ingeniería.

En relación con la ingeniería, importantes evoluciones tecnológicas se han registrado durante las últimas décadas. El advenimiento de Internet, la AI y los CPS están generando, ya no una evolución, sino una revolución tecnológica de alto impacto social. Algunas otras de las tecnologías exponenciales que más impacto han causado sobre los SDG, son el ML, el BD&A, el IoT, e, inclusive, innovadores modelos de negocios (Demartini et al., 2019).

Un ejemplo de aplicación de las T4.0 alineadas con los SDG es el diseño de una solución para hacer llegar agua potable a comunidades marginadas en situación de emergencia y/o sin posibilidades de acceder a centros urbanos ni a sus servicios básicos; ya sea por lejanía, condiciones climáticas, dificultad o imposibilidad para trasladarse, entre otros. En dicho caso de aplicación, el objetivo de ofrecer una solución no sólo se plantea para generar impacto inmediato, sino como recurso para la introducción a una mejora notable en la calidad de vida de las personas y sus condiciones de acceso al agua potable. Mediante energía solar recolectada por paneles solares, estratégicamente localizados en las zonas donde es imperativa una respuesta a la problemática, se diseñó un dispositivo portátil capaz de potabilizar agua proveniente de ríos, pozos, quebradas u otra fuente de agua dulce de cercanía y de realizar un seguimiento del proceso mediante sensores IoT. Estos dispositivos recolectarán información relevante como temperatura, humedad, presión, presencia de minerales en el agua, entre otras variables y los datos se enviarán a la nube a través de comunicación satelital para ser procesados. Además de permitir llevar a cabo un monitoreo y control del proceso, este flujo de datos posibilita la realización de un mantenimiento preventivo, correctivo, predictivo y prescriptivo. Este desarrollo hace uso de algunas de las más importantes tecnologías habilitadoras de la industria 4.0, tales como comunicación satelital, CC, BD&A, IA, entre otras. De este modo, se resuelve esta problemática a través del uso de las T4.0, dando respuesta a varios de los SDG, tales como las comunidades sustentables, el bienestar social y buena salud, potabilización y sanitización del agua, energía solar, y pobreza cero.

CAPÍTULO IV

Gestión de la Calidad

4. GESTIÓN DE LA CALIDAD

4.1. Introducción

Un primer indicio hacia el camino del aseguramiento de la calidad se puede encontrar en el primer libro del Antiguo Testamento: “... en el sexto día el Creador completó su trabajo e invocó la inspección para determinar si se necesitaban más acciones...” Un segundo hito, importante también, donde la especificación de las piezas se establece antes del ensamblaje final, se atribuye a Eli Whitney (1765-1825), un inventor, ingeniero mecánico y fabricante estadounidense. Whitney es recordado como el inventor de la desmotadora de algodón por desarrollar el concepto de producción en masa de piezas intercambiables (Zonnenshain & Kenett, 2020).

La calidad es un término que aborda innumerables aspectos, pero se podría resumir como que es simplemente el cumplimiento de las exigencias del cliente y ello puede ser expresado de maneras diferentes por distintos autores (Oakland, 1994). Justamente para expresarlo desde las diferentes perspectivas conforme cada especialista, es que se realiza un breve resumen de los puntos de vista de cada uno de los referentes de la gestión de la calidad.

Vale aclarar que existen distintas instancias en la gestión de la calidad, desde la planificación pasando por el control y hasta la mejora continua (Foidl & Felderer, 2020).

Se realiza a una breve reseña de cada uno de los especialistas que se han destacado por sus trabajos orientados a la Calidad. Se ilustran a continuación dichos conceptos (Figura 55).

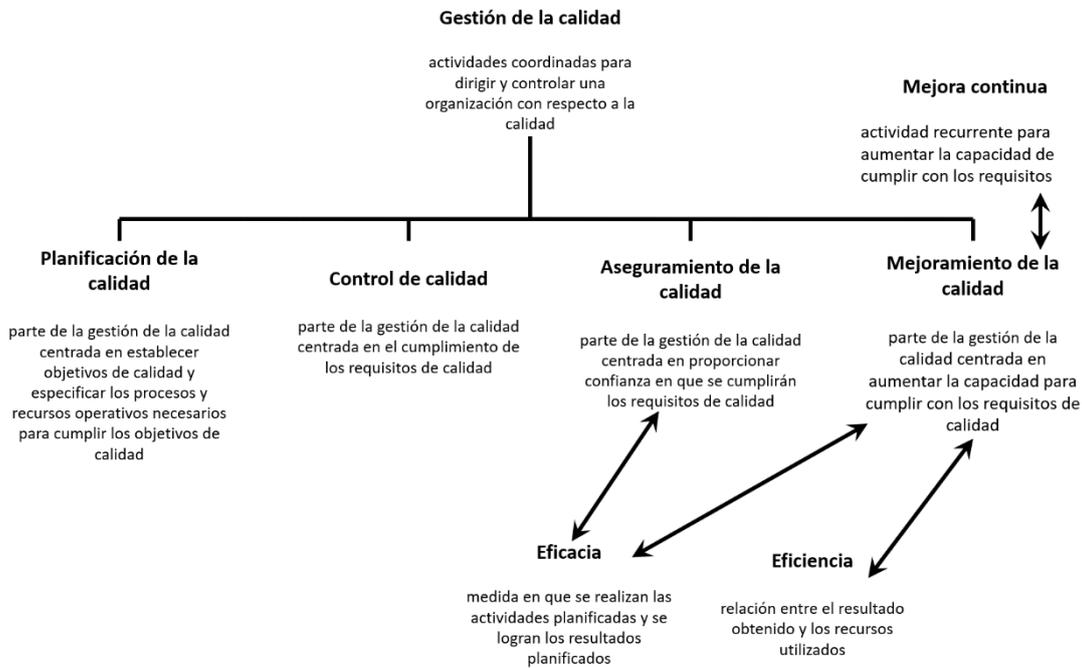


Figura 55 - Conceptos de la Gestión de la Calidad. Fuente: Foidl (2020)

Henri Fayol

Fayol nació en 1841, en un suburbio de Constantinopla (actual Estambul), en el seno de una familia francesa de la clase media. Su padre era ingeniero y él asistió al Liceo de Lyon graduándose en la academia de minería. En 1860, a la edad de diecinueve años, comenzó a trabajar en la compañía minera llamada "Compagnie de Commentry-Fourchambault-Decazeville" en Commentry como ingeniero de minas. Basándose en gran medida en su propia experiencia de gestión, desarrolló su concepto de administración.



Figura 56 - Jules Henri Fayol Le Maire (1841 - 1925)

En 1916 publicó estas experiencias en el libro "Administration Industrielle et Générale", más o menos al mismo tiempo que Frederick Winslow Taylor publicaba su libro *Los Principios de la Administración Científica*.

Fayol comienza definiendo que la administración de una empresa comprende las operaciones fundamentales: áreas técnicas (producción, fabricación, transformación), áreas comerciales (compras, ventas, permutas), áreas financieras (búsqueda y administración de capitales), área de seguridad (protección de bienes y de personas) y áreas contables (inventario balance, precio de costo, estadística, etc.). Murió a los 84 años, habiendo escrito solamente dos obras principales: la más notable, editada en 1916, fue Administración Industrial y General, la que desafortunadamente no fue traducida al inglés, y por ello fue poco conocida en Estados Unidos sino hasta 30 años más tarde. En 1921 escribió, el libro "La Incapacidad Industrial del Estado y el Despertar del Espíritu Público".

Vilfredo Pareto

Este marqués, Doctor en Ingeniería, nacido en París y de origen italiano, dedicó los últimos años de su vida al estudio de la eficiencia económica y la distribución de la riqueza, trabajos que tienen una aplicación directa en la ingeniería y las ciencias sociales.



Figura 57 - Vilfredo Pareto (1848 – 1923)

Como consecuencia de ellos aparecieron conceptos como el conocido Óptimo de Pareto, las Curvas de Indiferencia (o de Preferencia) y la Distribución de Pareto.

Dos resultados son lo que lo destacan. El primero, la regla del 80/20 que dice que el 80% de la riqueza está en manos de un 20% de la población y el segundo, derivado del principio anterior, el diagrama de Pareto tan profusamente empleado para analizar información en los sistemas de gestión y aseguramiento de la calidad que dice que el 20% de las causas más habituales provocan el 80% de los defectos detectados.

Winslow Taylor

Taylor es considerado como el padre de la Administración Científica del Trabajo, obsesionado con los tiempos de ejecución y el análisis estadístico de las diferentes tareas que se realizaban en la cadena de producción. Hasta entonces, los trabajadores en las fábricas eran responsables de su trabajo y de tomar las decisiones que considerarán oportunas para mejorar la producción.



Figura 58 – Frederic Winslow Taylor (1856 – 1915)

Taylor consideraba necesario analizar en profundidad y desde un punto de vista científico cada actividad con el fin de seleccionar las mejores herramientas y procedimientos para llevarla a cabo.

El trabajador debía seguir las órdenes recibidas y ser controlado en su actividad (incluso en cada uno de sus movimientos) para asegurar que la realizaba con la máxima eficiencia. La máxima especialización posible, la reducción de los tiempos muertos o el salario a destajo por pieza producida fueron otras de sus propuestas.

Walter A. Shewhart

El 16 de mayo de 1924 este físico estadounidense entregó un informe de una sola página a su jefe, George Edwards, en la Bell Technologies, el cual estaba destinado a cambiar la historia de la calidad. En él, un breve texto acompañaba a un gráfico hoy conocido como el Diagrama de Control.

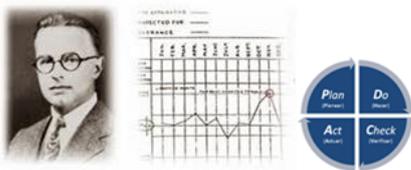


Figura 59 - Walter A. Shewhart (1891 – 1967)

La calidad se limitaba, hasta entonces, a verificar la fiabilidad de los componentes para corregir los defectos principales, sin ocuparse de las posibles causas de las desviaciones.

Shewhart demostró que este proceso de corrección reactiva aumentaba la variabilidad y degradaba la calidad de los sistemas de producción. El control estadístico de los procesos y el análisis de las causas se basan en los trabajos de este ingeniero.

De entre toda la propuesta de Shewhart, una de las destacadas dice que los datos deberían ser presentados de tal forma que preserven la evidencia original con el fin de asegurar la utilidad de las predicciones que se realicen a partir de ellos. El padre del Control de la Calidad habla de las evidencias, de la predictibilidad a partir de datos estadísticos y del control de los procesos. Su otra gran contribución fue la definición del ciclo PDCA ("Plan Do Check Act"). Aunque, en la actualidad, es más conocido como el Ciclo de Deming, por ser éste

quién sistematizó su uso en los sistemas de fabricación, fue Shewhart quien marco las bases para su concepción.

La mayor parte de los trabajos de Shewhart pueden encontrarse en los libros "Economic Control of Quality of Manufactured Product" y "Statistical method from the viewpoint of quality control" publicados en 1931 y 1939, respectivamente.

Egon Sharpe Pearson

Este matemático inglés desarrolló, junto con Jerzy Neyman, el método conocido como "Prueba de Hipótesis" ("Theory of Hypothesis Testing"), un procedimiento para juzgar si una propiedad de una población puede observarse en una muestra de dicha población estadística; es decir, dadas dos hipótesis sobre una población, la prueba permite determinar cuál es la acertada en función de los resultados de los experimentos realizados sobre una muestra.



Matemático inglés quien desarrolló, junto a Jerzy Neyman, el método conocido como "Prueba de Hipótesis"

Figura 60 - Egon Sharpe Pearson (1895 – 1980)

En la actualidad, sus trabajos resultan fundamentales para proyectos de investigación, control de calidad y la realización de encuestas de diversa índole, entre otros.

William Edward Deming

Considerado como el padre de la Calidad Total, aunque él nunca utilizó ese término, fue el responsable de la mejora de la calidad en las fábricas de armamento norteamericanas durante la Segunda Guerra Mundial. Interesado en la medición del error, Deming utilizó los trabajos de Shewhart (Control Estadístico) y Pearson (Prueba de Hipótesis) para afirmar que, cuanto menor sea la variabilidad de un proceso mayor será la calidad del producto resultante. Por lo tanto, sólo minimizando y controlando los errores más comunes, que son predecibles al responder a un patrón homogéneo de variabilidad, y actuando sobre las causas que provocan los errores especiales (los errores de Tipo I y II ya postulados por Pearson) puede garantizarse la calidad de un producto.



Figura 61 - William Edward Deming (1900 – 1993)

William Edward Deming también es, en parte, responsable del "milagro japonés" acontecido tras la Segunda Guerra Mundial.

En 1950 fue contratado por la JUSE (Unión Japonesa de Científicos e Ingenieros) para formar a directivos, ingenieros y estudiantes en el control estadístico de procesos y los conceptos de calidad. Los premios otorgados por esta organización (los Nobel de la calidad) a individuos y empresas llevan hoy su nombre. Compañías como Nissan, Toyota, Hitachi o la Nipon Steel han recibido este galardón. En 1989, la Florida Power and Light Company fue la primera extranjera en recibirlo. En su libro "Out of the Crisis", publicado en 1981, establece los 14 puntos que, aún hoy, siguen siendo la referencia en el diseño de cualquier sistema de gestión, control y aseguramiento de la calidad. Ellos garantizan la calidad, la productividad y la competitividad, siempre orientando la calidad como filosofía de gestión. Los puntos son:

1. Crear constancia en la mejora de productos y servicios con el objetivo de ser competitivos y mantenerse en el negocio, además de proporcionar puestos de trabajo.

2. Adoptar una nueva filosofía de cooperación en la cual todos se benefician y ponerla en práctica enseñándola a los empleados, clientes y proveedores.
 3. Desistir de la dependencia en la inspección en masa para lograr calidad y, en lugar de esto, mejorar el proceso e incluir calidad en el producto desde el comienzo.
 4. Terminar con la práctica de comprar a los más bajos precios, en su lugar, minimizar el costo total en el largo plazo. Buscar tener un sólo proveedor para cada ítem, basándose en una relación de largo plazo de lealtad y confianza.
 5. Mejorar constantemente y por siempre los sistemas de producción, servicio y planificación de cualquier actividad. Esto va a mejorar la calidad y la productividad bajando los costos en forma constante.
 6. Capacitación y entrenamiento para los trabajadores.
 7. Establecer líderes, reconociendo sus diferentes habilidades, capacidades y aspiraciones. El objetivo del supervisor debería ser ayudar a las personas, máquinas y dispositivos a realizar su trabajo.
 8. Eliminar el miedo y construir confianza, de esta manera todos podrán trabajar más eficientemente.
 9. Eliminar las barreras de comunicación entre los departamentos de la empresa (silos). Abolir la competición y construir un sistema de cooperación basado en el mutuo beneficio que abarque toda la organización.
 10. Eliminar eslóganes, exhortaciones y metas pidiendo cero defectos o nuevos niveles de productividad. Estas exhortaciones sólo crean relaciones de rivalidad. La principal causa de la baja calidad y productividad reside en el sistema y este va más allá del poder de la fuerza de trabajo.
 11. Eliminar objetivos numéricos y la gestión por objetivos.
 12. Remover barreras para apreciar la mano de obra y los elementos que privan a la gente de la alegría en su trabajo. Esto incluye eliminar las evaluaciones anuales o el sistema de méritos que da rangos a la gente y crean competición y conflictos.
 13. Instituir un programa vigoroso de educación y auto mejora.
 14. Poner a todos en la compañía a trabajar para llevar a cabo la transformación.
- Se puede estar de acuerdo con él o no, pero sin duda son varios de los preceptos que muchas compañías aún siguen hoy.

Joseph Moses Juran

Este emigrante rumano, ingeniero eléctrico, aportó una dimensión humana a la gestión de la calidad aún dominada en los años 50 por el control estadístico, los muestreos y los planes de inspección. Introdujo los Gráficos de Pareto, recalcó la importancia de la formación en calidad de gerentes y directivos e introdujo el concepto de Resistencia Cultural (Resistencia al Cambio).

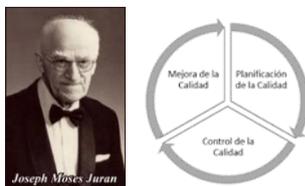


Figura 62 - Joseph Moses Juran (1904 – 2008)

Joseph Moses Juran, experto responsable de que la calidad saliera de las fábricas para incorporarse al mundo de la gestión y los negocios.

Juran participó junto con Deming en la difusión de la cultura de la calidad entre los directivos japoneses y es también autor de algunos de los libros más influyentes en esta área, entre los que destacan: *Quality Control Handbook* (1951), *Managerial Breakthrough* (1964) o *Management of Quality Control* (1967).

Entre las contribuciones de Joseph Juran se destacan: la difusión del Diagrama Pareto aplicando a problemas de calidad, la Trilogía de Juran, la cual implica un enfoque de la gestión

compuesto por tres procesos de gestión: la planificación, Control de Calidad y la mejora de la calidad. Juran también propuso 10 medidas para la mejora de la calidad:

1. Crear conciencia de la necesidad y oportunidad de mejorar.
2. Establecer metas para la mejora.
3. Crear planes para lograr los objetivos.
4. Proporcionar capacitación.
5. Ejecutar proyectos para resolver problemas.
6. Informar sobre el progreso.
7. Dar un reconocimiento para el éxito.
8. Comunicar los resultados.
9. Documentar el progreso realizado.
10. Mantener el impulso de mejora.

Obsérvese la coincidencia con Deming en, por ejemplo, la capacitación del personal, no así en el establecimiento de objetivos.

Taiichi Ohno

Ohno tuvo un papel fundamental en la revolución de Toyota, la empresa insignia de la calidad en los años 70. El sistema de producción Toyota (TPS, Toyota Production System) es considerado como uno de los grandes logros de la Calidad Total y marca muchos de los desarrollos actuales en esta área, Kaizen, 5S, 8D, Lean Manufacturing o Gemba, forman parte de TPS.



Figura 63 - Taiichi Ohno (1912 – 1990)

El desarrollo de TPS se atribuye a tres autores: Sakichi Toyoda (el fundador), Kiichiro Toyoda (su hijo) y Taicho Ohno, el ingeniero mecánico responsable del Justo a Tiempo (*Just InTime - JIT*).

JIT es un método para garantizar que los materiales y productos intermedios requeridos para el montaje alcancen la línea de producción justo en el momento y en la cantidad en que sean necesarios, con el fin de reducir al máximo las necesidades de inventario y garantizar la entrega a tiempo a los clientes. Entre sus libros destaca "Workplace Management", una recopilación en la que se reúnen algunos de sus pensamientos. Se describirá en el capítulo siguiente y con mayor detalle este tópico.

Kaoru Ishikawa

Tras la Segunda Guerra Mundial los japoneses se dispusieron a desarrollar una industria capaz de competir y derrotar a la americana; lo que no lograron con las armas lo conseguirían en las cadenas de producción. En 1958 un equipo de técnicos japoneses, dirigido por este químico industrial, visitó Estados Unidos con el fin de conocer en detalle los trabajos de Feigenbaum. Fascinados por el concepto de TQC lo exportaron al Japón, aunque adaptado a su cultura y modificado para responder mejor al valor de cada proceso empresarial.

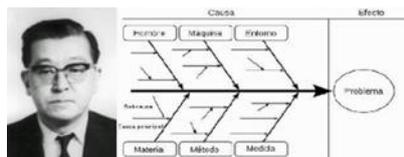


Figura 64 - Kaoru Ishikawa (1915 – 1989)

Junto a estos trabajos en TQC, Kaoru Ishikawa se destacó por sus trabajos relacionados con el análisis científico de las causas de los problemas en los procesos industriales.

Uno de los impulsos fundamentales en este proceso de transformación fue la fundación en 1946 de la JUSE ("Japanese Union of Scientific and Engineers"). Su primer presidente fue Kenichi Koyanagi y entre sus miembros principales destacan Shigeru Mizuno, Kaoru Ishikawa

y Tetsuichi Asaka. Una de las contribuciones más sobresalientes de la JUSE, ha sido la de Kaoru Ishikawa quien amplió conceptos de otros gurús de calidad añadiendo otros significados. Entre ellos se describen: Diagrama de Ishikawa, Espina de Pez o Diagrama de causa u efecto, una presentación gráfica que subraya las relaciones entre las causas de los problemas. Siete herramientas de Ishikawa para el control de la calidad: Hojas de Control, Histogramas, Análisis Pareto, Análisis de Causa Efecto, Diagramas de Dispersión, Gráficas de Control y Análisis de Estratificación.

Ishikawa también introdujo a Japón en la norma ISO, contribuyó al desarrollo de Kaizen y estableció el proceso de auditoría para otorgar los premios Deming junto con Massaki Imai. La mayor parte de las ideas de Ishikawa se encuentran en su libro: "¿Qué es el control total de calidad?: la modalidad japonesa".

Arman V. Feigenbaum

Este ingeniero trabajó en las décadas de los 50 y 60 en la General Electric, en donde concibió el concepto de Calidad Total. Ésta se basa en la búsqueda de la excelencia, la responsabilidad en el proceso de todos los miembros de la organización y en una clara orientación al cliente, un concepto que se explicita en "Los Diez Principios de la Calidad" mencionados en su libro "Control Total de Calidad" (TQM), publicado en 1994.



FACTORES QUE AFECTAN A LA CALIDAD (9M)

- MERCADOS
- DINERO
- GESTIÓN
- PERSONAS
- MOTIVACIÓN
- MATERIALES
- MÁQUINAS
- MÉTODOS MODERNOS DE INFORMACIÓN
- REQUISITOS MÁS ESENCIALES EN EL PRODUCTO

Entre sus aportes a la calidad, se destaca la Calidad Total, que involucra a toda la organización además del Departamento de producción, incluidas las actividades de calidad orientadas a los consumidores.

Figura 65 - Arman V. Feigenbaum (1922 – 2014)

El control de la calidad total se orienta hacia la excelencia y se aplica antes de que surjan los defectos. Definió el Control de Calidad 9M, nueve factores que afectan a la calidad: dinero, gestión, personas, mercados, motivación, materiales, máquinas, métodos y requisitos de producto y ensamblaje.

Genichi Taguchi



Este ingeniero japonés se destaca por su trabajo para combinar métodos estadísticos con técnicas de ingeniería como base para la consecución de mejoras en costo y calidad en los procesos de diseño y fabricación de productos.

Figura 66 - Genichi Taguchi (1924 – 2012)

Entre sus contribuciones se destacan las técnicas estadísticas encaminadas a mejorar el Diseño de Experimentos, la Función de Pérdida para evaluar los costos financieros derivados de la mala gestión de la calidad y el Diseño Robusto, es decir, un diseño óptimo de producto que evite la aparición de defectos posteriores y asegure que se cubren las necesidades de los clientes sin sobrecargar el diseño con otras medidas superfluas. Introdujo también el concepto de ingeniería de la calidad en línea (manufactura, control y corrección de procesos y acciones preventivas) y fuera de línea (optimización del diseño de productos y procesos) aseverando que el diseño y la optimización siempre resultan menos costosos que la corrección o la mejora continua. Posee una extensa bibliografía entre la que se destacan:

"Robust Engineering: Learn How to Boost Quality while Reducing Costs & Time to Market" (1992) y "Taguchi's Quality Engineering Handbook" (2005).

Philip B. Crosby

A mediados de los años 50, Crosby comenzó a trabajar en la Martin Company como gerente de Control de Calidad en el programa de misiles Pershing. Allí inició un programa de "Cero Defectos" tras el cual se redujo en un 25% la tasa de rechazo y un 30% los costos de producción. Su gran innovación radica en el trato hacia el trabajador, en fomentar su motivación y hacerle tomar un interés personal en todas las actividades que emprende.



Figura 67 - Philip B. Crosby (1926 – 2001)

"Cero Defectos" es una herramienta de gestión diseñada para reducir los mismos a través de la prevención.

Está orientada a motivar a la gente a prevenir errores inculcándoles un constante deseo de hacer su trabajo bien la primera vez".

Algo más tarde, con la crisis del petróleo en los 70, lanzó otro programa innovador conocido como DIRFT ("Doing It Right First Time") para intentar competir con la industria japonesa. Sus trabajos y los 14 principios que estableció para la implantación de un sistema de Control de Calidad se recopilan en su libro "Quality is Free", publicado en 1979. A partir de ese momento se convirtió en un autor prolífico destacando libros como "Quality Without Tears" (1988), "Let's talk about quality" (1989) y "Quality and Me: Lessons from an Evolving Life" (1999)

De sus aportaciones, se destacan las 6C de Crosby:

1. Comprensión: empieza a nivel directivo, con la identificación y comprensión total de los cuatro principios fundamentales de la administración para la calidad, y termina con la comprensión de todo el personal.
2. Compromiso de la organización: liderada por Dirección, establece un compromiso con la calidad y con sus cuatro principios fundamentales.
3. Competencia: para lograr la competencia, se define un método o plan en la organización, que garantice que todos entiendan y tengan oportunidad de participar en la mejora de la calidad.
4. Comunicación: la organización debe contar con un plan de comunicación que ayude a documentar y difundir las historias de éxito.
5. Corrección: implica contar con un sistema formal que incluya los departamentos y empleados para abordar los problemas de incumplimiento.
6. Continuidad: con el fin de garantizar la continuidad, la calidad debe ser prioritaria entre los aspectos importantes del negocio.

Joji Akao

Akao es coautor, junto con Shigery Mizuno, del método QFD ("Quality Function Deployment") que, con el tiempo, se ha constituido en una práctica clave en "Six-Sigma", la cual es ampliamente utilizada en los procesos de planificación y gestión. En esta metodología, la voz del cliente y la priorización de sus necesidades guía las fases de especificación de requisitos técnicos, diseño y, en última instancia, de los objetivos estratégicos de una organización. El cliente, la competitividad, las metas y la estrategia son puntos clave en esta técnica.

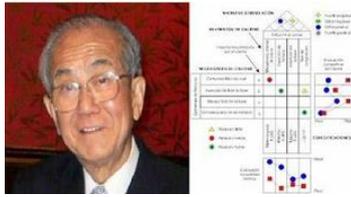


Figura 68 - Joji Akao (1928 – 2016)

En 1972 Akao creó la “*Casa de la Calidad*”, una herramienta basada en el QFD que permite relacionar las necesidades de los clientes con las características de un producto y las capacidades de una empresa.

La mejora en la competitividad es también parte importante en esta técnica. También destaca su contribución al desarrollo del método Hoshin Kanri, una metodología de planificación estratégica. Akao recibió el premio Deming en 1978 y entre sus libros se destacan: "Quality Function Deployment: Integrating Customer Requirements into Product Design" (1991) y "Hoshin Kanri: Policy Deployment for Successful TQM (Corporate Leadership)" (1990).

Maasaki Imai

En 1986 Masaaki Imai fundó el "Kaizen Institute Consulting Group (KICG)", para impulsar el desarrollo de Kaizen, una filosofía encaminada a aplicar la mejora continua en todas las áreas de la organización. En palabras del propio Maasaki: "Kaizen significa implicar a todo el mundo en la mejora continua sin gastar demasiado dinero".



Figura 69 - Maasaki Imai (1930)

Maasaki Imai, junto con Ishikawa, es coautor de las Siete Herramientas de la Calidad y entre sus libros se destacan: "The key to Japan's competitive success" (1986) y "Gemba Kaizen: A Commonsense, Low-Cost Approach to Management" (1997).

Noriaki Kano

Noriaki Kano es ingeniero, profesor y consultor japonés experto en gestión, creador de la teoría de satisfacción del cliente y desarrollo de productos que lleva su nombre: *Modelo de Kano*.

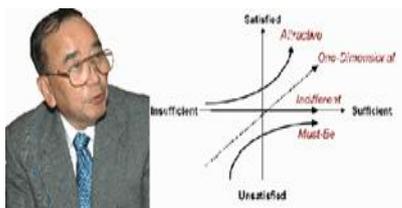


Figura 70 - Noriaki Kano (1940)

Noriaki Kano, ganador del premio Deming en 1997, desarrolló el *Modelo Kano de Satisfacción del Cliente* a finales de los 80. Clasifica las preferencias de los clientes en cinco categorías: atractiva, unidimensional, requerida, indiferente e inversa, como medio para comprender mejor las especificaciones del producto a desarrollar. Entre sus libros destaca: "Guide to TQM in Service Industries," publicado en 1996.

4.2. Calidad 4.0 – (Q4.0)

4.2.1. Qué es la Q4.0

La calidad de los productos, servicios y procesos es, hoy en día, fundamental para lograr el éxito económico y sostenible asegurando la competitividad. Como área importante de la investigación y desarrollo, la gestión de la calidad atrajo el interés de muchos académicos y profesionales (Foidl & Felderer, 2020).

Tal como se comentara en el punto anterior, se han estado adoptando varias herramientas de TQM, tales como 6-Sigma, Lean y Lean Six Sigma (LSS) con el fin de mejorar el desempeño de los procesos; sin embargo, según Zonnenshain & Kenett (2020), el desarrollo de la gestión de la calidad parecía haberse detenido sin que se hubieran presentado nuevos modelos ni herramientas durante los últimos años. El interés por la ingeniería de calidad había caído un 70 % desde 2004 (medido en búsquedas bibliográficas), de modo que la 4IR puede verse como una oportunidad para que la calidad vuelva a tener visibilidad (Broday, 2022).

En la 4IR la globalización intensifica la competencia entre empresas y con los avances en las nuevas tecnologías habilitadoras han surgido nuevos sistemas de gestión, por lo tanto, las empresas buscan ser ágiles, flexibles y con capacidades dinámicas (Sariyer et al., 2021).

La calidad es un atributo distintivo y fundamental, tanto para las empresas como para los consumidores. En la primera, por su importancia para optimizar sus operaciones e incrementar la demanda de sus productos en base a ventajas competitivas y comparativas; para los segundos, porque prevén que sus expectativas serán satisfechas e, incluso, superadas (Carvalho et al., 2021). Como se dijo anteriormente, William Deming aseguró que para ser competitivo y mantenerse en el negocio se debía perseverar en la mejora continua de los productos y servicios, mientras que Joseph Juran aportó una dimensión más humana a la gestión de la calidad ocupándose, entre otros factores, de la formación y el reconocimiento de los empleados (Oakland, 1994).

En el pasado, los conceptos de calidad se aplicaban principalmente a los productos tangibles, pero debido a la importancia que fueron tomando las empresas de servicios, los conceptos de calidad también comenzaron a aplicarse a este segmento y debido a ello, actualmente, la calidad es un factor clave para cualquier tipo de organización (Koontz et al., 2008).

Para Hyun Park et al. (2017) se hace cada vez más evidente que la I4.0 transformará la calidad. En lugar de ocuparse sólo por la calidad del producto se pondrá más énfasis en el diseño y la seguridad, así como en la calidad del servicio.

La calidad ha evolucionado desde la Inspección, pasando por el Control, el Aseguramiento, la Gestión de la Calidad Total (TQM) y, finalmente, el Diseño para la Calidad; pero en los últimos años la llegada de las T4.0 han producido un salto significativo en su evolución (Zonnenshain & Kenett, 2020); es por ello que la Q4.0 llega con el objetivo de combinar el Control de Calidad con las nuevas capacidades de la I4.0, todo ello con el fin de ayudar a las organizaciones a lograr la excelencia organizacional (Frank et al., 2019) (Figura 71).

Evolución de la Calidad Cómo la aplicación de la calidad ha progresado desde la Calidad 1.0 hasta la Calidad 4.0 con sus principios básicos

Evolución de la calidad	Q1.0	Q2.0	Q3.0	Q4.0
Enfoque de Calidad	 Inspección & Control de Calidad	 Aseguramiento de la Calidad	 Gestión de la Calidad total	 Digitalización de la Gestión de la Calidad
Características de la Calidad	 Inspección de Producto / Proceso	 Mejora continua de la Calidad	 Excelencia Operacional	 Excelencia Operacional Dinámica
Ecosistema de Calidad	 Manual	 Semi-Manual	 Automatización	 Digitalización

Figura 71 – Evolución de la calidad. Fuente: adaptado de Frank et al. (2019)

La Q4.0 es un tema de investigación emergente y se está repensando cómo se debe adoptar su gestión en la era digital (Saihi et al., 2021). Se puede caracterizar como la digitalización del TQM y su efecto en la tecnología, los procesos y las personas, pudiéndose definir como la aplicación de las T4.0 a la calidad (Dias et al., 2021).

Por su parte, los autores J. Antony et al. (2021) explican que la ASQ™ presentó la Q4.0 como un cuarto estado evolutivo donde: en ese primer estadio la digitalización se usaba para optimizar la retroalimentación de la señal y el ajuste del proceso, y el aprendizaje adaptativo respaldaba las correcciones del sistema autoinducidas; en segundo lugar, la calidad cambiaba su enfoque orientado desde el control de los operadores del proceso hacia los diseñadores de procesos; luego, las máquinas aprendían a autorregularse y gestionar su productividad y calidad y en el cuarto estadio la actuación humana es fundamental. En resumen, el énfasis pasa de la producción al diseño del sistema y la integración con el sistema empresarial (Watson, 2019) por Antony (2021).

Con frecuencia se enfatizan cuatro áreas principales para abordar la Q4.0: (1) el diseño y desarrollo, (2) la producción, (3) el servicio y (4) la cultura empresarial. Este último elemento debe ser considerado especialmente en el entorno de las organizaciones (Nenadál, 2020).

La Q4.0 combina nuevas tecnologías con métodos tradicionales con el objetivo de llegar a nuevos niveles óptimos de excelencia operativa, desempeño e innovación. Las nuevas tecnologías incluyen CC, BD, AI, ML, dispositivos y operaciones conectados, IoT, nuevas formas de colaboración mediante el uso de BC y redes sociales (Aldag & Eker, 2018).

Con el advenimiento de la DX se ha sido testigo de una nueva evolución de la calidad en los últimos años; la DX de la calidad impone un mayor uso de los datos con el fin de agilizar la toma de decisiones estudiando rápidamente las “causa-raíz” y pudiéndose realizar análisis predictivos (B. J. Antony et al., 2022). La diferencia más notable entre la Q4.0 y la tradicional, radica en las nuevas oportunidades que se generan a partir de la Integración horizontal en todo el ciclo de vida del flujo de valor (Chiarini & Kumar, 2020).

Por su parte, los investigadores Salimova et al. (2020), afirman que el concepto de Q4.0 se define como la capacidad de adaptación de los productos o servicios en todas las etapas del ciclo de vida. Ello se realiza para satisfacer las necesidades de un consumidor específico a través de alianzas con las partes interesadas y la gestión digital de la cadena de valor. La Q4.0 se basa en cerrar la brecha entre los requisitos del consumidor y las especificaciones del producto, las cuales surgen debido a la necesidad de adaptar productos masivos para satisfacer las necesidades individuales. La automatización, el uso de sistemas de análisis de datos y predicción, el uso de software con capacidad para autoajustar procesos en función de los datos, la disponibilidad de datos oportuna y precisa y el uso de software de procesamiento de datos, es lo que distingue a la Q4.0 de la tradicional (Yadav et al., 2021).

Zonnenshain & Kenett (2020) concluyen que no hay aún una definición clara sobre la Q4.0 pero destacan los siguientes lineamientos: (1) la calidad es una disciplina impulsada por datos, (2) se impulsa el modelado y simulación para la ingeniería de calidad basada en evidencia, (3) se fortalece el monitoreo de salud y pronósticos para la calidad, (4) se procura una gestión de calidad integrada, (5) depende de los niveles de madurez de la I4.0, (6) busca integrar innovación con calidad y gestión para la innovación, (7) está vinculada a la ciencia de datos, (8) se busca integrar la ingeniería de confiabilidad con la ingeniería de la calidad, y finalmente (9) mejora la calidad de la información.

Los autores dicen que se es consciente de que estas direcciones todavía no son una imagen completa de la Q4.0, sin embargo, afirman que constituyen una base sustancial para actualizar el cuerpo de conocimientos y prácticas de la gestión de la calidad.

Por su parte, según Carvalho et al. (2021), la Calidad se podría resumir en dos dimensiones básicas: (1) los aspectos técnicos y (2) los conductuales; éstos, a su vez, expresan distintas prácticas de gestión de la calidad y es sobre ellas donde las T4.0 impactan. Esto se muestra en la siguiente tabla a continuación (Tabla 7).

Tabla 7 -Prácticas de la Gestión de la Calidad-Carvalho (2021)

Dimensiones	Prácticas de la Gestión de la Calidad
Aspectos técnicos	
1	Técnicas de Benchmarking
2	Gestión de Procesos
3	Información y Análisis
4	Planificación Estratégica (formal)
Aspectos conductuales	
5	Compromiso con la gestión
6	Involucramiento del cliente
7	Involucramiento de los proveedores
8	Involucramiento de los empleados

Agregando algunas otras definiciones se puede citar al investigador Nenadál (2020), quien asegura que la Q4.0 es una referencia inmediata a la I4.0, aseverando que este tema es demasiado nuevo.

Según investigaciones de LNS Research Company™, la mayoría de las empresas industriales deberán transformarse hacia la I4.0 durante los próximos cinco años, incluida la conversión de la gestión de calidad (Align Technology to Create Market Advantage, 2018). Al analizar dicha fuente, se puede identificar las siguientes características del concepto de Q4.0. Este término Q4.0 proviene de la I4.0 y cubre todos los aspectos de una gestión de calidad avanzada en la era digital. Debe verse como un término general que describe abiertamente un enfoque basado en datos para gestionar todos los requisitos de calidad. Se enfatizan cuatro áreas principales: (1) diseño y desarrollo, (2) producción, (3) servicio y (4) cultura empresarial. Se agrega también que se presta especial atención a los métodos y herramientas que permitan una comunicación negocio-cliente ágil y una retroalimentación eficiente. Otro aspecto para destacar es que un amplio soporte de IT es una condición previa crucial para el establecimiento práctico de la Q4.0. La conectividad fiable y rápida, así como la interacción entre máquinas, personas, unidades organizativas y partes interesadas, no son un fin en sí mismo, sino que deben ser consideradas como un medio para la mejora de la calidad y las innovaciones eficaces y eficientes.

La Q4.0 combina de manera efectiva las nuevas T4.0 con métodos y herramientas de gestión de la calidad ya probados. Es por lo que, la filosofía TQM, es respetada como parte natural de la Q4.0. Una transformación, desde la gestión de calidad tradicional hacia la Q4.0, requerirá de recursos económicos, conocimiento de las personas y tiempo para su despliegue. Los llamados “Sistemas de Gestión de Calidad de Circuito Cerrado” son generalmente considerados como una base adecuada para la implementación secuencial del concepto Q4.0. Es de este modo como Sader et al. (2019) representan la evolución de la calidad partiendo desde el Control, siguiendo por el Aseguramiento, Gestión y, finalmente, la Q4.0, tal como se ilustra a continuación (Figura 72).

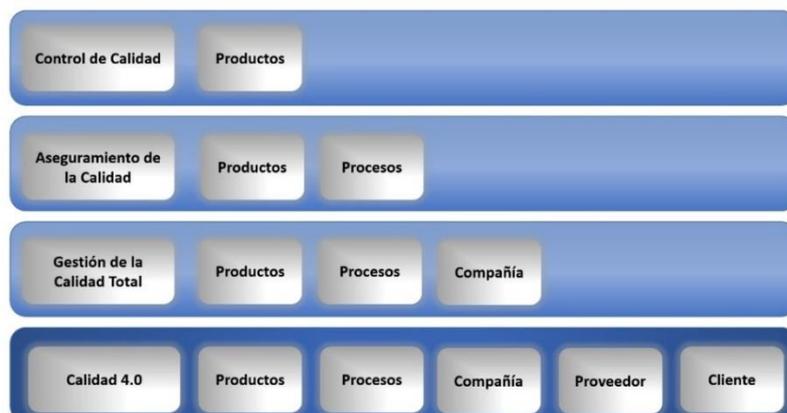


Figura 72 – I4.0 y Sistema de Gestión. Fuente: Sader et al. (2019)

En consecuencia, se podría establecer que la Q4.0 es la conjunción de las T4.0 con los procesos digitalizados y los seres humanos (Figura 73).

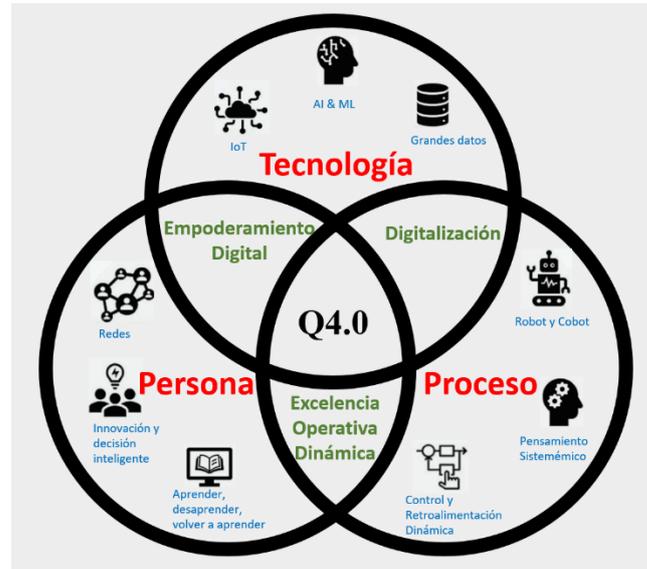


Figura 73 – Pilares de la Q4.0. Fuente: propia del autor

4.2.2. Precedentes y consideraciones de la Q4.0 en el contexto internacional

ASQ - American Society for Quality (ASQ)

Es una organización estadounidense global con miembros en más de 130 países. Consta con miembros que ayudan a conectarse con otros profesionales y practicantes de la gestión de la calidad a progresar en sus conocimientos. Para esta asociación, la Q4.0 es alcanzar la excelencia a través de la calidad y es primordial que los profesionales de la calidad ayuden a sus organizaciones a establecer la conexión entre la excelencia en la calidad y su capacidad para prosperar en la disrupción, utilizando principios de calidad para permitir la transformación y el crecimiento. Según la ASQ se basan en la terna: personas, tecnología y herramientas.

Personas: la Q4.0 es más que tecnología. Es una nueva forma para que los profesionales gestionen la calidad con las herramientas digitales disponibles en la actualidad y entiendan cómo aplicarlas logrando la excelencia a través de la calidad; es un vínculo vital y debe incluirse en el nivel estratégico para la sostenibilidad durante la transformación digital.

Tecnología: la tecnología está evolucionando y los procesos, sistemas, datos, operaciones y gobierno, deben seguir el ritmo. La tecnología también es un gran nivelador porque brinda a cualquier individuo, con la idea y la intención correctas, la capacidad que anteriormente sólo estaba disponible para las grandes organizaciones.

Herramientas de la Q4.0: las herramientas deben aprovecharse para aliviar los desafíos al implementar y desplegar sistemas para respaldar la transformación digital. Para la ASQ ellas son: AI, BD, BC, DL, ML y Ciencia de datos (Figura 74). Una nueva tecnología siempre debe introducirse con una articulación clara de los beneficios deseados que brindará, y, a veces, de qué forma sucederá. Las propuestas de valor para las iniciativas de Q4.0 se dividen en seis categorías, enumeradas en orden de importancia: (1) aumentar o mejorar la inteligencia humana; (2) incrementar la velocidad y calidad de la toma de decisiones; (3) mejorar la transparencia, la trazabilidad y la auditabilidad; (4) anticipar cambios, revelar sesgos y adaptarse a nuevas circunstancias y conocimientos; (5) evolucionar las relaciones, los límites organizacionales y el concepto de confianza para revelar oportunidades de

mejora continua y nuevos modelos de negocios y (6) aprender a aprender, cultivando la autoconciencia y la conciencia de los otros como habilidades.

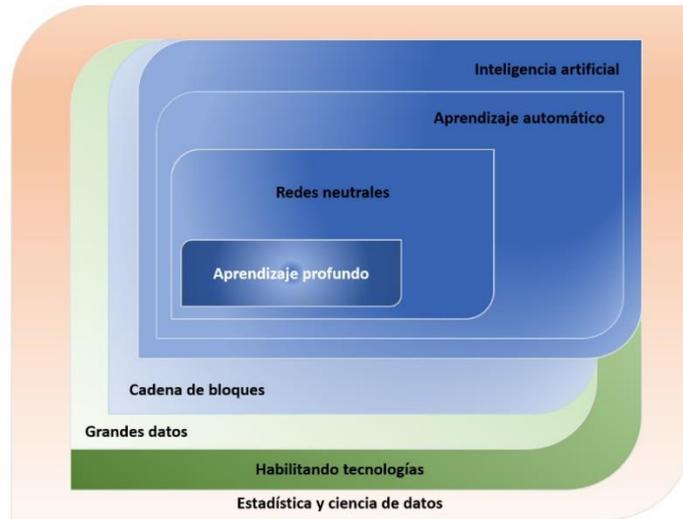


Figura 74 - El ecosistema de las herramientas Q4.0. Fuente: adaptado de ASQ

Los profesionales de la calidad están perfectamente posicionados para proponer y liderar iniciativas de transformación digital porque tienen profundas habilidades, entre ellas el pensamiento sistémico, la toma de decisiones basada en datos, el liderazgo para el aprendizaje organizacional, el establecimiento de procesos para la mejora continua y la comprensión de cómo las decisiones afectan a las personas, vidas, relaciones, comunidades, bienestar, salud y sociedad en general.

CQI - Chartered Quality Institute (CQI)

El CQI es el organismo profesional de expertos en la mejora de la calidad de productos, proyectos y servicios. Durante más de 100 años ha defendido la excelencia organizacional al establecer estándares profesionales para la gestión de la calidad en el Reino Unido y en todo el mundo.

Para el CQI, la Q4.0 es el aprovechamiento de la tecnología con las personas para mejorar la calidad de una organización, sus productos, sus servicios y los resultados que genera. Esta definición considera que los profesionales de la calidad tienen dos roles; por un lado, ayudar a las organizaciones a adoptar y utilizar tecnologías digitales de modo de crear valor para los clientes y otras partes interesadas, por otro, adoptar y utilizar tecnologías digitales en la gestión de la calidad con el fin de ofrecer de forma eficaz gobernanza, garantía y mejora (Figura 75).

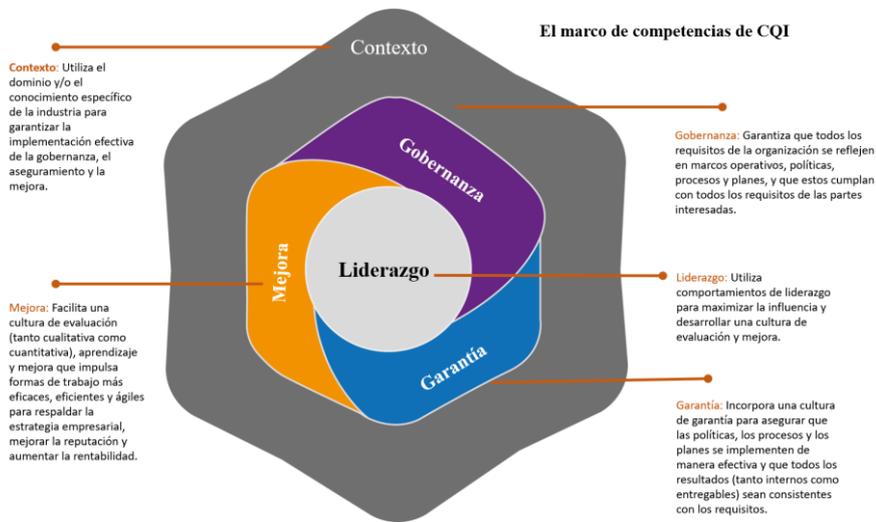


Figura 75 – Marco de Referencia del CQI. Fuente: CQI™

EFQM - Fundación Europea para la Gestión de la Calidad (EFQM)

Fundada en octubre de 1989 por directores ejecutivos de 67 empresas, han suscripto el Documento de Política y declararon su compromiso para lograr la misión y la visión de la EFQM. La Fundación creó un equipo de expertos de la industria y la academia para desarrollar el Modelo de Excelencia EFQM, un modelo y marco holístico que se puede aplicar a cualquier organización independientemente de su tamaño o sector. Éste se utilizó por primera vez para respaldar la evaluación de organizaciones en el Premio Europeo a la Calidad en 1992. EFQM asegura que su objetivo es incrementar la competitividad de las organizaciones europeas y de apoyar el desarrollo sostenible de sus economías. Es una fundación independiente sin fines de lucro, comprometida a apoyar a sus miembros en su camino hacia la excelencia. Aunque se enfoca en Europa, tiene un alcance global y apoya a todas las organizaciones.

Esta asociación no se ha expedido, a la fecha, sobre la Q4.0, sin embargo, su abordaje representado desde los habilitadores hasta los resultados es el que se muestra a continuación en la Figura 76 (Fonseca et al., 2021b).

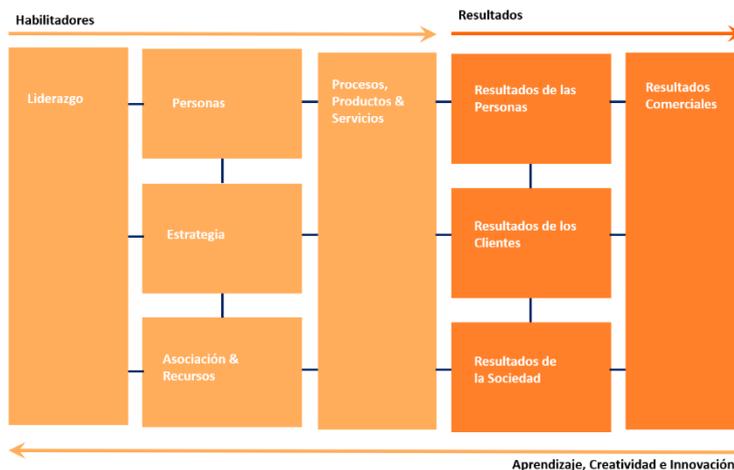


Figura 76 – Habilitadores y resultados – EFQM. Fuente: Fonseca (2021)

ISO - International Standardization Organization (ISO)

La Organización Internacional para la Estandarización es una organización sin fines de lucro que desarrolla y publica estándares de prácticamente todos los tipos posibles, desde tecnología de la información hasta dinámica de fluidos y energía nuclear.

Con sede en Ginebra, Suiza, ISO está compuesta por 162 miembros, cada uno de los cuales es el único representante de su país de origen. Como el desarrollador y editor de estándares más grande del mundo, ISO cumple un rol vital para el acuerdo entre desarrolladores de estándares individuales, difundiendo el progreso realizado por los desarrolladores locales de un país en todo el mundo con el fin de promover el objetivo de la estandarización.

Su estándar para la gestión de la calidad es el reconocido ISO 9001, Sistemas de Gestión de Calidad – Requisitos. Éste especifica los requerimientos para un sistema de gestión de la calidad cuando una organización: (1) necesita demostrar su capacidad para proporcionar de manera consistente productos y servicios que cumplan con los requisitos del cliente y los legales y reglamentarios aplicables y (2) mejorar la satisfacción del cliente a través de la aplicación efectiva del sistema, incluidos los procesos para la mejora del mismo y la garantía de la conformidad con el cliente y los requisitos legales y reglamentarios aplicables. Todos los requisitos de la norma ISO 9001:2015 son genéricos y están destinados a ser aplicables a cualquier organización, independientemente de su tipo, tamaño o de los productos y servicios que proporcione. Esta asociación no se ha expedido, a la fecha, sobre la Q4.0.

BFQ - British Quality Foundation (BFQ)

A principios de la década de 1980, los gobiernos y los líderes de la industria en Occidente se preocuparon por el bajo nivel de productividad industrial y la falta de competitividad de las empresas. Tras la exitosa introducción de un premio nacional a la calidad (el Premio Malcolm Baldrige) en los EE. UU. y el Premio Europeo a la Calidad, se consideró que la industria del Reino Unido se beneficiaría de una iniciativa similar: reconocer y promover las buenas prácticas en los negocios británicos. Esta asociación tampoco se ha expedido, a la fecha, sobre la Q4.0.

SQA - Society of Quality Assurance (SQA)

En 1980, Kathryn Bono, Robert Fishbeck, Richard Siconolfi y Fred Snyder formaron la Mesa Redonda de Garantía de Calidad. Estas personas se reunieron el año anterior con la idea de reunir a los profesionales de aseguramiento de la calidad en respuesta a la regulación de buenas prácticas de laboratorio de la FDA (The Food and Drug Administration) de EE. UU. y la retirada de estudios de registro de pesticidas de la EPA (Environmental Protection Agency). La primera mesa redonda de Control de Calidad se llevó a cabo en el otoño de 1980, en Hunt Valley, Maryland; 54 profesionales de aseguramiento de la calidad se reunieron para discutir e intercambiar información sobre la regulación y el retiro. Debido a la naturaleza de estas nuevas regulaciones, no se invitó a ningún representante del gobierno. Sin embargo, en 1983, en la mesa redonda de Control de Calidad de Houston, surgió la representación del gobierno y ese evento condujo al éxito de la reunión. La participación del gobierno continúa hasta el día de hoy, donde su participación asegura una reunión anual exitosa. Esta asociación tampoco se ha expedido, a la fecha, sobre la Q4.0.

EOQ - European Organization for Quality (EOQ)

Es una organización europea sin fines de lucro con una Junta Ejecutiva activa y constantemente inspirada por todos sus miembros. Impulsados por un Secretario General, trabaja en el futuro de acuerdo con su Visión, Ambición y Misión respetando los logros del pasado. No se ha encontrado información, a la fecha, sobre una posición de la EOQ respecto de la Q4.0.

Qu4lity

Qu4lity es un proyecto europeo dedicado a la “calidad autónoma” y la fabricación con cero defectos en la Industria 4.0. Qu4lity desea demostrar, de manera realista, medible y replicable, un modelo de producto y servicio abierto, certificable, altamente estandarizado,

amigable para las pymes y transformador, basado en datos compartidos para Factory 4.0 a través de 14 líneas piloto⁴. Tiene como objetivo demostrar cómo la industria europea puede construir estrategias únicas y altamente personalizadas y ventajas competitivas a través de un ecosistema de plataforma abierta orquestado, componentes atomizados y habilitadores digitales en todas las fases del ciclo de vida del producto y del proceso. El objetivo principal es construir un modelo de calidad autónomo para enfrentar los desafíos de I4.0. Qu4lity ha comenzado el 1 de enero de 2019 y es un proyecto que tendrá una duración de 39 meses.

ASQ Y BOSTON CONSULTING GROUP (BCG)

En 2018, Boston Consulting Group™ (BCG) invitó a la ASQ™ a asociarse en un estudio que explorara la Q4.0, centrado principalmente en el sector manufacturero de EE. UU. y Alemania. El estudio buscó las percepciones de los profesionales sobre las habilidades necesarias para implementar la Q4.0, los obstáculos para su implementación y los casos para el uso de la gestión de la calidad digital. Las respuestas del estudio revelaron cinco temas clave:

1. Sólo el 16% de las organizaciones encuestadas habían implementado iniciativas de Q4.0 y el 63% no había comenzado a planificarlas.
2. Los pioneros tenían expectativas más bajas para el impacto de la Q4.0 debido a los desafíos de implementación.
3. El 47 % y el 41 % afirmaban que las iniciativas de tecnología digital tenían el mayor impacto para la fabricación y la I+D, respectivamente.
4. El mayor desafío para implementar Q4.0 era la brecha de talento de habilidades digitales. Para los pioneros en la implementación de Q4.0 también se enfatizaban las barreras relacionadas con los datos.
5. El 69% de las organizaciones planeaban mejorar las habilidades de los trabajadores con el análisis de datos, identificándolo como la debilidad más importante.

LNS

La consultora LNS Research™ realizó un estudio en 2017, muy difundido y respetado actualmente, el cual concluye que la Q4.0 incluye la digitalización de la gestión de la calidad. Más importante aún es el impacto de esa digitalización en la tecnología, los procesos y las personas relacionadas a la gestión de la calidad.

LNS ha identificado 11 ejes de Q4.0 que las empresas pueden utilizar para educar, planificar y actuar. Utilizando este marco, los líderes identifican cómo la Q4.0 puede transformar las capacidades e iniciativas existentes. El marco también proporciona una perspectiva sobre la calidad tradicional. Q4.0 no reemplaza los métodos de calidad tradicionales sino que los desarrolla y los mejora. Las empresas deben utilizar el marco para interpretar su estado actual e identificar qué cambios son necesarios para pasar al estado futuro (Figura 77).

⁴ Qu4lity. Digital manufacturing platforms for connected smart factories. Deliverable Id: D2.10 30/04/2021

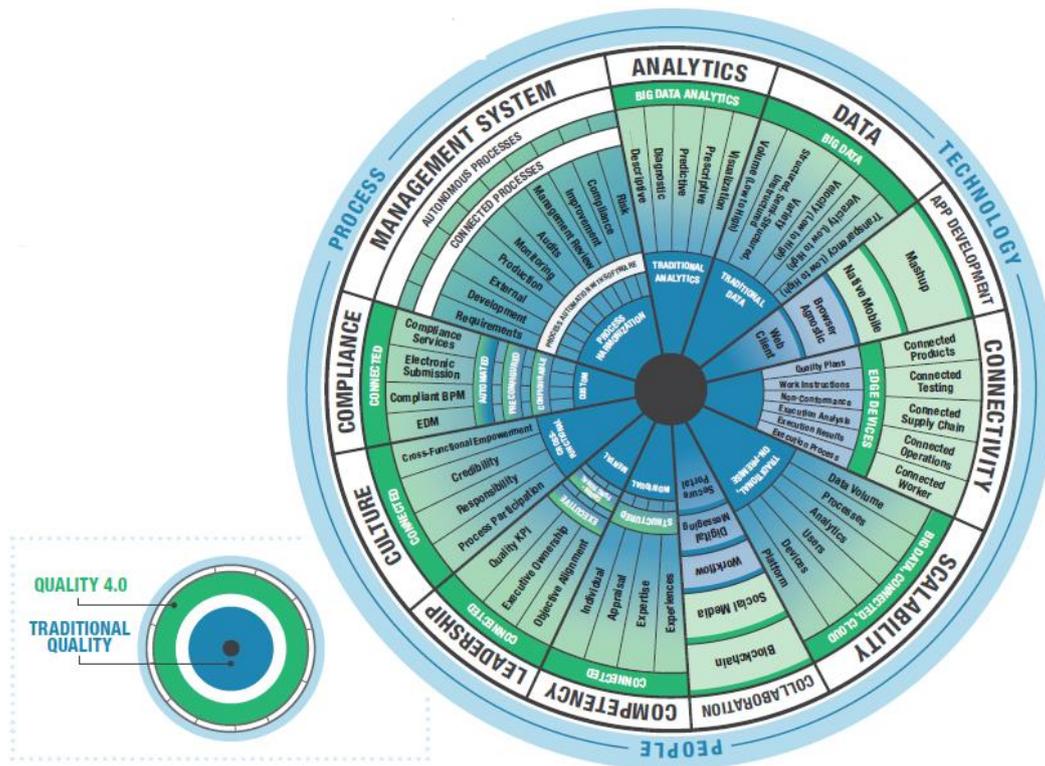


Figura 77 – Evolución de la Calidad. Fuente: LNS research™ (2017)

4.2.3. Precedentes y consideraciones de los Estándares

El marco de referencia RAMI4.0 se basa fundamentalmente en dos estándares, el IEC 62890 y el IEC 62264, pero, además, se tomaron como base a varios otros, fundamentalmente relacionados a la producción, automatización, calidad de datos, interoperabilidad y sustentabilidad. Se listan a continuación los más importantes relacionadas con la Q4.0 (Tabla 8).

Tabla 8 – Estándares relacionados a la Q4.0

ID	Nombre	Descripción
ANSI/DMSC QIF 3.0 - 2018	Estándar del marco de información de calidad (QIF)	Define un conjunto integrado de modelos de información que permiten el intercambio efectivo de datos de metrología a lo largo de todo el proceso de medición de la calidad de fabricación, desde el diseño del producto hasta la planificación de la inspección, la ejecución, el análisis y la generación de informes.
BS-7850-1	Gestión total de la calidad. guía de principios de gestión	Orientación a la dirección sobre las formas de hacer que la estructura, la gestión y el sistema de calidad de la organización sean más eficaces para cumplir los objetivos de la organización maximizando sus recursos humanos y materiales.
BS-7850-2	Gestión total de la calidad. Guía de métodos de mejora de la calidad.	Da consejos sobre la implementación de la mejora continua de la calidad dentro de una organización. Los métodos para implementar y adoptar estas directrices dependen de factores como la naturaleza, la cultura y el tamaño de una organización, los tipos de servicios o productos ofrecidos y las necesidades de los clientes y los mercados atendidos. La cobertura incluye definiciones, conceptos fundamentales y una metodología para la mejora de la calidad. También incluye tablas y diagramas.
ISO-9000	Conjunto de estándares internacionales sobre gestión y garantía de calidad	Desarrollados para ayudar a las empresas a documentar de manera efectiva los elementos del sistema de calidad necesarios para mantener un sistema de calidad eficiente. No son específicos de ninguna industria y se pueden aplicar a organizaciones de cualquier tamaño.
ISO/IEC TR 90005	"Ingeniería de sistemas - Directrices para la aplicación de la norma ISO 9001 a los procesos del ciclo de vida del sistema"	Proporciona orientación para las organizaciones en la aplicación de la norma ISO 9001:2000 a la adquisición, suministro, desarrollo, operación y mantenimiento de sistemas y servicios de apoyo relacionados. No agrega ni modifica los requisitos de la norma ISO

		9001:2000. Las pautas provistas en ISO/IEC TR 90005:2008 no están destinadas a ser utilizadas como criterios de evaluación en el registro o certificación del sistema de gestión de calidad. ISO/IEC TR 90005:2008 adopta los procesos del ciclo de vida de los sistemas ISO/IEC 15288 como punto de partida para el desarrollo, operación o mantenimiento del sistema e identifica los requisitos equivalentes en ISO 9001:2000 que tienen relación con la implementación de ISO/IEC 15288.
BS ISO 8000-8:2015		Describe los conceptos fundamentales de la calidad de la información y los datos, y cómo estos conceptos se aplican a los procesos de gestión de la calidad y a los sistemas de gestión de la calidad.
ISO-IEC-25012	Calidad de los datos	Representa los cimientos sobre los cuales se construye un sistema para la evaluación de un producto de datos. En un modelo de Calidad de Datos se establecen las características de Calidad de Datos que se deben tener en cuenta a la hora de evaluar las propiedades de un producto de datos determinado. La Calidad del Producto de Datos se puede entender como el grado en que los datos satisfacen los requisitos definidos por la organización a la que pertenece el producto. Son precisamente estos requisitos los que se encuentran reflejados en el modelo de Calidad de Datos mediante sus características (Exactitud, Completitud, Consistencia, Credibilidad, Actualidad, Accesibilidad, ...).
IEC 61360-6	Directrices de calidad del diccionario de datos comunes de IEC (IEC CDD)	IEC 61360-6:2016 brinda orientación para la definición de conceptos que se utilizan para describir clases y propiedades enviadas para la actualización del contenido del Diccionario de datos comunes de IEC (IEC CDD). Esto incluye: - una comprensión básica de los conceptos y procedimientos clave utilizados en IEC CDD; - una referencia vinculante para el Control de Calidad del contenido del diccionario compatible con IEC 61360; - orientación sobre documentos en los que se puede adquirir un conocimiento profundo necesario. IEC 61360-4, colección de referencia IEC de tipos de elementos de datos estándar y clases de componentes, se puede acceder desde IEC CDD (Diccionario de datos comunes) Acceso gratuito a la base de datos. La base de datos contiene la colección de referencia IEC de clases y propiedades características asociadas (tipos de elementos de datos o DET) de componentes eléctricos/electrónicos, incluidos materiales, geometría y características utilizadas en equipos y sistemas electrotécnicos. El diccionario y la base de datos siguen la metodología de la Parte 1 de IEC 61360 y el modelo de información de la Parte 2.
ISO/IEC 62264	Gestión de operaciones de calidad en la norma ISO/IEC 62264	Se define como un conjunto de actividades, que coordinan, gestionan y dan seguimiento a las funciones que miden y reportan la calidad.
IEC 62443	Seguridad de Sistemas y Redes Industriales.	Es un estándar industrial que proporciona procedimientos para gestionar los riesgos relacionados con las amenazas de ciberseguridad en IACS.

El enfoque centrado en los datos, característica de la Q4.0, puede estar respaldado por algunos estándares internacionales como ISO 25012 (Figura 78) que define las características de calidad de los datos. Este enfoque también está soportado por estándares internacionales tales como la serie ISO 8000-60 (Figura 79) específicamente también para la calidad de los datos, y la serie ISO 33000 (Figura 80) para la evaluación de procesos en tecnología de la información (Kim et al., 2019).

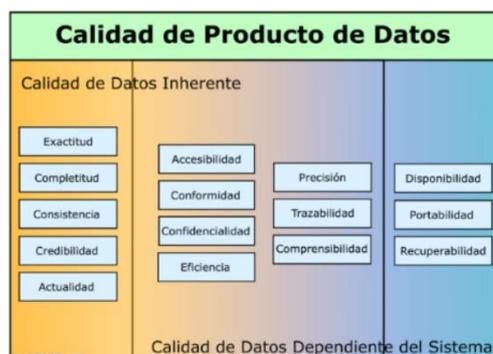


Figura 78 – ISO 25012. Fuente: ISO

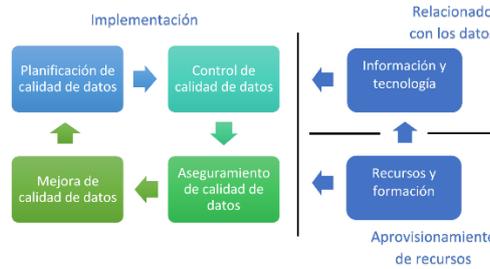


Figura 79 – ISO 8000. Fuente: ISO



Figura 80 – ISO 33000. Fuente: ISO

4.2.4. Beneficios de la Q4.0

La integración horizontal y vertical en todo el ciclo de vida del flujo de valor es una de las grandes ventajas de la gestión de la Q4.0.

La integración horizontal, en particular, es uno de los pilares de la I4.0 junto con el desarrollo de objetos y productos inteligentes, ofreciendo nuevas oportunidades para la optimización de procesos, el cumplimiento funcional de los productos e, inclusive, de nuevos objetivos de sostenibilidad y medio ambiente (Gaiardelli et al., 2021); es interorganizacional, lo que permite fabricar productos y servicios de manera eficiente facilitando, a través de la colaboración, los ecosistemas y el intercambio de datos entre las organizaciones (Saihi et al., 2021).

Por su parte, la integración vertical, está relacionada con los subsistemas jerárquicos dentro de una empresa, facilitando la vinculación, por ejemplo, de sensores con un ERP. La posibilidad de coleccionar datos de insumos, semienterminados o productos terminados, a lo largo de todo el flujo de valor, en tiempo real y accesible a todos los interesados, permite obtener información, trazabilidad, análisis causa-raíz, comportamientos de consumo e información sobre uso, desuso, descarte o reciclado de productos finales. Esta información es compartida entre diferentes departamentos de la empresa, por ejemplo, marketing, I+D, producción, logística; en resumen, es la conjunción entre las tecnologías IT y las OT.

Dicha interoperabilidad, además de la integración horizontal, son una parte importante de las bases de la I4.0 (Standardization-Council-Industry, 2020). Por ejemplo, los datos históricos sobre el comportamiento de los clientes podrían usarse para mejorar los esquemas de producción de modo de gestionar la demanda fluctuante y equilibrar otros esquemas de producción. El BD se puede utilizar para desarrollar modelos de AI para permitir que la máquina tome una decisión instantánea en la planta de producción pudiendo alertar a los operadores para realizar acciones recomendadas como mantenimiento predictivo o mejores configuraciones de producción (Sader et al., 2019).

El interrogante que surge es cómo los fundamentos de la I4.0, a lo largo de todo el ciclo de Vida de Flujo de Valor, pueden tener un impacto positivo en la gestión de la calidad de objetos y productos inteligentes, beneficiando no sólo a la empresa sino también a sus empleados, usuarios finales y al medio ambiente. La conexión entre tecnologías habilitadoras, integraciones verticales y horizontales, productos inteligentes y nuevos

conceptos centrados en las personas, sería lo que daría forma a esta nueva generación de gestión de la calidad, la denominada Q5.0.

Como se mencionó anteriormente, los beneficios de un sistema de gestión de circuito cerrado son la visibilidad, que esto es un factor muy crítico para la retroalimentación, y el cumplimiento, un factor muy crítico para socios comerciales, leyes, regulaciones y el apoyo a la toma de decisiones, lo cual es fundamental para evitar problemas futuros. Vale aclarar que un sistema de gestión de circuito cerrado es aquel que transita por las fases de descubrimiento, modelado, despliegue, monitoreo y optimización.

Descubrimiento: implica identificar herramientas, procedimientos e ideas internas.

Modelado: es cuando los descubrimientos se modelan en objetivos e iniciativas, utilizando herramientas y procedimientos adicionales.

Despliegue: es el que vincula la estrategia con la operación física y un tercer conjunto de herramientas y procedimientos.

Monitoreo: es el que continúa evaluando y entendiendo los datos y el entorno empresarial.

Optimización: es cuando los equipos comienzan a evaluar estrategias y encontrar la mejor solución de compromiso de un componente clave que a su vez comienza otro ciclo.

Todos estos conceptos apuntan a una necesidad común: unir todo el potencial de las T4.0 con el conocimiento humano. Sin embargo, con la adopción de varias tecnologías en el contexto industrial, se modifica la forma en que se lleva a cabo la gestión de la calidad, surgiendo la necesidad de nuevas habilidades, imprescindibles para que los profesionales de la calidad puedan hacer frente a esas adaptaciones. En ese contexto, aparecen conceptos tales como el TQM4.0 (Figura 81), que busca alinear las competencias de los profesionales de la calidad con los cambios propuestos por la I4.0 y la Q4.0, caracterizados por el uso de tecnologías en los sistemas QMS actualmente disponibles.

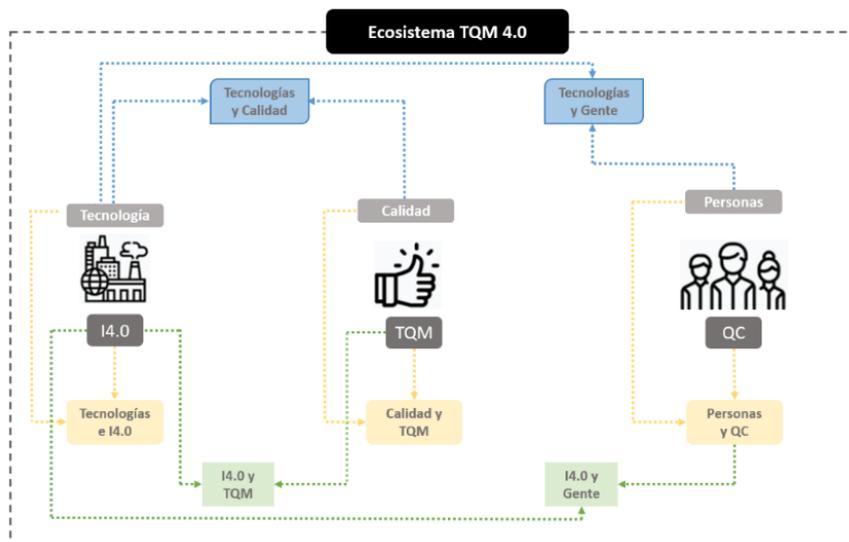


Figura 81 – Ecosistema TQM 4.0. Fuente: Souza de (2021)

Así, conceptos como estos, buscan adoptar este escenario apoyando y mejorando los métodos tradicionales de la calidad ayudados por la tecnología (Souza et al., 2021).

Por su parte, la complementación del Lean y la I4.0 traería aparejado una cantidad de beneficios. En resumen, se pueden identificar cuatro áreas de acción en las que el Lean se beneficiaría a partir de la I4.0:

1. La digitalización mejora la implementación de la producción personalizada, bajo demanda, experimentando cambios disruptivos a través de modelos de negocio digitales. En producción, la disminución de tiempo, costos y la mejora de la calidad continúan siendo los principales objetivos. La flexibilidad y la personalización son cada vez más importantes. Desde la perspectiva del mercado, existe el riesgo de que los nuevos enfoques digitales reemplacen a los negocios existentes. Cuando se puedan ofrecer nuevos servicios al cliente

a través de la digitalización de procesos internos y un modelo de pago correspondiente que genere nuevas ventas, se puede crear un nuevo modelo de negocio. Esto no tiene por qué surgir necesariamente de sistemas ciberfísicos.

2. Los datos en tiempo real crean nuevas oportunidades para los métodos existentes de producción Lean. Ésta, junto a la I4.0, están en cierto punto en clara oposición, donde el ciclo de mejora consiste en la estandarización, la detección de desviaciones, la resolución de problemas por parte de los empleados y la posterior mejora es interrumpida por la fábrica inteligente. La oportunidad de la I4.0 radica en el intercambio de datos en tiempo real entre cualquier paso del proceso. Esto puede eliminar una de las principales debilidades de los sistemas de soporte y planificación digital anteriores y la falta de información actualizada. Los estándares inflexibles pueden superarse mediante la provisión de información específica de la situación en el sitio y en tiempo real, sin renunciar a la secuencia de “pull, takt o first-in-first-out”.

3. La digitalización ayuda a establecer Lean en nuevas áreas, tales como el modelo de negocio de fabricación a demanda. Ahora es posible la producción de lotes pequeños y el modelo de fabricación a pedido, o la producción con alcances de trabajo específicos, o sea, personalizada, mientras que en el pasado la estandarización no lo permitía. En el futuro, los estándares de trabajo y de procesos podrían modularizarse o incluso individualizarse y ajustarse de forma adaptativa al proceso de producción.

4. El producto inteligente conoce el entorno de producción ajustada y puede controlarlo. El control del proceso de producción, por parte del objeto o producto, ya es posible gracias a las tecnologías disponibles. Con la ayuda de las nuevas tecnologías habilitadoras se pueden producir productos personalizados en condiciones estandarizadas. Reproduciendo las palabras de la especialista Judith Enke, el camino hacia el Lean 4.0 sería el desarrollo de instrumentos de calidad de sistemas de producción holísticos a través de la I4.0. Con la I4.0 como una visión futura del sitio de producción, surge la pregunta de cómo combinar enfoques de mejora con las nuevas oportunidades que la digitalización ofrece. En particular, las técnicas de calidad para sistemas de producción son de gran importancia con respecto al desarrollo continuo de procesos y productos. Por tanto, surge la necesidad de investigar la combinación de los dos temas en el marco de una calidad Lean 4.0 integrada y de forma intensiva.

4.2.5. Desafíos, barreras y factores críticos de éxito

Existen algunos desafíos para la implantación de la calidad en la era digital, entre ellos se podría mencionar el hecho de explorar nuevas soluciones digitales, poner el foco en la creación de eficiencia interna, apuntar a la creación de valor para el cliente y explotar soluciones digitales ya disponibles. Los nuevos desafíos son: la colaboración con áreas de IT, con trabajadores que se encuentren distante geográficamente, los nuevos roles para la gestión de procesos, el desarrollar los procesos desde la perspectiva del cliente, monitorear productos en tiempo real, presentar falla de calidad en aplicaciones de “social media”, habilitar nuevas formas “on-line” para solicitud de nuevos requerimientos u ofrecer estos servicios “on line” digitales o “digital logs” de productos en uso (Elg et al., 2021).

Algunos de los factores críticos de éxito (CSF) pueden también resultar debilidades si se utilizan inadecuadamente. Según los autores Psarommatis et al. (2020a) se debe tener en cuenta algunos aspectos importantes para ayudar a evitar algunas fallas y las barreras más fuertes para la mejora de la calidad; ellos son:

- (1) Falta de experiencia en implementación y capacitación de los trabajadores;
- (2) falta de compromiso de la alta dirección;
- (3) resistencia al cambio;
- (4) falta de recursos;
- (5) falta de involucramiento de los empleados;

- (6) falta de un marco de referencia para la implementación;
- (7) necesidad de un especialista;
- (8) comunicación pobre;
- (9) dificultades de implementación de una infraestructura de control de datos, y
- (10) débil selección de proyectos (Psarommatis et al., 2020b).

Los factores críticos son monitoreados a través de los indicadores clave de desempeño KPI (Key Performace Indicator). Las mediciones del desempeño son parámetros críticos en la planta de producción porque los KPI bien definidos permiten encontrar las brechas de rendimiento entre las operaciones reales y las planificadas, pudiendo monitorear las mejoras en las organizaciones basadas en datos. El monitoreo del desempeño y el Control de Calidad son fundamentales para aumentar la eficiencia y la calidad de sus procesos y productos con el fin de enfrentar un mercado altamente competitivo. Es por ello que se utilizan conceptos de múltiples disciplinas para implementar los KPI definidos en la norma ISO 22400, sistemas de automatización e integración y las normas ANSI/ISA-95 para la integración de sistemas MES y ERP (Tambare et al., 2022).

Los autores Sader et al. (2017) definen los CSF en la gestión de la calidad total, los cuales se ilustran en la siguiente Tabla 9.

Tabla 9 - TQM - Factores críticos de éxito CSF. Fuente: Anu P. Anil y Satish (2016)

1. Liderazgo y compromiso de la alta dirección	7. Educación y entrenamiento	13. Cultura de la calidad
2. Mejora continua	8. Gestión estratégica	14. Evaluación comparativa
3. Gestión de la calidad de los proveedores	9. Uso de SPC	15.. Diseño de procesos y productos
4. Enfoque en el cliente	10. Análisis de información de la calidad	16. Gestión de procesos
5. Participación de los empleados	11. Aseguramiento de la calidad	17. Innovación de producto
6. Empoderamiento de los empleados	12. Ciudadanía estratégica	18. Conocimiento administrativo

4.2.6. Prácticas, herramientas y tecnologías aplicables a la Q4.0

En continuidad con lo anterior, el citado autor (Sader, 2019) define también las mejores prácticas del TQM en la 4IR, esquematizándolo de la siguiente manera (Fig. 82).



Figura 82 – Mejores Prácticas del TQM: Fuente: propia, adaptado de Sader (2019)

Por su parte, Ali & Johl (2022) definen las siguientes prácticas digitales para la Q4.0, lo cual se puede complementar con lo desarrollado anteriormente (Figura 83).

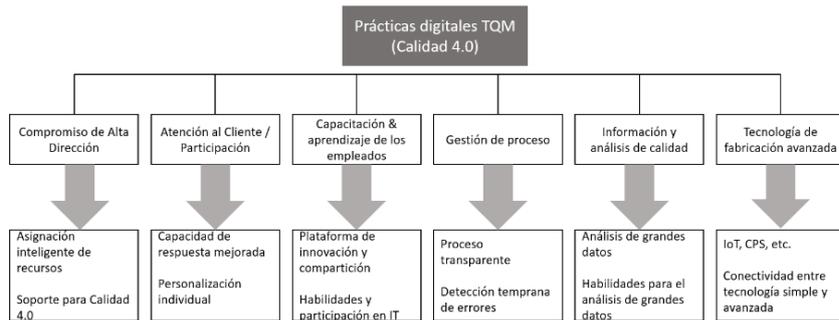


Figura 83 – Prácticas digitales del TQM I4.0. Fuente: Ali (2022)

Como se mencionaba al principio de este capítulo, el ASQ™ asevera que el pensamiento sistémico, la toma de decisiones basada en datos, el liderazgo para el aprendizaje organizacional, el establecimiento de procesos para la mejora continua y la comprensión de cómo las decisiones afectan a las personas, vidas, relaciones, comunidades, bienestar, salud y sociedad en general, conforman la Q4.0.

La intensidad de la relación entre las T4.0 y su contribución a la Q4.0 son aportados por un estudio de campo realizado por Bunzendahl & Schneider (2021) (Figura 84).

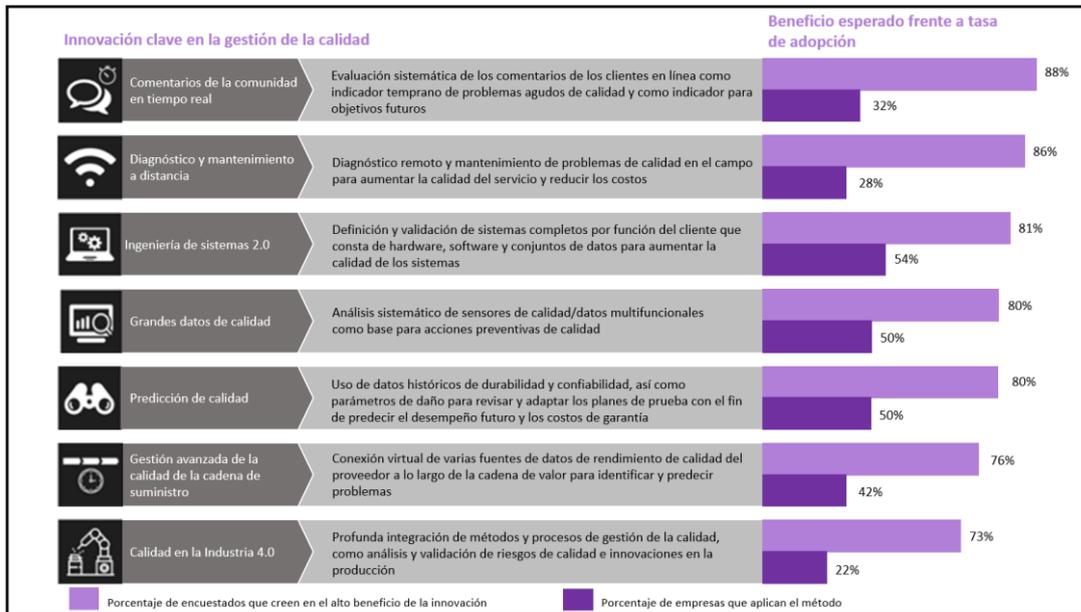


Figura 84 – Innovaciones de la Gestión de la Calidad. Fuente: Bunzendahl (2021)

Otro estudio interesante que relaciona las nuevas tecnologías con las prácticas tradicionales es el de Sonntag (2022) que muestra la relación que existe entre las T4.0 y las herramientas tradicionales de la calidad usadas en Lean. El resultado de su estudio se muestra en la siguiente Tabla 10.

Tabla 10 - Herramientas Lean vs. tecnologías 4.0. Fuente: Sonntag (2022).

Herramientas Lean	Tecnologías Industria 4.0							
	RFID	Internet das Coisas	Computação na Nuvem	Simulação	Realidade Aumentada e Virtual	Sistema Ciberfísico	Robôs Autônomos	Big Data
Poka-Yoke	1, 16, 17	1, 2, 3, 14, 23	2, 14, 23		1, 2, 16, 17, 23	1, 2, 3, 6, 23	7, 8	6
Andon		1, 3, 13	1, 3			1, 3		
Controle de Qualidade na Fonte	16, 17, 21	8, 9, 10, 11, 14	3, 4, 10, 14		16	3, 10, 14, 15	7, 8, 10	4, 5, 6, 12, 13
CEP		14	14		22	23		
Standard Work	14	20	20	14	14	19		
5S	14, 18, 22			14	14, 18, 22		14	

4.2.7. Optimización de procesos y calidad en la 4^{ta} Revolución Industrial

Los modelos de calidad tradicionales no están totalmente alineados con los conceptos de I4.0 y pueden estar perdiendo relevancia y aún estancarse (Asif, 2020). Podría entonces adoptarse T4.0 para fomentar la confianza y la colaboración a lo largo del tiempo a través de la transparencia y la credibilidad. Con las ventajas que ofrecen estas tecnologías, todos los interesados en un proyecto pueden avanzar en la misma dirección. Según Emblemståg (2020), nadie ha implementado esta solución en la vida real en industrias basadas en proyectos. Naturalmente, esto sería un paso adelante para ellas, pero llevará algún tiempo.

A través de una encuesta a empresas rusas, Salimova et al. (2020) verifican los cambios en las herramientas y conceptos de calidad y aseguran que se requieren cambios en los conceptos básicos de ésta. Además, los autores Petcharit et al. (2020) han investigado los factores que impactan en la TQM y aseguran que la planificación estratégica y la influencia de la calidad del producto en los cambios de la TQM realizados por la I4.0 están haciendo que los procesos queden obsoletos.

Yadav et al. (2020) comparan el impacto de la I4.0 y sus herramientas en los indicadores de desempeño de Lean Six Sigma (L6S) y los Sistemas de Gestión de la Calidad (Quality Management Systems – QMS) en las organizaciones, asegurando que cuando las herramientas L6S y las herramientas de la I4.0 se aplican juntas, se comprueba un desempeño máximo.

Una idea fundamental en el contexto del Lean Manufacturing es que el proceso correcto ofrezca el resultado correcto. Por un lado, los procesos estandarizados y capaces conducen a bajas tasas de error o de falla; por otro, permiten la detección transparente de desviaciones con el fin de que se puedan iniciar medidas de mejora. Existen hoy en el mercado la combinación de una diversidad de productos con un gran volumen de producción, sin embargo, con la tendencia de aumentar la individualización en la producción, estos métodos están llegando a sus límites. Cada producto requiere sus propias secuencias de proceso y, como los posibles defectos son específicos de cada producto, las relaciones causales son cada vez más complejas.

La necesidad de adaptar los métodos de calidad existentes a los requisitos de la producción personalizada se hace evidente y, para tal fin, la I4.0 ofrece un alto potencial. Es por ello que para la optimización preventiva se utilizan métodos tales como DFMA (Design for Manufacture and Assembly) y el FMEA (Failure Mode and Effects Analysis). Mientras que el DFMA garantiza que un producto se pueda fabricar en producciones estables desde la fase de diseño, el proceso FMEA garantiza que los procesos de producción asociados puedan generar, de forma segura, las características del producto.

Los métodos descriptos deben combinarse con las posibilidades que ofrece la I4.0. Este enfoque basado en tecnologías de la información se utiliza para vincular la producción con la tecnología de la información y la comunicación. La atención se centra entonces en el desarrollo de fábricas inteligentes con las que las empresas pongan en red sus recursos operativos y sistemas de almacenamiento tales como los CPS. Estos CPS están definidos por la integración entre lo virtual y lo físico, trabajando también en forma autónoma e interactuando en forma independiente con su entorno. Tal como se ha mencionado, la interconexión entre los CPS y las fábricas inteligentes es posible gracias a un sistema basado en software y una plataforma de servicios.

Como ya se ha explicado, la visión de la I4.0 contradice, de algún modo, la filosofía Lean. Por ejemplo, la idea de que los objetos inteligentes negocien su propio proceso de producción con las máquinas y sistemas contradice la práctica Lean en relación con que sólo se aprueben procesos capaces para la producción de un producto. Cabe destacar que dicha negociación entre máquinas y productos es posible gracias a los objetos inteligentes. Mientras que para Lean las desnaturalizaciones son el punto de partida para las mejoras, el enfoque de la I4.0 permite la autorregulación de los procesos de producción. Por su parte, la I4.0 permite procesos complejos y no predefinidos como resultado de la interconexión de objetos inteligentes, mientras que el enfoque Lean intenta descomponer sistemas complejos y así lograr soluciones simples; sin embargo, ambos enfoques tienen como objetivo optimizar los tamaños de lote, tiempo, calidad, costos, seguridad y motivación. Así es como un futuro Lean-Q4.0, en el contexto de la producción sin defectos, puede ofrecer una alta calidad de proceso.

La especialista Judith Enke (2017) en su trabajo “Der Weg zur Lean Quality 4.0” ha planteado la una relación entre la I4.0 y el Lean como se muestra en la Tabla 11. El procedimiento para este estudio incluyó los pasos de la formulación de objetivos, la generación de ideas y evaluación, así como documentación y selección de ideas. Se muestra la Matriz de campo de búsqueda para Lean Q4.0, donde las soluciones ya desarrolladas están marcadas y las ideas de innovación están resaltadas.

Tabla 11 - LEAN 4.0. Fuente: adaptada de Enke (2017).

Instrumento de Calidad Esbelta	INDUSTRIA 4.0						Escenario
	CPS			CPPS			
	Objetos Inteligentes	Etiquetas Inteligentes	Datos Inteligentes	M2M	VR	Usables	
DFMA y FMEA							Planificación Predictiva Inteligente
Control propio							Autoinspección Inteligente
control sucesivo							Inspección Sucesiva Inteligente
Inspección de la fuente de fallas							Inspección de Fuente Inteligente
Poka Yoke		X					Smart Pola Yoke
Andon						X	Andon Inteligente
sistema de parada de correa	X						Parada de Línea Inteligente
Descripción del problema							Definición Inteligente de Problemas
Análisis de causa raíz							Análisis Inteligente de Causa raíz
PDCA							PDCA Inteligente
Infirma A3							Formalización Inteligente

En un ejemplo de aplicación de Lean 4.0 en una fábrica inteligente, el proceso de trabajo sería el siguiente: un técnico de planta es informado, a través de su tablet, sobre la orden de reparación o el problema encontrado (Smart Andon); recibe la imagen de la cámara del trabajador grabada a través de sus VR en el sitio, a través de una red local inalámbrica (WLAN) y guía al empleado de producción de forma remota a través de una videollamada. Si el problema no puede resolverse de esta manera, el técnico interviene para brindar soporte (Smart Line Stop). El supervisor también es notificado del mal funcionamiento de la máquina mediante un semáforo digital “Andon” en su reloj inteligente. Recibe una descripción del problema creada automáticamente por el mal funcionamiento detectado y se muestra en su tablet para que pueda identificar la ubicación del error (definición inteligente del problema). Al interactuar con herramientas de datos inteligentes el siguiente paso es derivar automáticamente las posibles causas del problema. También invoca las lecciones aprendidas, que se encuentran en la nube, con el fin de identificar la causa principal (Análisis Causa-Raíz Inteligente). Para garantizar la aceptación de las posibles soluciones, por parte de todos los empleados involucrados en la resolución de problemas, las medidas de solución propuestas se coordinan en una plataforma alojada también en la nube. Si se han cumplido los objetivos deseados, o se ha evitado que el problema se repita, se almacena este nuevo proceso en la misma nube, ahora como un proceso estándar (Smart PDCA).

A través de las técnicas de la I4.0 los instrumentos de calidad de los sistemas de producción se pueden desarrollar aún más para la aplicación específica de la demanda en los actuales entornos de producción. Para determinar las potenciales soluciones se elige un enfoque sistemático para combinar las características de Lean Q4.0 de una manera estructurada. Con el objetivo de implementar los escenarios identificados, se deben formular los requisitos técnicos preestablecidos. Por su parte, será necesario preparar a los empleados y personal de planta para la DX en el contexto de la 4IR a través de un entrenamiento, capacitación y formación continua.

Tal como se sabe, el Lean es un enfoque basado en el valor en el que los empleados mejoran constantemente los procesos, eliminando el desperdicio y resolviendo sistemáticamente los problemas. La clave del Lean se encuentra en el concepto de mejora continua de procesos, el ciclo PDCA. Además, la digitalización de la producción industrial brinda a las empresas la capacidad de mejorar sus procesos y sus productos, un campo en el que la filosofía de la producción Lean está efectivamente establecida en la industria.

A pesar de que un gran número de empresas hayan informado la implementación de nuevos sistemas digitales para conectar maquinarias, partes, semielaborados, trabajadores y productos, se ha planteado la pregunta de cuál puede ser la situación futura de la mano de obra de producción. Es muy probable que las tareas rutinarias y las competencias necesarias puedan cambiar, pero los trabajadores seguirán siendo esenciales para tareas de

mantenimiento más elaboradas o para resolver problemas complejos en un futuro entorno de producción conectada. Este concepto tiene un gran potencial para aliviar a los empleados de las tareas monótonas y peligrosas y mejorar la calidad de las decisiones en la planta.

Ambos enfoques, Lean Production e I4.0, son similares en términos de sus objetivos: mientras que el Lean persigue los objetivos de tiempo, calidad, costos, seguridad y motivación de los trabajadores, la I4.0 agrega los elementos de sus tecnologías habilitadoras, la personalización, los nuevos modelos comerciales y los sistemas conectados (Figura 85).

	Producción Lean		Industria 4.0
 Acercamiento	holístico (humano + tecnología + organización)	↔	impulsado por la tecnología
 Filosofía	desarrollo de personas + resolución de problemas	↔	factibilidad, (auto) optimización
 Fundación	estabilidad y estandarización	+	interconectividad, adaptabilidad
 Principio de control	fluir, tirar, FiFo	+	dinámico, dependiendo de la situación actual
 Mejora + resolución de problemas	Proactivo → estándar anomalía → reactiva	+	aprendizaje basado en datos → predictivo
 Adquisición de información	lugar real, material real ('Ir y Ver')	+	provisión de datos específicos del problema, en tiempo real'

Figura 85 – Diferencias que mantienen Industrie 4.0 y la producción ajustada. Fuente: Enke (2018)

Otro punto de discusión es que Lean enfatiza la estabilidad y los productos estandarizados, mientras que I4.0 promueve procesos de autocontrol y correlación antes que la causalidad. Es importante destacar que el principio Andon es una secuencia para encontrar y resolver problemas en los que cualquiera que encuentre un error puede detener una línea de producción y que cada paso del trabajo se lleva a cabo de forma individual, autónomo e inteligente; por lo tanto, los problemas en una estación de trabajo no deberían influir en las demás.

Los especialistas Metternich et al. (2017) aseguran que la digitalización de la producción ajustada se complementará en el futuro mejorando los entornos de producción; también aseguran que la digitalización ha llegado y se encuentra disponible en procesos industriales, se caracterizan porque los estándares no existen y porque faltan KPI. Sólo cuando un equipo de trabajo comprenda la idea de la producción ajustada y aplique sus herramientas con precisión y confianza, la digitalización proporcionará el próximo impulso al incremento de la productividad.

Por otro lado, el especialista Brusa (2019), dice que la digitalización no puede reemplazar el enfoque del valor de la producción ajustada, como, por ejemplo, el desarrollo de las competencias de los empleados a través de objetivos, liderazgo y la filosofía de mejora continua a través de la resolución sistemática de problemas. La combinación de los dos conceptos, dice, se podría acuñar bajo el término Lean4.0 (L4.0).

La Q4.0 tiene la capacidad de mantener la calidad en todo el proceso. Las organizaciones obtienen garantía de calidad en tiempo real y con documentación detallada disponible en cada paso del proceso. Ciertos dispositivos estarán más presentes en los procesos en un futuro muy próximo; gafas inteligentes y guantes inteligentes para control de la calidad, relojes inteligentes para gestión de no conformidades, impresión 3D en procesos de fabricación y simulación por realidad virtual para el desarrollo de productos (Broday, 2022).

Finalmente se puede citar a Arsovski (2019) quien en su trabajo "Social Oriented Quality: from Quality 4.0 towards Quality 5.0" dice que el nuevo modelo Q4.0-Plus deberá incluir la calidad de vida (QoL), en particular la calidad de vida laboral, la psicología positiva y

la calidad virtual (Virtual Quality) porque el entorno virtual en el futuro será dominante. Esto, junto a la centralidad del ser humano sería la denominada Calidad 5.0 (Q5.0).

4.2.8. Dimensiones de distintos Marcos de Referencia para la Q4.0

Diferentes autores han estudiado las características de la disponibilidad para la Q4.0, como también sus beneficios, barreras de entrada y factores críticos de éxito.

Se muestra a continuación una tabla que resume el abordaje de 12 de los más destacados autores que han estudiado este tema (Tabla 12).

Tabla 12 - Distintos abordajes de marcos de referencia de la Q4.0. Fuente: propia del autor

	PRONTITUD	BENEFICIOS	BARRERAS	CSF/DESAFÍOS	TECH4.0	HERRAMIENTAS Y PRÁCTICAS	PERSONAS & ORGANIZACIÓN	MEJORAS/ FASES
ANTONY	X	X	X					
ARMANI		X			X			
CARVALHO					X	X		
de Souza							X	
DUTTA								X
FOIDL					X			
GLOGOVAC					X		X	
JAVAID		X						
PSAROMMATIS		X		X				
SADER						X		
SAIHI								X
TAMBARE				X				
YADAV				X				
ZONNENSHAIN		X			X			

A partir de lo analizado se llega a la conclusión de que apenas la mitad de los estudios contemplan algún factor de impacto de las T4.0 en la Calidad, enfocándose primordialmente en el aspecto “soft” de la misma.

No se ha encontrado a la fecha ningún trabajo que analice el grado de impacto de cada T4.0 en cada fase del ciclo de vida del flujo de valor.

CAPÍTULO V

ESTUDIOS CUANTITATIVOS DE LA INDUSTRIA 4.0, BARRERAS DE ENTRADA Y CALIDAD 4.0 EN LA ARGENTINA

5. ESTUDIOS CUANTITATIVOS DE LA INDUSTRIA 4.0, BARRERAS DE ENTRADA Y CALIDAD 4.0 EN LA ARGENTINA

5.1. INDUSTRIA 4.0 en la Argentina. Resultado del estudio cuantitativo.

Partiendo de la premisa de que la Q4.0 es una conjunción de la I4.0 más el TQM, se presenta en primera instancia un estudio cuantitativo de la I4.0 en la Argentina. Con ese fin, se toman en consideración factores humanos, organizacionales y tecnológicos. El resultado de éste es una descripción del estado de desarrollo de la I4.0 en la Argentina.

Tabla 13 - Encuesta I4.0

Contexto del estudio	Estudio realizado durante septiembre y octubre de 2021 en la Argentina en forma virtual. Durante la administración de las técnicas no hubo dificultad alguna para cumplir con la totalidad de las evaluaciones dentro de los tiempos planificados.
Casos	Empresas de manufactura y servicios radicadas en la Argentina.
Diseño	El diseño utilizado fue no experimental, específico y correlacional.
Muestra	Personas participantes con roles jerárquicos y operativos de las empresas seleccionadas como casos de estudios. No representarían estadísticamente a la población en estudio, pero sí son informantes claves. Criterio de inclusión por conveniencia. Personas participantes fuera del territorio argentino es criterio de exclusión.
Procedimiento	A partir de la base de datos de elaboración propia, en función de 30 años de desempeño profesional en el sector industrial, se procedió a categorizar a los mismos en contactos de primer y segundo grado. Se les

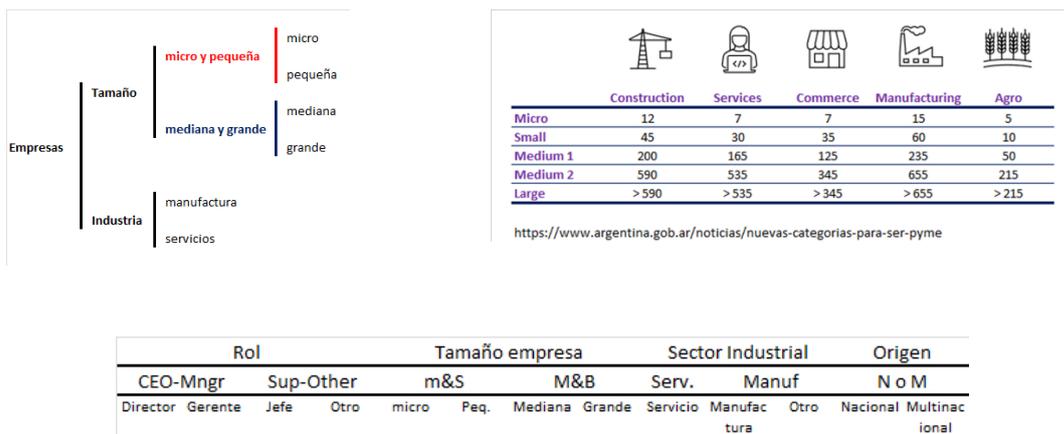
	suministro un cuestionario autoadministrado a través de internet, haciendo uso de emails y redes sociales. La colecta de datos se realizó en la plataforma e-encuesta™. Luego se extrajeron los datos los cuales fueron transcritos a una planilla electrónica donde fueron procesados. Para algunos otros análisis se procesaron los datos en el software estadístico Minitab™.
Instrumento	Instrumento “ad-hoc” basado en estudios similares a nivel global. Autoadministrado, anónimo, via web, plataforma: e-encuesta™
Cantidad de preguntas	40
Respuestas	Son de tipo Likert (escalas graduadas), bimodales o multimodales, univariadas o multivariadas según el caso.
Prueba Piloto	Se ha realizado una prueba piloto con 10 casos con el fin de probar la funcionalidad del instrumento.
Encuestas suministradas	425
Respuestas recibidas	156
Tasa de respuesta	36,7%
Respuestas válidas	121
Tasa de validez	77,5%

Participantes - Característica

Los encuestados participantes fueron categorizados conforme al rol que desempeñan en su lugar de trabajo y las empresas en las que trabajan de acuerdo con su origen, tamaño y sector industrial.

En resumen, las 121 muestras se clasificaron según: (1) el rol del encuestado, (2) el tamaño de su empresa, (3) la región en la que se encuentra la empresa, (4) el tipo de industria, (5) si dicha empresa es nacional o multinacional, (6), (7) y (8) son preguntas de caracterización del entrevistado, preguntándole respectivamente si (6) conoce la I4.0, (7) si piensa que el sector privado es un impulsor de la gestión y tecnologías innovadoras y finalmente (8) si considera que el rol de los gobiernos es un factor clave para el desarrollo de la industria 4.0 en la Argentina.

La clasificación principal utilizada para el análisis es la que se muestra en la siguiente (Figura 86). Tal como se puede observar, las empresas se han clasificado de acuerdo con su tamaño y sector industrial. En el caso de los respondientes, se clasifican los roles como Directores, Gerentes, Supervisores y otros.



Rol		Tamaño empresa			Sector Industrial			Origen				
CEO-Mngr	Sup-Other	m&S	M&B		Serv.	Manuf	N o M					
Director	Gerente	Jefe	Otro	micro	Peq.	Mediana	Grande	Servicio	Manufac tura	Otro	Nacional	Multinac ional

Figura 86 - Caracterización encuestados I4.0

Dimensiones

Las preguntas desde la (9) a la (40) son las 32 variables utilizadas para analizar el nivel de disponibilidad de la I4.0 en la Argentina. Dichas 32 variables se agruparon en 5 dimensiones, tal como se desarrolló en el marco teórico y se muestra en la Figura 87.

Trabajo Inteligente y Organización	Sistemas de Información	Manufactura Inteligente
Roadmap Industry 4.0	CRM	Sensing
Training multi skills	ERP	MES
Innovation initiatives	PPM	Smart energy
Process Management	PLM	Predictive Maintenance
Agile Management	EQM	Flexible Manufacturing
Collaboration Networks models	EHSM	
Tecnologías Base	Cadena de Valor Inteligente	
IoT	Materials and parts trazability	
CC	Digital Integrations with suppliers	
Big Data and Analytics	Digital integration with clients	
CPS / Cobots	Product trazability (on clients)	
Information Security	Remote monitoring of Products	
3D	Machines controlled by Products	
VR / AR	Intelligent Products	
Simulation / Digital twin		

Figura 87 - Cinco dimensiones de la I4.0 en la Argentina. Fuente propia del autor.

5.1.1. Análisis de la I4.0 en la Argentina

Se observa en la Figura 88 los resultados obtenidos a partir de la encuesta I4.0; éstas ilustran claramente las cinco dimensiones consideradas. En general se puede inferir que existe un escaso desarrollo de estas últimas, pero entre ellas la que se coloca en primer orden es el de Sistemas de Información. Además, se observa una amplia dispersión de las respuestas sobre la dimensión de las tecnologías base, lo que sugiere que existen diferentes grados de desarrollo de acuerdo al sector evaluado.

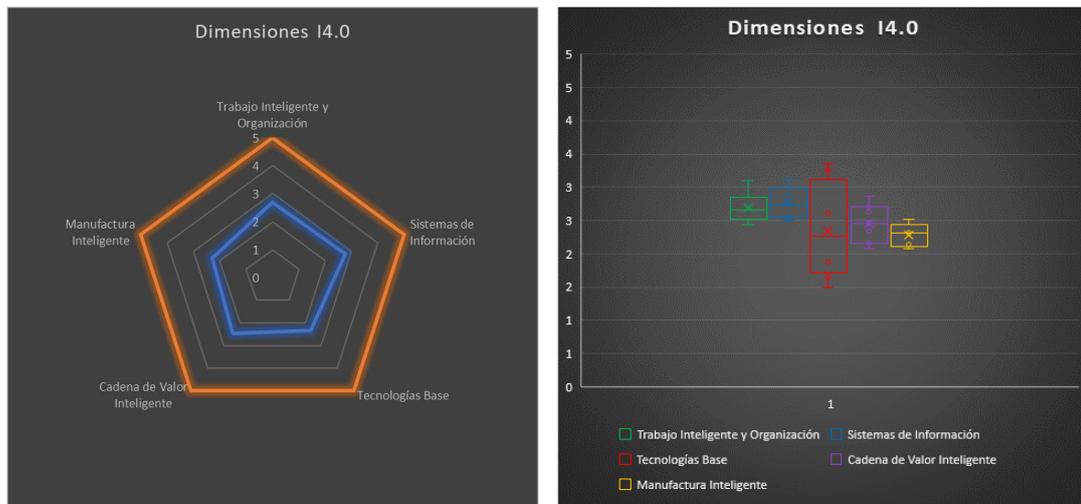


Figura 88 - Resultados de las 5 dimensiones de la I4.0 en la Argentina

Se realizó un cálculo de medianas a partir de las pruebas Mann-Whitney, obteniéndose los resultados que se muestran a continuación en las figuras 89 y 90.

Two-Sample T-Test and CI: Small; Big

Method

μ_1 : mean of Small
 μ_2 : mean of Big
 Difference: $\mu_1 - \mu_2$

Equal variances are not assumed for this analysis.

Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
Small	47	2,431	0,922	0,13
Big	53	2,97	1,13	0,16

Estimation for Difference

Difference	95% CI for Difference
-0,541	(-0,949; -0,134)

Test

Null hypothesis	$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$	
Alternative hypothesis	$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$	
T-Value	DF	P-Value
-2,64	97	0,010

Mann-Whitney: Small; Big

Method

η_1 : median of Small
 η_2 : median of Big
 Difference: $\eta_1 - \eta_2$

Descriptive Statistics

Sample	N	Median
Small	47	2,25
Big	53	3,00

Estimation for Difference

Difference	CI for Difference	Achieved Confidence
-0,5	(-1; -0,0833333)	95,02%

Test

Null hypothesis	$H_0: \eta_1 - \eta_2 = 0$	
Alternative hypothesis	$H_1: \eta_1 - \eta_2 \neq 0$	
Method	W-Value	P-Value
Not adjusted for ties	2018,50	0,014
Adjusted for ties	2018,50	0,014

Figura 89 - Two sample T test. Fuente: propia del autor Figura 90 - Mann-Whitney test. Fuente: propia del autor

Se realizó también una prueba Alpha de Cronbach para cada conjunto de preguntas, superando todos ellos el valor de 0,8 (Figura 91). Se sabe, por convención, que valores del alfa superiores a 0,7 ó 0,8 (dependiendo de la fuente) son suficientes para garantizar la fiabilidad de la escala, por lo que se considera que el resultado de las escalas utilizadas en este estudio son aceptables.

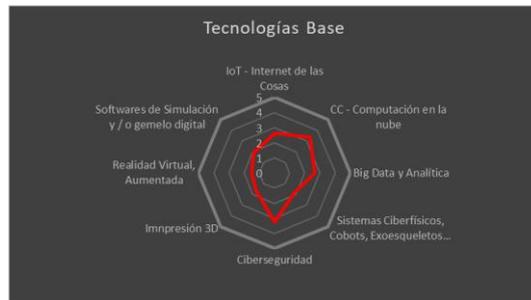
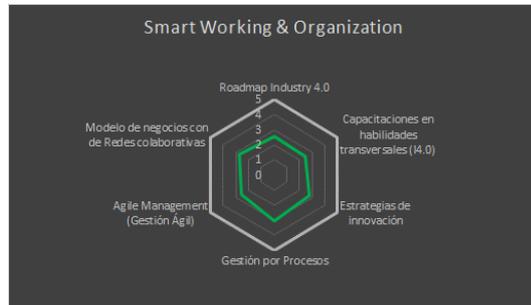
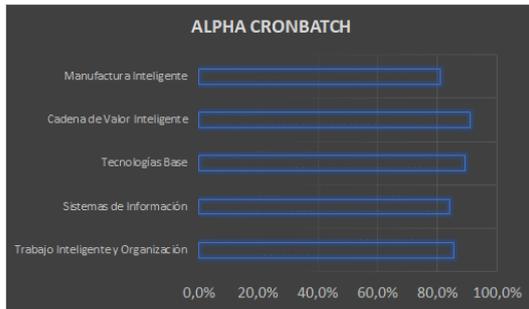




Figura 91 – Prueba Alpha Cronbach

En la Figura 92 se muestran los resultados obtenidos para cada una de las dimensiones con sus respectivos factores. Se observa también el resultado general de cada dimensión. Es de destacar que, en el caso de las tecnologías habilitadoras, el factor mejor posicionado es ciberseguridad y el menos desarrollado el de VR/AR.

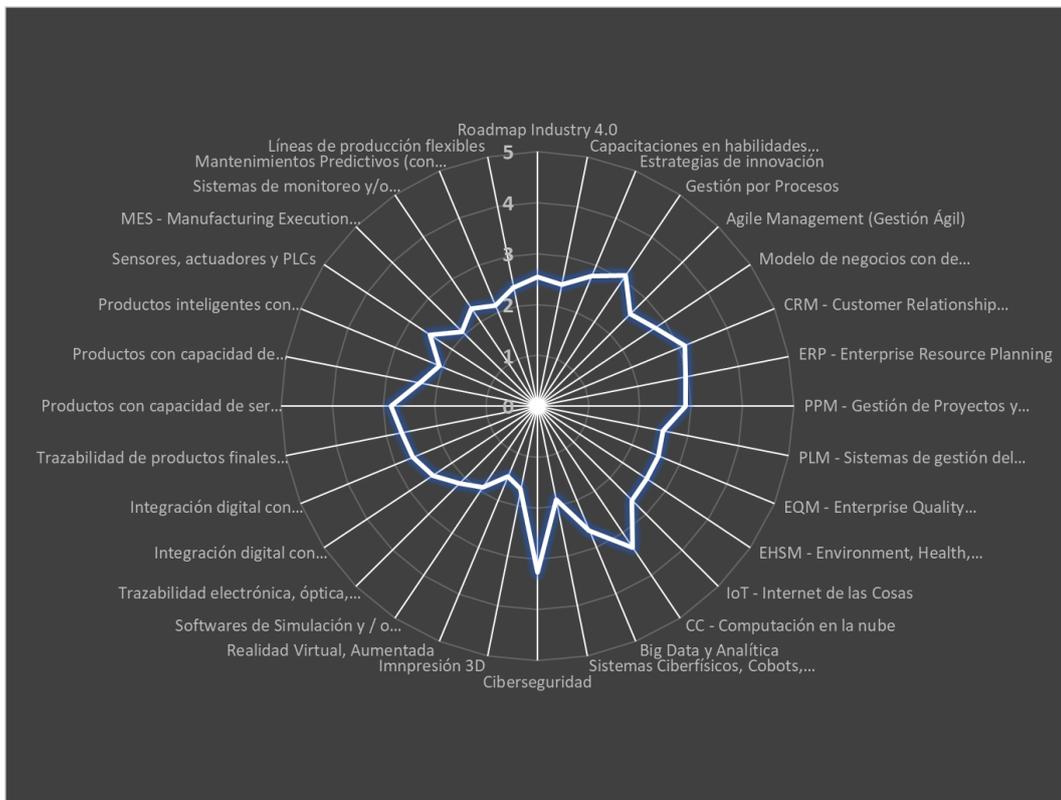


Figura 92 - Resultados de los 32 factores de la I4.0 en la Argentina

Se realiza también un análisis comparativo de cada dimensión considerando el tamaño de la empresa. De ello se comprueba que aquellas medianas y grandes empresas son las que se encuentran en un mayor nivel de desarrollo (Figura 93).

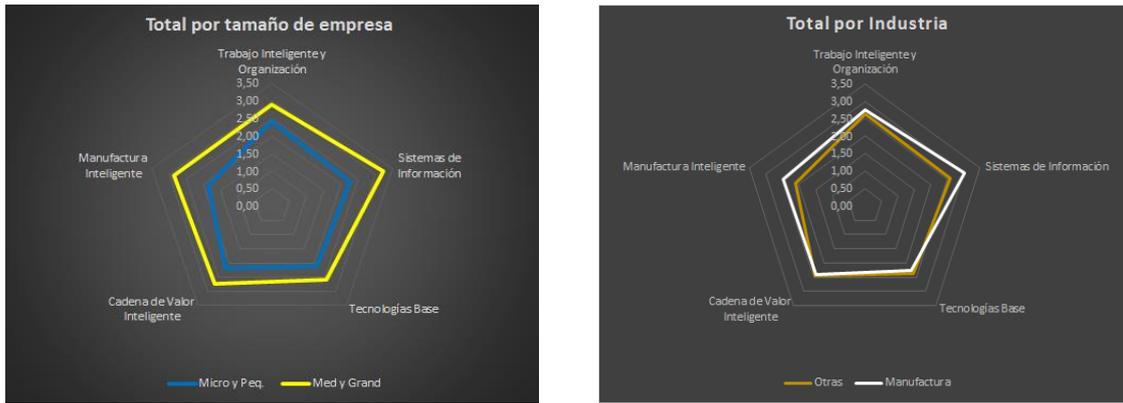


Figura 93 - Resultados de los 32 factores de la I4.0 en la Argentina

Debido al interés particular en este estudio en la industria manufacturera, se realizó un análisis más detallado sólo para dicho segmento (Figura 94).

En el análisis para este segmento en particular, se comprueba también que la CC y la ciberseguridad, son los dos factores más adoptados por la industria de manufactura.

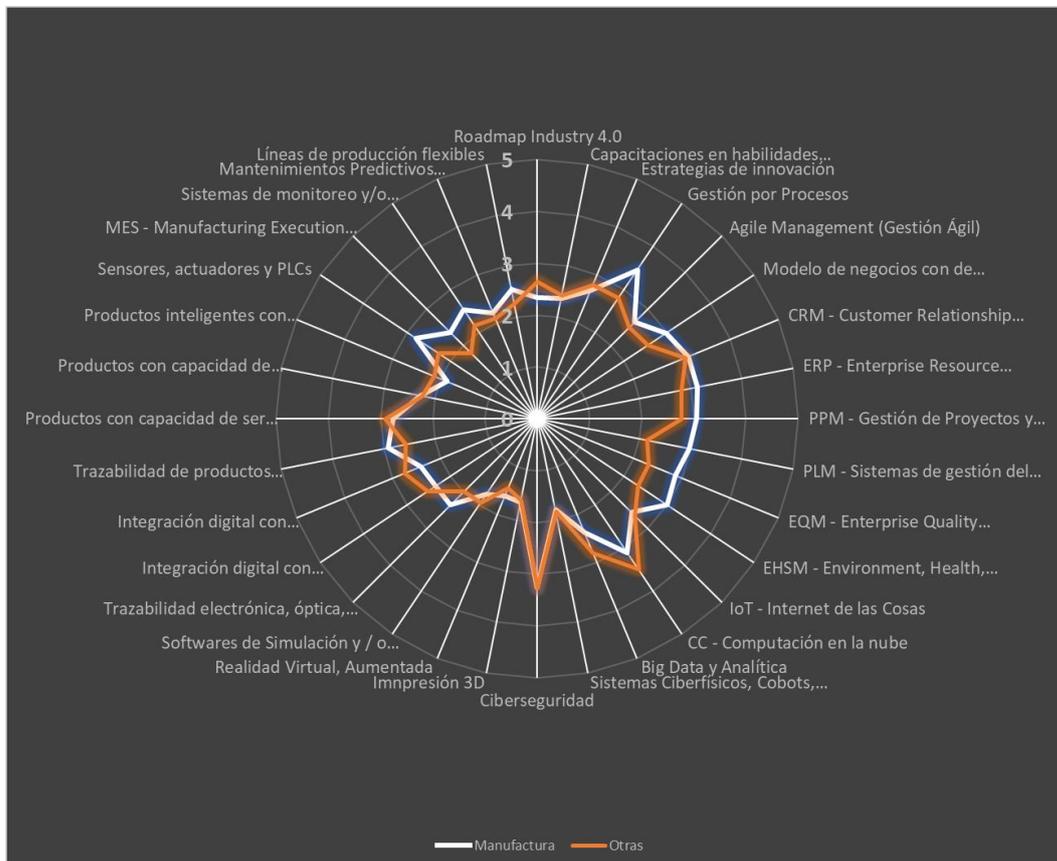


Figura 94 - Resultados de los 32 factores del sector manufactura en la Argentina

Observando el análisis general de los 32 factores de la I4.0 en la Argentina (Figura 95), puede verse claramente que las medianas y grandes empresas están en un nivel de adopción superior que las pequeñas y microempresas, en lo referente a las tecnologías habilitadoras de la I4.0.

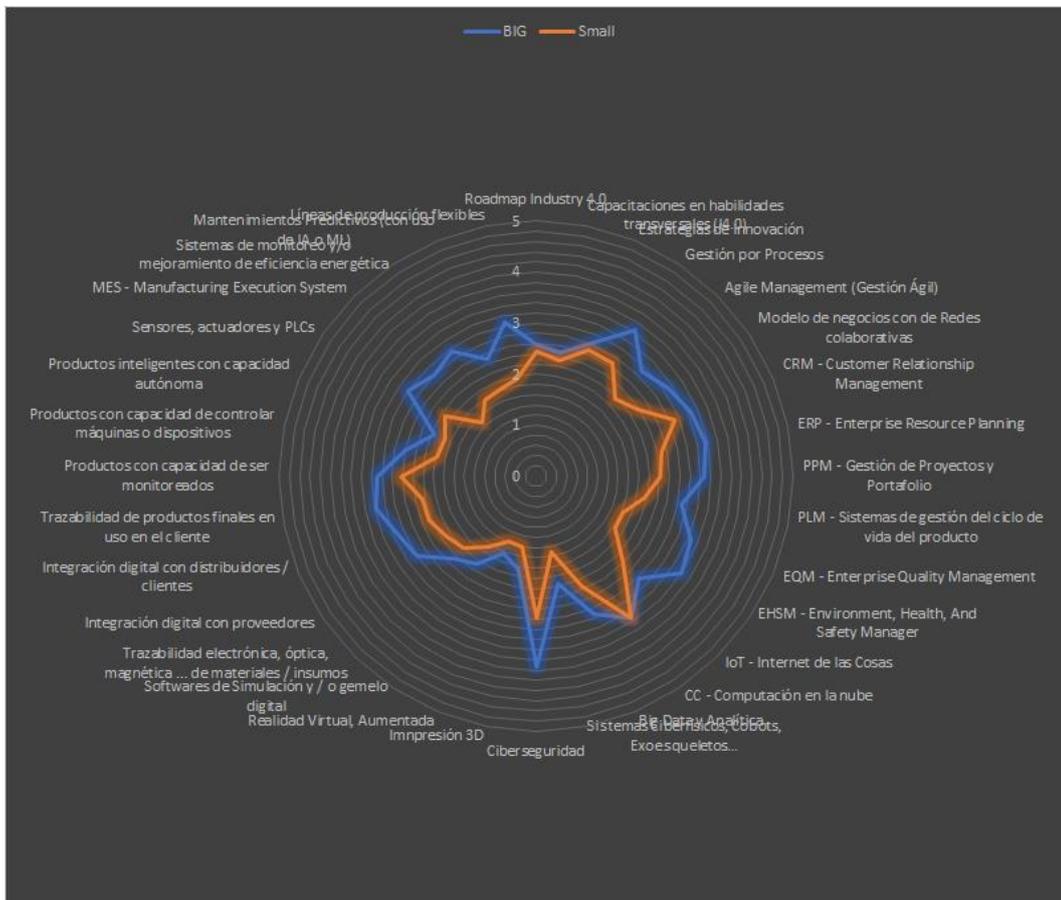


Figura 95 - Análisis general de los 32 factores I4.0 en la Argentina

5.1.2. Conclusiones sobre la encuesta 1: I4.0 en la Argentina

- Todos los resultados están basados en pruebas estadísticas, habiéndose realizado pruebas de normalidad, consistencia e hipótesis, entre otras. Para ello se trabajó con el software MS Excel™ y Minitab™, considerando que fueron adecuados para dichos análisis.
- El desarrollo de I4.0 en Argentina está en un nivel de 2,49 (en una escala de 0 a 5). Esto indica que su desarrollo está aún a mitad de su recorrido.
- Sobre las 5 cinco dimensiones propuestas, el mejor desempeño se encuentra en los Sistemas de Información, con un valor promedio general de 2.76 sobre 5.
- El peor desempeño de entre las 5 cinco dimensiones del marco de referencia fue para Manufactura Inteligente, con una puntuación de 2,27 sobre 5.
- Contrariamente a lo que se hipotetizó al inicio de este estudio, no existe suficiente evidencia estadística para confirmar una diferencia estadísticamente significativa entre la tasa promedio de desarrollo de los sectores de servicios y manufactura.
- Sin embargo, si se analiza cada dimensión por separado, se verifica un mejor desempeño en las de Organización y Trabajo Inteligente (Manufactura: 2.7 vs. Servicio 2.2) y Sistemas de Información (también Manufactura: 2.7 vs. Servicio 2.2).

- Cuando se analiza según el tamaño de la empresa, se confirma la hipótesis de una marcada diferencia en el desarrollo de las medianas y grandes con respecto a las micro y pequeñas empresas. Las 5 cinco dimensiones están más desarrolladas en los casos de medianas y grandes empresas que en las micro y pequeñas.

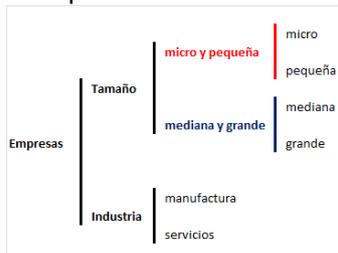
5.2. BARRERAS DE ENTRADA a la Industria 4.0 en la Argentina. Resultados del estudio cuantitativo.

En esta segunda fase se realiza un análisis cuantitativo de las barreras de entrada a la I4.0 en la Argentina, para el cual se sigue el lineamiento del estudio anterior (Tabla 14).

Tabla 14 - Encuesta Barreras a la I4.0

Contexto del estudio	Estudio realizado durante noviembre y diciembre de 2021 en la Argentina en forma virtual. Durante la administración de las técnicas no hubo dificultad alguna para cumplir con la totalidad de las evaluaciones, y todo ello dentro de los tiempos planificados.
Casos	Empresas de manufactura y servicios radicadas en la Argentina.
Diseño	El diseño utilizado fue no experimental, específico y correlacional.
Muestra	Personas participantes con roles jerárquicos y operativos de las empresas seleccionadas. No representarían estadísticamente a la población en estudio, pero sí son informantes claves. Criterio de inclusión: por conveniencia. Criterio de exclusión: personas participantes fuera del territorio argentino.
Procedimiento	A partir de la base de datos de elaboración propia, en función de 30 años de desempeño profesional en el sector de industria, se procedió a categorizar a los mismos en contactos de primer y segundo grado. Se les suministro un cuestionario autoadministrado a través de internet, haciendo uso de emails y redes sociales. La colecta de datos se realizó en la misma plataforma e-encuesta™. Luego se extrajeron los datos los cuales fueron transcritos a una planilla electrónica donde fueron procesados. Para algunos otros análisis se procesaron los datos en el software estadístico Minitab™.
Instrumento	Instrumento “ad-hoc” basado en estudios similares a nivel global. Autoadministrado, anónimo, via web, plataforma: e-encuesta.
Cantidad de preguntas	21
Respuestas	Son de tipo Likert (escalas graduadas), bimodales o multimodales, univariadas o multivariadas, según el caso.
Prueba Piloto	Se ha realizado una prueba piloto de 10 casos con el fin de probar la funcionalidad del instrumento.
Encuestas suministradas	425
Respuestas recibidas	115
Tasa de respuesta	27%
Respuestas válidas	108
Tasa validez	93,9%

Participantes. Características



	Construction	Services	Commerce	Manufacturing	Agro
Micro	12	7	7	15	5
Small	45	30	35	60	10
Medium 1	200	165	125	235	50
Medium 2	590	535	345	655	215
Large	> 590	> 535	> 345	> 655	> 215

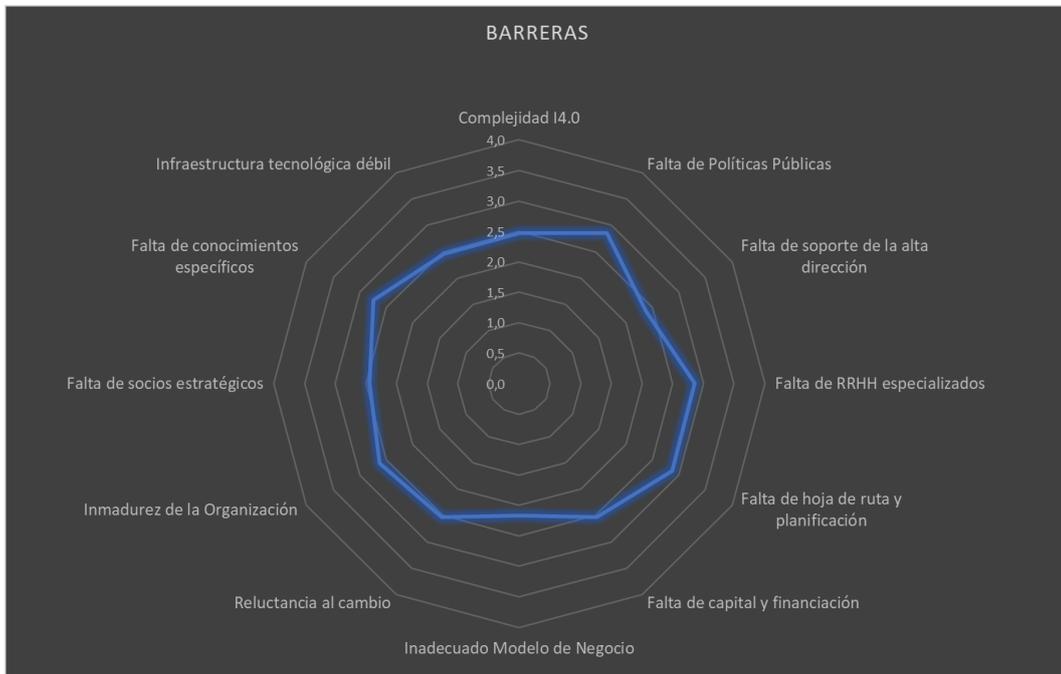
<https://www.argentina.gob.ar/noticias/nuevas-categorias-para-ser-pyme>

Rol				Tamaño empresa			Sector Industrial			Origen		
CEO-Mngr		Sup-Other		m&S	M&B		Serv.	Manuf	Otro	N o M		
Director	Gerente	Operativos	Otro	micro	Peq.	Mediana	Grande	Servicio	Manufactur	Otro	Nacional	Multinacional

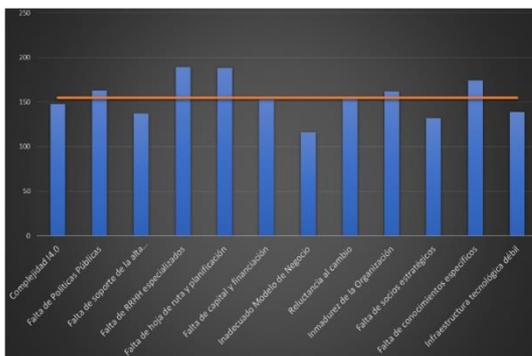
Figura 96 - Caracterización encuestados Barreras I4.0

5.2.1. Análisis de Barreras de entrada a la I4.0

En base a la revisión bibliográfica a nivel global expuesta en la presente tesis, se han estudiado entre los autores más importantes y destacados: (Cottrino et al., 2020), (Dikhanbayeva et al., 2021), (Essakly et al., 2019), (Fayomi et al., 2020), (Genest & Gamache, 2020), (Horváth & Szabó, 2019), (Huang et al., 2019), (Ingaldi & Ulewicz, 2020), (Kruszewska et al., 2021), (Kumar et al., 2021) y (Mezentseva, 2021). Previamente, se realizaron entrevistas a las empresas argentinas seleccionadas como estudio de caso, entre ellas: Lerca, Lara, Datastar y Nextvision, se diseñó el instrumento y analizaron las siguientes barreras de entrada, tanto tecnológicas como no tecnológicas. En la Figura 97 se muestran los resultados anteriormente descriptos.



(a) 12 barreras de entrada a la I4.0



(b) Media y las 12 barreras de entrada a la I4.0



(c) Análisis de sensibilidad de las 12 Barreras

Figura 97 - Barreras de entrada a la I4.0 en la Argentina. Fuente: propia del autor

Se realiza una comparación de las 12 Barreras de entrada a la I4.0 desde la perspectiva de las pyme y grandes empresas. Se observa claramente en la Figura 98 que las barreras de entrada son mucho más severas para las pyme que para las grandes empresas.

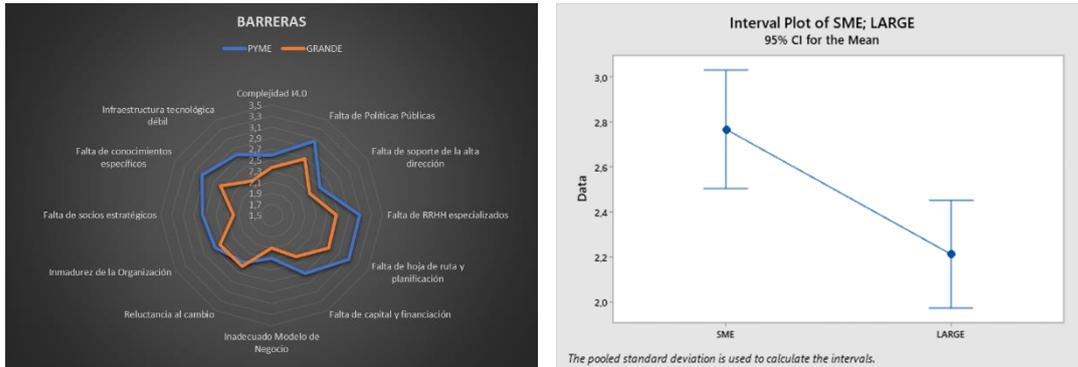


Figura 98 - Barreras - Comparación por tamaño de las empresas. Fuente: propia del autor

Realizando ahora la comparación entre empresas de origen nacional y las de origen extranjero, se puede ver en la Figura 99 que no existe una diferencia estadísticamente representativa entre ambas, razón por la cual no se puede concluir que ambas sufran barreras de diferente índole o intensidad.

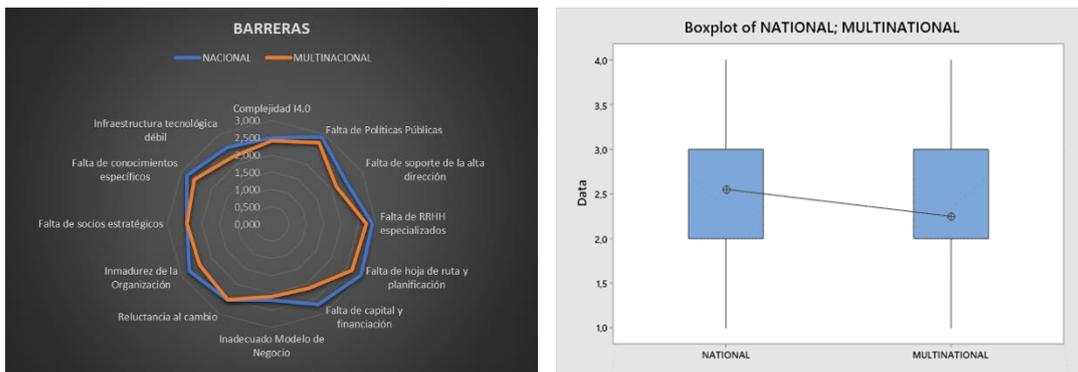


Figura 99 - Barreras - Comparación por origen de las empresas. Fuente: propia del autor

Finalmente, al analizar los datos provenientes de las empresas de manufactura y compararlas con las de servicio, se podría afirmar que estas últimas encuentran mayores barreras de entrada que las primeras, tal como se ilustra en la Figura 100.

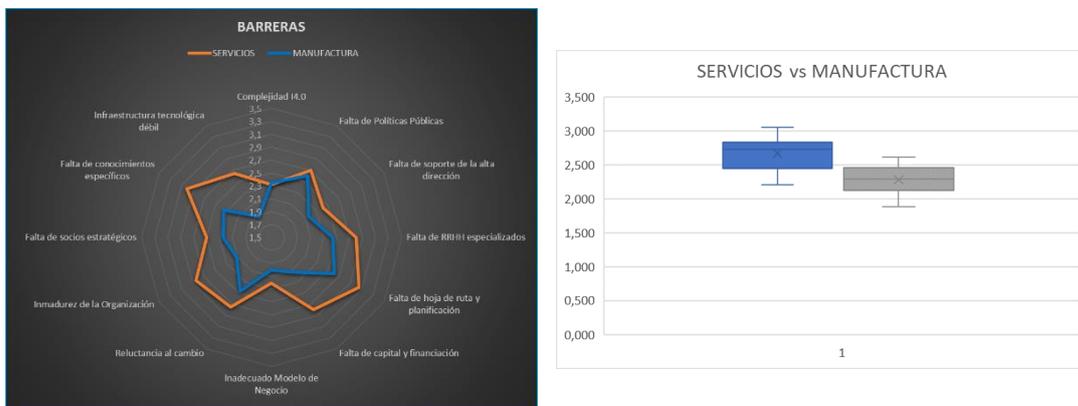


Figura 100 - Comparación industrias manufactureras y de servicios. Fuente: propia del autor

5.2.2. Conclusiones sobre la encuesta “Barreras de Entrada a la I4.0”

En una comparación entre los que estuvieron Totalmente de Acuerdo y Muy de Acuerdo, menos, los que para esas mismas consignas estuvieron Poco de Acuerdo o en Desacuerdo, se observa que hay 7 factores con pesos claramente positivos. Ellos son, en orden de importancia:

- Falta de recursos humanos especializados.
- Falta de hoja de ruta y planificación.
- Falta de Políticas Públicas.
- Falta de conocimientos específicos en la I4.0.

y de aquellas que se mencionan con menor frecuencia, aparecen las siguientes tres:

- Falta de capital y financiación.
- Reluctancia al cambio.
- Inmadurez de la organización.

Por su parte, esos los mismos encuestados no estuvieron de acuerdo con las siguientes afirmaciones, por lo que se deduce que para ellos no son barreras de entrada a la I4.0 los siguientes factores:

- Inadecuado modelo de negocio.
- Falta de apoyo de la alta dirección.
- Falta de socios estratégicos.
- Complejidad de la I4.0

Existe una afirmación en la que se encontraron opiniones divididas, y tiene que ver con la infraestructura tecnológica débil.

Cuando se analizan las respuestas tomando en consideración el tamaño de la empresa, existe efectivamente, una diferencia estadísticamente representativa entre las micro y pequeñas, comparadas con las medianas y grandes. Para el caso de las micro y pequeñas se nota un mayor índice de dificultad, o sea, barreras de entrada más altas.

Por su parte, cuando se comparan las empresas de origen nacional con las de origen multinacional (extranjeras) no se puede afirmar, estadísticamente, que exista diferencia entre ellas. Es decir, ambas adolecen del mismo grado de obstáculos para ingresar a la I4.0.

En otro análisis comparativo, en este caso entre empresas de servicios y de manufactura, los resultados indican que las empresas de servicios tendrían mayor dificultad para afrontar los desafíos para entrar en al I4.0.

Se observa en el la siguiente Figura 101 un diagrama radar que muestra las 12 barreras analizadas para los segmentos de:

- SM: Micro y Pequeñas empresas.
- L: Medianas y Grandes empresas.
- N: de origen argentino.
- M: de origen extranjero.
- SE: de servicios.
- E: de manufactura electrónica.

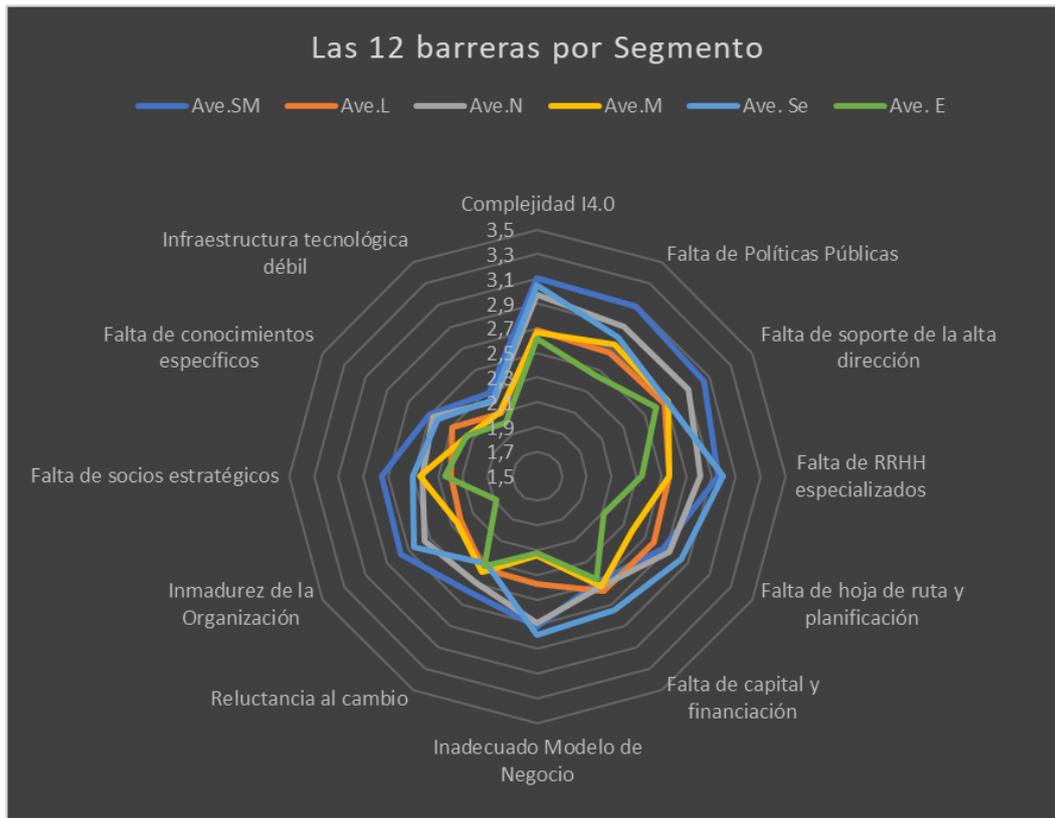


Figura 101- Las 12 barreras por Segmento

Se listan a continuación las 12 barreras estudiadas y su importancia en cuanto al entorpecimiento que le generarían a las empresas para ingresar en la I4.0. Considerando el valor 5 como el barrera máxima, mientras que el valor de 0 representa la ausencia de la misma.



Figura 102 – Resultado 12 barreras

Finalmente, y considerando que el factor tecnológico ocupa un lugar central en la I4.0, se muestra en la siguiente (Figura 103) las medias y desvíos de para cada uno de los segmentos industriales estudiados.

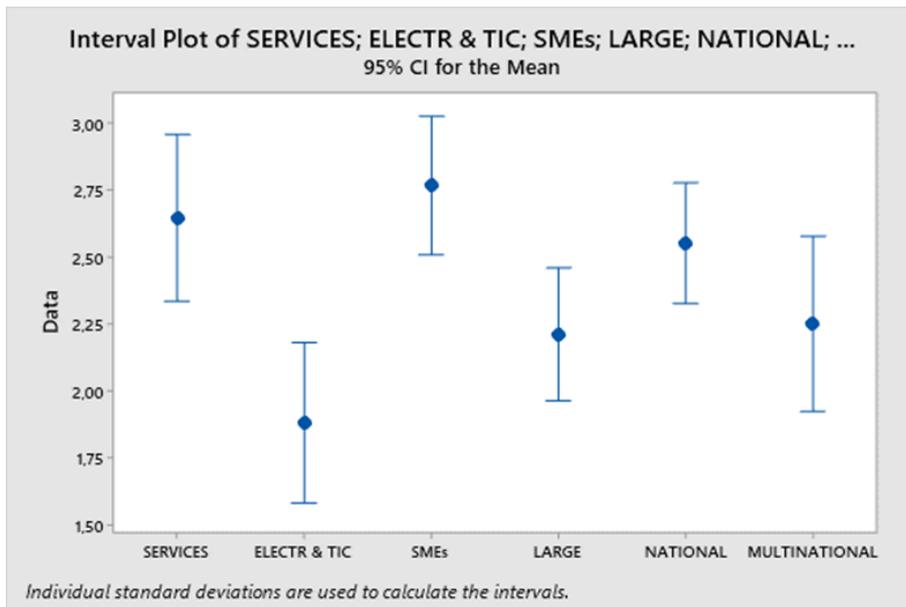


Figura 103 – Barreras de Infraestructura tecnológica

5.3. CALIDAD 4.0 en la Argentina. Resultados del estudio cuantitativo.

5.3.1. Análisis de la Calidad 4.0 en la Argentina

Este tercer paso corresponde a la aplicación del Marco de Referencia para la Q4.0 desarrollado a partir del estudio de diversos investigadores en todo el mundo. Una vez confeccionado, se pasa a realizar un estudio cuantitativo del estado de la Q4.0 en la Argentina, para luego desarrollar una hoja de ruta que colabore con las organizaciones que deseen implementarla (Figura 104).

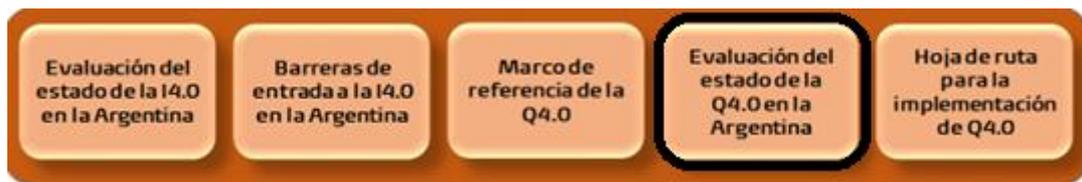


Figura 104 – Estudio de la I4.0 y la Q4.0. Fuente: propia del autor

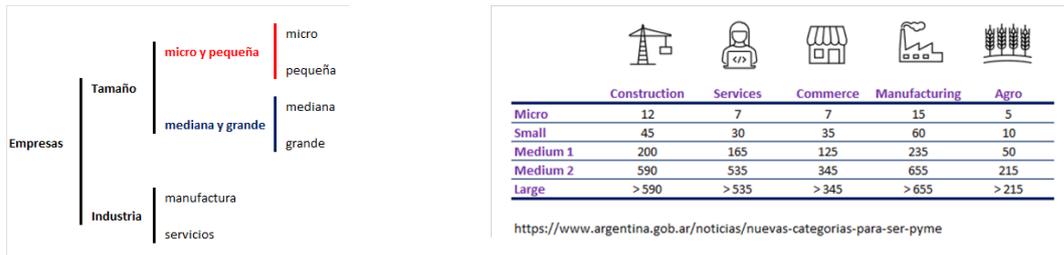
Se presenta en la siguiente Tabla 15 la caracterización de la encuesta de Q4.0 en la Argentina, la tercera de la presente tesis.

Tabla 15 - Encuesta Calidad 4.0

Contexto del estudio	Estudio realizado durante septiembre y octubre de 2022 en la Argentina en forma virtual. Durante la administración de las técnicas no hubo dificultad alguna para cumplir con la totalidad de las evaluaciones, y todo ello dentro de los tiempos planificados.
Casos	Personas con roles directivos, gerenciales y operativos vinculados a la Gestión de la Calidad en empresas de manufactura radicadas en la Argentina.
Diseño	El diseño utilizado fue “no experimental”, específico y correlacional.

Muestra	Criterio de inclusión por conveniencia. Personas que aceptan participar del estudio. No representarían estadísticamente a la población en estudio, pero sí son informantes claves. Criterio de exclusión: respondientes fuera de la Argentina.
Procedimiento	A partir de base de datos propias en función de 30 años de carrera en el sector de industria, se procedió a suministrar a contactos de 1er y 2do grado el cuestionario autoadministrado a través de internet. Se utilizó tanto email como redes sociales. La colecta de datos se realizó en la misma plataforma e-encuesta™. Luego se extrajeron los datos los cuales fueron volcados a una planilla electrónica donde fueron procesados. Para algunos otros análisis se volcaron los datos en el software estadístico Minitab™.
Instrumento	Instrumento “ad-hoc” basado en estudios similares a nivel global. Autoadministrado, anónimo, via web, plataforma: e-encuesta
Cantidad de preguntas	40
Respuestas	Tipo Likert (escalas graduadas), bimodales o multimodales, univariadas o multivariadas según el caso.
Prueba Piloto	Se ha realizado una prueba piloto de 10 casos con el fin de probar la funcionalidad del instrumento.
Encuestas suministradas	388
Respuestas recibidas	187
Tasa de respuesta	48,2%
Respuestas válidas	129
Tasa validez	69,0%

Caracterización de los encuestados



	Rol		Tipo		Tamaño empresa				Sector Industrial			Tipo		Origen			
	CEO-Mngr		Sup-Other		Rol de Gestión de		m&S		M&B	Serv.	Manuf		P o S		N o M		
	Directivos	Gerenciales	Operativos	Otro	Sí	No	micro	Peq.	Mediana	Grande	Servicio	Manufatura	Otro	Productos	Servicios	Nacional	Extranjera
Tech 4.0																	
Uso herramientas para la Gestión de la Calidad																	
Cadena inteligente																	
Org. y Gestión de la Calidad																	

Figura 105 - Caracterización de los encuestados

Tal como se desarrollara en el marco teórico, se sigue la recomendación de la RAMI4.0 para el estudio de las diferentes fases y subfases del ciclo de vida del flujo de valor. Se detalla a continuación (Tabla 16) la clasificación del ciclo de vida de un producto dentro de la recomendación antes mencionada.

Tabla 16 - Clasificación de las fases del ciclo de vida de un producto

DESARROLLO	MANTENIMIENTO de DESARROLLO	PRODUCCIÓN	MANTENIMIENTO de PRODUCCIÓN y USO	
I+D	Actualizaciones	Operaciones / Producción	Mktng y Ventas	POSVENTA
Conceptualización	Configuración	Almacenaje	Distribución	Disolución
Creación	Updates	Ensamblaje	Logística	Eliminación
Definición	Upgrades	Extracción	Ventas & Marketing	Mantenimiento de producto
Desarrollo	Actualización de documentación	Industrialización		Reciclaje
Diseño		Manufactura		Re-uso
Planificación		Operaciones		Servicios posventa
Prototipado		Procesamiento de materiales		
Prototipado		Producción		

5.3.1.1. Análisis conforme a las dimensiones de la calidad del CQI

El primer análisis realizado, a partir de los resultados de la encuesta, consiste en la evaluación de las respuestas en base a las dimensiones recomendadas por expertos basadas en el CQI - Chartered Quality Institute (CQI).

Se toma como referencia esta institución, debido a que ella está entre las más activas en lo referente a la I4.0 y, consecuentemente, a la Q4.0, quien toma en consideración algunas de las tecnologías habilitadoras, diferenciando al CQI de las restantes asociaciones de la gestión de la calidad, siendo que prácticamente todas las demás se enfocan fundamentalmente en el comportamiento humano y de la organización.

Como se decía anteriormente, la CQI establece la utilización de tecnologías digitales en la gestión de la calidad con el fin de ofrecer de forma eficaz gobernanza, garantía y mejora continua, pero, sin embargo, no analiza cada T4.0 y su impacto de la Gestión de la Calidad en todo el ciclo de vida del flujo de valor.

En resumen, las dimensiones consideradas son: Gobernanza, Garantía & Aseguramiento de la Calidad, Aprendizaje & Mejora y Contexto tecnológico.

De la información obtenida en la encuesta, resulta que los participantes que se desempeñan con cargos de alta gerencia como aquellos que son operarios, presentan una leve diferencia en la percepción de las tecnologías. Para quienes tienen cargos de alta gerencia aparece una menor valoración de dichas tecnologías (Figura 106). Además, en el análisis comparativo de las respuestas obtenidas entre las micro y pequeñas empresas (μ s) con las medianas y grandes empresas (ML) aparece una marcada diferencia en favor de estas últimas sobre la apreciación de las cuatro dimensiones en cuestión (Figura 107).

Observando los gráficos siguientes se podría concluir que:

- De entre el personal encuestado de la alta gerencia y los operativos, se observa una leve diferencia a favor por parte de los roles operativos en la percepción de las tecnologías utilizadas, coincidiendo casi exactamente en las restantes dimensiones. De cualquier forma, se puede observar según los respondientes, una escasa aplicación de las nuevas tecnologías para con el aseguramiento de la calidad.
- Por otra parte, cuando se analizan las respuestas de las micro y pequeñas empresas, comparándolas con las medianas y grandes, se puede observar una diferencia importante a favor de estas últimas (Figura 107).

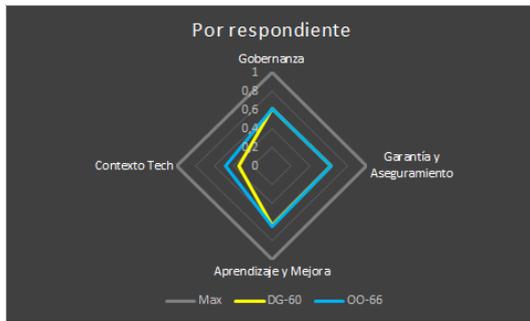


Figura 106 – Análisis CQI por cargo

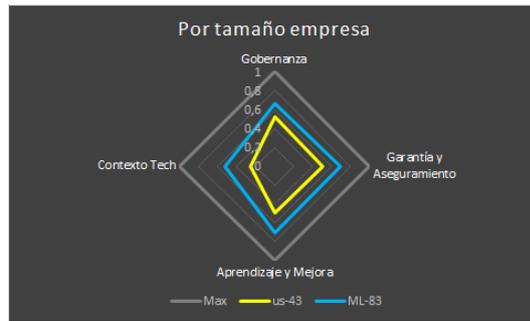


Figura 107 - Análisis CQI por tamaño empresa

Como se muestra en la Figura 108, se observan las respuestas en base al origen de las empresas nacionales (argentinas) o de origen extranjero (no argentinas); teniendo en cuenta además si son principalmente exportadoras (Figura 109). Sobre las empresas de origen extranjero, consideradas en la categoría de multinacionales, aparecen mejor calificadas en las cuatro dimensiones en comparación con aquellas de origen nacional. En cuanto a las empresas con perfil exportador, estas muestran también una mayor calificación en las cuatro dimensiones en comparación con aquellas empresas no exportadoras.

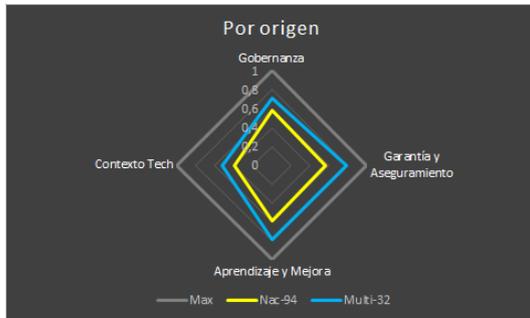


Figura 108 – Análisis CQI de las empresas por su origen



Figura 109 - Análisis CQI de las empresas por su perfil exportador

De acuerdo con la información recabada se puede inferir que las empresas de origen extranjero califican mejor en las cuatro dimensiones, tal vez, debido a las exigencias que tienen las mismas en materia de normas o estándares en el marco internacional en comparación con el ámbito nacional, en donde la adopción de estas normas por parte de las empresas a veces es a discreción. En este sentido también se puede pensar en el impacto que tienen las exigencias de los mercados internacionales y la competencia en lo referente a la calidad, ya que en general la diferencia no es tan importante en las tecnologías habilitadoras, sino en su aplicación a la gestión de la calidad.

Sobre el análisis de las respuestas analizadas aparece la industria farmacéutica como el sector industrial que mejor califica en las cuatro dimensiones; en cuanto al uso de las tecnologías en particular se equipara a la industria del sector automotriz. Esta característica coincide con la bibliografía consultada. En contraposición, tal como se verá luego en detalle, se halló que las industrias de alimentación y metalmecánica argentinas están entre las peores calificadas (Figura 111).

Se puede observar también en los gráficos a continuación, un análisis de las industrias más representativas de la muestra tomada para la encuesta. A partir de ellas, se puede concluir que:

- En consonancia con lo esperado a partir de lo analizado en la búsqueda bibliográfica, la industria farmacéutica es la que mejor califica en las cuatro dimensiones, igualando su calificación con la automotriz en lo referente al uso de tecnología.

- En contraposición a ello, las industrias de alimentación y metalmecánica argentinas están entre las peores calificadas (en la presente muestra). De todas formas, no se puede concluir definitivamente hasta no analizar las categorías en detalle. Una hipótesis sería que la proporción importante de pyme en el resultado de las alimenticias, que, en el caso de la Argentina tiene un componente artesanal y familiar muy fuerte, y tal lo visto anteriormente, carecen de un suficiente desarrollo en lo tocante a la Gestión de la Calidad.

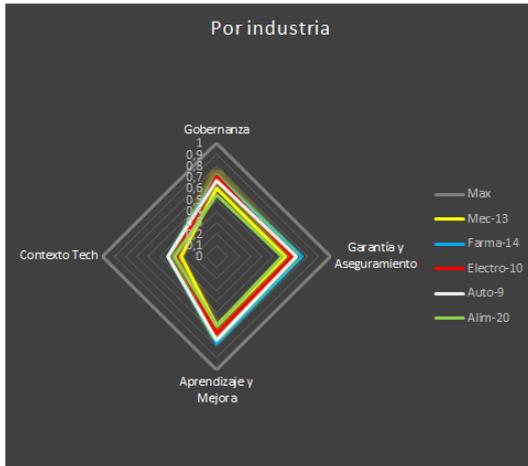


Figura 110 – Análisis CQI por sector industrial

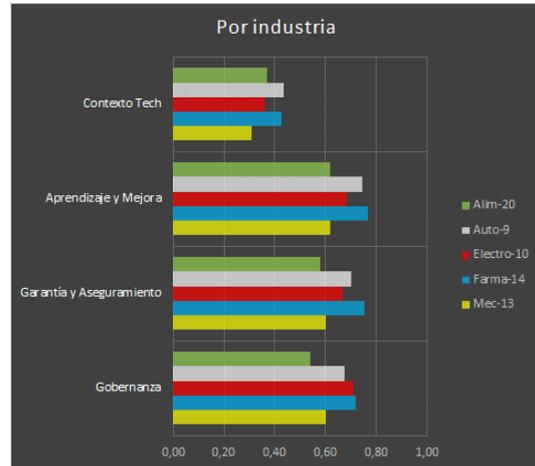


Figura 111 - Análisis CQI por sector industrial

Del análisis anterior se puede pensar que en Argentina la afectación deficiente sobre el desarrollo de la Gestión de la Calidad se debe a la importante proporción de pymes en el sector alimenticio de carácter artesanal y enmarcadas fundamentalmente en emprendimientos familiares.

5.3.1.2. Análisis conforme el Ciclo de vida de Flujo de Valor de la RAMI4.0

Finalmente, se analizan a continuación las diferentes tecnologías habilitadoras utilizadas en cada fase y subfase del ciclo de vida del flujo de valor, conforme las recomendaciones de la RAMI4.0. Para ello se considera la información aportada por los participantes de acuerdo con el rol y cargo que tienen en la empresa en la cual trabajan (Figura 112). Se puede observar que al menos 1 de cada 3 empresas no utilizan ninguna T4.0 a lo largo de todo el flujo de valor. Sobre ello, aparece nuevamente, una divergencia desde la perspectiva en los participantes con cargos en la alta gerencia respecto a aquellos con cargos operativos (Figura 113), aunque sin duda prevalece la no utilización. También se manifiesta una mayor utilización de T4.0 en la fase de producción, aunque no muy importante.

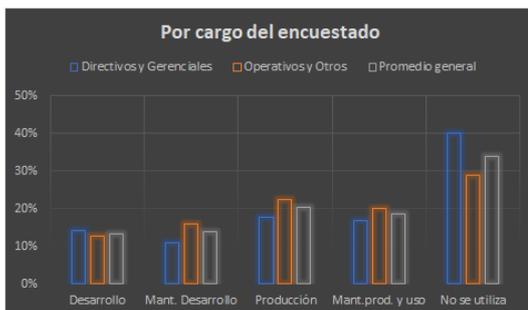


Figura 112 – Análisis RAMI4.0 por cargo del encuestado



Figura 113 - Análisis RAMI4.0 por cargo del encuestado

Cuando se analizan los resultados clasificados por tamaño de la empresa, se puede observar claramente la diferencia en cuanto a la no utilización de T4.0 a lo largo de todo el flujo de valor entre las medianas y grandes empresas y las micro y pequeñas. En ambos casos existe nuevamente una incipiente mayor utilización en la fase de producción, seguidas por mantenimiento y uso, como se muestra a continuación en la Figura 114 y la Figura 115.

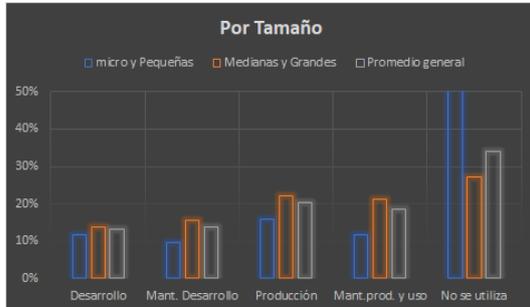


Figura 114 – Análisis RAMI4.0 por tamaño de la empresa

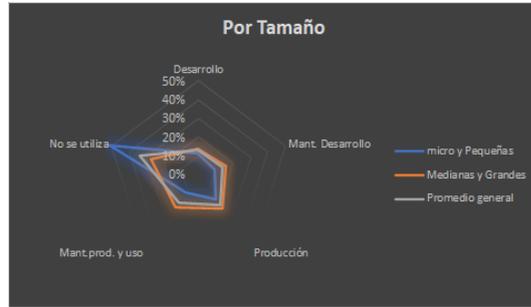


Figura 115 – Análisis RAMI4.0 por tamaño de la empresa

Tomando ahora en cuenta el origen local o extranjero de las empresas encuestadas, se observa nuevamente, al igual que en el análisis CQI, una ventaja considerable en el uso de T4.0 por parte de las empresas extranjeras. Aparece además la no utilización significativamente menor en las empresas de origen extranjero (Figura 116 y Figura 117).

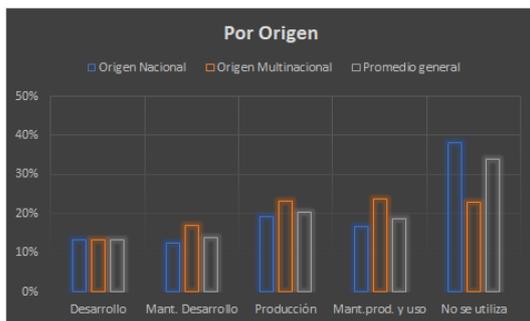


Figura 116 – Análisis RAMI4.0 por origen de la empresa

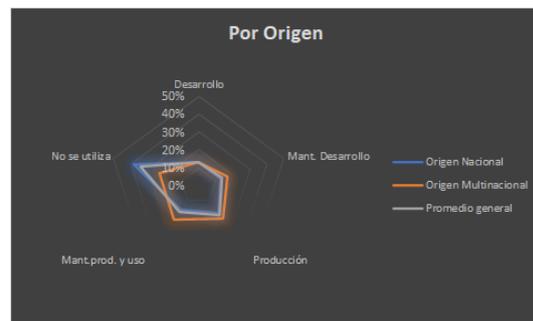


Figura 117 – Análisis RAMI4.0 por origen de la empresa

En cuanto a las empresas predominantemente exportadoras, también al igual que por su origen, se nota una mayor utilización de tecnologías en todas sus fases y una menor frecuencia del no uso en ninguna fase del ciclo de vida del flujo de valor, tal como muestra la Figura 118 y la Figura 119.



Figura 118 – Análisis RAMI4.0 por perfil exportador de la empresa

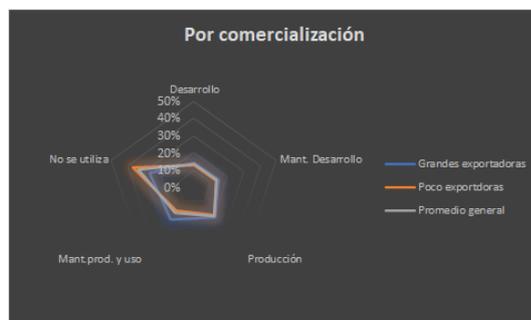


Figura 119 - Análisis RAMI4.0 por perfil exportador de la empresa

Análisis por Industria

De acuerdo con a la relevancia estadística obtenida y en línea con el grupo de industrias consideradas de interés para este trabajo, se analizan los resultados de los sectores: mecánica, farmacéutica, electrónica, automovilística y de alimentos y bebidas. Estos resultados dan cuenta de que la fase de producción es la que más hace uso de las T4.0, necesarias para la gestión de calidad.

En los sectores metalmecánica y de alimentos y bebidas, aparece una notoria no utilización de tecnologías. Esto hace pensar que se debe a la fuerte participación de las micro y pequeñas empresas en dichos sectores (Figura 120).

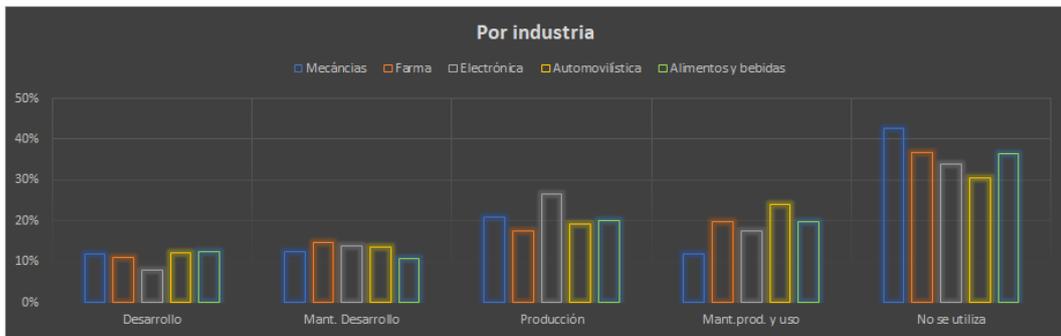


Figura 120 – Análisis RAMI4.0 por segmento industrial

5.3.1.3. Análisis general del uso de T4.0

La metodología de valoración considerada para este análisis fue el siguiente:

- Encuestas realizadas sobre el uso de las siguientes tecnologías y fases para la Gestión de la Calidad, a saber:
 - Tecnologías: IoT, CC, BD&A, VR/AR, Cobots /CPS, 3D, DT, AI/ML, Cybsec.
 - Fases: Desarrollo, mantenimiento de desarrollo, producción, mantenimiento de producción.
- Se realizó un conteo total de todas las tecnologías posibles en todas las fases.
- Se calculó el porcentaje de utilización actual respecto del máximo posible, haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$MedTech = \frac{\sum_1^n Tc}{n * Tc}$$

siendo:

$n = 126$ la muestra, y

$Tc = 9$ las tecnologías posibles de utilización para la gestión de la calidad: (1) IoT, (2) CC, (3) BD&A, (4) VR/AR, (5) Cobots /CPS, (6)3D, (7) DT, (8) AI/ML y (9) Cybsec.

Este análisis arrojó los resultados que se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17 - Utilización T4.0 por fase

	Investigación y Desarrollo	Ingeniería de actualizaciones y mejoras de productos existentes	Operaciones / Producción / Industrialización	Logística, Distribución, Marketing y Ventas	Servicios de posventa, reciclaje, desuso	No se utiliza	
IoT	47	41	63	43	12	27	233
CC	34	44	61	49	18	39	245

BD&A	27	31	42	40	22	55	217
VR/AR	8	15	10	8	2	97	140
Cobots /CPS	6	8	40	14	5	76	149
3D	22	18	26	3	2	78	149
DT	20	20	15	6	1	83	145
AI/ML	16	12	15	10	3	89	145
Cybersec	45	46	73	55	24	32	275
Total	225	235	345	228	89	576	1.698
MedTech Gral	13,3%	13,8%	20,3%	13,4%	5,2%	33,9%	100%

Los resultados anteriores son los que se representan en la siguiente Figura 121.

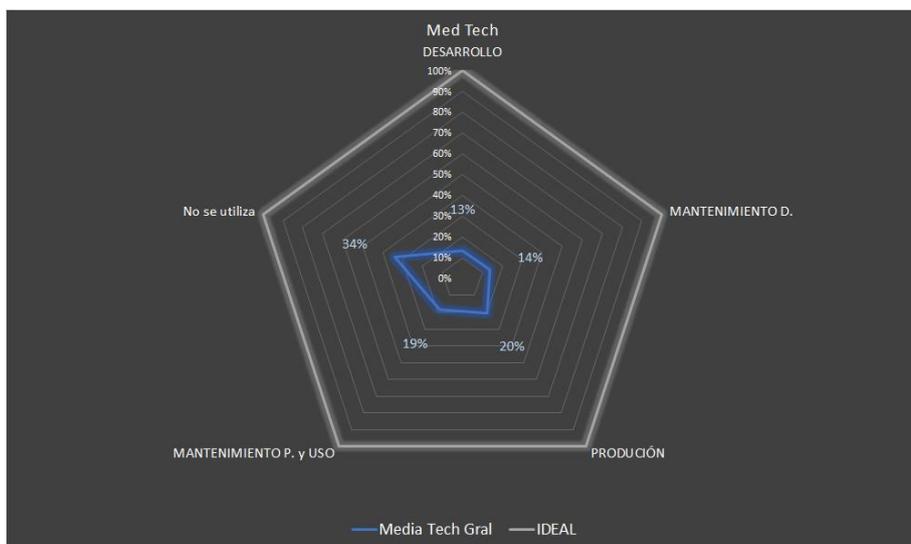
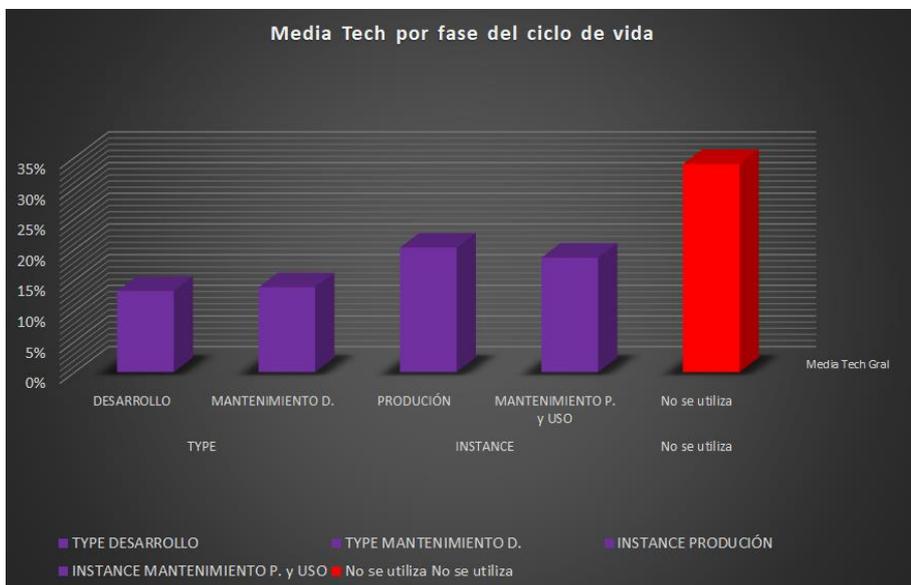


Figura 121 – Análisis fases RAMI4.0 por media de uso de T4.0

Puede observarse en la siguiente Figura 122, la intensidad de uso de cada tecnología en cada subfase del ciclo de vida del flujo de valor. Cabe destacar que, nuevamente, en la subfase de producción es donde más se utilizan las T4.0.

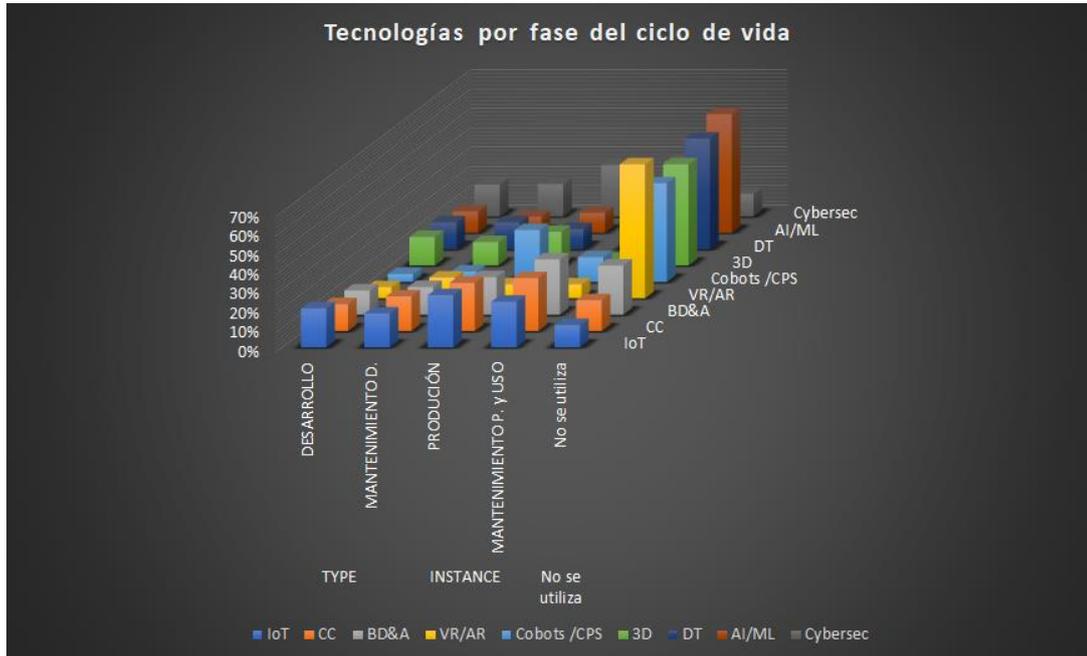


Figura 122 – Análisis T4.0 por fase RAMI4.0

Para mayor comodidad para su análisis, se lo representa a continuación en un mapa de calor (Figura 123).

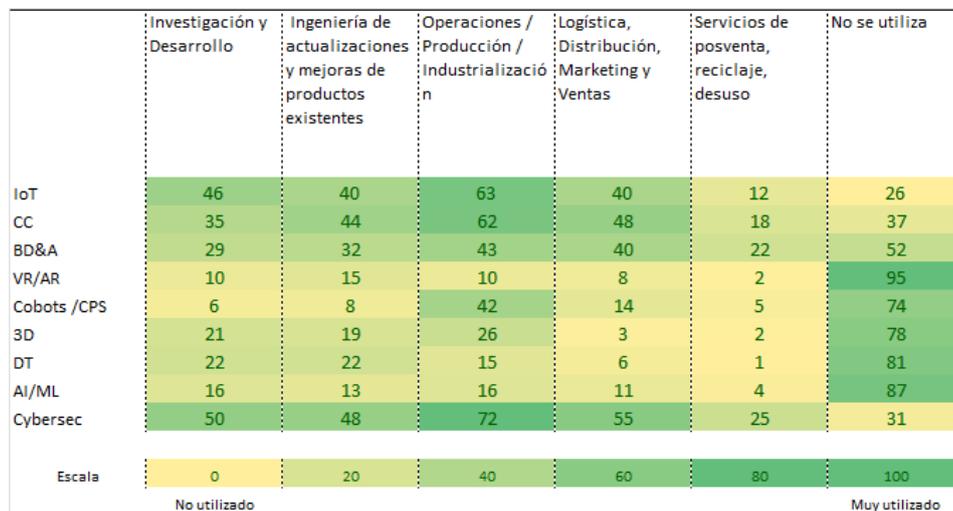


Figura 123 – Mapa de Calor T4.0 por fase RAMI4.0

Resultados de cada tecnología

Se puede observar en las siguientes gráficos (Figura 124), los resultados individuales de cada tecnología utilizada a lo largo del ciclo de vida del flujo de valor.

IoT: el 12% de los encuestados dicen no utilizar en ninguna instancia tecnologías IoT en sus fábricas. Comparado con otras T4.0 ese valor es algo bajo. Es de destacar que la subfase sobre la cual se utiliza IoT es la de Producción con un 27%, la cual es relativamente baja y no muy superior a su uso en el resto de las subfases.

CC: en el caso de la computación en la nube se puede observar que su uso se incrementa en la medida que se trascurre hacia las fases finales, “upstream”, siendo la de mantenimiento y uso la mayor. Se puede inferir que esta tecnología es más utilizada por los departamentos comerciales y posventa más que los de desarrollo y producción.

VR/AR: en concordancia con lo relevado durante el trabajo previo de entrevistas cualitativas, la realidad virtual y aumentada no está muy difundida aún en la industria argentina. Sólo se ha podido corroborar que, solo en grandes empresas, son apenas utilizadas fundamentalmente para capacitación y entrenamiento. Nótese que la no utilización asciende al 69%.

BD&A: sin duda que el análisis de grandes volúmenes de datos es una de las tecnologías medianamente utilizadas en la industria argentina. Es notorio también, al igual que el caso de la CC, que estas herramientas se utilizan con mayor intensidad en las últimas fases del ciclo de vida del producto. Se puede observar también que, 1 de cada 4 de las industrias relevadas no utilizan BD&A en ninguna de las instancias de producción.

Cobots/CPS: una de las limitaciones del presente trabajo fue la no discriminación (en las encuestas) entre los robots colaborativos y los sistemas ciberfísicos. La falta de conocimiento profundo de estas tecnologías por parte de los respondientes llevó a conjugar ambos con el fin de al menos tener un conocimiento de la automatización en cada fase. Claramente, y como era de esperar, esta tecnología se destaca en la fase de producción, donde el 27% de los encuestados dijo utilizarla.

AM/3D: la manufactura aditiva o impresión 3D, según la encuesta, es utilizada actualmente en la Argentina sólo por la mitad de las empresas. Su uso más intensivo, en coincidencia con el relevamiento bibliográfico, se da en las etapas de desarrollo y producción. En la primera, debido a un incipiente uso para prototipado, en el segundo, para producción personalizada y de bajos volúmenes.

DT: el concepto de gemelo digital no está aún establecido en nuestro mercado. Inclusive, tal como se vio en el relevamiento bibliográfico, existen diferentes opiniones en cuanto a las “fronteras” entre la simulación y los gemelos digitales. De cualquier modo, lo importante para destacar es que el 57% de las industrias no lo utilizan en ninguna instancia.

AI/ML: la inteligencia artificial, en particular el aprendizaje autónomo, no está totalmente establecido en la industria aún. Es que, justamente, esta es una de las tecnologías que más rápidamente evoluciona lo cual puede observarse semestre a semestre tal el caso de Chat-GPT. El 61% de las industrias encuestadas (a noviembre de 2022) dice no hacer ningún tipo de uso de la inteligencia artificial en ninguna de las instancias del ciclo de vida de un producto.

CybSec: se evalúa finalmente los resultados de la ciberseguridad. Tal como se puede observar en el último gráfico de la siguiente ilustración, éste no es utilizado por tan sólo el 12% de las empresas. Su intensidad de uso sigue la misma forma que el CC y el BD&A, ya que existe una correlación en el uso de estas tres tecnologías.

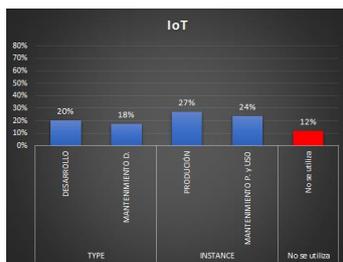


Fig. 124a

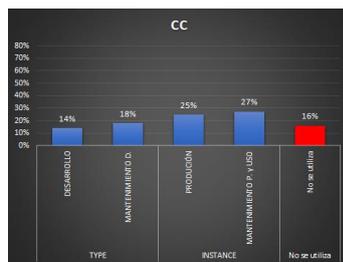


Fig. 124b

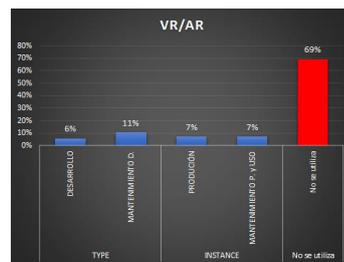


Fig. 124c

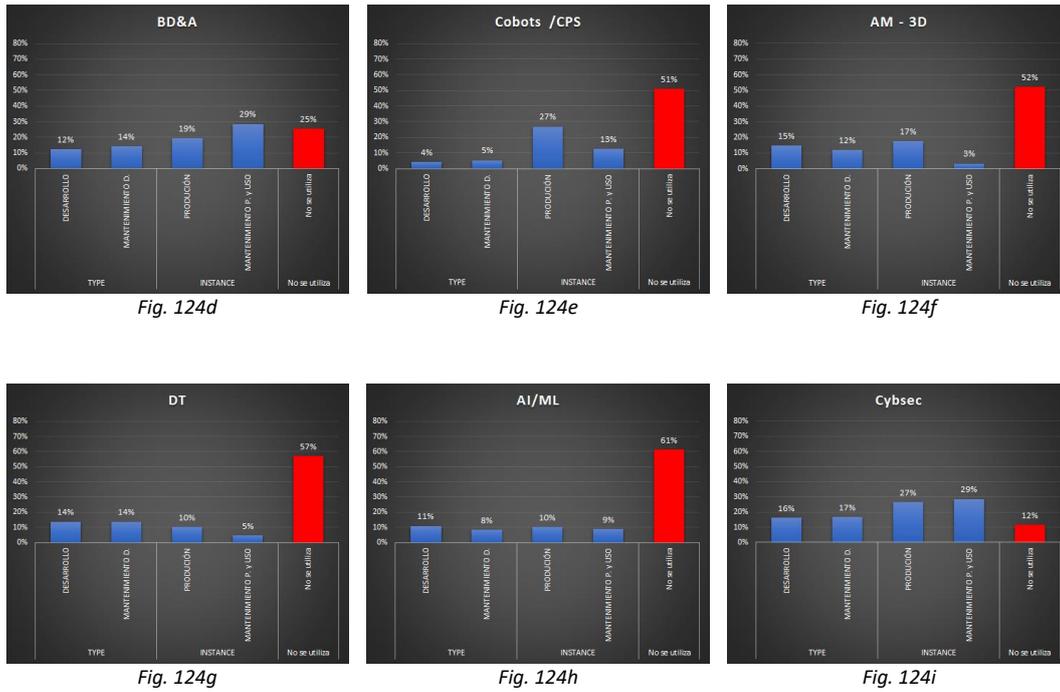


Figura 124 - Análisis de T4.0 por fase del VSLC

Ilustrando a continuación (Figura 125a) la no utilización de cada una de las tecnologías analizadas se puede observar claramente que las menos utilizadas en términos generales son la VR/AR, AI/ML y el DT, tal lo confirmado anteriormente. Por su parte, las más utilizadas en términos generales son el IoT, Cybsec, CC y BD&A (Fig. 125b). Finalmente se muestran las tecnologías facilitadoras de la Calidad 4.0 más utilizadas en la industria nacional detallando cada fase (Fig. 125c).

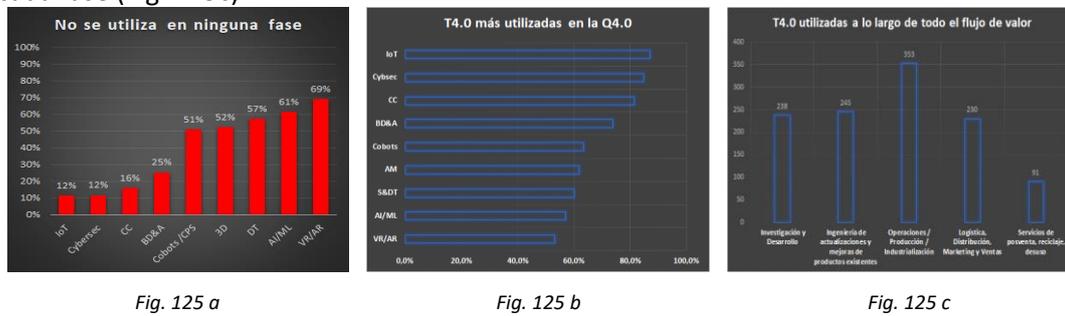


Figura 125 - Análisis T4.0. Fuente propia del autor

Del análisis de estos últimos dos gráficos se concluye que:

- Las tecnologías habilitadoras más utilizadas para la gestión de la calidad a lo largo de todo el ciclo de vida del flujo de valor son: IoT, Ciberseguridad y Computación en la nube.
- La subfase en la que actualmente se utiliza más tecnología es en la de Producción.

5.3.2. Conclusiones de la encuesta Calidad 4.0 en la Argentina

Finalmente se puede concluir, a partir de la encuestas, que los responsables con cargos de alta gerencia tienen una percepción de menor uso de la tecnología; esto podría deberse a que los gerentes tienen una visión más amplia del negocio, pero a su vez están más alejados de las operaciones diarias. Por su parte, los roles operativos, lógicamente, observan de forma más cercana y en detalle la utilización de tecnología en cada fase del VSLC.

En relación con las dimensiones cualitativas (Gobernanza, Garantía & Aseguramiento de la Calidad y Aprendizaje & Mejora) no existe una diferencia significativa, en la opinión los participantes de alta gerencia y operadores. De cualquier forma se puede observar, según los respondientes, que hay una escasa tendencia a la aplicación de las nuevas tecnologías para con el aseguramiento de la calidad.

Cuando se analizan las respuestas en base al tamaño de las empresas, las micro y pequeñas empresas comparadas con las medianas y grandes, se concluye que existe una diferencia importante a favor de estas últimas en las cuatro dimensiones: Gobernanza, Garantía & Aseguramiento de la Calidad, Aprendizaje & Mejora y Contexto tecnológico. Además, se puede observar claramente también la diferencia que existe en cuanto a la no utilización de T4.0 a lo largo de todo el flujo de valor entre las medianas & grandes y micro & pequeñas, aunque en ambos casos existe una incipiente mayor utilización en la fase de Producción, seguidas por Mantenimiento y Uso.

Las empresas multinacionales, denominadas en la encuesta como de origen extranjero, califican mejor en las cuatro dimensiones que las de origen nacional. Esto probablemente se deba a exigencias de las normas o estándares internacionales no obligatorios en la Argentina. Tomando justamente en consideración el origen local o extranjero de las empresas encuestadas, se observa nuevamente, al igual que en el análisis CQI, una ventaja considerable en el uso de T4.0 por parte de las multinacionales. Nótese también que, congruentemente, el análisis de la no utilización de ninguna tecnología es significativamente menor en las empresas de origen extranjero.

Las empresas con perfil exportador (aquellas cuyos ingresos provienen fundamentalmente de exportaciones más que de operaciones locales), también califican mejor en las cuatro dimensiones que las no exportadoras. Esto se puede deber, casi seguramente, debido a las exigencias de los mercados internacionales y la competencia en lo referente a la Calidad en General. Es de señalar que la diferencia no es tan importante en las T4.0 en general, sino en su aplicación a la Gestión de la Calidad. En estas empresas predominantemente exportadoras, también al igual que por su origen, se nota una mayor utilización de tecnologías en todas sus fases y una menor frecuencia del no uso en ninguna fase del ciclo de vida del flujo de valor.

Con respecto al sector industrial al que pertenecen, y en consonancia con lo esperado debido a lo analizado en el relevamiento bibliográfico, la industria farmacéutica es la que mejor califica en las cuatro dimensiones, igualando su calificación con la automotriz en lo referente al uso de tecnología. En contraposición a ello, las industrias de alimentación y metalmecánica argentinas están entre las peores calificadas en las muestras analizadas. De todas formas, no se puede concluir definitivamente hasta no analizar los componentes en detalle. Estas aproximaciones son construidas a partir de la muestra considerada para el caso en estudio en particular en la presente tesis, por lo que no se puede concluir con certeza como una generalidad, pero sí permite plantear algunos supuestos. Entre ellos, una hipótesis sería que la proporción importante de pymes en el resultado de las industrias del sector alimenticio, que para en el caso de la Argentina tiene un componente artesanal y familiar muy importante, y tal lo visto anteriormente, carecen de un suficiente desarrollo en lo tocante a la Gestión de la Calidad.

En conclusión, para este estudio, se concluye que la fase de producción en el sector industrial argentino es la que más está haciendo uso de las T4.0 necesarias para la Gestión de la Calidad.

Enfocándose en la tecnología, se observa que al menos 1 de cada 3 empresas no utilizan ninguna T4.0 a lo largo de todo el flujo de valor. Existe nuevamente una divergencia desde la perspectiva de la alta gerencia respecto de los operativos, aunque sin duda prevalece la no utilización. Se observa también que existe una mayor utilización, aunque no muy importante, de T4.0 en la fase de producción. Las T4.0 más utilizadas para la gestión de la calidad a lo largo de todo el ciclo de vida del flujo de valor son: IoT, Ciberseguridad y Computación en la nube.

Analizando cada fase y subfase del ciclo de vida del flujo de valor, se concluye, a partir de los resultados para el presente estudio, que la fase de producción es la que más está haciendo uso de las T4.0 necesarias para la gestión de la calidad. Tomando en consideración el valor definido como Media Tech, se observa una vez más, que en la subfase de producción es donde más se utilizan T4.0.

En resumen, a partir de las 129 respuestas válidas de empresas diferentes se podría concluir que: (1) las empresas medianas y grandes están mejor preparadas y organizadas para el aseguramiento de la calidad y con el uso de nuevas tecnologías, (2) las empresas con perfil exportador y / o de origen extranjero también están mejor calificadas, (3) de los sectores industriales encuestados, la industria farmacéutica es la mejor preparada, mientras que la metalmecánica califica entre las menos preparadas, (4) la fase con mayor incorporación de tecnología, aunque pobre aún, es la subfase de producción y (5) las tecnologías habilitadoras con mayor uso general son: IoT, Ciberseguridad y la CC.

CAPÍTULO VI

APLICACIONES EN CASOS REALES

6. APLICACIONES EN CASOS REALES

6.1. LERCA S.C.A: Incorporación de Cobots para la mejora de calidad.

Lerca S.C.A es una empresa argentina situada en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y fundada en el año 1954, desde entonces, se especializó y se dedicó al diseño y fabricación de fusibles y bases portafusibles de alto, medio y bajo voltaje. Su propietario asegura que los productos LERCA cuentan con alta tecnología y materia prima de primera calidad, son fabricados bajo estrictas normas y verificados por un laboratorio propio, garantizando la calidad, seguridad y protección de toda la línea de fusibles.

LERCA cuenta, además, con una producción amplia y versátil que permite no sólo fabricar fusibles normalizados, sino también diseñar y adaptar el producto según la necesidad del cliente. Asimismo, posee un Departamento de Calidad que vela por el cumplimiento de un riguroso control de la materia prima y componentes, las etapas intermedias de producción y el producto final para cumplir con los requerimientos del cliente y asegurar su excelencia en la calidad del producto. Cuenta, también, con un Departamento Técnico que respalda con precisión y seriedad los productos finalizados. LERCA, en la actualidad, abastece a una gran parte del mercado nacional y sudamericano, el cual brinda reconocimiento y garantía de todos sus productos.

Estudio de caso LERCA: Cobot e Impresora 3D para mejora de calidad de un componente

Con el fin de encontrar la metodología de trabajo con Cobots más adecuada y colaborar en una estación de trabajo, se estudió el caso de un baño de estaño de una pieza clave de un elemento de protección eléctrico. Este caso se ubica en la subfase Producción de la fase Instancia según el modelo RAMI4.0 (Figura 126).

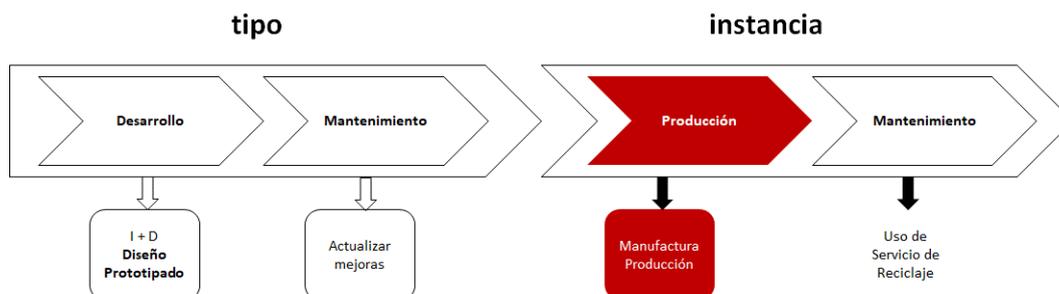


Figura 126 - Fase producción de empresa LERCA

Tal como los autores Chang et al. (2021) afirman, evaluar la aplicación de tecnología I4.0 en pymes es un tema que requiere una estrategia multicriterio y que incluya elementos tanto cuantitativos como cualitativos. Así fue cómo se evaluó esta prueba utilizando para este caso una herramienta de software para la ayuda de toma de decisiones multicriterio.

Para el presente caso de estudio se utilizó un Cobot y una impresora 3D; siendo su objetivo diseñar a medida las pinzas del Cobot.

Es el primer Cobot que esta pyme iba a incorporar para esta tarea de baño de estaño y deseaba comparar entre tres configuraciones posibles con 3 pinzas diferentes, las cuales fueron denominadas G1, G2 y G3. Esto era realizado con el fin de encontrar el mejor acabado de dicho elemento.

Para este estudio se consideraron 9 factores técnicos y se analizó un único escenario en relación con las condiciones ambientales, que era en la que habitualmente la fábrica trabajaba.

Las alternativas de selección fueron denominadas:

1. Cobot G1
2. Cobot G2
3. Cobot G3

Correspondiendo la G al tipo de "Gripper" (pinza).

Los criterios de selección para establecer el ranking de preferencia fueron los siguientes factores técnicos:

1. Carga útil
2. Ejes
3. Alcance
4. Velocidad
5. Movilidad
6. Actuación
7. Alimentación de elemento
8. Manejo del elemento
9. Montaje del elemento

Debido al tamaño de la pieza a tratar, la variable carga útil no se considera un factor clave. En relación con el parámetro "alimentación del elemento", se desconsideró en esta etapa debido a que se realiza de forma manual. Cabe destacar que esta empresa había ya adquirido un segundo Cobot para trabajar en conjunto con el primero y, justamente, colaborar con la alimentación del elemento; cuestión que la fábrica tiene previsto instalar en los próximos meses.

Tal lo mencionado anteriormente, se trabajó en este experimento en sólo un escenario (Escenario1).

El software utilizado para la ayuda en la toma de decisión fue el Visual Promethee™, herramienta para análisis de decisiones multicriterio MDCA (*Multicriteria Decision Analysis*) por el método Promethee y Gaia.

La colecta de datos fue por observación directa y por medio de entrevistas en profundidad al operador y al supervisor del área. Esta observación se desarrolló durante junio de 2021.

Se muestra a continuación la matriz de decisión y las características y tipos de preferencia utilizados (Figura 127).

Visual PROMETHEE Academic - TdDPromheteec caso Federico.vpg (saved)

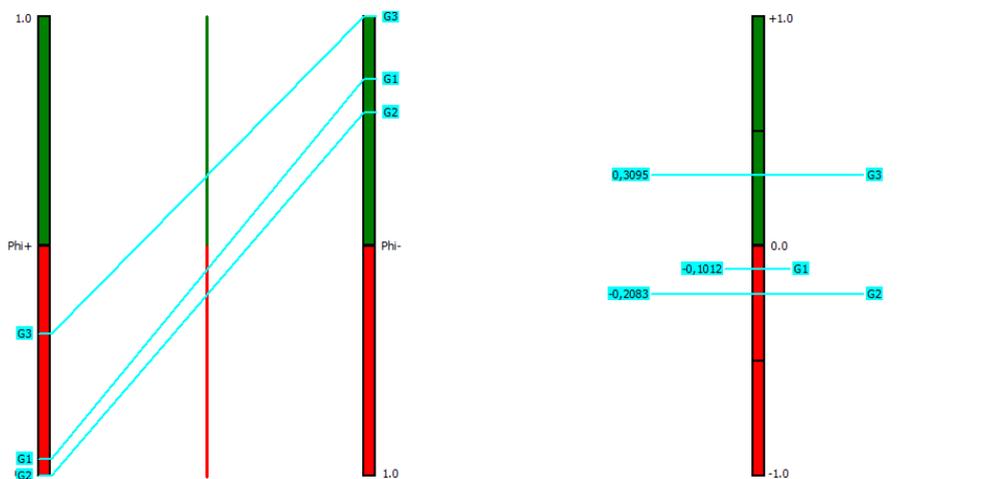
File Edit Model Control PROMETHEE-GAIA GDSS GIS Custom Assistants Snapshots Options Help

Scenario1	Carga	Eje	Alcance	Velocidad	Movilidad	Actuación	Alimenta...	Manejo	Montaje
Unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit	unit
Cluster/Group	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Preferences									
Min/Max	max	max	max	max	max	max	max	max	max
Weight	1,00	2,00	5,00	7,00	10,00	5,00	1,00	10,00	1,00
Preference Fn.	V-shape	Usual	Usual	V-shape	V-shape	V-shape	V-shape	V-shape	V-shape
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute
- Q:	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- P: Preference	1,00	n/a	n/a	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Statistics									
Minimum	10,00	10,00	8,00	5,00	8,00	5,00	8,00	2,00	8,00
Maximum	10,00	10,00	10,00	5,00	8,00	8,00	8,00	10,00	8,00
Average	10,00	10,00	8,67	5,00	8,00	6,00	8,00	5,67	8,00
Standard Dev.	0,00	0,00	0,94	0,00	0,00	1,41	0,00	3,30	0,00
Evaluations									
<input checked="" type="checkbox"/> G1	10,00	10,00	8,00	5,00	8,00	5,00	8,00	5,00	8,00
<input checked="" type="checkbox"/> G2	10,00	10,00	8,00	5,00	8,00	5,00	8,00	2,00	8,00
<input checked="" type="checkbox"/> G3	10,00	10,00	10,00	5,00	8,00	8,00	8,00	10,00	8,00

Figura 127 - Toma de decisiones multicriterio – Método Prometheé

Debido a que cada decisor asigna una importancia relativa diferente a cada uno de los criterios seleccionados de acuerdo con la estructura de preferencias, los pesos (*weight*) de cada criterio son asignados por el tomador de la decisión. Es por ello que la solución de un problema multicriterio no depende sólo de la naturaleza de este, sino también del propio decisor. Este último es un aspecto muy importante en el proceso decisorio (Fernandez, 2002).

Luego de la colecta de datos y la ayuda de la herramienta para toma de decisiones, y tal como puede observarse en la siguiente Figura 128, la movilidad y el montaje han sido los dos criterios más importantes para los tomadores de decisión. Se observan en la figura los resultados del análisis donde se denota claramente que, conforme las preferencias y valoraciones de cada uno de los 9 criterios evaluados, el modelo de pinza G3 fue el más adecuado para ese tipo de tarea.



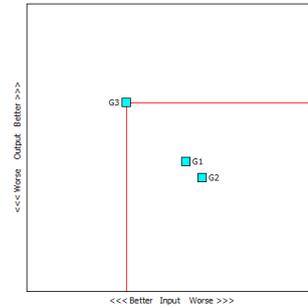
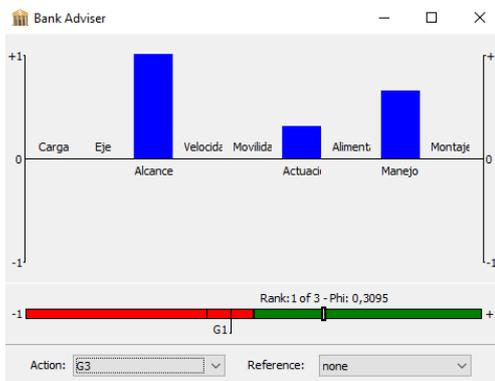
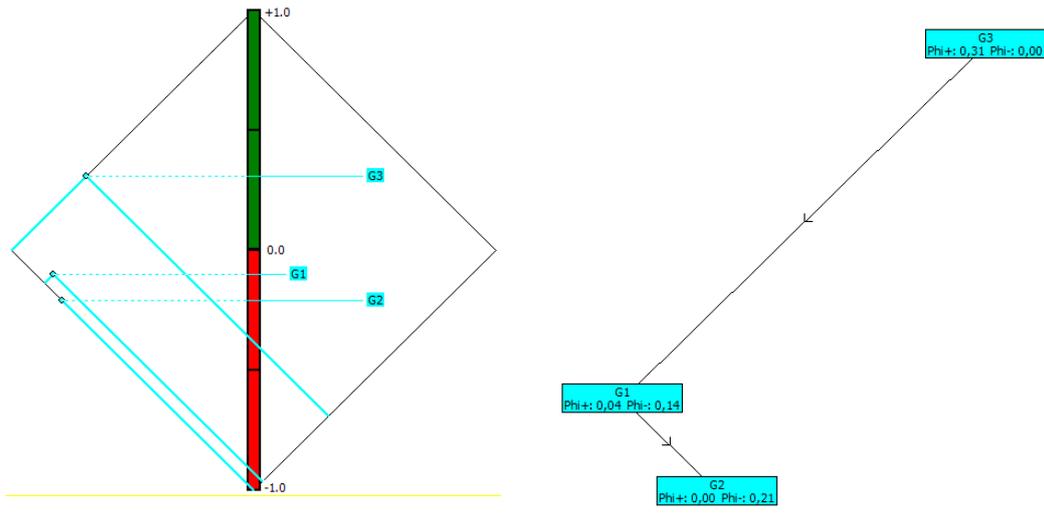


Figura 128 - Resultado del análisis de ranking de preferencias

Como se mencionó anteriormente, con los criterios de preferencia del tomador de decisión, la pinza G3 es la preferida, situándose claramente alejada de la segunda opción, la G1, y dejando como última alternativa la G2.

La inspección del bañado al elemento es meramente visual, por lo que se le podría también atribuir cierta subjetividad a dicho Control de Calidad.

No obstante, y de acuerdo con lo observado, se observó una mejor uniformidad y menor variación entre los elementos tratados.

Se puede observar en la Figura 129 al robot colaborativo en su fase de Set Up y ajuste final, tomando el elemento a tratar desde un soporte, y llevándolo y sumergiéndolo en una pequeña cuba. Las siguientes imágenes son capturas de pantalla de un video grabado durante las pruebas.



Figura 129- Imágenes del Cobot e impresora 3D en período de prueba. Fuente: propia del autor

Luego de diferentes ensayos se logró mejorar el diseño de las pinzas. Esto fue posible gracias a la utilización de tecnología de la impresión aditiva, la cual permitió un rápido prototipado de las mismas.

En resumen, el socio gerente de la firma explica que buscaba modernizar su planta, con el fin de mantener su ventaja competitiva, no sólo a nivel nacional sino regional. Para ello, la decisión era continuar marcando su ventaja comparativa en la calidad y durabilidad de sus productos. Además, manifestó que el tratamiento de ciertas partes de sus fusibles es un factor determinante, según sus dichos, en el desempeño del producto final. Agregó también que la automatización parcial de la línea de producción permitiría aumentar su capacidad de producción, lo cual lograría con la incorporación de dos Cobots.

La estabilidad en la salida del proceso de bañado le asegura una mejor calidad de dicho elemento, lo que redundaría en una mejora general del fusible.

Debido a las particularidades geométricas y tamaño de la pieza a tratar por el Cobot, una pinza Ad Hoc debía ser fabricada. Para ello, se utilizó otra tecnología base de la I4.0, la manufactura aditiva, clave hoy en día fundamentalmente para la fase de prototipado. Tres diferentes tipos de pinzas (Gripper) fueron fabricados y a partir de sucesivos ajustes en el seleccionado se logró el óptimo funcionamiento del Cobot y tarea en esa fase de la línea de producción.

El presente caso es un buen ejemplo de cómo dos de las nuevas tecnologías habilitadoras de la I4.0, Cobot y AM, pueden ser utilizadas para la mejora de la calidad, en este caso, de un componente de un fusible de media tensión.

Finalmente, el socio gerente agrega: “el próximo paso será la incorporación de cámaras para el Control de Calidad”.

.....

6.2. ALMACENAR SRL: Simulación de proceso en una oficina técnica

ALMACENAR S.R.L. - Sistemas de Almacenamiento.

La empresa Almacenar SRL se desempeña en la actividad industrial desde el año 1965 en la Argentina. Se ubica en el gran Buenos Aires y pertenece al sector metalúrgico especializándose en la fabricación de sistemas de almacenaje y entrepisos. Su objetivo es atender las necesidades de las pequeñas, medianas y grandes empresas que buscan optimizar los espacios de almacenamiento. Para ello ofrecen soluciones integrales ya que disponen de una amplia gama de productos y servicios. No sólo proporcionan un producto como una estantería o pisos de almacenaje, sino también asesoran a cada interesado sobre su situación en particular y el espacio con el que cuenta, presentando un “layout” o propuesta confeccionada por su Oficina Técnica. Si bien tercerizan el servicio de montaje, participan en forma activa hasta la finalización de cada proyecto y con la certificación correspondiente. Su titular busca mejorar las entregas en tiempo y forma cuidando la calidad, no sólo del producto final, sino de los procesos de fabricación. Debido a las características del negocio se siguen las directrices de gestión por proyectos, ya que cada cliente requiere una solución única.

Estudio de caso LARA: Simulación computacional para mejora de proceso

Este caso de estudio aplica para la subfase Mantenimiento de la fase Instancia, según la clasificación RAMI 4.0 (Figura 130).

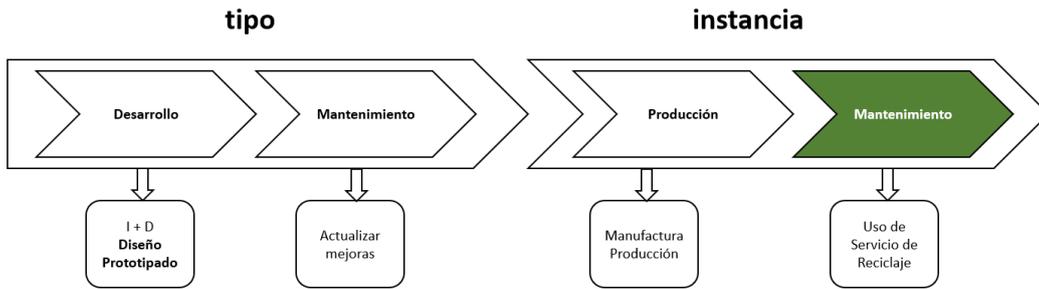


Figura 130 - Fase "Mantenimiento de Producción" en empresa Lara. Fuente propia del autor

El titular de la empresa necesita realizar una optimización de los procesos de su negocio, fundamentalmente de su oficina técnica, debido a que allí es donde se han detectado, lo que comúnmente se denomina "cuellos de botella".

Antes de poner en práctica la contratación de nuevos especialistas, la incorporación de un sistema ERP y la modificación del flujo de trabajo, pretende realizar una simulación computacional con el fin de evaluar las posibles mejoras, tanto en tiempos como en costos.

El primer paso fue entender la estructura organizacional de la empresa (Figura 131), para luego relevar los procesos internos utilizando la nomenclatura BPMNv2. Dichos procesos fueron representados y analizados con una herramienta de software que permite la simulación de los procesos (Bizagi™) (Figura 132).

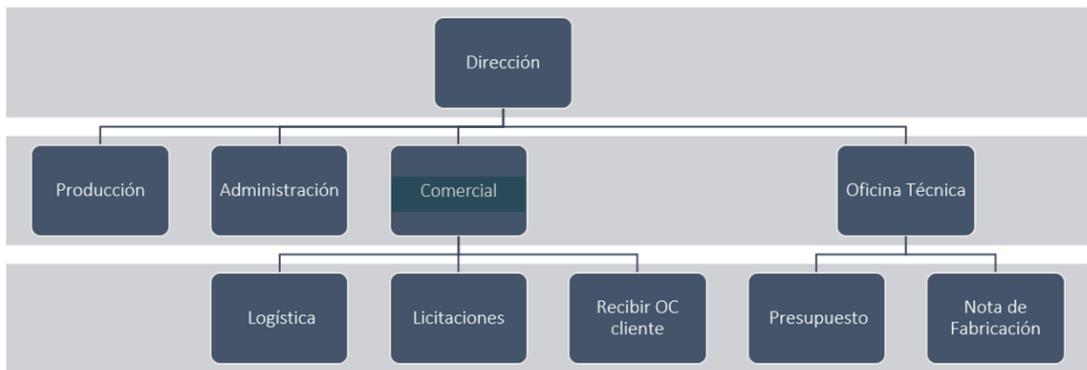
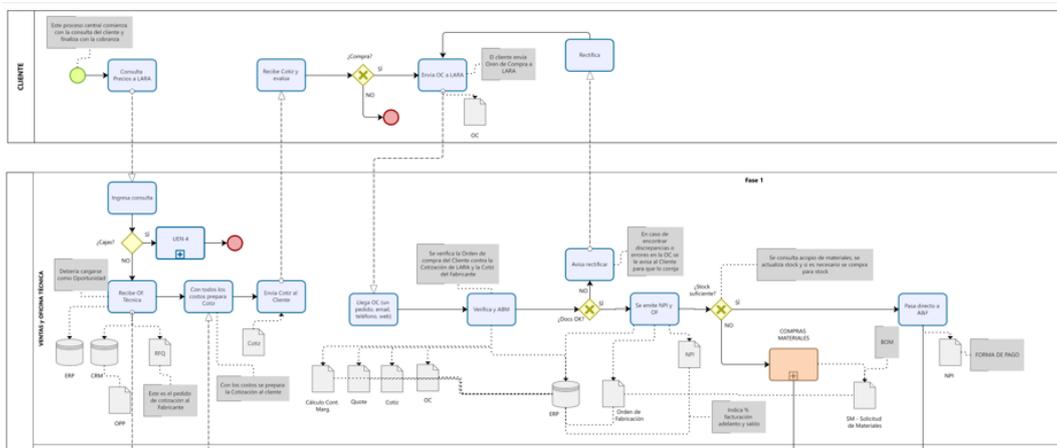


Figura 131 - Estructura Organizacional de la empresa Lara. Fuente propia del autor



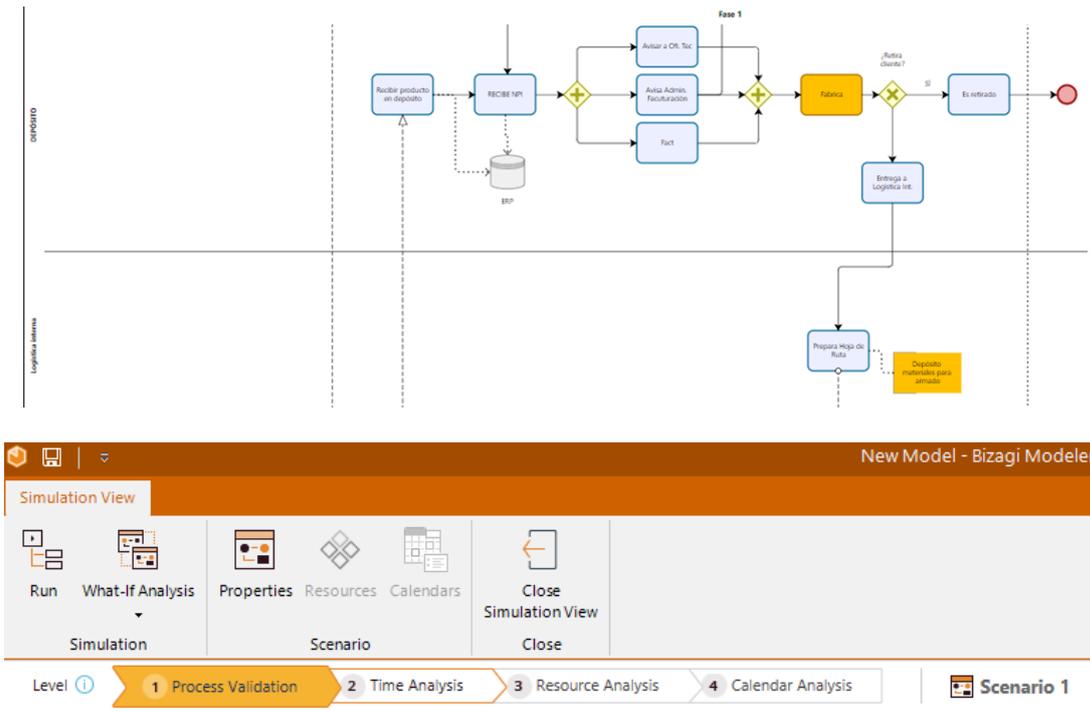


Figura 132 - Diagramas BPMN.2 en Bizagi con capacidad de simulación. Fuente propia del autor

La base de indicadores clave de gestión para contrastar y evaluar las posibles mejoras son los que se muestran en la siguiente ilustración (Figura 133).

INDICADORES	TABLERO DE CONTROL INTEGRAL	DESCRIPCIÓN
KPIs		
# COMERCIAL		
10 Ventas (billing)	Facturación	
20 Negocios cerrados (booking)	Órdenes de compra recibidas pero aún sin facturar	
30 BCC billing		
40 BCC booking		
70 Ídem anterior por fabricante		
80 Uso (hrs) de preventiva por vendedor por negocio		
ECONÓMICO FINANCIERO		
110 Margen Bruto (Gross Margin)	Ventas menos costo de materiales	
120 Contribución Marginal (Contribution Margin)	Margen bruto menos costos variables	
150 Gastos Operativos (Operating Expenses OPEX)		
150 Beneficio Operativo (Operating Profit)		
160 RATIO: OPEX / Ventas		
170 RATIO: OPEX / EBIT		
180 Ratio: ROS	Beneficio neto sobre ventas totales sin impuestos	
190 FRU (estado de resultados) histórico y proyectado mensual		
200 Balance sheet histórico y proyectado mensual	OJO Activos	
210 Cash Flow histórico y proyectado mensual		
230 DSA	Días en la calle	
250 RATIO: Costo viáticos y viajes / empleado		
270 RATIO: Overhead (personal administrativo / productivo)		
290 Cantidad de pedidos (negocios cerrados) por empleado.		
300 Pedidos (negocios cerrados) por representante de ventas		
COSTOS		
340 Como porcentual de ventas.		
390 De personal directo.		
CALIDAD:		
530 Cantidad de No conformidades		
560 Costo de No Conformidades		
RRHH		
580 Horas de capacitación por empleado por año		
590 Ausencias Licencias promedio mes		
600 Rotación de personal		
610 Nivel de satisfacción ambiente empleados		
PPis		
640		
650 Tiempo de ciclo	Tiempos de ciclos de cada proceso	
660 RATIO: Ventas/Oportunidades (Close Rate)	Eficacia de cada vendedor	
670 Ciclo de implementación	tiempo desde la recepción de la OC a la firma de conformidad	
740 Índice de defectos	No conformidades	
SERVICIO		
770 - Cantidad de tickets abiertos al mes		
800 - Cantidad de tickets cerrados al mes		
810 - Índice de cumplimiento de SLA en tickets cerrados		
820 - Nivel de satisfacción del cliente en tickets cerrados		
PROYECTOS		
870 RATIO: real / presupuesto	Costos	
880 RATIO: real / presupuesto	Plazos	
890 Desvíos de Alcance	Cantidad de veces que se cambia al alcance del proyecto	
900 Cumplimiento de documentos de proyecto	Cumplimiento de documentación de seguimiento y cierre del proyecto.	
910 Nivel de satisfacción del cliente en proyectos cerrados		
CLIENTES		
920 Índice de satisfacción de clientes		
930 Cantidad de clientes activos		
940 Clientes nuevos		
950 Rotación de Clientes		

Figura 133 - Indicadores clave de gestión de la empresa Lara. Fuente propia del autor

Si bien esta es una herramienta de simulación de procesos relativamente simple, ella permitió plantear diferentes escenarios, incluyendo para cada actividad del proceso: (1) validación, (2) análisis de tiempos, (3) análisis de recursos y (4) análisis de calendarios.

El titular de la firma agrega: “nuestro próximo paso es ampliar nuestra oferta ingresando en el negocio de la logística, fundamentalmente interna, asesorando e integrando soluciones de automatización y vehículos autónomos de transporte; queremos ofrecer soluciones de Logística 4.0” .

6.3. RANIERI S.A.: Diseño de Producto y mejora de una línea de producción

Ranieri Argentina S.A. es una empresa fundada en la Argentina en 1974, que se dedica a la producción y comercialización de armazones oftálmicos y anteojos de sol. Está dirigida por su segunda generación, cuentan con una alta calidad de producto y un diseño innovador. Cada colección es diseñada y desarrollada anticipando e interpretando las tendencias de la moda nacional y mundial. Sus clientes son marcas de primera línea, tales como Reef™ eyewear, Valeria Mazza™, Las Oreiro™ gafas, Ossira™ eyewear, Wanama™, John L. Cook™ y Wrangler™ eyewear, entre otras. Han trabajado con dichas marcas en más de una oportunidad, ofreciendo el diseño y la producción de nuevas colecciones de temporada y la reposición de faltantes de productos de colecciones anteriores.

Valores como visión de futuro, perseverancia frente a las dificultades, actitud proactiva, y trabajo en equipo, son las bases de esta tradición familiar, que se han hecho parte de la empresa.

Este tercer caso de estudio se desarrolla en dos subfases. La primera en la subfase Desarrollo de la fase Tipo (Figura 134) y la segunda en la subfase Producción de la fase Instancia (Figura 136), ambas conforme la clasificación de fases de la RAMI4.0.

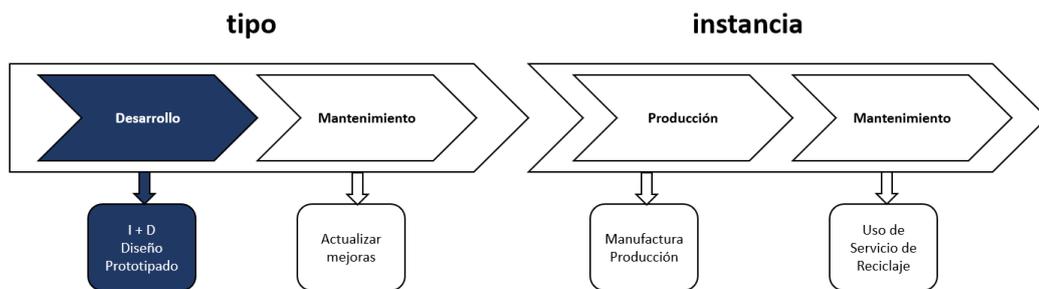


Figura 134 - Fase Desarrollo en la empresa Ranieri. Fuente propia del autor

Para este caso de estudio se utilizó la herramienta de simulación Anylogic™, ya que es mucho más potente que la utilizada en el caso 2, Bizagi™ e incluye los tres tipos básicos de la simulación: (1) eventos, (2) sistemas dinámicos y (3) agentes.

La fuente de datos para la modelización proviene de su sistema ERP. Los mismos fueron exportados a la herramienta de simulación representando el proceso simplificado de diseño y desarrollo (Figura 135).

MODELOS NUEVOS											
Tipo	Material	Diseño									
		Desarrollo de la colección	Delay	Proyecto	Delay	Desarrollo muestras proveedor	Delay	Importación Muestras	Delay	Aprobación muestras arribadas	Tiempo Total del Proyecto de Desarrollo
RANIERI	Metal	30	2	10	2	100	2	15	2	5	168
RANIERI	Inyección	30	2	10	2	100	2	15	2	5	168
RANIERI	Acetato	30	2	10	2	100	2	15	2	5	168
SEMI (CH)	Todos	30	2	10	2	60	2	15	2	5	128
SEMI (IT)	Todos	30	2	10	2	45	2	15	2	5	113
Semiterminado	Metal	30	2	10	2	100	2	15	2	5	168
Semiterminado	Inyección	30	2	10	2	100	2	15	2	5	168
Semiterminado	Acetato	30	2	10	2	100	2	15	2	5	168
TERMINADO	Todos	30	2	10	2	100	2	15	2	5	168

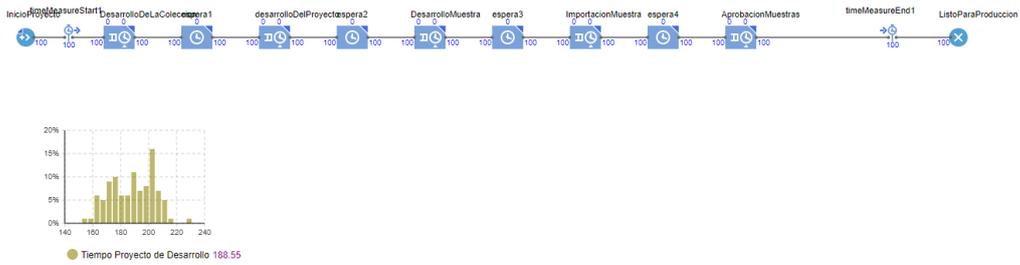


Figura 135 - Simulación de la fase de diseño. Fuente propia del autor

La simulación computacional para el proceso de diseño y desarrollo de la empresa Ranieri™ permitió a sus socios plantear diferentes escenarios de mejoras y replantear una serie de parámetros con el fin de reducir el tiempo de cada proyecto en un 20% en promedio.

Tal como se describió en la introducción, el próximo experimento fue desarrollado en la subfase Producción (Figura 136).

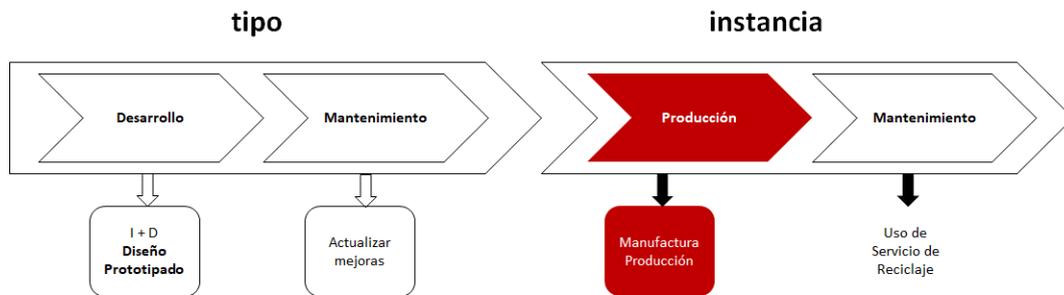
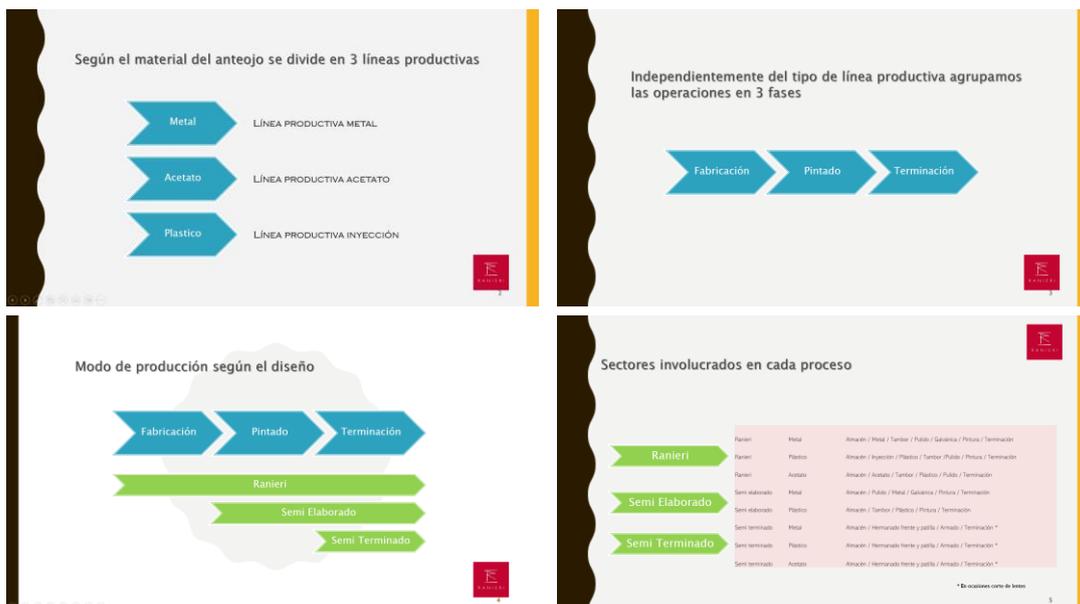


Figura 136 - Fase Instancia en la empresa Ranieri. Fuente propia del autor

La fábrica posee tres líneas de producción de marcos para anteojos: metal, acetato y plástico (Figura 137). Se eligió para este experimento la línea de producción de acetato, debido a que resultaba estar más estandarizada y por ello podía ser mejor modelizada.



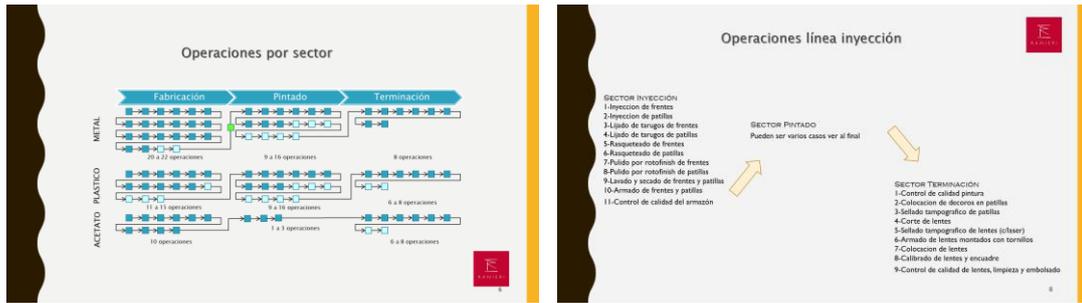


Figura 137 – Mapeo de procesos. Fuente: Ranieri S.A

Se observa en la siguiente Figura 138 el modelado de la línea de producción de marcos de anteojos de acetato. Se puede observar el ingreso de tres insumos diferentes, colas de espera, estaciones de servicio de producción, tanto manual como automáticas, los diferentes parámetros para estudiar cada escenario y los gráficos de resultados en tiempo real.

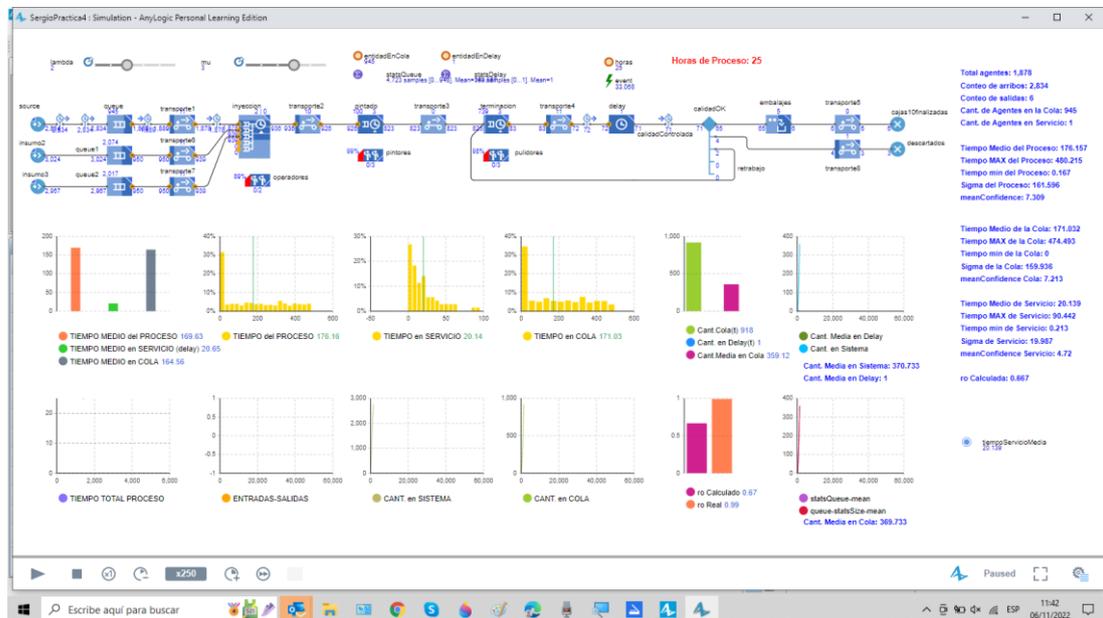


Figura 138 - Simulación de producción acetato. Fuente propia del autor.

Como se dijo, de este modo se podía observar en “tiempo real” lo que iba sucediendo en la línea de producción de acuerdo con los diferentes escenarios planteados, combinando distintos tipos de equipamientos automatizados, tareas manuales, paradas de máquina y distintas distribuciones de frecuencia de entrada de materiales y salidas de producción. Gracias a esta tecnología los gerentes en la planta pudieron observar que a partir de pequeños cambios era posible lograr mejoras sustanciales.

6.4. Conclusiones de los Casos de Estudio

El objetivo de los tres casos de estudio fue evaluar las T4.0 que dichas empresas están utilizando, sus beneficios y limitaciones. Si bien son de características diferentes, las tres son pyme familiares, lo cual es representativo del sector industrial argentino.

Se puede concluir que las tres empresas hacen un uso relativamente importante de la computación en la nube, la ciberseguridad y la analítica de datos. Puede también observarse que las tres, en mayor o menor grado, hacen uso de la sensorización de dispositivos y máquinas, fundamentalmente en la fase de producción.

Se muestra en la Tabla 18 la intensidad de uso de cada tecnología, en cada fase del ciclo de vida, para cada una de las tres empresas, y se las compara con el valor medio general del sector, análisis surgido del estudio (encuesta 3).

En esta comparación de los casos versus la media general, se puede ver que coincide el hecho de que CC, Cybsec y BD&A son las tecnologías más utilizadas para mejorar el desempeño y asegurar la calidad en todo el ciclo del flujo de valor.

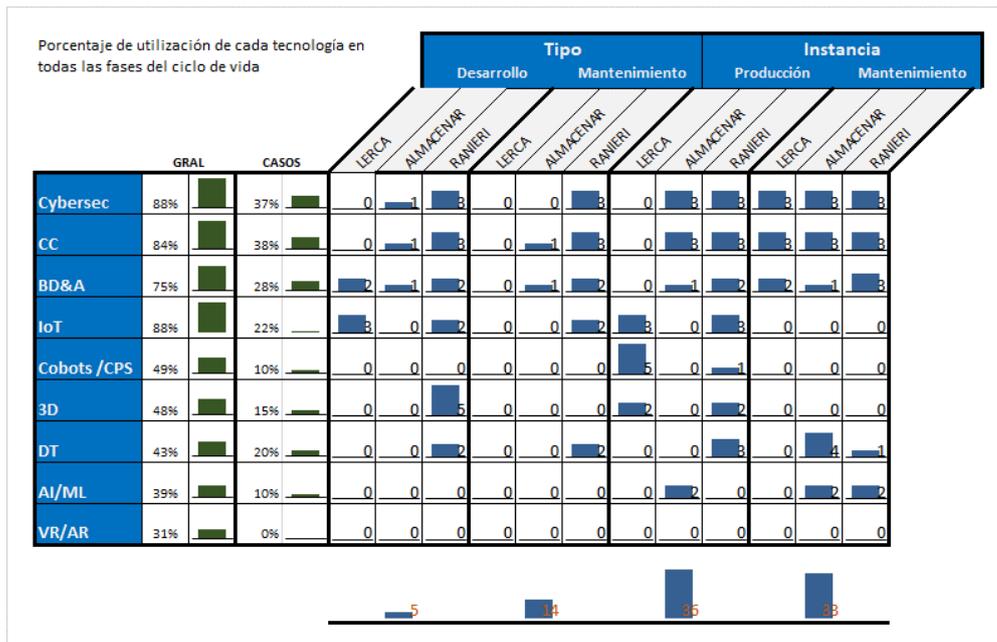
Se confirma también que los CPS, 3D, DT, AI/ML y VR/AR son las menos utilizadas.

Un punto de disidencia es en relación con el IoT. Mientras que en el promedio general de la encuesta arroja que el 88% de las empresas lo usa en alguna fase del ciclo de vida, en estos tres casos ello es menor al 22%. Una hipótesis que surge de las entrevistas en profundidad y los tres casos de estudio, es que aún no está muy claro para los responsables de calidad la clasificación de IoT. Se toma muchas veces como sistemas de IoT a sensorizaciones básicas de las máquinas, conectadas tal vez a sistemas, pero mediante redes locales y no a través de Internet. Esto se ve claramente en las entrevistas en profundidad, donde se puede explicar en detalle dichas diferencias, pero no así en las encuestas donde cada responsable de calidad simplemente responde con una calificación de 0 a 5 en qué medida utiliza IoT en fases de diseño, mantenimiento, producción o posventa, tal vez ellos sin comprender perfectamente el significado de cada una.

En relación con el uso de simulación, manufactura aditiva y uso de robots colaborativos por parte de cada una de las tres empresas, se confirma su utilización, pero de un modo rudimentario aún.

Como se explicó anteriormente se muestra en la siguiente ilustración la intensidad de uso de cada T4.0 en cada una de las fases y subfases. Se representa al pie de la ilustración un promedio general de uso de estas tres empresas analizadas notándose que en términos generales la intensidad de uso de T4.0 enfocadas a la gestión de la calidad sigue la distribución concluida como resultado de las encuestas generales también.

Tabla 18 - Utilización T4.0 por fase para cada caso de estudio



CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES GENERALES Y PERSPECTIVAS

7. CONCLUSIONES GENERALES Y PERSPECTIVAS

7.1. Marco de referencia para la Q4.0

Teniendo presente la definición de la Q4.0 a la cual se arribó a partir de estudios de distintos especialistas, se presenta el siguiente marco de referencia el cual se sintetiza a continuación.

Las nuevas tecnologías, las cuales son las habilitadoras de la Industria 4.0 y que también son denominadas Tecnologías 4.0, están evolucionando de manera exponencial, tal lo descrito en el punto 3.3.1.

El hecho de ser, actualmente, algo más masivas, ha reducido su costo e incrementado su difusión, de manera que se ha acelerado su aplicación en las distintas empresas.

Tal como se puede confirmar en el estudio de casos de tres pyme manufactureras en la Argentina, la computación en la nube y su necesaria ciberseguridad, la analítica de datos y el internet de las cosas, son las tecnologías más utilizadas.

Digitalización de la Industria

La orientación actual hacia la integración horizontal, es decir, el completo flujo de valor del sistema (proveedores – empresa – clientes) está generando nuevas oportunidades de negocio. Ello no sería posible sin un pensamiento sistémico y el IoT industrial. Es por ese motivo que la intersección entre la Tecnología y el Flujo de Valor, diere como resultado la digitalización de la industria. La innovación, tanto en los procesos como en los productos, avanza en pos de un mejor aprovechamiento de recursos, menor cantidad de desperdicios y errores, lo cual impacta positivamente en la calidad total.

Trabajo inteligente

Más allá de ello y sin lugar a duda las personas y su interrelación con sus pares dentro de la organización y entre las distintas organizaciones es la clave del trabajo inteligente. Se puede remitir al estudio cuantitativo de la I4.0 donde justamente una de sus 5 dimensiones es la de Trabajo Inteligente e incluía los factores de la planificación, las habilidades multidisciplinares de los trabajadores y las redes colaborativas, entre otros.

Excelencia Operativa

Si se analiza ahora la interrelación entre el Flujo de Valor de la empresa con el concepto del “ser humano en el centro”, se logra una mejora operativa, no sólo para los procesos sino para el bienestar de las personas.

Calidad 4.0

Se podría sintetizar diciendo que la integración vertical entre los sistemas operacionales y de información (OT/IT), la integración horizontal de todo el ciclo de vida del flujo de valor, las nuevas tecnologías y las redes colaborativas, permiten un aseguramiento de la calidad de los procesos y los productos en tiempo real y disponible para todos los interesados del sistema; ello se denomina Calidad 4.0 (Figura 139).

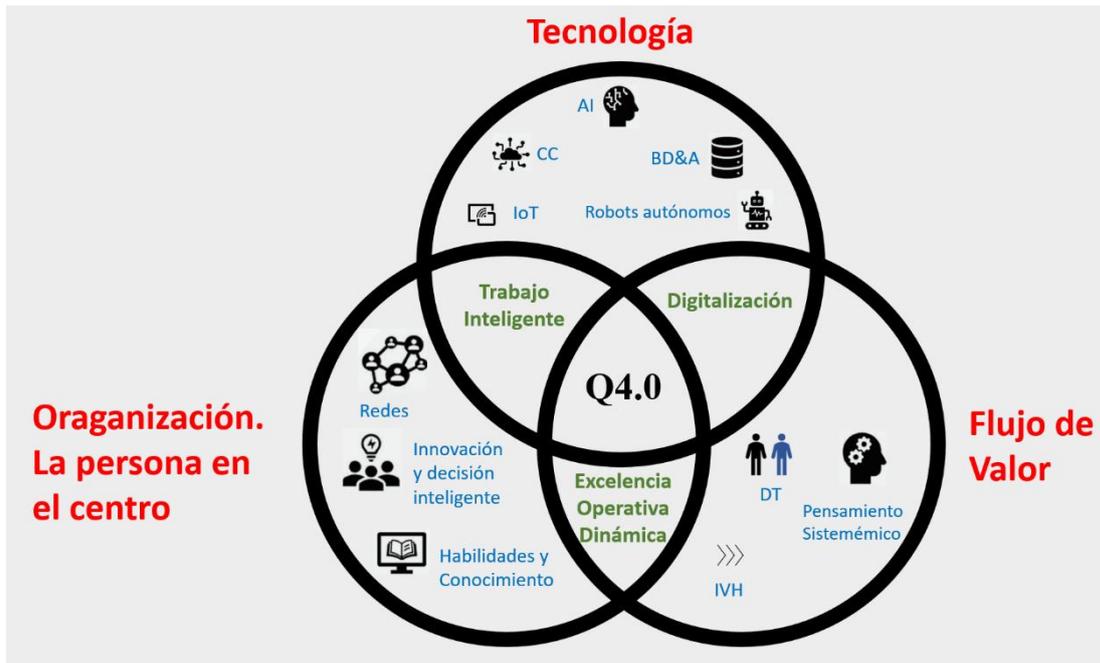


Figura 139 – Calidad 4.0. Fuente: propia del autor

Una nueva evolución se está concretando actualmente; el colocar en el centro a las personas humanas en lugar de las tecnologías, el cuidado del medioambiente y la presencia de los Objetivos de Desarrollo Sustentable, está siendo acuñado actualmente como Industria 5.0, y consecuentemente cuando se habla de la Gestión de la Calidad se lo redefine como Calidad 5.0.

Las redes colaborativas y las nuevas habilidades y conocimientos, junto a la creatividad e innovación, son las nuevas características en lo referente a la Organización. La mirada con foco en el cliente, externo o interno, fundamenta la Gestión por Procesos y la integración de todo el ciclo de vida del flujo de valor de la organización y el sistema.

Finalmente, las nuevas tecnologías habilitadoras de la I4.0, también conocidas como tecnologías exponenciales o T4.0, son el medio por el cual se puede hacer realidad el ideal del Ser Humano en el Centro.

Una de las preguntas que frecuentemente surge es cómo lograr esta evolución dentro de la empresa. Para ello, y sólo con el fin de marcar un posible camino para lograrlo, es que se propone la siguiente hoja de ruta hacia la Q4.0.

7.2. Hoja de ruta para la implementación de Q4.0

De acuerdo con lo relevado durante las reuniones y entrevistas con las empresas antes mencionadas, es que se dedujeron los pasos que se detallan a continuación. Debe tenerse en consideración que, para un más preciso análisis y propuestas puntuales, debería trabajarse más particularmente en cada organización donde se quisiera aplicar.

Esta hoja de ruta es el resultado del trabajo en campo, fundamentalmente en las 3 empresas mencionadas como casos de estudio. En resumen, se sugieren 10 pasos para avanzar hacia la digitalización de la Gestión de la Calidad:

1. Inicio.

El primer paso debería ser la aprobación, por parte de la alta gerencia, de un plan de proyecto de capacitación y digitalización, con el fin de delinear los detalles y comenzar a ejecutar el plan de acción. Las directrices generales se enumeran a continuación.

2. Formación de equipo y capacitación.

Una vez aprobado internamente el proyecto, se debería conformar un equipo de trabajo que lidere dicho proyecto de digitalización.

3. Relevamiento detallado de los 32 factores clave de la I4.0.

Una vez establecido el equipo y ya estando capacitado, se debería realizar una auditoría interna y exhaustiva de cada uno de los 32 factores. En base a los resultados, se establecerá un orden de prioridad y secuencia para abordar su solución o evolución.

4. Sensorización y Conectividad.

Con el fin de poder integrar horizontalmente la cadena de valor, y poder monitorear y controlar el proceso central, se debería conectar máquinas y sistemas vía internet con un IoT gateway.

5. Acceso remoto a máquinas y dispositivos.

En este punto ya se podría implementar el monitoreo y gestión remota de toda la fábrica / empresa. Puede suceder que algunas máquinas dispongan ya de dispositivos e interfaces, pero debería analizarse en detalle el estado de cada una de ellas. Una vez finalizado, debería trabajarse para hacer posible el acceso remoto a los puntos de monitoreo predefinidos.

6. Gestión de usuarios, procesos y aplicaciones.

En total acuerdo con la alta gerencia, se deberá definir y gestionar los usuarios, permisos, tableros de control y todo lo que permita un monitoreo y control de dispositivos interconectados.

7. Monitoreo y Análisis.

Una vez que comience la colecta de datos, se podrá analizar la información, de modo de no sólo tener tableros de información en tiempo real, sino predecir, probabilísticamente, diversos comportamientos e incidentes.

8. Enfoque impulsado por datos (Data-Driven).

Lo realizado en el punto 7, más sumado a los datos disponibles de otros sistemas ya integrados al control central, permitiría comenzar la gestión integral “impulsada por datos”. Tal como se ha mencionado en varias ocasiones en este trabajo, la toma de decisiones con el enfoque en los datos es una de las características más salientes de esta 4IR.

9. Nuevos productos y / o servicios.

La trazabilidad, extremo a extremo, el monitoreo en tiempo real, no sólo de la producción, del área comercial, sino de la relación con proveedores y, fundamentalmente clientes, ofrece la oportunidad de desarrollar nuevos productos y / o servicios que serán fuentes de ingresos adicionales a las actuales a partir de una estrategia de crecimiento de diversificación horizontal.

10. Sistemas Ciberfísicos.

Se sugiere, como último paso, la evaluación de la incorporación de sistemas autónomos con el fin de mejorar la productividad de la producción, calidad de los procesos y productos, logística y seguridad e higiene de los empleados.

7.3. Conclusiones finales y futuras líneas de investigación

Luego de varios años de relevamiento bibliográfico, análisis, estudio y producción académica, se ha comprobado la velocidad con que las disciplinas de la gestión e ingeniería están evolucionando. Nuevos términos se fueron acuñando a lo largo de este último lustro: Sociedad 5.0, Calidad 5.0, Industria 5.0 y organizaciones exponenciales, entre otros. Ello hizo de este trabajo un “documento vivo”, el cual exigía una actualización periódica. No es fácil reconocer cuando se está transitando un período disruptivo, como lo es una revolución industrial, pero es tal la rapidez del cambio en estos días que es imposible no percibirlo; una vez más, se comprueba que lo único permanente es el cambio, y cada vez más, como profesionales y académicos, se requiere de flexibilidad y agilidad para adaptarse a estas nuevas épocas.

Innovaciones disruptivas, inventos que se pudieron llevar a la práctica, son los que han marcado las distintas revoluciones industriales. La máquina a vapor, el uso de la electricidad en las fábricas, el semiconductor y la inteligencia artificial, fueron puntos de inflexión en la industria y, consecuentemente, en la sociedad.

La Internet (Interconnected Network – Red Interconectada), una red de computadoras interconectadas a nivel global, junto a otras tecnologías innovadoras, fueron generando una nueva evolución exponencial en lo referente a la informática y las telecomunicaciones, y un nuevo mundo virtual también se fue creando para brindar nuevas oportunidades en innumerables aplicaciones para toda la sociedad; fue de ese modo que se combinó y complementó el mundo real con el virtual, lo que dio origen a los sistemas ciberfísicos. A partir del semiconductor y las técnicas digitales comienza una transformación de la forma de aprender, trabajar y vivir, esa es la Transformación Digital, y cuando la 4^{ta} Revolución Industrial arribó a las fábricas, se la acuñó con el término Industria 4.0.

Se puede entonces responder las cuatro preguntas de investigación del presente trabajo.

1. ¿Cuál es el estado de arte de la I4.0 en la dimensión: Ciclo de Vida del Flujo de Valor?

No es simple definir exactamente el significado de la I4.0, pero tomando las palabras de los expertos se podría decir que el término I4.0 describe la revolución en la industria manufacturera en todo el mundo. Por lo tanto, es la combinación de la tecnología de la información, de operaciones e Internet en la fábrica; es la integración e interacción de tecnologías, tanto en el ámbito digital como físico; es la creación de los objetos inteligentes, que se comunican entre sí y crean una Internet de objetos y servicios. El mundo físico y el mundo virtual se integran en sistemas ciberfísicos. Entonces, también, es la DX aplicada a la industria; es la revolución de todo el proceso de la cadena de valor en las fábricas sobre la base del sistema de producción ciberfísico; es la integración de maquinaria y dispositivos físicos complejos con sensores y software en red, utilizados para predecir, controlar y planificar mejores resultados operativos, comerciales y sociales; y es un nuevo nivel de organización de la cadena de valor y su gestión a lo largo del ciclo de vida de los productos.

La I4.0 se ha estado estudiando especialmente desde la perspectiva tecnológica. Se han identificado distintas tecnologías, denominadas tecnologías habilitadoras de la I4.0, las T4.0, algunas de ellas muy novedosas y otras ya trabajadas por algunos años. La novedad es la articulación entre dichas tecnologías y las distintas aplicaciones que se están dando.

A lo largo del presente estudio, y debido a su impacto en la industria, se ha definido como tecnologías habilitadoras a las diez siguientes: IoT, CC, CPS, Cobots, DT, BD&A, AI, AM, VR y CS, agregándose la Integración Vertical y la Integración Horizontal como dos aplicaciones clave gracias a varias de las tecnologías antes mencionadas, ya no como tecnologías, sino como implementaciones mandatorias de la I4.0.

Durante estos últimos años se ha comenzado a dar mayor importancia a las personas dentro de esa I4.0. Es por tal motivo que, actualmente, se habla de la I4.0 centrada en las personas, incluso ya denominada Industria 5.0. No sólo se hace ahora hincapié en los seres humanos sino también en la sustentabilidad y medio ambiente.

Por su parte, el Marco de Referencia de la Arquitectura de la I4.0, denominado RAMI4.0, pone énfasis en la integración horizontal durante todo el ciclo de vida de un producto. Tal es así que ese es uno de los tres ejes que la representan. Dicha integración horizontal no está totalmente lograda, aunque comienzan a revelarse algunos casos prácticos de aplicación experimental. Sí, en cambio, pueden realizarse simulaciones, copias virtuales y gemelos digitales de lo que sería el mundo real, esto con el fin de analizar las bondades y nuevas oportunidades de negocio que dicha integración horizontal permitiría.

Un cambio de tal magnitud, una revolución industrial, obviamente impacta en todas las disciplinas y la Gestión de la Calidad no es ajena a ello; se procede, entonces, a dar respuesta a la segunda pregunta de investigación.

2. ¿Cuál es el estado de arte de Calidad 4.0 en la dimensión: Ciclo de Vida del Flujo de Valor?

La Calidad 4.0 se puede caracterizar como la digitalización de la Gestión de la Calidad Total y su efecto en la tecnología, los procesos y las personas.

Con frecuencia se enfatizan cuatro áreas principales para abordarla: el diseño y desarrollo, la producción, el servicio y la cultura empresarial. Se afirma que combina nuevas tecnologías con métodos tradicionales con el objetivo de llegar a nuevos niveles óptimos de excelencia operativa, desempeño e innovación.

Si bien no hay aún una definición aceptada por todos los especialistas sobre qué es la Q4.0, sí se pueden destacar algunas características. La Gestión de la Calidad es, actualmente, una disciplina impulsada por datos y vinculada a la ciencia de datos. Se impulsa el modelado y simulación para la ingeniería de calidad basada en evidencia, se fortalece el monitoreo y pronósticos, se busca una gestión de calidad integrada e innovadora, dependiendo de los niveles de madurez de la I4.0, se procura integrar ingeniería de confiabilidad con ingeniería de calidad y, finalmente, se mejora la calidad de la información.

Unas pocas asociaciones vinculadas con la Calidad definen, a la fecha, qué es la Q4.0. Ellas son, principalmente, la ASQ y la CQI, aunque la mayoría de ellas hace al menos mención de la aplicación de las nuevas tecnologías a la Gestión de la Calidad.

A partir de lo analizado se llega a la conclusión de que apenas la mitad de los estudios contemplan algún factor de impacto de las T4.0 en la Calidad, enfocándose primordialmente en el aspecto “blando” de la misma. No se ha encontrado ningún trabajo que evalúe el grado de impacto de cada una de las T4.0 en todas y cada una de las fases del ciclo de vida del flujo de valor, y es por ello la importancia del presente trabajo.

Se está entonces, ahora, en condiciones de responder las siguientes preguntas de investigación, ya referido en particular a la situación en la Argentina.

3. ¿Cuál es el estado actual de la Industria 4.0 y sus barreras de entrada en la Argentina?

Cabe destacar que todos los resultados presentados en este trabajo están basados en pruebas estadísticas, habiéndose realizado pruebas de normalidad, consistencia e hipótesis,

entre otras. Se trabajó con el software MS Excel™ y Minitab™. A partir de las primeras dos encuestas realizadas (I4.0 y Barreras) se concluye lo siguiente:

El desarrollo de I4.0 en Argentina está en un nivel de 2,5 (en una escala de 0 a 5). Esto indica que su desarrollo se encuentra aún a mitad de su recorrido. La encuesta fue realizada más de un año antes de la presentación de este trabajo, por lo que muy probablemente el grado de madurez haya evolucionado hasta la fecha.

De entre las 5 dimensiones propuestas, (1) Organización y Trabajo Inteligente, (2) Sistemas de Información, (3) Tecnologías habilitadoras, (4) Cadena de Valor Inteligente y (5) Manufactura Inteligente, el mejor desempeño pertenece a los Sistemas de Información, con un valor promedio general de 2.8 sobre 5, mientras que el peor desempeño de entre las 5 dimensiones del marco de referencia fue para Manufactura Inteligente, con una puntuación de 2,2 sobre 5.

Contrariamente a lo considerado al inicio de este estudio, no existe suficiente evidencia para confirmar una diferencia estadísticamente significativa entre la tasa promedio de desarrollo de los sectores de servicios y manufactura. Sin embargo, si se analiza cada dimensión por separado, se verifica un mejor desempeño en las de Organización y Trabajo Inteligente (Manufactura: 2.7 vs. Servicio 2.2) y Sistemas de Información (también Manufactura: 2.7 vs. Servicio 2.2).

Cuando se realiza un análisis conforme el factor tamaño de la empresa, se constata una marcada diferencia en el desarrollo de las medianas y grandes con respecto a las micro y pequeñas empresas. Las 5 dimensiones están más desarrolladas en los casos de medianas y grandes empresas que en las micro y pequeñas.

Por su parte, la segunda encuesta, Barreras de entrada a la I4.0, permite arribar a las siguientes conclusiones: en una comparación entre los que estuvieron Totalmente de Acuerdo y Muy de Acuerdo menos los que para esas mismas consignas estuvieron Poco de Acuerdo o en Desacuerdo, se observa que hay 7 factores con calificaciones claramente positivas. Ellos son, en orden de importancia: (1) Falta de Recursos Humanos especializados, (2) Falta de hoja de ruta y planificación, (3) Falta de Políticas Públicas, (4) Falta de conocimientos específicos (en la I4.0) y, en menor medida, los siguientes tres: (5) Falta de Capital y Financiación, (6) Reluctancia al cambio y (7) Inmadurez de la Organización.

Por su parte, esos mismos encuestados no estuvieron de acuerdo con las siguientes afirmaciones, por lo que se deduce que son barreras de entrada a la I4.0 muy bajas. Ellos fueron: Inadecuado Modelo de Negocio, Falta de apoyo de la Alta Dirección, Falta de Socios Estratégicos y Complejidad de la I4.0.

Existe una afirmación en la que se encontraron opiniones divididas, y tiene que ver con una infraestructura tecnológica débil. Cuando se analizan las respuestas, tomando en consideración el factor tamaño de la empresa, existe, efectivamente, una diferencia estadísticamente representativa entre las micro y pequeñas, comparadas con las medianas y grandes, donde en el caso de las micro y pequeñas se nota un mayor índice de dificultad, es decir, barreras de entrada altas. Por su parte, cuando se comparan las empresas de origen Nacional con las de origen Multinacional (extranjeras) no se puede afirmar, estadísticamente, que exista diferencia entre ellas. Es decir, ambas adolecen del mismo grado de entorpecimiento para ingresar a la I4.0. En otra comparación, en este caso entre empresas de Servicios y de Manufactura, los resultados indican que las empresas de servicios tendrían algún grado mayor de dificultad para afrontar los desafíos al entrar en la I4.0.

4. ¿Cuál es el impacto de las tecnologías 4.0 en la calidad y en el flujo de valor en la Argentina?

Finalmente se concluye para esta cuarta pregunta que, de entre las personas encuestadas, los mandos medios tienen una percepción de mejor uso de la tecnología; esto podría deberse a que los gerentes y directores tienen una visión más amplia del negocio y de ese modo pueden contemplar toda la cadena de valor, pero de manera menos profunda. En relación con las restantes dimensiones: Gobernanza, Garantía & Aseguramiento de la Calidad y

Aprendizaje & Mejora, no existe una diferencia significativa en la opinión de alta gerencia y operadores. De cualquier forma se puede observar, según los respondientes, una escasa aplicación de las nuevas tecnologías para con el aseguramiento de la calidad.

Cuando se analizan las respuestas en base al tamaño de las empresas, las micro y pequeñas empresas comparadas con las medianas y grandes, se puede observar una diferencia importante a favor de estas últimas en las cuatro dimensiones: Gobernanza, Garantía & Aseguramiento de la Calidad, Aprendizaje & Mejora y Contexto tecnológico. Además, se comprueba claramente la diferencia en cuanto a la no utilización de T4.0 a lo largo de todo el Flujo de Valor entre las medianas/grandes y micro/pequeñas empresas, aunque en ambos casos existe una incipiente mayor utilización en la fase de producción, seguidas por mantenimiento y uso.

Con respecto a las empresas multinacionales, denominadas en la encuesta como de origen extranjero, califican mejor en las cuatro dimensiones que las de origen nacional. Esto probablemente se deba a exigencias de las normas o estándares internacionales, no obligatorios en la Argentina. Tomando justamente en consideración el origen local o extranjero de las empresas encuestadas, se observa nuevamente, al igual que en el análisis anterior, una ventaja considerable en el uso de T4.0 por parte de las multinacionales. Nótese también que, congruentemente, el análisis de la no utilización de ninguna tecnología es significativamente menor en las empresas de origen extranjero.

Las empresas con perfil exportador (aquellas cuyos ingresos provienen fundamentalmente de exportaciones más que de operaciones locales) también califican mejor que las no exportadoras en las cuatro dimensiones. Esto se podría explicar debido a las exigencias de los mercados internacionales y la competencia en lo referente a la calidad en general. Se nota que la diferencia no es tan importante en las tecnologías habilitadoras en su totalidad, sino en su aplicación a la Gestión de la Calidad. En las empresas predominantemente exportadoras, también al igual que por su origen (nacional o extranjero), se nota una mayor utilización de tecnologías en todas sus fases y una menor frecuencia del no uso en ninguna fase del ciclo de vida del flujo de valor.

Con respecto al sector industrial al que pertenecen, y en consonancia con lo esperado debido a lo analizado en la búsqueda bibliográfica, la industria farmacéutica es la que mejor califica en las cuatro dimensiones, igualando su calificación con la automotriz en lo referente al uso de tecnología. En contraposición a ello, las industrias de alimentación y metalmeccánica argentinas están entre las peores calificadas (en la presente muestra). De todas formas, no se puede concluir definitivamente hasta no analizar los factores en detalle. Una hipótesis podría ser que la proporción importante de empresas pyme en el resultado de las alimenticias, que en el caso de la Argentina tiene un componente artesanal y familiar muy importante, y tal lo visto anteriormente, carecen de un suficiente desarrollo en lo tocante a la Gestión de la Calidad; es decir, que el tamaño de la empresa tiene más preponderancia que su sector industrial.

Se concluye también, a partir de estos resultados, que la fase de producción es la que más está haciendo uso de las T4.0 necesarias para la gestión de la calidad.

Enfocándose en los factores tecnológicos se observa que al menos 1 de cada 3 empresas no utilizan T4.0 a lo largo de todo el Flujo de Valor. Existe nuevamente una divergencia desde la perspectiva de la alta gerencia respecto de los operativos, aunque prevalece, sin duda, la no utilización. Se observa también que existe un mayor uso de T4.0, aunque no muy importante, en la fase de producción.

Las tecnologías habilitadoras más utilizadas para la gestión de la calidad a lo largo de todo el ciclo de vida del flujo de valor son: IoT, Ciberseguridad y Computación en la Nube.

Analizando cada fase y subfase del ciclo de vida del flujo de valor, se concluye, a partir de los resultados, que la fase de producción es, nuevamente, la que más está haciendo uso de las T4.0 necesarias para la gestión de la calidad. Tomando en consideración el valor definido como MediaTech se observa nuevamente que en la subfase Producción es donde más se utilizan dichas T4.0.

En resumen, a partir de las 129 respuestas válidas en esta tercera encuesta se podría validar que: (1) las empresas medianas y grandes están mejor preparadas y organizadas para el aseguramiento de la calidad con el uso de nuevas tecnologías, (2) las empresas con perfil exportador y / o de origen extranjero también están mejor calificadas, (3) de los sectores industriales encuestados, la industria farmacéutica es la mejor preparada, mientras que la metalmecánica califica entre las menos preparadas, (4) la fase con mayor incorporación de tecnología, aunque muy pobre aún, es la subfase de Producción y (5) las tecnologías habilitadoras con mayor uso general son: IoT, Ciberseguridad y Computación en la Nube.

LIMITACIONES DEL TRABAJO Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Las limitaciones del alcance geográfico y tamaño de las 3 encuestas realizadas hace que deba considerarse con cuidado y analizar más profundamente cada factor conforme cada segmentación. Cabe destacar también, como otro elemento limitante al presente trabajo, el impacto de las restricciones impuestas por las cuarentenas debido a la pandemia COVID 19. La misma redujo notablemente las visitas presenciales planificadas a plantas durante gran parte del estudio. Debido a ello, un análisis en campo más profundo aportaría un gran valor. En este aspecto, y destacando que no es el mismo tipo de trabajo planificado en un inicio, algunas de las simulaciones realizadas han reemplazado algunas observaciones previstas en planta, pero sólo desde el punto de vista académico.

Por su parte, la importancia de las personas, el factor humano, dentro de la disciplina de la Gestión de la Calidad, hace que la incipiente I5.0 tome en consideración mucho más profundamente este aspecto, motivo por el cual una actualización de este trabajo desde la perspectiva I5.0 sea mandatoria.

Desde una perspectiva meramente tecnológica se encuentran tres herramientas de vital importancia y en pleno desarrollo: la Inteligencia Artificial, la Manufactura Aditiva y la Realidad Virtual. Ellas están en acelerada evolución y la tendencia es su uso intensivo. La AM en la prototipación e inclusive, en algunos casos, para la manufactura personalizada; la VR, en lo referente a su uso como herramienta clave, no sólo para el control automatizado de la calidad sino para la capacitación del personal. Finalmente, la AI, fundamentalmente el ML, tiene un papel cada vez más preponderante en el monitoreo de la calidad.

Concluyendo, la 4^{ta} Revolución Industrial está impactando en la manera de gestionar la calidad en las empresas, no sólo debido a las nuevas tecnologías, sino a también por su impacto en las personas. Colocar al ser humano “en el centro” y dar la importancia que se merece a la sustentabilidad del medioambiente está llevando a un nuevo nivel a la actual Industria 4.0. Se podría decir, entonces, que se está frente a otra nueva revolución, o, al menos, una fuerte evolución, la cual se comenzó a acuñar como INDUSTRIA 5.0.

REFERENCIAS

- Abderahman Rejeb, J. G. K. and H. T. (2019). *Leveraging the Internet of Things and Blockchain in SC.pdf*. 1–22.
- Abramovici, M., Göbel, J. C., Savarino, P., & Gebus, P. (2017). Towards smart product lifecycle management with an integrated reconfiguration management. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 517(January), 489–498. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72905-3_43
- Acharya, P. (2021). *Virtual Reality. January*.
- Acosta, M. (2019). Inteligencia artificial: la cibernética del ser vivo y de la máquina. *Naturaleza y Libertad. Revista de Estudios Interdisciplinarios*, 12, 13–30. <https://doi.org/10.24310/natylib.2019.v0i12.6262>
- Adamik, A., & Nowicki, M. (2018). Preparedness of companies for digital transformation and creating a competitive advantage in the age of Industry 4.0. *Proceedings of the International Conference on Business Excellence*, 12(1), 10–24. <https://doi.org/10.2478/picbe-2018-0003>
- Ahmed, M. B., Sanin, C., & Szczerbicki, E. (2019). Smart virtual product development (SVPD) to enhance product manufacturing in industry 4.0. *Procedia Computer Science*, 159(2018), 2232–2239. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.398>
- Alcácer, V., & Cruz-Machado, V. (2019). Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 22(3), 899–919. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.01.006>
- Aldag, M. C., & Eker, B. (2018). What Is Quality 4.0 in the Era of Industry 4.0? *International Conference on Quality of Life, November*, 31–34. https://www.researchgate.net/publication/329442755_WHAT_IS_QUALITY_40_IN_THE_ERA_OF_INDUSTRY_40
- Ali, K., & Johl, S. K. (2022). Impact of Total Quality Management on SMEs Sustainable Performance in the Context of Industry 4.0. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 299(January), 608–620. https://doi.org/10.1007/978-3-030-82616-1_50
- Align technology to create market advantage.* (2018).
- Antony, B. J., Bhat, S., Jayaraman, R., Mcdermott, O., Sony, M., Snee, R., & States, U. (2022). The genealogy of Quality 4.0. *ISE Magazine*, 34–40. www.iise.org/ISEmagazine
- Antony, J., McDermott, O., & Sony, M. (2021). Quality 4.0 conceptualisation and theoretical understanding: a global exploratory qualitative study. *The TQM Journal, ahead-of-p*(ahead-of-print). <https://doi.org/10.1108/tqm-07-2021-0215>
- Antunes, J., Pinto, A., Reis, P., & Henriques, C. (2018). Industry 4.0: a challenge of competition. *Millenium - Journal of Education, Technologies, and Health*, 6, 89–97. <https://doi.org/10.29352/mill0206.08.00159>
- Armando W. Colombo, Thomas Bangemann, Stamatis Karnouskos, Jerker Delsing, Petr Stluka, Robert Harrison, Francois Jammes, J. L. L. (2014). *Industrial Cloud-Based Cyber-Physical Systems: The IMC-AESOP Approach*. Springer.
- Arsovski, S. (2019). *Social oriented quality : from. 1*, 397–404.
- Aruväli, T., & Rauch, E. (2022). ERP and Digital Planning in Learning Factories for Increasing Digital Resilience. *Proceedings of the 15th EPIEM Conference 2022, June*.
- Asif, M. (2020). Are QM models aligned with Industry 4.0? A perspective on current practices. *Journal of Cleaner Production*.
- Assenza, G., Faramondi, L., Vollero, L., & Oliva, G. (2018). Quaderno Aspetti innovativi dell'industria 4.0 e applicazione alla sanità e all'industria farmaceutica Innovative aspects of Industry 4.0 and its application to health and the pharmaceutical industry QUADERNO. *Medic*, 26(2), 25–31.

- Ates, E., Bostanci, E., & Guzel, M. (2020). Security Evaluation of Industry 4.0: Understanding Industry 4.0 on the Basis of Crime, Big Data, Internet of Things and Cyber Physical Systems. *Güvenlik Bilimleri Dergisi, February*, 29–50. <https://doi.org/10.28956/gbd.695889>
- Azarian, M., Yu, H., & Solvang, W. D. (2021). Integrating Additive Manufacturing into a Virtual Industry 4.0 Factory. In *Lecture Notes in Electrical Engineering* (Vol. 737). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6318-2_73
- Babatunde, O. (2020). Mapping the implications and competencies for Industry 4.0 to hard and soft total quality management. *TQM Journal*.
- Bader, S., Barnstedt, E., Bedenbender, H., Billman, M., Boss, B., & Braunmandl, A. (2020). Details of the Asset Administration Shell Part 1 - The exchange of information between partners in the value chain of Industrie 4.0. *Plattform Industrie 4.0, 0*, 473.
- Banik, A., Taqi, H. M. M., Ali, S. M., Ahmed, S., Garshasbi, M., & Kabir, G. (2020). Critical success factors for implementing green supply chain management in the electronics industry: an emerging economy case. *International Journal of Logistics Research and Applications, 0(0)*, 1–28. <https://doi.org/10.1080/13675567.2020.1839029>
- Bänziger, T., Kunz, A., & Wegener, K. (2020). Optimizing human–robot task allocation using a simulation tool based on standardized work descriptions. *Journal of Intelligent Manufacturing, 31(7)*, 1635–1648. <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1411-1>
- Batchkova, I. A., Gocheva, D. G., & Georgiev, D. (2017). Iec-62264 Based Quality Operations Management According the Principles of Industrial Internet of Things. *Scientific Proceedings Xiv International Congress "Machines. Technologies. Materials, VI(3)*, 431–434.
- Beste, C., Welo, T., & Ringen, G. (2019). Newness and outcomes in commodity-driven new-product development projects: A survey in the Norwegian manufacturing industry. *Procedia CIRP, 84*, 749–754. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.269>
- Bhosale, S., Patil, R. B., & Karjulkar, J. (2016). Augmented Reality. *2018 Fourth International Conference on Computing Communication Control and Automation (ICCUBEA), June*, 36–48.
- Bisio, I., Garibotto, C., Grattarola, A., Lavagetto, F., & Sciarrone, A. (2018). Exploiting context-aware capabilities over the internet of things for industry 4.0 applications. *IEEE Network, 32(3)*, 108–114. <https://doi.org/10.1109/MNET.2018.1700355>
- Borshchev, A. (2014). Multi-method modelling: AnyLogic. In *Discrete-Event Simulation and System Dynamics for Management Decision Making* (Vol. 9781118349, Issue April 2014). <https://doi.org/10.1002/9781118762745.ch12>
- Braun, M. (2009). Industry 4.0: Opportunities and Challenges for Operations Management Tava. *Word-Formation and Creolisation, 1–2*. <https://doi.org/10.1515/9783484970229.1>
- Brodaj, E. E. (2022). The evolution of quality: from inspection to quality 4.0. *International Journal of Quality and Service Sciences, 2020*. <https://doi.org/10.1108/IJQSS-09-2021-0121>
- Bunzendahl, S., & Schneider, O. (2021). *Direct Impacts of Industry 4.0 To Purchasing 4.0 and Quality 4.0* (Issue September). <https://doi.org/10.7441/dokbat.2021.10>
- Candia, L. D., Rodríguez, A. S., Castro, N., Bazán, P., Ambrosi, V. M., Díaz, J., & Industria, P. C. (2018). *Mejoras en maquinaria industrial con IoT. Hacia la. 715–724*.
- Carreras Guzman, N. H., Wied, M., Kozine, I., & Lundteigen, M. A. (2020). Conceptualizing the key features of cyber-physical systems in a multi-layered representation for safety and security analysis. *Systems Engineering, 23(2)*, 189–210. <https://doi.org/10.1002/sys.21509>
- Carvalho, A. V., Enrique, D. V., Chouchene, A., & Charrua-Santos, F. (2021). Quality 4.0: An overview. *Procedia Computer Science, 181(2019)*, 341–346. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.176>
- Centobelli, P., Cerchione, R., Murino, T., & Gallo, M. (2016). Layout and material flow optimization in digital factory. *International Journal of Simulation Modelling, 15(2)*, 223–235. [https://doi.org/10.2507/IJSIMM15\(2\)3.327](https://doi.org/10.2507/IJSIMM15(2)3.327)

- Chakraborty, S., Adhikari, S., & Ganguli, R. (2021). The role of surrogate models in the development of digital twins of dynamic systems. *Applied Mathematical Modelling*, *90*, 662–681. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.09.037>
- Chang, R. N. Y. (2018). *Smart Industry Adoption: how analytics affect SMEs in the Netherlands*. 1–29.
- Chang, S. C., Chang, H. H., & Lu, M. T. (2021). Evaluating industry 4.0 technology application in smes: Using a hybrid mcdm approach. *Mathematics*, *9*(4), 1–20. <https://doi.org/10.3390/math9040414>
- Chiarini, A., & Kumar, M. (2020). Lean Six Sigma and Industry 4.0 integration for Operational Excellence: evidence from Italian manufacturing companies. *Production Planning and Control*, *32*(4), 1–18. <https://doi.org/DOI: 10.1080/09537287.2020.1784485>
- Chinga-Carrasco, G. (2021). Biocomposite inks for 3D printing. *Bioengineering*, *8*(8), 10–12. <https://doi.org/10.3390/bioengineering8080102>
- Chiu, Y. C., Cheng, F. T., & Huang, H. C. (2017). Developing a factory-wide intelligent predictive maintenance system based on Industry 4.0. *Journal of the Chinese Institute of Engineers, Transactions of the Chinese Institute of Engineers, Series A/Chung-Kuo Kung Ch'eng Hsueh K'an*, *40*(7), 562–571. <https://doi.org/10.1080/02533839.2017.1362357>
- Chouchene, A., Carvalho, A., Lima, T. M., Charrua-Santos, F., Osório, G. J., & Barhoumi, W. (2020). Artificial Intelligence for Product Quality Inspection toward Smart Industries: Quality Control of Vehicle Non-Conformities. *ICITM 2020 - 2020 9th International Conference on Industrial Technology and Management*, 127–131. <https://doi.org/10.1109/ICITM48982.2020.9080396>
- Cotrino, A., Sebastián, M. A., & González-Gaya, C. (2020). Industry 4.0 roadmap: Implementation for small and medium-sized enterprises. *Applied Sciences (Switzerland)*, *10*(23), 1–17. <https://doi.org/10.3390/app10238566>
- Dalzochio, J., Kunst, R., Pignaton, E., Binotto, A., Sanyal, S., Favilla, J., & Barbosa, J. (2020). Machine learning and reasoning for predictive maintenance in Industry 4.0: Current status and challenges. *Computers in Industry*, *123*, 103298. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103298>
- Darnley, R., Diplacido, M., Kerns, M., & Kim, A. (2018). Industry 4.0: Digitization in Danish Industry. *Interactive Qualifying Projects (All Years)*, *April*, 127.
- de Landazuri Suárez, I. O. (2021). Design of comminution in ceramic plants using a simulation-based optimization approach. *Ingeniería e Investigación*, *41*(3), 1–9. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v41n3.87761>
- De Marchi, M., Mark, B. G., Angeli, N., Rauch, E., & Matt, D. T. (2022). Using RFID and Industrial IoT in Manual Assembly for Data Collection and Processing in Learning Factories. *SSRN Electronic Journal*, *i*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4074692>
- Della, S., Individuale, R., Divisione, U. N. A., Vita, D. I., & Laureati, U. E. (2020). *SFIDA DELLA RIVOLUZIONE INDIVIDUALE*. *January*, 0–9.
- Demartini, M., Evans, S., & Tonelli, F. (2019). Digitalization technologies for industrial sustainability. *Procedia Manufacturing*, *33*, 264–271. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.04.032>
- Demartini, M., & Tonelli, F. (2018). Quality management in the industry 4.0 era. *Proceedings of the Summer School Francesco Turco, 2018-Sette*, 8–14.
- Dias, A. M., Carvalho, A. M., & Sampaio, P. (2021). Quality 4.0: literature review analysis, definition and impacts of the digital transformation process on quality. *International Journal of Quality and Reliability Management*, *October*. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-07-2021-0247>
- Diaz, A., Schöggel, J. P., Reyes, T., & Baumgartner, R. J. (2021). Sustainable product development in a circular economy: Implications for products, actors, decision-making support and lifecycle information management. *Sustainable Production and Consumption*, *26*, 1031–1045. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.12.044>
- Dikhanbayeva, D., Tokbergenova, A., Lukhmanov, Y., Shehab, E., Pastuszak, Z., & Turkyilmaz, A. (2021). Critical factors of industry 4.0 implementation in an emerging country: Empirical study. *Future Internet*, *13*(6). <https://doi.org/10.3390/fi13060137>

- Djuric, A. M., Rickli, J. L., & Urbanic, R. J. (2016). A Framework for Collaborative Robot (CoBot) Integration in Advanced Manufacturing Systems. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 9(2), 457–464. <https://doi.org/10.4271/2016-01-0337>
- DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE. (2018). German Standardsation Roadmap: Industrie 4.0. *DIN e. V.*, 146.
- DMSC. (2014). Quality Information Framework (QIF) - An Integrated Model for Manufacturing Quality Information: Part 1. *CMM Quarterly*, 173.
- dos Santos, C. H., Lima, R. D. C., Leal, F., de Queiroz, J. A., Balestrassi, P. P., & Montevechi, J. A. B. (2020). A decision support tool for operational planning: a Digital Twin using simulation and forecasting methods. *Production*, 30, 1–17. <https://doi.org/10.1590/0103-6513.20200018>
- Duan, H., & Tian, F. (2020). The development of standardized models of digital twin. *IFAC-PapersOnLine*, 53(5), 726–731. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.04.164>
- Ducassé, P. (1979). *Historia de las Técnicas* (6ta ed.). Editorial Universitaria de Buenos Aires.
- Durão, L. F. C. dos S., Zancul, E. de S., & Schützer, K. (2021). Digital twin: a concept in evolution. *Product Management & Development*, 19(1), e20210001. <https://doi.org/10.4322/pmd.2021.003>
- Dutkova, S., Achimsky, K., & Drozdziel, P. (2020). Simulation of a queuing system of a post office in anylogic software. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*, 22(2), 15–22. <https://doi.org/10.26552/com.C.2020.2.15-22>
- Dutta, G., Kumar, R., Sindhwani, R., & Singh, R. K. (2021). Digitalization priorities of quality control processes for SMEs: a conceptual study in perspective of Industry 4.0 adoption. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 32(6), 1679–1698. <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01783-2>
- Elg, M., Birch-Jensen, A., Gremyr, I., Martin, J., & Melin, U. (2021). Digitalisation and quality management: problems and prospects. *Production Planning and Control*, 32(12), 990–1003. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1780509>
- Elhidaoui, S., Benhida, K., El Fezazi, S., Kota, S., & Lamalem, A. (2022). Critical Success Factors of Blockchain adoption in Green Supply Chain Management: Contribution through an Interpretive Structural Model. *Production and Manufacturing Research*, 10(1), 1–23. <https://doi.org/10.1080/21693277.2021.1990155>
- Emblemsvåg, J. (2020). On Quality 4.0 in project-based industries. *TQM Journal*, 32(4), 725–739. <https://doi.org/10.1108/TQM-12-2019-0295>
- Eng, A., & Nikolova-Jahn, I. (2019). Quality Management And Requirements Of The Fourth Technical Revolution. *International Scientific Journal 'Industry 4.0'*, IV(2), 61–63. <https://stumejournals.com/journals/i4/2019/2/61/pdf>
- Enke, J., Glass, R., Kreß, A., Hambach, J., Tisch, M., & Metternich, J. (2018). Industrie 4.0 - Competencies for a modern production system: A curriculum for Learning Factories. *Procedia Manufacturing*, 23(January), 267–272. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.04.028>
- Ennis, C., Barnett, N., De Cesare, S., Lander, R., & Pilkington, A. (2020). A Conceptual Framework for Servitization in Industry 4.0: Distilling Directions for Future Research. *SSRN Electronic Journal*, April, 0–8. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3529276>
- Esben H. Østergaard. (2017). *The role of cobots in industry 4.0*. Universal Robots.
- Essakly, A., Wichmann, M., & Spengler, T. S. (2019). A reference framework for the holistic evaluation of Industry 4.0 solutions for small- And medium-sized enterprises. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 427–432. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.093>
- Estamsetty, V. P. (2021). *Cloud Computing, Mobile Cloud Computing and its Comparative Study*. January. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30812.41601>
- European Commission. (2017). *Integration of Digital Technology by Enterprises*. 1–7.
- Fager, P., Calzavara, M., & Sgarbossa, F. (2020). Modelling time efficiency of cobot-supported kit preparation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(5–6), 2227–2241. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04679-x>

- Faller, C., & Feldmüller, D. (2015). Industry 4.0 learning factory for regional SMEs. *Procedia CIRP*, 32, 88–91. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.117>
- Fayomi, O. S. I., Akande, I. G., Esse, U. C., & Oladipupo, S. (2020). Examining the roles and challenges of human capital influence on 4th industrial revolution. *AIP Conference Proceedings*, 2307(December). <https://doi.org/10.1063/5.0033737>
- Ferber, M. (2015). *Qualitätsmanagement im Rahmen Industrie 4.0*.
- Fernandez, G. (2002). Los Métodos PROMETHEE: una Metodología de Ayuda a la Toma de Decisiones Multicriterio Discretas. *Serie Monográfica. Revista Rect*, 17.
- Ferreira, F., Faria, J., Azevedo, A., & Marques, A. L. (2016). Product lifecycle management enabled by industry 4.0 technology. *Advances in Transdisciplinary Engineering*, 3, 349–354. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-668-2-349>
- Foidl, H., & Felderer, M. (2020). *Research Challenges of Industry 4.0 for Quality Management*. 1–17.
- Fonseca, L., Amaral, A., & Oliveira, J. (2021a). Quality 4.0: The efqm 2020 model and industry 4.0 relationships and implications. *Sustainability (Switzerland)*, 13(6), 0–20. <https://doi.org/10.3390/su13063107>
- Fonseca, L., Amaral, A., & Oliveira, J. (2021b). Quality 4.0: The efqm 2020 model and industry 4.0 relationships and implications. *Sustainability (Switzerland)*, 13(6), 0–20. <https://doi.org/10.3390/su13063107>
- Ford, W., & Baum, M. S. (1997). *Secure electronic commerce* (Kathleen M. Caren & Mary Franz, Eds.). Prentice-Hall, Inc.
- Forero, D. V., & Sisodia, R. (2020). *Quality 4.0 – How to Handle Quality in the Industry 4.0 Revolution Master's thesis in Quality and Operations Management*. January.
- Frank, A. G., Dalenogare, L. S., & Ayala, N. F. (2019). Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*, 210(January), 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>
- Gadre, M., & Deoskar, A. (2020). Industry 4.0 – Digital Transformation, Challenges and Benefits. *International Journal of Future Generation Communication and Networking*, 13(2), 139–149.
- Gaiardelli, P., Pezzotta, G., Rondini, A., Romero, D., Jarrahi, F., Bertoni, M., Wiesner, S., Wuest, T., Larsson, T., Zaki, M., Jussen, P., Boucher, X., Bigdeli, A. Z., & Cavalieri, S. (2021). Product-service systems evolution in the era of Industry 4.0. In *Service Business* (Vol. 15, Issue 1). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/s11628-021-00438-9>
- Gajdzik, B., Grabowska, S., & Saniuk, S. (2021). A theoretical framework for industry 4.0 and its implementation with selected practical schedules. *Energies*, 14(4), 1–24. <https://doi.org/10.3390/en14040940>
- Gajsek, B., Marolt, J., Rupnik, B., Lerher, T., & Sternad, M. (2019). Using maturity model and discrete-event simulation for industry 4.0 implementation. *International Journal of Simulation Modelling*, 18(3), 488–499. [https://doi.org/10.2507/IJSIMM18\(3\)489](https://doi.org/10.2507/IJSIMM18(3)489)
- Ganzarain, J., & Errasti, N. (2016). Three stage maturity model in SME's towards industry 4.0. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 9(5), 1119–1128. <https://doi.org/10.3926/jiem.2073>
- Gao, J., & Bernard, A. (2018). An overview of knowledge sharing in new product development. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(5–8), 1545–1550. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0140-5>
- Gattu, M. (Department of C. and I. / B. (2021). *Internet of Things*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31763.50722>
- Gautam, P., & Singh, Y. P. (2018). Impact of Data Mining on Big Data Analytics: Challenges and Opportunities. *International Journal of Computer Trends and Technology*, 57(1), 19–26. <https://doi.org/10.14445/22312803/ijctt-v57p104>
- Genest, M. C., & Gamache, S. (2020). Prerequisites for the implementation of industry 4.0 in manufacturing SMEs. *Procedia Manufacturing*, 51(2019), 1215–1220. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.170>
- Gerekli, İ., Çelik, T. Z., & Bozkurt, İ. (2021). Industry 4.0 and Smart Production. *TEM Journal*, 10(2), 799–805. <https://doi.org/10.18421/TEM102-37>

- Ghosh, A. (2017). *Dynamic Systems for Everyone*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-43943-3>
- Gualtieri, L., Rauch, E., Rojas, R., Vidoni, R., & Matt, D. T. (2018). Application of Axiomatic Design for the Design of a Safe Collaborative Human-Robot Assembly Workplace. *MATEC Web of Conferences*, 223. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822301003>
- Gualtieri, L., Rojas, R. A., Ruiz Garcia, M. A., Rauch, E., & Vidoni, R. (2020). Implementation of a laboratory case study for intuitive collaboration between man and machine in sme assembly. In *Industry 4.0 for SMEs: Challenges, Opportunities and Requirements*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-25425-4_12
- Hackmann, C. H., dos Reis, D. de A. L., & de Assis Neto, A. C. (2019). Digital revolution in veterinary anatomy: Confection of anatomical models of canine stomach by scanning and three-dimensional printing (3D). *International Journal of Morphology*, 37(2), 486–490. <https://doi.org/10.4067/S0717-95022019000200486>
- Hair, J. F., Anderson, R. E., Mehta, R., & Babin, B. J. (2010). *Administración de Ventas. Relaciones y Sociedades con el cliente* (S. A. Cengage Learning Editores, Ed.).
- Hakeem, A. A. A., Solyali, D., Asmael, M., & Zeeshan, Q. (2020). *Smart Manufacturing for Industry 4. 0 using Radio Frequency Identification (RFID) Technology*. 32(1), 31–38. [https://doi.org/10.17576/jkukm-2020-32\(1\)-05](https://doi.org/10.17576/jkukm-2020-32(1)-05)
- Hamzeh, R., Zhong, R., & Xu, X. W. (2018). A Survey Study on Industry 4.0 for New Zealand Manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 26, 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.007>
- Hankammer, S., Brenk, S., Fabry, H., Nordemann, A., & Piller, F. T. (2019). Deriving Product-Service Systems for a Circular Economy based on Consumer Needs. An Outcome-Driven Innovation Study in the Consumer Electronics Industry SMC Excel (Enhancing Sustainability by Mass Customization for European Consumer Electronics) View proj. *Researchgate.Net*, October.
- Hansen, E. B., & Bøgh, S. (2021). Artificial intelligence and internet of things in small and medium-sized enterprises: A survey. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 362–372. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.08.009>
- Hartmann, D., & Auweraer, H. Van Der. (2022). Chapter 1. In *Blockchain and Other Emerging Technologies for Digital Business Strategies* (Issue May). https://doi.org/10.1007/978-3-030-98225-6_5
- Haseeb, M., Hussain, H. I., Ślusarczyk, B., & Jermisittiparsert, K. (2019). Industry 4.0: A solution towards technology challenges of sustainable business performance. *Social Sciences*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/socsci8050154>
- Hernandez-de-Menendez, M., Morales-Menendez, R., Escobar, C. A., & McGovern, M. (2020). Competencies for Industry 4.0. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 14(4), 1511–1524. <https://doi.org/10.1007/s12008-020-00716-2>
- Hernández-Sampieri, R. (2018). *Metodología de la Investigación* (6th ed.). McGraw Hill.
- Hofmann, E., & Rüsçh, M. (2017). Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. *Computers in Industry*, 89(August), 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2017.04.002>
- Horváth, D., & Szabó, R. Z. (2019). Driving forces and barriers of Industry 4.0: Do multinational and small and medium-sized companies have equal opportunities? *Technological Forecasting and Social Change*, 146. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.05.021>
- Huang, C. J., Chicoma, E. D. T., & Huang, Y. H. (2019). Evaluating the factors that are affecting the implementation of industry 4.0 technologies in manufacturing MSMEs, the case of Peru. *Processes*, 7(3). <https://doi.org/10.3390/PR7030161>
- Hussain, F., & Qi, M. (2021). *Security Vulnerabilities of Popular Smart Home Appliances Security Vulnerabilities of Popular Smart Home Appliances*. April.
- Hyun Park, S., Shin, W. S., Hyun Park, Y., & Lee, Y. (2017). Building a new culture for quality management in the era of the Fourth Industrial Revolution. *Total Quality Management and Business Excellence*, 1(28), 1–12.

- I Klačková1, I Kuric1, I Zajačko1, V Tlach1, D. W. 1University. (2011). Virtual Reality & Augmented Reality in Industry. *Virtual Reality & Augmented Reality in Industry*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-17376-9>
- Ingaldi, M., & Ulewicz, R. (2020). Problems with the implementation of industry 4.0 in enterprises from the SME sector. *Sustainability (Switzerland)*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/SU12010217>
- Jaiswal, A., Basu, R., & Bholá, P. (2019). Proposed decision framework for smart product development in industry 4.0: An Indian Perspective. *2019 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT 2019, April*, 628–633. <https://doi.org/10.1109/CoDIT.2019.8820582>
- Jolly Rich. (2015). *Systems Thinking For Business* (1st ed.). System Thinking Solutions, LLC.
- Jussen, P., Kuntz, J., Senderek, R., & Moser, B. (2019). Smart service engineering. *Procedia CIRP*, 83, 384–388. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.089>
- Kagermann, H. (n.d.). *HISTORIA - STRUKTURWANDEL (2011) - ORIGENES DE LA I4*.
- Karmakar, A., Dey, N., Baral, T., Chowdhury, M., & Rehan, M. (2019). Industrial internet of things: A review. *2019 International Conference on Opto-Electronics and Applied Optics, Optronix 2019, March 2019*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/OPTRONIX.2019.8862436>
- Kiklhorn, D., Wolny, M., Austerjost, M., & Michalik, A. (2020). Digital lifecycle records as an instrument for inter-company knowledge management. *Procedia CIRP*, 93, 292–297. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.03.062>
- Kim, S., Castillo, R. P. Del, Caballero, I., Lee, J., Lee, C., Lee, D., Lee, S., & Mate, A. (2019). Extending Data Quality Management for Smart Connected Product Operations. *IEEE Access*, 7, 144663–144678. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2945124>
- Koçoğlu, F. Ö., & Demirkol, D. (2020). Data in the Context of Industry 4.0. In *Who Runs the World: Data* (Issue December). <https://doi.org/10.26650/b/et06.2020.011.04>
- Koontz, H., Weihrich, H., & Cannice, M. (2008). *Administración. Una perspectiva global y empresarial* (13ra ed.). McGraw-Hill/Interamericana editores s.a.
- Kovács, G., Benotsmane, R., & Dudás, L. (2019). the Concept of Autonomous Systems in Industry 4.0. *Advanced Logistic Systems - Theory and Practice*, 12(1), 77–87. <https://doi.org/10.32971/als.2019.006>
- Kowang, T. O., Ying, Y. C., Yew, L. K., Hee, O. C., Fei, G. C., Long, C. S., & Saadon, M. S. I. bin. (2019). Industry 4.0 Competencies for Production Equipment Manufacturers in Malaysia. *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*, 9(2), 300–311. <https://doi.org/10.6007/ijarbss/v9-i2/5545>
- Kozma, D., Soos, G., & Varga, P. (2019). *Supporting Digital Production , Product Lifecycle and Supply Chain Management in Industry 4 . 0 by the Arrowhead Framework – a Survey*. July.
- Kragic, D., Gustafson, J., Karaoguz, H., Jensfelt, P., & Krug, R. (2018). Interactive, collaborative robots: Challenges and opportunities. *IJCAI International Joint Conference on Artificial Intelligence, 2018-July*, 18–25. <https://doi.org/10.24963/ijcai.2018/3>
- Kruszewska, J., Michna, A., & Forces, D. (2021). *Driving forces , barriers and competences in the implementation of industry 4 . 0 : literature review driving forces , barriers and competences in the implementation of industry 4 . 0 : literature review*. July, 0–7.
- Kuila, N., Patki, A., Ozarkar, Y., & Gite, Y. (2021). *Study of disruptive trends in digitalization in the era of Industry 4.0*. June, 1–6.
- Kulkarni, V. N., Gaitonde, V. N., & Kotturshettar, B. B. (2021). Product Lifecycle Management (PLM): A Key Enabler in Implementation of Industry 4.0. In *Handbook of Smart Materials, Technologies, and Devices*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58675-1_14-1
- Kumar, P., Bhamu, J., & Sangwan, K. S. (2021). Analysis of Barriers to Industry 4.0 adoption in Manufacturing Organizations: An ISM Approach. *Procedia CIRP*, 98, 85–90. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.010>
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business and Information Systems Engineering*, 6(4), 239–242. <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>

- Leander, B., Čaušević, A., & Hansson, H. (2019). Applicability of the IEC 62443 standard in Industry 4.0 / IIoT. *ACM International Conference Proceeding Series*. <https://doi.org/10.1145/3339252.3341481>
- Learning, A., Jane, B. Y., September, H., & Maps, T. G. (2019). *Four steps to succeed with the artificial intelligence of things*.
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3(December), 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
- Lee, J., Davari, H., Singh, J., & Pandhare, V. (2018). Industrial Artificial Intelligence for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 18(September), 20–23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.09.002>
- Lee, J. H., & Pilkington, M. (2017). How the Blockchain Revolution Will Reshape the Consumer Electronics Industry [Future Directions]. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 6(3), 19–23. <https://doi.org/10.1109/MCE.2017.2684916>
- Leitão, P., Colombo, A. W., & Karnouskos, S. (2016). Industrial automation based on cyber-physical systems technologies: Prototype implementations and challenges. *Computers in Industry*. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2015.08.004>
- Leng, J., Ruan, G., Jiang, P., Xu, K., Liu, Q., Zhou, X., & Liu, C. (2020). Blockchain-empowered sustainable manufacturing and product lifecycle management in industry 4.0: A survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 132(October). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110112>
- Liao, Y., Loures, E. R., Deschamps, F., Brezinski, G., & Venâncio, A. (2018). The impact of the fourth industrial revolution: a cross-country/region comparison. *Production*, 28(0). <https://doi.org/10.1590/0103-6513.20180061>
- Lins, R. G., & Givigi, S. N. (2021). Cooperative Robotics and Machine Learning for Smart Manufacturing: Platform Design and Trends within the Context of Industrial Internet of Things. *IEEE Access*, 9, 95444–95455. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3094374>
- Liu, X. L., Wang, W. M., Guo, H., Barenji, A. V., Li, Z., & Huang, G. Q. (2020). Industrial blockchain based framework for product lifecycle management in industry 4.0. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 63(October 2019), 101897. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101897>
- Logunova, I. V., Salikov, Y. A., Kablashova, I. V., Amelin, S. V., & Enina, E. P. (2020). *Modernization of Quality Management System in the Conditions of Digital Transformation of Enterprise*. 148(RuDÉck), 417–422. <https://doi.org/10.2991/aebmr.k.200730.076>
- Lutters, E. (2018). Pilot production environments driven by digital twins e. Lutters 1,2 * article info. *South african journal of industrial engineering*, 29(3), 40–53.
- Mabkhot, M. M., Ferreira, P., Maffei, A., Podrżaj, P., Mądział, M., Antonelli, D., Lanzetta, M., Barata, J., Boffa, E., Finžgar, M., Paško, Ł., Minetola, P., Chelli, R., Nikghadam-Hojjati, S., Wang, X. V., Priarone, P. C., Litwin, P., Stadnicka, D., Lohse, N., & Lupi, F. (2021). Mapping industry 4.0 enabling technologies into united nations sustainability development goals. *Sustainability (Switzerland)*, 13(5), 1–35. <https://doi.org/10.3390/su13052560>
- Malhotra, L. J. K. (University of N. D. L. P. R. (The O. S. U. and M. K. M. (University of S. C. (2009). Administración de Operaciones: Procesos y Cadenas de Valor. In *Información tecnológica* (8va ed., Vol. 20, Issue 5). Pearson. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642009000500001>
- Marciniak, R., Moricz, P., & Baksa, M. (2020). Towards Business Services 4.0 - Digital Transformation of Business Services at a Global Technology Company. *Lecture Notes in Business Information Processing*, 410, 124–144. https://doi.org/10.1007/978-3-030-66834-1_8
- Maresova, P., Soukal, I., Svobodova, L., Hedvicakova, M., Javanmardi, E., Selamat, A., & Krejcar, O. (2018). Consequences of industry 4.0 in business and economics. *Economies*, 6(3), 1–14. <https://doi.org/10.3390/economies6030046>
- Mark, B. G., Rauch, E., & Matt, D. T. (2021). Worker assistance systems in manufacturing: A review of the state of the art and future directions. *Journal of Manufacturing Systems*, 59(December 2020), 228–250. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.02.017>

- Markov, K., & Vitliemov, P. (2020). Logistics 4.0 and supply chain 4.0 in the automotive industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 878(1), 0–6. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/878/1/012047>
- Martínez-Olvera, C. (2022). The role of manufacturing efficiency in the achievement of sustainable mass customization 4.0. *Production and Manufacturing Research*, 10(1), 132–159. <https://doi.org/10.1080/21693277.2022.2064360>
- Matt, D. T. (2020). Industry 4.0 for SMEs. In *Industry 4.0 for SMEs*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-25425-4>
- Meadows, D. H. (2008). *Thinking in Systems* (Diana Wrig). Chelsea Gree Publishing.
- Mejía. (2015). *Introducción a Las Tecnologías De La Información Y a Su Aplicación En Los negocios electrónicos. January 2015*.
- Mezentseva, E. (2021). Advantages and Barriers of Industry 4.0 Concepts Implementation in Small and Medium Industrial Enterprises. *SHS Web of Conferences*, 93, 01007. <https://doi.org/10.1051/shsconf/20219301007>
- Millán Naveas, G., & Vargas Guzmán, M. (2020). Un algoritmo de control de flujo para redes de computadoras de alta velocidad. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 28(1), 24–30. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052020000100024>
- Miragliotta, G., Sianesi, A., Convertini, E., & Distanti, R. (2018). Data driven management in Industry 4.0: a method to measure Data Productivity. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 19–24. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.228>
- Mittal, S., Khan, M. A., Romero, D., & Wuest, T. (2018). A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs). *Journal of Manufacturing Systems*, 49(November), 194–214. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.10.005>
- Morrow, J. H. Jr. (2008). *La gran guerra* (1ra ed.). Routledge.
- Mosterman, P. J., & Zander, J. (2016). Industry 4.0 as a Cyber-Physical System study. *Software and Systems Modeling*, 15(1), 17–29. <https://doi.org/10.1007/s10270-015-0493-x>
- Mourtzis, D., Gargallis, A., & Zogopoulos, V. (2019). Modelling of Customer Oriented Applications in Product Lifecycle using RAMI 4.0. *Procedia Manufacturing*, 28(January), 31–36. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.12.006>
- Mourtzis, D., Vlachou, E., Dimitrakopoulos, G., & Zogopoulos, V. (2018). Cyber- Physical Systems and Education 4.0 -The Teaching Factory 4.0 Concept. *Procedia Manufacturing*, 23(2017), 129–134. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.04.005>
- Mysen, A. G. (2007). *Smart Products: An introduction for design students. Aml 2007 Workshops*, 158–164.
- Neal, A. D., Sharpe, R. G., van Lopik, K., Tribe, J., Goodall, P., Lugo, H., Segura-Velandia, D., Conway, P., Jackson, L. M., Jackson, T. W., & West, A. A. (2021). The potential of industry 4.0 Cyber Physical System to improve quality assurance: An automotive case study for wash monitoring of returnable transit items. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 32, 461–475. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.07.002>
- Nenadál, J. (2020). The new EFQM model: What is really new and could be considered as a suitable tool with respect to quality 4.0 concept? *Quality Innovation Prosperity*, 24(1), 17–28. <https://doi.org/10.12776/QIP.V24I1.1415>
- Novak, E. (2022). 3D Printing in Education. *3D Printing in Education*, July. <https://doi.org/10.4324/9781138609877-ree81-1>
- Nunes, M. L., Pereira, A. C., & Alves, A. C. (2017). Smart products development approaches for Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 13, 1215–1222. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.035>
- Oakland, J. S. (1994). *Gerenciamento da Qualidade Total* (5ta ed.). Nobel.
- Oluwaseun, A., & Numbu, L. P. (2019). Industry 4.0 : The Fourth Industrial Revolution And How It Relates To The Application Of Internet Of Things (IoT). *Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies*, February.

- Öztürk, F., & Kayar, A. (2019). Product Lifecycle Management In Smart Factories: Industry 4 . 0 Applications. *10th International Symposium on Intelligent Manufacturing and Service Systems, September 2019*, 1420–1427.
- Pan, Y. (2021). VR Reality of the Relationship between Augmented Reality and Virtual Reality in the Context of Virtual Reality. *Journal of Physics: Conference Series*, 2066(1), 012056. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2066/1/012056>
- Paschou, T., Adrodegari, F., Rapaccini, M., Saccani, N., & Perona, M. (2018). Towards Service 4.0: A new framework and research priorities. *Procedia CIRP*, 73(March), 148–154. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.300>
- Peres, R. S., Jia, X., Lee, J., Sun, K., Colombo, A. W., & Barata, J. (2020). Industrial Artificial Intelligence in Industry 4.0 -Systematic Review, Challenges and Outlook. *IEEE Access*, 220121–220139. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3042874>
- Pessl, E., Sorko, S. R., & Mayer, B. (2020). Roadmap industry 4.0 - Implementation guideline for enterprises. *26th International Association for Management of Technology Conference, IAMOT 2017*, 5(6), 1728–1743. <https://doi.org/10.11648/j.ijsts.20170506.14>
- Petcharit, A., Sornsaruht, P., & Pimdee, P. (2020). An analysis of total quality management (TQM) within the thai auto parts sector. *International Journal of Online and Biomedical Engineering*, 16(2), 131–145. <https://doi.org/10.3991/ijoe.v16i02.11917>
- Piccarozzi, M., Aquilani, B., & Gatti, C. (2018). Industry 4.0 in management studies: A systematic literature review. *Sustainability (Switzerland)*, 10(10), 1–24. <https://doi.org/10.3390/su10103821>
- Piperi, E., & Bodi, I. (2021). *Scanning, 3D GD & T Inspection for automotive plastic elements Scanning , 3D GD & T Inspection for automotive plastic elements. December.*
- Prause, M. (2019). Challenges of Industry 4.0 technology adoption for SMEs: The case of Japan. *Sustainability (Switzerland)*, 11(20). <https://doi.org/10.3390/su11205807>
- Professur für Prozessleittechnik. (n.d.). *Vorlesung Prozessrechen- und -leittechnik - ISA 95 & IEC/ISO 62264* (p. 32).
- Psarommatis, F., Prouvost, S., May, G., & Kiritsis, D. (2020a). Product Quality Improvement Policies in Industry 4.0: Characteristics, Enabling Factors, Barriers, and Evolution Toward Zero Defect Manufacturing. *Frontiers in Computer Science*, 2(August), 0–15. <https://doi.org/10.3389/fcomp.2020.00026>
- Psarommatis, F., Prouvost, S., May, G., & Kiritsis, D. (2020b). Product Quality Improvement Policies in Industry 4.0: Characteristics, Enabling Factors, Barriers, and Evolution Toward Zero Defect Manufacturing. *Frontiers in Computer Science*, 2(August), 0–15. <https://doi.org/10.3389/fcomp.2020.00026>
- Qi, Q., & Tao, F. (2018). Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison. *IEEE Access*, 6, 3585–3593. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2793265>
- Qin, J., Liu, Y., & Grosvenor, R. (2016a). A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and beyond. *Procedia CIRP*, 52, 173–178. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.08.005>
- Qin, J., Liu, Y., & Grosvenor, R. (2016b). A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and beyond. *Procedia CIRP*, 52, 173–178. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.08.005>
- Raff, S., Wentzel, D., & Obwegeser, N. (2020). Smart Products: Conceptual Review, Synthesis, and Research Directions. *Journal of Product Innovation Management*, 37(5), 379–404. <https://doi.org/10.1111/jpim.12544>
- Rauch, E., Garcia, M. A. R., Rauch, E., Vidoni, R., & Matt, D. T. (2021). Implementing Industry 4.0 in SMEs. In *Implementing Industry 4.0 in SMEs* (Issue May). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-70516-9>
- Rauch, E., Stecher, T., Unterhofer, M., Dallasega, P., & Matt, D. T. (2019). Suitability of Industry 4.0 concepts for small and medium sized enterprises: Comparison between an expert survey and a user survey. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 2019(MAR), 1174–1185.

- Rauch, E., Unterhofer, M., Rojas, R. A., Gualtieri, L., Woschank, M., & Matt, D. T. (2020). A maturity level-based assessment tool to enhance the implementation of industry 4.0 in small and medium-sized enterprises. *Sustainability (Switzerland)*, *12*(9). <https://doi.org/10.3390/SU12093559>
- Rauch, E., & Vinante, E. (2021). *Three Dimensional Technology Radar Model to Evaluate Emerging Industry 4.0 Technologies*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7>
- Redchuk, A., & Mateo, F. (2021). *New Business and Operating Models. Optimization of a Blast Furnace in the New Business and Operating Models. Optimization of a blast furnace in the steel industry. Machine Learning as a Process Optimization*. November. <https://doi.org/10.20944/preprints202111.0416.v1>
- Render, B., Stair, M. R., & Hanna, M. E. (2006). *Métodos cuantitativos para los negocios* (P. M. G. Rosas, Ed.; 9na ed.). Pearson Educación.
- Ridaura, G. (2020). La Economía circular en Ecuador: perspectivas de cumplimiento de los ODS en la era Post COVID-19. *CienciaAmérica*, *9*(4), 19. <https://doi.org/10.33210/ca.v9i4.339>
- Roblek, V., Meško, M., & Krapež, A. (2016). A Complex View of Industry 4.0. *SAGE Open*, *6*(2). <https://doi.org/10.1177/2158244016653987>
- Rodionov, N., & Tatarnikova, L. (2021). Digital twin technology as a modern approach to quality management. *E3S Web of Conferences*, *284*, 04013. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128404013>
- Rojko, A. (2017). Industry 4.0 concept: Background and overview. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, *11*(5), 77–90. <https://doi.org/10.3991/ijim.v11i5.7072>
- Rosa, A. C. M., & Broday, E. E. (2018). Comparative analysis between the industrial and service sectors: A literature review of the improvements obtained through the application of lean six sigma. *International Journal for Quality Research*, *12*(1), 227–252. <https://doi.org/10.18421/IJQR12.01-13>
- Rubio Mateos, A. (2021). *FRENTE A LAS LIMITACIONES DEL SISTEMA LINEAL THE CONTRIBUTION OF THE CIRCULAR ECONOMY TO THE SDGS VERSUS THE LIMITATIONS OF THE LINEAR SYSTEM* Laura Santurde Rubio. *4*, 149–170.
- Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., & Harnisch, M. (2015). Industry 4.0: Future of Productivity and Growth in Manufacturing. *Boston Consulting Group (BCG)*, April, 20. <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>
- Sader, S., Husti, I., & Daróczi, M. (2017). Total Quality Management in the Context of Industry 4.0. *Synergy International Conferences - Engineering, Agriculture and Green Industry Innovation*, June 2018, 9001.
- Sader, S., Husti, I., & Daróczi, M. (2019). Industry 4.0 as a Key Enabler toward Successful Implementation of Total Quality Management Practices. *Periodica Polytechnica Social and Management Sciences*, *27*(2), 131–140. <https://doi.org/10.3311/ppso.12675>
- Saihi, A., Awad, M., & Ben-Daya, M. (2021). Quality 4.0: leveraging Industry 4.0 technologies to improve quality management practices – a systematic review. *International Journal of Quality and Reliability Management*. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-09-2021-0305>
- Salimbeni, S., & Mamani, D. (2020). Marco de referencia para la incorporación de Cobots en líneas de manufactura. *Podium*, *38*(38), 159–180. <https://doi.org/10.31095/podium.2020.38.10>
- Salimova, T., Vatolkina, N., Makolov, V., & Anikina, N. (2020). the Perspective of Quality Management System Development in the Era of Industry 4.0. *Humanities & Social Sciences Reviews*, *8*(4), 483–495. <https://doi.org/10.18510/hssr.2020.8447>
- Sanders, A., Elangeswaran, C., & Wulfsberg, J. (2016). Industry 4.0 implies lean manufacturing: Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing. *Journal of Industrial Engineering and Management*, *9*(3), 811–833. <https://doi.org/10.3926/jiem.1940>
- Sariyer, G., Mangla, S. K., Kazancoglu, Y., Ocal Tasar, C., & Luthra, S. (2021). Data analytics for quality management in Industry 4.0 from a MSME perspective. *Annals of Operations Research*, *0123456789*. <https://doi.org/10.1007/s10479-021-04215-9>
- Schmeisser, B. (2013). A systematic review of literature on offshoring of value chain activities. *Journal of International Management*, *19*(4), 390–406. <https://doi.org/10.1016/j.intman.2013.03.011>

- Schmidt, J., & Adler, S. (2019). *Die digitale Lebenslaufakte - Stand der Normung*. October. <https://doi.org/10.24406/iff-n-581274>
- Schuh, G., Rudolf, S., & Riesener, M. (2016). Design for industrie 4.0. *Proceedings of International Design Conference, DESIGN, DS 84*, 1387–1396.
- Schumacher, A., Erol, S., & Sihm, W. (2016). A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises. *Procedia CIRP*, 52, 161–166. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.040>
- Selvaggio, M., Cognetti, M., Nikolaidis, S., Ivaldi, S., & Siciliano, B. (2021). Autonomy in physical human-robot interaction: A brief survey. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 6(4), 7989–7996. <https://doi.org/10.1109/LRA.2021.3100603>
- Serumaga-Zake, J. M., & van der Poll, J. A. (2021). Addressing the impact of fourth industrial revolution on south african manufacturing small and medium enterprises (SMEs). *Sustainability (Switzerland)*, 13(21). <https://doi.org/10.3390/su132111703>
- Sevinç, A., Gür, Ş., & Eren, T. (2018). Analysis of the difficulties of SMEs in industry 4.0 applications by analytical hierarchy process and analytical network process. *Processes*, 6(12). <https://doi.org/10.3390/pr6120264>
- Shanmugam, S. (2020). 3D Printing. <http://www.globalview.gr>, 578(February), 1–14. <https://doi.org/10.31142/ijtsrd23284>
- Shuttleworth, L., Schmitz, S., & Beier, G. (2022). Impacts of Industry 4.0 on industrial employment in Germany: A comparison of industrial workers' expectations and experiences from two surveys in 2014 and 2020. *Production and Manufacturing Research*, 10(1), 583–605. <https://doi.org/10.1080/21693277.2022.2104400>
- Sivagami, P., Illavarason, P., Harikrishnan, R., & Reddy, G. (2021). *IoT Ecosystem- A survey on Classification of IoT*. <https://doi.org/10.4108/eai.16-5-2020.2304170>
- Soares do Amaral, J. V., Montevechi, J. A. B., Miranda, R. de C., & Junior, W. T. de S. (2022). Metamodel-based simulation optimization: A systematic literature review. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 114(December), 102403. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2021.102403>
- Sommer, L. (2015). Industrial revolution - Industry 4.0: Are German manufacturing SMEs the first victims of this revolution? *Journal of Industrial Engineering and Management*, 8(5), 1512–1532. <https://doi.org/10.3926/jiem.1470>
- Sommer, M., & Stjepandić, J. (2022). *Machine Learning in Manufacturing in the Era of Industry 4.0*. January, 79–102. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77539-1_5
- Sonntag, U. H. (2022). *Impactos das Tecnologias da Indústria 4.0 sobre as Ferramentas da Qualidade*. June, 0–19.
- Sony, M., & Mekoth, N. (2022). Employee adaptability skills for Industry 4.0 success: a road map. *Production and Manufacturing Research*, 10(1), 24–41. <https://doi.org/10.1080/21693277.2022.2035281>
- Sousa, M. J., & Rocha, Á. (2019). Digital learning: Developing skills for digital transformation of organizations. *Future Generation Computer Systems*, 91, 327–334. <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.08.048>
- Souza, F. F. de, Corsi, A., Pagani, R. N., Balbinotti, G., & Kovaleski, J. L. (2021). Total quality management 4.0: adapting quality management to Industry 4.0. *TQM Journal*. <https://doi.org/10.1108/TQM-10-2020-0238>
- Standardization-Council-Industry. (2020). *DIN and DKE Roadmap. German Standardization Roadmap Industrie 4.0 version 4* (DIN e. V., Ed.; 4th ed.). DIN.
- Stock, T., & Seliger, G. (2016). Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 40(1cc), 536–541. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.129>
- Szabó-Szentgróti, G., Végvári, B., & Varga, J. (2021). Impact of industry 4.0 and digitization on labor market for 2030-Verification of Keynes' Prediction. *Sustainability (Switzerland)*, 13(14), 1–19. <https://doi.org/10.3390/su13147703>
- Tambare, P., Meshram, C., Lee, C. C., Ramteke, R. J., & Imoize, A. L. (2022). *Performance Measurement System and Quality Management in Data - Driven Industry 4.0 : A Review*.

- Tummala, Y., & Kalluri, Dr. H. K. (2018). A review on Data Mining & Big Data Analytics. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.24), 92. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.24.21863>
- Türkeş, M. C., Oncioiu, I., Aslam, H. D., Marin-Pantelescu, A., Topor, D. I., & Căpuşneanu, S. (2019). Drivers and barriers in using industry 4.0: A perspective of SMEs in Romania. *Processes*, 7(3), 1–20. <https://doi.org/10.3390/pr7030153>
- Unterhofer, M., Rauch, E., Matt, D. T., & Santiteerakul, S. (2019). Investigation of Assessment and Maturity Stage Models for Assessing the Implementation of Industry 4.0. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 2019-Decem* (December), 720–725. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2018.8607445>
- van der Valk, H., Haße, H., Möller, F., & Otto, B. (2021). Archetypes of Digital Twins. *Business & Information Systems Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s12599-021-00727-7>
- Vo, B., Kongar, E., & Suárez Barraza, M. F. (2020). Root-Cause Problem Solving in an Industry 4.0 Context. *IEEE Engineering Management Review*, 99(1).
- Wang, J., Zhang, W., Shi, Y., Duan, S., & Liu, J. (2018). *Industrial Big Data Analytics: Challenges, Methodologies, and Applications*. 1–13. <http://arxiv.org/abs/1807.01016>
- Wang, L., Liu, Z., Liu, A., & Tao, F. (2021). Artificial intelligence in product lifecycle management. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114(3–4), 771–796. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06882-1>
- Xin, Y., & Ojanen, V. (2018). The impact of digitalization on product lifecycle management: How to deal with it? *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 2017-Decem*, 1098–1102. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2017.8290062>
- Yadav, N., Shankar, R., & Singh, S. P. (2020). Impact of Industry4.0/ICTs, Lean Six Sigma and quality management systems on organisational performance. *TQM Journal*, 32(4), 815–835.
- Yadav, N., Shankar, R., & Singh, S. P. (2021). Hierarchy of Critical Success Factors (CSF) for Lean Six Sigma (LSS) in Quality 4.0. *International Journal of Global Business and Competitiveness*, 16(1), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s42943-020-00018-0>
- Zapata, M. L., Berrah, L., & Tabourot, L. (2020). Is a digital transformation framework enough for manufacturing smart products? The case of Small and Medium Enterprises. *Procedia Manufacturing*, 42(2019), 70–75. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.024>
- Zhang, Z., Yuan, Z., Ni, G., Lin, H., & Lu, Y. (2020). The quality traceability system for prefabricated buildings using blockchain: An integrated framework. *Frontiers of Engineering Management*, 7(4), 528–546. <https://doi.org/10.1007/s42524-020-0127-z>
- Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., & Newman, S. T. (2017a). Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. *Engineering*, 3(5), 616–630. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.015>
- Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., & Newman, S. T. (2017b). Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. *Engineering*, 3(5), 616–630. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.015>
- Zhou, keliang, Zhou, L., & Liu, T. (2015). Industry 4.0: Towards Future Industrial Opportunities and Challenges: FSKD 2015: 15-17 August, Zhangjiajie, China. *12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, 0–5. <https://doi.org/10.1109/FSKD.2015.7382284>
- Zito, M. (2018). La sustentabilidad de Internet de las Cosas. *Cuadernos Del Centro de Estudios En Diseño y Comunicación. Ensayos*, 70, 1–3.
- Zlatanovska, B., Stojkovicj, N., Kocaleva, M., Stojanova, A., Lazarova, L. K., & Gobubovski, R. (2018). Modeling of some chaotic systems with anylogic software. *TEM Journal*, 7(2), 465–470. <https://doi.org/10.18421/TEM72-31>
- Zonnenshain, A., & Kenett, R. S. (2020). Quality 4.0—the challenging future of quality engineering. *Quality Engineering*, 32(4), 614–626. <https://doi.org/10.1080/08982112.2019.1706744>

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Gestión del Ciclo de Vida de un Producto. Fuente: propia del autor.	9
Figura 2 – RAMI4.0. Fuente: adaptado de RAMI4.0.....	11
Figura 3 – Ciclo de Vida del Flujo de Valor RAMI4.0. Fuente: adaptado de RAMI4.0	12
Figura 4 – Capas - Ciclo de Vida del Flujo de Valor. Fuente: Adaptado de RAMI4.0	12
Figura 5 – Eje “Ciclo de Vida del Flujo de Valor”. Fuente: propia del autor	13
Figura 6 – Sistema de Valor. Fuede: propia del autor	13
Figura 7 - Sistemas de Información y Operacional. Fuente: propia del autor	14
Figura 8 – Hoja de ruta de la presente investigación. Fuente: propia del autor	15
Figura 9 – Metodología enfoque mixto secuencial. Fuente: propia del autor	19
Figura 10 - Codificación del análisis cualitativo. Fuente: propia del autor	21
Figura 11 – Digitización. Fuente: propia del autor.	24
Figura 12 - Estadíos del desarrollo industrial. Fuente: propia del autor	27
Figura 13 - La base de la DX. Fuente: propia del autor.....	29
Figura 14 - Las 9 tecnologías de la I4.0. Fuente: adaptado de LNS Research	30
Figura 15 – Elementos tecnológicos de la Industria I4.0. Fuente: EC, 2017	31
Figura 16 - Tecnologías habilitadoras de la I4.0. Fuente: propia del autor	32
Figura 17 - Exponencialidad. Fuente: propia del autor	35
Figura 18 – Evolución del IoT. Fuente: Sivagami 2021	37
Figura 19 - Jerarquías del IoT. Fuente: propia del autor	38
Figura 20 - Entidades. Fuente: Sivagami 2019	39
Figura 21 - Ciclo de vida del servicio. Fuente: Sivagami 2019	39
Figura 22 - Sistemas operativos. Fuente: Sivagami 2019	40
Figura 23 - Evolución del IoT. Fuente: propia del autor, adaptado de Karmakar, 2019	42
Figura 24 - Servicios en la nube. Fuente: adaptado de J. Agustín Martínez, 2021.....	44
Figura 25 - Servicios en la nube. Fuente: adaptado de J. Agustín Martínez, 2021.....	45
Figura 26 - Computación en la nube móvil. Fuente: propia del autor.....	46
Figura 27 - CPS e IoT. Fuente: propia del autor.....	48
Figura 28 - Segunda perspectiva: Evolución secuencial de la cibernética a DNCS y CPS.....	49
Figura 29 - Interacción Humano-Máquina. Fuente: propia del autor	51
Figura 30 - Sistemas dinámicos. Fuente: propia del autor	56
Figura 31 - van der Valk (2021) – Arquetipos de Gemelos Digitales	56
Figura 32 - El Gemelo Digital como base para la toma de decisiones	58
Figura 33 - Pirámide jerárquica del conocimiento. Fuente: Chaffey and Wood 2005.....	61
Figura 34 – Industrial AI. Fuente: adaptado de Lee, 2018.....	70
Figura 35 - VR y CAD.....	74
Figura 36 – Robot y VR	75
Figura 37 - Áreas de seguridad en la I4.0. Fuente: propia del autor	76
Figura 38 - Gartner 3d radar. Fuente: Rauch (2021)	80
Figura 39 - Componente I4.0. Fuente: adaptado de Roadmap I4.0 v.4.....	82
Figura 40 – Activos. Fuente: adaptado de Roadmap I4.0 v.4	82
Figura 41 - Información sobre el producto durante el ciclo de vida.....	83
Figura 42 - Logística 4.0. Fuente: elaboración propia del autor	85
Figura 43 - Niveles de inteligencia en productos	86
Figura 44 - Clasificación de objetos inteligentes	87
Figura 45 - Producto Inteligente durante fase de prototipado. Fuente: MADE Center	92
Figura 46 - Beneficios a lo largo del ciclo de vida del producto. Fuente: propia del autor	93
Figura 47 - Diseño de Marco de Referencia para la I4.0. Fuente: adaptado de Schuh et al., (2016)	97
Figura 48 - Diseño para enfoques X en el contexto de la I4.0. (Schuh et al., 2016)	98
Figura 49 - Curvas de costo-beneficio por la incorporación de sensores en los productos. Fuente: propia	98
Figura 50 - Tipos de interacción. Fuente: adaptado de Schuh et al., (2016)	99
Figura 51 - La I4.0 como habilitador clave para la PLM. Fuente: adaptado de Ferreira (2016).....	100
Figura 52 - Flujo de información global a través de objetos inteligentes. Fuente: adaptado de Ferreira (2016).100	100
Figura 53 - Implicancias en el desarrollo de modelos de negocios y productos 4.0. Fuente: propia del autor....	101
Figura 54 - Economía Circular. Fuente: propia	102
Figura 55 - Conceptos de la Gestión de la Calidad. Fuente: Foidl (2020)	107
Figura 56 - Jules Henri Fayol Le Maire (1841 - 1925)	107
Figura 57 - Vilfredo Pareto (1848 – 1923)	108

Figura 58 – Frederic Winslow Taylor (1856 – 1915).....	108
Figura 59 - Walter A. Shewhart (1891 – 1967).....	108
Figura 60 - Egon Sharpe Pearson (1895 – 1980)	109
Figura 61 - William Edward Deming (1900 – 1993).....	109
Figura 62 - Joseph Moses Juran (1904 – 2008)	110
Figura 63 - Taiichi Ohno (1912 – 1990)	111
Figura 64 - Kaoru Ishikawa (1915 – 1989).....	111
Figura 65 - Arman V. Feigenbaum (1922 – 2014).....	112
Figura 66 - Genichi Taguchi (1924 – 2012).....	112
Figura 67 - Philip B. Crosby (1926 – 2001)	113
Figura 68 - Joji Akao (1928 – 2016).....	114
Figura 69 - Maasaki Imai (1930).....	114
Figura 70 - Noriaki Kano (1940)	114
Figura 71 – Evolución de la calidad. Fuente: adaptado de Frank et al. (2019).....	115
Figura 72 – I4.0 y Sistema de Gestión. Fuente: propia del autor	117
Figura 73 – Pilares de la Q4.0. Fuente: propia del autor.....	118
Figura 74 - El ecosistema de las herramientas Q4.0. Fuente: adaptado de ASQ	119
Figura 75 – Marco de Referencia del CQI. Fuente: CQI™.....	120
Figura 76 – Habilitadores y resultados – EFQM. Fuente: Fonseca (2021).....	120
Figura 77 – Evolución de la Calidad. Fuente: LNS research™ (2017).....	123
Figura 78 – ISO 25012. Fuente: ISO.....	124
Figura 79 – ISO 8000. Fuente: ISO.....	125
Figura 80 – ISO 33000. Fuente: ISO.....	125
Figura 81 – Ecosistema TQM 4.0. Fuente: Souza de (2021)	126
Figura 82 – Mejores Prácticas del TQM: Fuente: propia, adaptado de Sader (2019)	129
Figura 83 – Prácticas digitales del TQM I4.0. Fuente: Ali (2022).....	129
Figura 84 – Innovaciones de la Gestión de la Calidad. Fuente: Bunzendahl (2021).....	130
Figura 85 - Diferencias que mantienen Industrie 4.0 y la producción ajustada. Fuente: Enke (2018).....	133
Figura 86 - Caracterización encuestados I4.0.....	136
Figura 87 - Cinco dimensiones de la I4.0 en la Argentina. Fuente propia del autor.....	137
Figura 88 - Resultados de las 5 dimensiones de la I4.0 en la Argentina.....	137
Figura 89 - Two sample T test. Fuente: propia del autor	138
Figura 90 - Mann-Whitney test. Fuente: propia del autor	138
Figura 91 – Prueba Alpha Cronbach.....	139
Figura 92 - Resultados de los 32 factores de la I4.0 en la Argentina	139
Figura 93 - Resultados de los 32 factores de la I4.0 en la Argentina.....	140
Figura 94 - Resultados de los 32 factores del sector manufactura en la Argentina	141
Figura 95 - Análisis general de los 32 factores I4.0 en la Argentina	141
Figura 96 - Caracterización encuestados Barreras I4.0	143
Figura 97 - Barreras de entrada a la I4.0 en la Argentina. Fuente: propia del autor.....	143
Figura 98 - Barreras - Comparación por tamaño de las empresas. Fuente: propia del autor	144
Figura 99 - Barreras - Comparación por origen de las empresas. Fuente: propia del autor	144
Figura 100 - Comparación industrias manufactureras y de servicios. Fuente: propia del autor.....	144
Figura 101- Las 12 barreras por Segmento	146
Figura 102 – Resultado 12 barreras - totalFigura 103 - Resultado 12 barreras – total	146
Figura 104 – Estudio de la I4.0 y la Q4.0. Fuente: propia del autor	147
Figura 105 - Caracterización de los encuestados	148
Figura 106 – Análisis CQI por cargo.....	150
Figura 107 - Análisis CQI por tamaño empresa	150
Figura 108 – Análisis CQI de las empresas por su origen	150
Figura 109 - Análisis CQI de las empresas por su perfil exportador.....	150
Figura 110 – Análisis CQI por sector industrial.....	151
Figura 111 - Análisis CQI por sector industrial	151
Figura 112 – Análisis RAMI4.0 por cargo del encuestado	151
Figura 113 - Análisis RAMI4.0 por cargo del encuestado	151
Figura 114 – Análisis RAMI4.0 por tamaño de la empresa	152
Figura 115 – Análisis RAMI4.0 por tamaño de la empresa	152
Figura 116 – Análisis RAMI4.0 por origen de la empresa.....	152
Figura 117 – Análisis RAMI4.0 por origen de la empresa.....	152
Figura 118 – Análisis RAMI4.0 por perfil exportador de la empresa.....	152

Figura 119 - Análisis RAMI4.0 por perfil exportador de la empresa	152
Figura 120 – Análisis RAMI4.0 por segmento industrial.....	153
Figura 121 – Análisis fases RAMI4.0 por media de uso de T4.0	154
Figura 122 – Análisis T4.0 por fase RAMI4.0	155
Figura 123 – Mapa de Calor T4.0 por fase RAMI4.0.....	155
Figura 124 - Análisis RAMI4.0 por tecnologías habilitadoras	157
Figura 125 - Análisis T4.0. Fuente propia del autor.....	157
Figura 126 - Fase producción de empresa LERCA	160
Figura 127 - Toma de decisiones multicriterio – Método Promethee	162
Figura 128 - Resultado del análisis de ranking de preferencias	163
Figura 129- Imágenes del Cobot e impresora 3D en período de prueba. Fuente: propia del autor.....	163
Figura 130 - Fase "Mantenimiento de Producción" en empresa Lara. Fuente propia del autor	165
Figura 131 - Estructura Organizacional de la empresa Lara. Fuente propia del autor	165
Figura 132 - Diagramas BPMNv.2 en Bizagi con capacidad de simulación. Fuente propia del autor	166
Figura 133 - Indicadores clave de gestión de la empresa Lara. Fuente propia del autor	166
Figura 134 - Fase Desarrollo en la empresa Ranieri. Fuente propia del autor	167
Figura 135 - Simulación de la fase de diseño. Fuente propia del autor	168
Figura 136 - Fase Instancia en la empresa Ranieri. Fuente propia del autor	168
Figura 137 – Mapeo de procesos. Fuente: Ranieri S.A.....	169
Figura 138 - Simulación de producción acetato. Fuente propia del autor.	169
Figura 139 – Calidad 4.0. Fuente: propia del autor	172

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 - Entrevistas.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 2 - Términos relacionados a la DX.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 3 - Características del humano y el robot.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 4 - Clasificación AM.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 5 - Ranking de nuevas tecnologías. Fuente: Rauch (2021)</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 6 - Servicios 4-0. Adaptado de Ennis et. al.(2020)</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 7 -Prácticas de la Gestión de la Calidad-Carvalho (2021).....</i>	<i>117</i>
<i>Tabla 8 – Estándares relacionados a la Q4.0</i>	<i>123</i>
<i>Tabla 9 - TQM - Factores críticos de éxito CSF. Fuente: Anu P. Anil y Satish (2016).....</i>	<i>128</i>
<i>Tabla 10 - Herramientas Lean vs. tecnologías 4.0. Fuente: Sonntag (2022).</i>	<i>130</i>
<i>Tabla 11 - LEAN 4.0. Fuente: adaptada de Enke (2017).</i>	<i>132</i>
<i>Tabla 12 - Distintos abordajes de marcos de referencia de la Q4.0. Fuente: propia del autor.....</i>	<i>134</i>
<i>Tabla 13 - Encuesta I4.0.....</i>	<i>135</i>
<i>Tabla 14 - Encuesta Barreras a la I4.0.....</i>	<i>142</i>
<i>Tabla 15 - Encuesta Calidad 4.0.....</i>	<i>147</i>
<i>Tabla 16 - Clasificación de las fases del ciclo de vida de un producto</i>	<i>149</i>
<i>Tabla 17 - Utilización T4.0 por fase.....</i>	<i>153</i>
<i>Tabla 18 - Utilización T4.0 por fase para cada caso de estudio</i>	<i>170</i>