

**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO EN CELAYA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**PROPUESTA DE UN MODELO DE EVALUACIÓN DE MADUREZ DE INDUSTRIA
4.0 ORIENTADO A EMPRESAS MANUFACTURERAS**

**TESIS PROFESIONAL PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

PRESENTA:

JORGE ARMANDO PUENTES MÁRQUEZ

DIRECTOR:

M.C. VICENTE FIGUEROA FERNÁNDEZ

CODIRECTOR:

DR. JOSÉ ANTONIO VÁZQUEZ LÓPEZ

CELAYA, GTO., MÉXICO – FEBRERO DE 2020.



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
en Celaya

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Asunto: Autorización de impresión de trabajo profesional.

Celaya Gto., **06 Febrero 2020**

M.C. MOISES TAPIA ESQUIVIAS
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERIA INDUSTRIAL.
Presente.

De acuerdo a la convocatoria hecha por esta jefatura a fin de aprobar o no la impresión del trabajo profesional titulado:

"PROPUESTA DE UN MODELO DE EVALUACIÓN DE MADUREZ DE INDUSTRIA 4.0 ORIENTADO A EMPRESAS MANUFACTURERAS"

*Presentado por el (a) pasante **C. ING. Jorge Armando Puentes Márquez (M1803016)** alumno (a) del programa de Maestría en Ingeniería Industrial que ofrece nuestro Instituto. Hacemos de su conocimiento que éste jurado ha tenido a bien aprobar la impresión de dicho trabajo para los efectos consiguientes.*

ATENTAMENTE

M.C. VICENTE FIGUEROA FERNANDEZ
Presidente

DR. JOSE ALFREDO JIMENEZ GARCIA
Secretario

DR. SALVADOR HERNANDEZ GONZALEZ
Vocal

M.C. MOISES TAPIA ESQUIVIAS
Vocal Suplente

Ccp. Escolares
Archivo.
VFF*MTE*dmvp



Antonio García Cubas #600 esq. Av. Tecnológico, Colonia Alfredo V. Bonfil, C.P. 38010
Celaya, Gto. Ap 57, Conmutador 01 (461) 611 75 75 e-mail: lince@itcelaya.edu.mx
www.tecnm.mx | www.itcelaya.edu.mx



Agradecimientos

Agradezco a mis padres, abuela, y hermana por el grandioso e incondicional amor y apoyo que me han brindado a lo largo de mi vida y de este gran proceso de aprendizaje.

A Mónica por todo el amor, apoyo y compañía que me ha brindado en todo este camino que hemos emprendido.

A Edgar y Ana por su sincera amistad, apoyo, y el genial trabajo en equipo que construimos a través de estos dos años llenos de alegrías y constantes esfuerzos. Así mismo, a esos amigos casi hermanos de mi tierra natal que, aún en la distancia, estuvieron conmigo en todo este proceso.

Al M.C. Vicente por haber creído en mí desde el comienzo y haberme brindado su confianza, conocimientos y valioso apoyo a lo largo de toda la maestría.

Al Dr. José Alfredo por toda la confianza, apoyo y motivación que desde el principio me ha brindado.

A la Dra. Celma por las enseñanzas, confianza, apoyo y el gran cariño que me brindó durante mi estancia de investigación en la Universidad de São Paulo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por los apoyos económicos otorgados para la realización de mis estudios.

Finalmente, a todas y cada una de las personas en Colombia, México y Brasil que contribuyeron a hacer realidad todos los sueños que una vez despegaron con este joven soñador de un avión y que hoy son una realidad.

“O valor das coisas não está no tempo que elas duram, mas na intensidade com que acontecem. Por isso, existem momentos inesquecíveis, coisas inexplicáveis e pessoas incomparáveis.” (Fernando Pessoa).

“El valor de las cosas no está en el tiempo que estas duran, sino en la intensidad con la que suceden. Por ello, existen momentos inolvidables, cosas inexplicables y personas incomparables.” (Fernando Pessoa).

Dedicado a todas las personas incomparables que me acompañaron y creyeron en mí a lo largo de este viaje lleno de momentos inolvidables y sucesos excelsamente inefables.

Resumen

El término Industria 4.0 ha ido incrementando su importancia en los últimos años. Esto, debido a los cambios que implica en la manera en cómo se conciben las organizaciones y cadenas de suministro. Ante esto, diversas compañías alrededor del mundo han realizado esfuerzos para implementar Industria 4.0. Sin embargo, la manera en cómo las empresas conciben este término suele variar de organización a organización, así como también, el método que cada organización lleva a cabo para convertirse en la *Smart Factory* de la Industria 4.0. Llegando muchas de estas organizaciones, a desviarse de los principios fundamentales de Industria 4.0 y a ejecutar inapropiados planes de transición que no son acordes a las características y necesidades particulares que cada empresa posee. Esto, resulta frecuentemente en el despilfarro de recursos susceptibles a ser utilizados de una mejor manera y en la desmotivación que supone para las organizaciones no conseguir los resultados deseados. Debido a lo anterior, la presente investigación tiene como objetivo proponer un modelo de evaluación de madurez orientado a valorar el grado de desarrollo que empresas manufactureras tienen con relación a Industria 4.0. Los resultados muestran que el modelo propuesto constituye una herramienta útil para diagnosticar y coadyuvar a la planificación estratégica de las organizaciones hacia Industria 4.0. Por otra parte, una nueva definición de Industria 4.0 es propuesta en el presente estudio, así como también, oportunidades de exploración para futuras investigaciones.

Abstract

The term Industry 4.0 has been increasing its importance in recent years. This, due to the changes that this term implies in the way in which organizations and supply chains are conceived. Given this, several companies around the world have made efforts to implement Industry 4.0. However, the way in which companies conceive this term usually varies from organization to organization, as well as the method that each organization carries out to become the Smart Factory of Industry 4.0. Due to the previous, many organizations deviate from the fundamental principles of Industry 4.0 and execute inappropriate roadmaps that are not in accordance with the characteristics and particular needs that each company has. This often results in the waste of resources susceptible to being used in a better way and in the demotivation that supposes for the organizations not obtaining the desired results. Due to the above, the present research aims to propose a maturity assessment model to evaluate the degree of development that manufacturing companies have in relation to Industry 4.0. The results show that the proposed model is a useful tool to diagnose and contribute to the strategic planning of organizations towards Industry 4.0. On the other hand, a new definition of Industry 4.0 is proposed. Research gaps are identified and recommendations for future researches are proposed.

ÍNDICE

Resumen	iii
Abstract.....	iv
Introducción.....	1
1. CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	4
1.1. Planteamiento del problema.....	4
1.2. Justificación	5
1.3. Objetivos.....	6
1.3.1. Objetivo general	6
1.3.2. Objetivos específicos.....	6
1.4. Pregunta de investigación	7
1.5. Alcance y delimitaciones	7
1.6. Hipótesis	7
2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	8
2.1. Industria 4.0	8
2.1.1. Descripción.....	8
2.1.2. Principios de diseño.....	10
2.1.3. Principales componentes tecnológicos	11
2.1.4. Hiperconectividad: integración vertical y horizontal	29
2.1.5. Estado actual de Industria 4.0 en el mundo	31
2.1.6. Industria 4.0 vs Cuarta Revolución Industrial	36
2.1.7. Impactos en la industria actual	37
2.2. Modelos de evaluación de madurez.....	40
2.2.1. Descripción.....	40

2.2.2.	Historia de los modelos de evaluación de madurez.....	44
2.2.3.	Criterios de calificación.....	46
2.2.4.	Hojas de ruta (<i>roadmaps</i>)	49
2.3.	Estado del arte.....	51
3.	CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	71
3.1.	Descripción del método de investigación	71
3.1.1.	Caracterización de principios y propuesta conceptual de Industria 4.0.....	72
3.1.2.	Construcción del modelo de evaluación de madurez.....	72
3.1.3.	Elaboración de instrumento de recolección de la información	73
3.1.4.	Validación del modelo	75
4.	CAPÍTULO IV: RESULTADOS	77
4.1.	Caracterización de principios y propuesta conceptual de Industria 4.0.....	77
4.2.	Construcción de modelo de evaluación de madurez.....	79
4.2.1.	Ponderación de componentes del modelo	83
4.2.2.	Categorías de madurez.....	85
4.3.	Instrumento de recolección de la información.....	88
4.3.1.	Valoración de las respuestas.....	92
4.4.	Aplicación y validación del modelo	94
4.4.1.	Aplicación del modelo.....	94
4.4.2.	Resultados del modelo.....	95
4.4.3.	Síntesis de recomendaciones	118
4.4.4.	Validación del modelo.....	122
5.	CAPÍTULO V: CONCLUSIONES	131
	BIBLIOGRAFÍA	133
	ANEXOS	145

Anexo 1. Cuestionario de modelo de evaluación de madurez propuesto.....	145
Anexo 2. Respuestas obtenidas de Auditor A	164
Anexo 3. Respuestas obtenidas de Auditor B.....	165

Índice de Figuras

Figura 2.1. Conexión Beacon-Receptor-Nube	12
Figura 2.2. Big Data & Analytics.....	13
Figura 2.3. Unidades de almacenamiento de información y sus equivalencias	14
Figura 2.4. Estructura de red tipo distribuida utilizada por Blockchain.....	16
Figura 2.5. Ejemplo de codificación de texto con función hash SHA-1	17
Figura 2.6. Modelos de servicio de computación en la nube	21
Figura 2.7. Principales proveedores de computación en la nube por modelos de servicio	22
Figura 2.8. Pieza de metal elaborada mediante proceso de fabricación aditiva DMLS	24
Figura 2.9. Topología básica de una red neuronal artificial de tipo perceptrón multicapa	25
Figura 2.10. Representación tipo red del Internet de las Cosas.....	27
Figura 2.11. Ejemplo de realidad aumentada en tareas de mantenimiento	28
Figura 2.12. Integración vertical y horizontal en Industria 4.0	31
Figura 2.13. Estrategias gubernamentales de Industria 4.0 a nivel mundial	34
Figura 2.14. Reemplazo de equipos a lo largo de las diferentes revoluciones industriales.....	39
Figura 2.15. Niveles de madurez de CMMI v2.0	41
Figura 2.16. Forma básica de modelo de evaluación de madurez de Industria 4.0.....	43
Figura 2.17. Principales evoluciones de los modelos CMM	46
Figura 2.18. Representación visual de una hoja de ruta	51
Figura 2.19. Línea de tiempo de modelos de evaluación de madurez de Industria 4.0 desarrollados desde 2011 hasta 2019.....	53
Figura 2.20. Niveles de madurez considerados en el modelo IMPULS.....	58
Figura 3.1. Método de investigación propuesto	71
Figura 3.2. Ejemplo de pregunta de tipo estado actual – estado futuro.....	74
Figura 4.1. Dimensiones de modelo de evaluación de madurez propuesto.....	80
Figura 4.2. Subdimensiones y elementos de madurez de dimensión "Dirección"	81
Figura 4.3. Subdimensiones y elementos de madurez de dimensión "Operaciones"	81
Figura 4.4. Subdimensiones y elementos de madurez de dimensión "Producción"	82
Figura 4.5. Subdimensiones y elementos de madurez de dimensión "Conectividad"	82
Figura 4.6. Conteo de componentes de modelo de evaluación de madurez propuesto	83

Figura 4.7. Explicación de codificación utilizada para la identificación de preguntas	89
Figura 4.8. Nivel general promedio de madurez actual y deseado.....	95
Figura 4.9. Nivel general de madurez actual y deseado – Auditores A y B.....	96
Figura 4.10. Madurez de las dimensiones evaluadas – Auditores A y B	98
Figura 4.11. Madurez de las subdimensiones evaluadas – Auditores A y B.....	99
Figura 4.12. Madurez de elementos evaluados en dimensión 'Dirección'	104
Figura 4.15. Madurez actual y deseada de elementos de dimensión 'Dirección'	107
Figura 4.14. Madurez de elementos evaluados en dimensión 'Operaciones'	108
Figura 4.17. Madurez actual y deseada de elementos de dimensión 'Operaciones'	111
Figura 4.16. Madurez de elementos evaluados en dimensión 'Producción'	112
Figura 4.19. Madurez actual y deseada de elementos de dimensión 'Producción'	114
Figura 4.18. Madurez de elementos evaluados en dimensión 'Conectividad'	115
Figura 4.21. Madurez actual y deseada de elementos de dimensión 'Conectividad'	118
Figura 4.20. Opinión de correspondencia de resultados de ABC Company	127
Figura 4.21. Satisfacción de ABC Company con respecto al modelo de evaluación de madurez propuesto	128
Figura 4.22. Opinión de utilidad del modelo de evaluación de madurez según ABC Company	128
Figura 4.23. Sugerencias y recomendaciones de ABC Company	129

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Índices de competitividad global frente a Industria 4.0	35
Tabla 2.2. Dimensiones y elementos de madurez propuestos por Rockwell Automation	55
Tabla 2.3. Dimensiones y elementos de madurez propuestos por IMPULS	57
Tabla 2.4. Dimensiones y elementos de madurez propuestos por VDMA.....	59
Tabla 2.5. Dimensiones y elementos de madurez propuestos por Schumacher et al.	60
Tabla 2.6. Dimensiones y elementos de madurez propuestos por AIDIMME & ITI.....	62
Tabla 2.7. Dimensiones y elementos de madurez propuestos por Schuh et al.	63
Tabla 2.8. Dimensiones y elementos de madurez propuestos por Agca et al.....	65
Tabla 2.9. Dimensiones y elementos de madurez propuestos por Akdil et al.	68
Tabla 2.10. Resumen de principales modelos de evaluación de madurez de Industria 4.0 consultados	70
Tabla 4.1. Ponderación de componentes de modelo de evaluación de madurez de Industria 4.0	84
Tabla 4.2. Categorías de madurez para calificación global de madurez	85
Tabla 4.3. Esquema general del sistema de preguntas elaborado.....	91
Tabla 4.4. Justificación del otorgamiento de niveles de madurez a posibles respuestas de encuesta	93
Tabla 4.5. Resumen de resultados para dimensiones de madurez.....	100
Tabla 4.6. Resumen de resultados para subdimensiones de madurez	100
Tabla 4.7. Resumen de resultados para elementos de madurez.....	101
Tabla 4.8. Resultado de validación para elementos de madurez.....	124
Tabla 4.9. Resultado de validación para subdimensiones de madurez.....	125
Tabla 4.10. Resultado de validación para dimensiones de madurez	126

Introducción

Las revoluciones industriales son procesos de transformación económica, política, social y tecnológica que se han presentado en tres ocasiones a lo largo de la historia de la humanidad (Schwab, 2017). Estas revoluciones han implicado un cambio en la manera en cómo las sociedades consumen, trabajan, interactúan, se informan, entre otras actividades más de la vida cotidiana. Cada cambio ha tenido repercusiones que se han extendido sistemáticamente hacia diversos sectores de la sociedad, logrando una mejora significativa, en términos generales, de las condiciones de vida del ser humano (Nuvolari, 2018).

La primera revolución industrial data del año 1760, cuando el escocés James Watt desarrolló la primera máquina de vapor cuyas características permitieron posteriormente la construcción de un gran número de máquinas que aceleraron el desarrollo de la industria (Lukač, 2015). A medida que inventos como la pila eléctrica, máquinas de hilar y barcos de vapor se iban desarrollando, la primera revolución industrial se fue expandiendo desde Inglaterra hasta Europa occidental y Norteamérica, alcanzando su punto de madurez hacia el año 1840. Marcando así, un hito en la historia de una sociedad que pasaba de una economía estancada de carácter rural, a una economía en expansión basada en la industrialización (Salort, 2012).

Posteriormente, entre los años 1850 y 1914, gracias a una explotación más eficiente de fuentes de energía y la introducción de nuevos materiales y sistemas de transporte y comunicación, inició la segunda revolución industrial. En esta ocasión, las fábricas comenzaron a producir bienes en masa gracias a la electrificación de las plantas de producción. Paralelamente, debido a una movilización masiva de personas e ideas en todo el planeta, surge la primera globalización. Estos dos sucesos, la segunda revolución industrial y la primera globalización, originaron la creación de un mercado mundial de productos caracterizado por el comercio internacional, la convergencia de precios, grandes movimientos de capital, y migraciones masivas en todo el planeta (Thomson, 2015).

La tercera revolución industrial nace en los años 2000 gracias al enlazamiento de la microelectrónica, las energías renovables, y las tecnologías de la información ligadas a procesos de ciencia, tecnología e innovación. La utilización de robots para automatizar procesos

productivos parcial o totalmente permitió incrementar la productividad de las industrias manufactureras y aquellas pertenecientes al sector servicios. En esta ocasión, las pequeñas y medianas empresas (Pymes) pasan a jugar un papel fundamental dentro del sistema económico, de tal manera que pequeñas, medianas, y grandes empresas, deben necesariamente coexistir para permitir el éxito entre estas y sus partes interesadas (*stakeholders*) (Villamil, 2017). Así mismo, la generación de valor pasa de ser medida en unidades de masa, a ser medida también en unidades de información (*Bytes*) (Woodrow & Grant, 2010).

Hasta este punto, es posible inferir que, en términos generales, los avances en la industria han ido en aumento de manera exponencial. Tanto así, que actualmente se prevé una cuarta revolución industrial en el corto-mediano plazo bajo el nombre de Industria 4.0. Pero ¿qué enfoque tendrá esta nueva revolución?, ¿cuáles serán los efectos que tendrá en la industria tal como hoy se conoce?

El término “Industria 4.0” se originó en Alemania bajo el nombre de *Industrie 4.0* gracias a un proyecto gubernamental de computarización de la industria manufacturera que lleva su mismo nombre (GTAI, 2014). El término fue popularizado en 2011 por medio de una de las ferias industriales más grandes del mundo, la *Hannover Fair*, en donde se le señaló como el inicio de la cuarta revolución industrial (Sung, 2018). El término inmediatamente captó la atención de académicos, profesionistas, oficiales de gobierno y políticos al rededor del mundo. Según Kagermann, Wahlster, & Helbig (2013), Industria 4.0 se puede definir como “*la integración técnica de sistemas ciber-físicos (CPS) en la manufactura y la logística, y el uso del Internet de las cosas y los servicios en los procesos industriales*”¹. Lo anterior, con el objetivo de crear fábricas inteligentes (*Smart Factories*).

Mediante este tipo de fábricas inteligentes se pretende emplear sistemas de control y monitoreo que permitan generar una representación virtual en tiempo real de determinados macroprocesos, o subgrupo de procesos físicos, con el fin de descentralizar parte de las decisiones organizacionales mediante la constante cooperación humano-máquina vía Internet. Una parte

¹ Traducción propia. Definición original: “*the technical integration of CPS into manufacturing and logistics and the use of the Internet of Things and Services in industrial processes*”.

del gran volumen de la información que se espera generar viajará a través de la red y podrá suministrar información valiosa a distintas dependencias de una compañía, cadenas de suministro, e incluso, interconectar ecosistemas empresariales a nivel global (Meissnera, Ilse, & Aurich, 2017).

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del problema

Actualmente, múltiples organizaciones se encuentran al tanto del término Industria 4.0 y están realizando acciones para llevar a cabo una implementación de los principios de esta llamada cuarta revolución industrial. No obstante, la manera en cómo las empresas conciben Industria 4.0 suele variar de organización a organización, así como también, el método que cada organización lleva a cabo para convertirse en la *Smart Factory* de la Industria 4.0. Llegando muchas de estas, a desviarse de los principios fundamentales de Industria 4.0 y a ejecutar inapropiados planes de transición que no son acordes a las características y necesidades propias que cada empresa posee. Esto, resulta frecuentemente en el despilfarro de recursos susceptibles a ser utilizados de una mejor manera (Schumacher, Erol, & Sihm, 2016).

Ante esta situación, diversos autores proponen el uso de modelos de evaluación de madurez para diagnosticar el grado de inclusión o desarrollo que posee una organización frente a Industria 4.0. Dichos modelos constan de una etapa de evaluación donde se valora el estado actual de determinada compañía en términos de determinadas categorías de madurez. Luego, se procede a realizar un análisis de los resultados para brindar recomendaciones a dicha compañía (IMPULS, 2015). Una vez conocido el estado actual, algunos modelos solicitan el estado deseado que la compañía desearía tener en términos de Industria 4.0 con el fin de coadyuvar a que esta pueda generar su propia planificación (*roadmap*) hacia dicho estado deseado (Schumacher, Erol, & Sihm, 2016) (Mittal, Khan, Romero, & Wuest, 2018).

No obstante, la mayoría de los modelos omiten componentes fundamentales a evaluar como lo son la cualificación del recurso humano de la organización frente a las habilidades requeridas en Industria 4.0, consideraciones legales, necesidades de la empresa, inversiones estratégicas, entre otras componentes. Así mismo, modelos que toman en consideración el estado deseado de la compañía, suelen omitir los componentes anteriormente dichos (VDMA, 2016) (Mittal, Khan, Romero, & Wuest, 2018). Estos componentes hacen parte de las tendencias de Industria 4.0 y constituyen grandes áreas de oportunidad en el campo de los estudios relacionados a modelos de evaluación de madurez de Industria 4.0 (Mittal, Khan, Romero, & Wuest, 2018). En este orden de

ideas, la presente investigación tiene como objetivo proponer un modelo de evaluación de madurez orientado a valorar el grado de desarrollo que empresas manufactureras tienen con relación a Industria 4.0. Esto, tomando en consideración las tendencias previamente identificadas.

1.2. Justificación

La llegada de Industria 4.0 como cuarta revolución industrial es cada vez más notoria en el ámbito empresarial. Países como Alemania, China, Japón, Brasil, Estados Unidos, entre otros, están llevando a cabo proyectos gubernamentales orientados hacia el desarrollo de sus sectores industriales para que estos sean competitivos ante la llegada de Industria 4.0, y de esta manera, evitar quedar relegados con relación a los cambios que se avecinan. Según Porter y Heppelmann (2015), productos inteligentes y conectados (como los que propone Industria 4.0) suponen un nuevo paradigma sobre cómo las organizaciones compiten actualmente, de modo que las que no se ajusten a este nuevo enfoque, tendrán a futuro pocas posibilidades de sobrevivir en el mercado. Debido a lo anterior, compañías y gobiernos en todo el mundo están trabajando en función de las transformaciones que demanda Industria 4.0, para así, poder adaptarse a los cambios actualmente visibles y los futuros (Vaidya, Ambad, & Bhosle, 2018) (Sung, 2018).

Mediante la ejecución de la presente investigación se podrá contar con un modelo capaz de valorar la madurez o grado de desarrollo actual y deseado que compañías manufactureras tienen respecto a Industria 4.0. Esto, tomando en consideración las condiciones y necesidades particulares que cada compañía posea. Lo anterior, constituirá una herramienta fundamental para coadyuvar hacia una íntegra y efectiva transición de empresas convencionales hacia la *Smart Factory* de Industria 4.0 (Agca, Gibson, Godsell, Ignatius, & Davis, 2017).

Por otra parte, para superar la creciente incertidumbre que compañías enfrentan con respecto a Industria 4.0, se hace necesario la creación de métodos y herramientas capaces de proporcionar orientación y apoyo a estas compañías con el fin de alinear las estrategias y operaciones organizacionales a los nuevos avances y tendencias de la industria. En este sentido, la presente investigación pretende ser una ayuda para que las organizaciones conciban de mejor manera el término Industria 4.0 y puedan evitar errores comunes a la hora de destinar recursos hacia su

implementación. Lo anterior, brinda a las organizaciones mayores oportunidades para que puedan realizar una correcta transición hacia Industria 4.0 (Schumacher, Erol, & Sihm, 2016).

Así mismo, al contemplar el presente modelo componentes que otros modelos de evaluación de madurez no contemplan y que están presentes en las recientes tendencias de Industria 4.0, el modelo a desarrollar pretende ser uno de los más completos en cuanto a su propósito. Lo anterior, representará un avance en el campo de estudio de los modelos de madurez de Industria 4.0. Logrando así, la construcción de uno de los primeros modelos de este tipo en ser elaborado en Latinoamérica. Lo anterior permitirá, además, abrir paso a futuras investigaciones que deseen ahondar sobre el modelo a plantear conforme Industria 4.0 va adquiriendo mayor presencia y madurez en el mundo (Roblek, Meško, & Krapež, 2016).

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

- Proponer un modelo de evaluación de madurez con el fin de valorar el grado de desarrollo que empresas manufactureras tienen con relación a Industria 4.0.

1.3.2. Objetivos específicos

- a. Caracterizar los principios de diseño de Industria 4.0 con el fin de establecer los parámetros del modelo a desarrollar.
- b. Construir un modelo de evaluación de madurez que permita a empresas manufactureras conocer su estado actual de desarrollo con respecto a Industria 4.0.
- c. Elaborar un instrumento de recolección de la información que permita recabar la información requerida por el modelo.
- d. Validar el modelo de evaluación de madurez construido mediante un caso de aplicación.

1.4. Pregunta de investigación

- a) ¿Qué dimensiones, elementos, y relaciones se deben considerar en un modelo de evaluación de madurez para valorar correctamente el desarrollo de Industria 4.0 en una organización?

1.5. Alcance y delimitaciones

La presente investigación pretende proponer un modelo de evaluación de madurez capaz de diagnosticar el grado de desarrollo que una compañía posee en torno a Industria 4.0. Lo anterior, considerando adicionalmente las áreas de oportunidad identificadas para modelos de evaluación de madurez de Industria 4.0: recursos humanos, consideraciones legales, necesidades de la empresa, e inversiones estratégicas (*ver pág. 4 y pág. 69*). Por otra parte, el presente estudio se encuentra delimitado a organizaciones de tipo manufactureras y a un caso de aplicación debido al tiempo disponible para la ejecución del proyecto de investigación.

1.6. Hipótesis

La inclusión de un modelo de evaluación de madurez de Industria 4.0 y sus tendencias coadyuva a diagnosticar el grado de desarrollo de Industria 4.0 en empresas manufactureras.

2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Industria 4.0

2.1.1. Descripción

El término Industria 4.0 fue acuñado inicialmente en 2011 en la *Hannover Fair* bajo el término alemán *Industrie 4.0*, en donde el versionado “4.0” refleja el enfoque de informatización a la industria y la connotación de cuarta revolución industrial que se le pretende dar. Además de la primera definición de Industria 4.0 propuesta por Kagermann et al. (*ver pág. 2*), diversos investigadores y compañías alrededor del mundo han mostrado puntos de vista diferentes acerca de lo que consideran como Industria 4.0 y las tecnologías que ésta engloba. Varios autores realizan definiciones incluyendo conceptos como “*interoperabilidad de procesos*”, “*digitalización*”, “*flexibilidad*”, entre otros (VDMA, 2016) (Lu, 2017) (De Sousa, Jabbour, Foropon, & Filho, 2018). No obstante, existe consenso en relación con los principales aspectos que Industria 4.0 abarca, estos, según Pereira y Romero (2017), son:

Fábrica Inteligente (*Smart Factory*): es llamada la fábrica de la Industria 4.0, una fábrica convencional que gracias a varios procesos de integración, digitalización, uso de estructuras flexibles, y la inclusión de métodos de solución inteligentes, ha sido transformada en una fábrica inteligente capaz de satisfacer los requerimientos de Industria 4.0 (Radziwon, Bilberg, Bogers, & Skov Madsen, 2014). En este tipo de fábricas, los recursos de una organización tales como máquinas, sensores, actuadores, robots, sistemas de información, entre otros, se encuentran conectados en tiempo real (Qin, Liu, & Grosvenor, 2016). Esto permite incrementar las tasas de productividad, descentralizar operaciones y atender requerimientos complejos de mercado tales como la personalización de productos (Kagermann, Wahlster, & Helbig, 2013).

Productos Inteligentes (*Smart Products*): son bienes que pasan a ser integrados a toda la cadena de suministros como parte activa. Un producto inteligente en proceso es capaz de monitorear su propio estado de producción con base a datos almacenados en su interior, calcular y solicitar automáticamente la cantidad de insumos necesarios para su producción, y modificar parámetros del proceso productivo acorde a sus necesidades. Por otro lado, un producto inteligente terminado

es capaz de proveer información al consumidor acerca de los parámetros de funcionamiento de este, el estado de sus componentes principales a lo largo de su ciclo de vida, e incluso informaciones acerca de cuándo realizar mantenimientos preventivos y/o realizar reemplazos de consumibles (Schmidt, Möhring, Härting, & Jozinović, 2015). En cierta medida, un producto inteligente es una aplicación de un sistema ciber-físico dado que poseen la capacidad de conectar el mundo físico con el virtual (Nasser, 2014).

Modelos de Negocio (*Business Models*): debido al cambio de paradigma que implica Industria 4.0 en la manera en cómo las empresas se comunican e interactúan a lo largo de la cadena de suministro, nuevos modelos de negocios están emergiendo para dar respuesta a nuevas dinámicas de mercado caracterizadas por ambientes colaborativos. En estos nuevos modelos de negocio, existen más oportunidades para generar valor debido al tipo de ambientes en el cual se desenvuelven. La constante integración, comunicación y cooperación entre eslabones de la cadena es el factor clave de éxito para estos modelos de negocio (Qin, Liu, & Grosvenor, 2016).

Clientes (*Customers*): los clientes son los más beneficiados ante Industria 4.0, estos se verán favorecidos con ofertas que responden de manera más rápida y acertada a la demanda. Esto, gracias a la alta flexibilidad que caracteriza a las fábricas inteligentes. De acuerdo con Erol, Jäger, Hold, Ott, & Sihn (2016), Industria 4.0 está cambiando la manera en cómo las empresas interactúan para atender los fluctuantes requerimientos de mercado a través de la constante integración y cooperación en tiempo real a lo largo de toda la cadena de suministros. Lo anterior, coloca a los clientes en un plano en el que contarán con una mejor y más variada oferta de bienes y servicios acorde a sus necesidades.

Dado que el concepto “*smart*” o “inteligente” es notoriamente un concepto central en el contexto de Industria 4.0, cabe aclarar que este se refiere, en dicho contexto, a la cualidad o atributo que posee un bien de ser independiente y autónomo en cierta medida. Siendo este capaz de comunicarse, cooperar, tomar decisiones, y llevar a cabo acciones en tiempo real en sincronía con otros bienes o incluso todo un sistema de bienes dentro de un entorno productivo (ambiente inteligente) (Radziwon, Bilberg, Bogers, & Skov Madsen, 2014).

2.1.2. Principios de diseño

Realizar el proceso de transición de los sistemas actuales de producción hacia los que demanda Industria 4.0 es una labor que requiere de grandes esfuerzos. Las acciones que cada compañía deba seguir estarán sujetas a las particularidades de su sistema de producción, tipo de bienes producidos, y diversas variables más (Hermann, Pentek, & Otto, 2016). No obstante, existen principios que se deben tener en cuenta a la hora de diseñar escenarios productivos en el marco de Industria 4.0. Según Hermann et al. (2016), estos son:

- **Interconexión (conectividad):** refiere a la habilidad de máquinas, personas, y sistemas para conectarse y comunicarse entre sí a través del Internet de las Cosas (IoT). Este principio demanda colaboración y estándares de seguridad debido a toda la información valiosa y de tipo confidencial que estará constantemente viajando a través de la red. Conceptos como integración horizontal (integración de la empresa con los eslabones de la cadena de suministro) e integración vertical (integración de los sistemas TIC a través de los distintos niveles jerárquicos y procesos de la compañía) están estrechamente ligados a este principio de diseño (Tjahjono, Esplugues, Ares, & Pelaez, 2017), (Kagermann, Wahlster, & Helbig, 2013).
- **Descentralización:** es la habilidad de los sistemas ciber-físicos (sistemas que conectan al mundo físico con el virtual) de tomar decisiones por su propia cuenta y realizar tareas autónomamente. Esto, con el fin de aumentar las tasas de productividad en las organizaciones y eliminar procesos innecesarios o fácilmente automatizables. Un ejemplo de este principio en el contexto de Industria 4.0 son los sistemas modulares de producción, estos son capaces de identificar y ajustar automáticamente la configuración de una línea productiva en función de las necesidades que se presenten. Máquinas de producción con interfaces de tipo Plug & Produce permiten una rápida y sencilla reconfiguración de las líneas de producción, facilitando esto la creación de ambientes inteligentes de producción y la reducción de tiempos de cambio de línea. Cabe resaltar que decisiones importantes que involucren excepciones a reglas, conflicto de intereses, y demás particularidades, deberán ser elevadas a un nivel superior (razonamiento humano).

- **Transparencia de la información:** refiere a la habilidad de los sistemas ciber-físicos de abstraer con suma precisión el mundo físico a un mundo virtual. La información recolectada por sensores y demás dispositivos electrónicos deberá ser suficiente tal que permita crear una copia fidedigna del mundo físico. La adecuada provisión y análisis de información en tiempo real a los sistemas ciber-físicos es fundamental para su correcta operación, este nivel de precisión coadyuvará a que puedan tomar mejores decisiones y más confiables.
- **Asistencia técnica:** las interfaces visuales de las máquinas deben ser amigables con los usuarios de tal forma que la información compleja, procesada por sistemas ciber-físicos, pueda ser fácilmente comprensible por humanos para tomar decisiones y solucionar problemas urgentes de manera rápida y sencilla. Además del soporte virtual descrito, es necesario un soporte físico orientado a que máquinas cumplan con un rango de tareas que podrían resultar desagradables, exhaustivas o inseguras para los humanos. Para lo anterior, es necesaria una adecuada interacción entre máquinas y personas (Wittenberg, 2016).

2.1.3. Principales componentes tecnológicos

Industria 4.0 contempla la inclusión de diversas tecnologías en los sistemas productivos con el fin de aumentar la productividad y la generación de valor agregado en toda la organización. A continuación, se describen las principales tecnologías utilizadas y breves ejemplos de su utilización en un entorno de producción inteligente:

Beacons

Son pequeños dispositivos de bajo consumo energético que permiten transmitir mensajes o avisos a cualquier dispositivo compatible tales como *smartphones* o tabletas que se encuentren dentro de su radio de acción. Estos dispositivos emiten una señal de tipo *broadcast* o de “amplia difusión” mediante una conexión bluetooth de bajo consumo (BLE) sin necesidad de emparejar previamente el beacon con el dispositivo receptor (Brassil, 2014). Gracias al tipo de señal *broadcast* es posible

transmitir simultáneamente información desde un nodo emisor hacia múltiples nodos receptores, sin necesidad de repetir la misma transmisión n veces hasta informar a cada nodo receptor. El nodo receptor puede poseer la capacidad de transmitir la información recibida hacia algún servidor en la nube (Spachos & Plataniotis, 2018).



Figura 2.1. Conexión Beacon-Receptor-Nube

Fuente: ricveal.com

Los usos de los beacons se extienden principalmente al ámbito informativo y del marketing. Actualmente, en Estados Unidos, cadenas comerciales como Macy's Inc. utilizan la tecnología beacon para emitir ofertas de última hora o ayudar a que el cliente se ubique más fácilmente en la tienda al emitir un mensaje a los dispositivos móviles que pasen por determinado punto físico o por un área previamente delimitada de la tienda. Los mensajes que se emiten pueden contener texto, audio, imágenes o video. Estos mensajes deben poseer un equilibrio entre cantidad y calidad para no saturar al cliente de mensajes y, a la vez, brindarle la información justa, en el lugar estratégico, y en el momento oportuno (Kim, Park, Sun, & Lee, 2016).

En el entorno de una fábrica inteligente, los beacons pueden ayudar al rápido reconocimiento de las características de un lote de productos con sólo instalar un nodo emisor en dicho lote y que un operario posea un nodo receptor en donde se mostrará la información (Ahuett-Garza & Kurfess, 2015). Adicionalmente, pueden informar a determinados trabajadores mensajes importantes acerca del estado en tiempo real de un proceso productivo, conocer la posición exacta de materias primas o trabajadores, registrar el tiempo que pasan en diferentes locaciones, emitir datos sobre el estado de máquinas o procesos con destino hacia la nube para su posterior análisis, mejorar el flujo de vehículos en la fábrica, entre otros usos (Heddebaut, Ghys, Sanz, & Elbahhar, 2013).

Big Data & Analytics

Big Data es un término usado para referirse a los estudios y aplicaciones de grandes volúmenes de datos los cuales son muy complejos de procesar con técnicas de procesamiento de datos convencionales (Dumbill, 2013). El término, a grandes rasgos, involucra la captura, almacenamiento, procesamiento, análisis, y gestión y visualización de la información. Por otra parte, el término Analytics, el cual suele acompañar al Big Data, se refiere exclusivamente a la fase de análisis y visualización de la información. Por lo cual referirse a Big Data & Analytics es igual a referirse únicamente a Big Data. Sin embargo, el término Analytics puede ser usado cuando se desea referirse únicamente a la fase de análisis y visualización de información (Hillier & Lieberman, 2015).

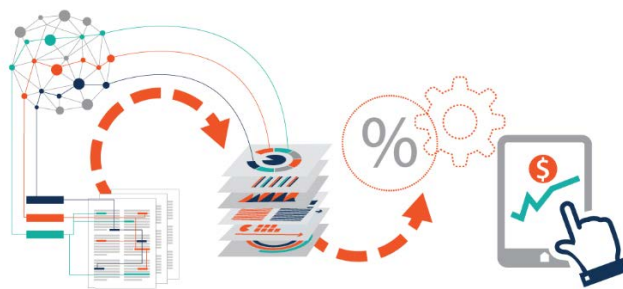


Figura 2.2. Big Data & Analytics

Fuente: ontotext.com

Como se mencionó previamente, cuando a Big Data se refiere, los volúmenes de información que se manejan son altos, usualmente en unidades de almacenamiento de información de Terabytes o Petabytes. Para hacer una mejor idea de qué tan altos son, se propone al lector imaginar que todo el contenido audiovisual en Full HD (1080p) que pudiese transmitir un canal de televisión durante 3.5 años continuos de transmisión ocuparía alrededor de 1 petabyte de información. Gigantes como Amazon, Facebook y Google poseen servidores de hasta 100 petabytes dedicados al almacenamiento de la información que generan sus consumidores. Pero ¿de dónde proviene toda esta cantidad de información?

Con la inclusión de asequibles dispositivos generadores de datos que hacen uso del Internet de las Cosas, tales como dispositivos móviles, cámaras digitales, micrófonos, dispositivos RFID, sensores, registros de software, entre otros, el volumen de datos alrededor del mundo ha ido creciendo vertiginosamente (Provost & Fawcet, 2013). Este crecimiento se ha venido dando a ritmos acelerados desde 2002, el cual fue marcado como el año de la Revolución Digital o la Tercera Revolución Industrial. De acuerdo con Hajirahimova & Aliyeva (2017), basándose en datos de un reporte de la *International Data Corporation* (IDC), es posible prever que el volumen mundial de datos almacenados irá creciendo exponencialmente desde 4.4 zettabytes en 2013 hasta 44 zettabytes en 2020, pudiendo alcanzar los 163 zettabytes de datos en 2025.

Para representar toda la cantidad de datos que las anteriores cifras y unidades suponen, la Figura 2.3 representa la equivalencia de unidades como Petabyte y Zettabyte a unidades de almacenamiento usualmente más conocidas como el Gigabyte.

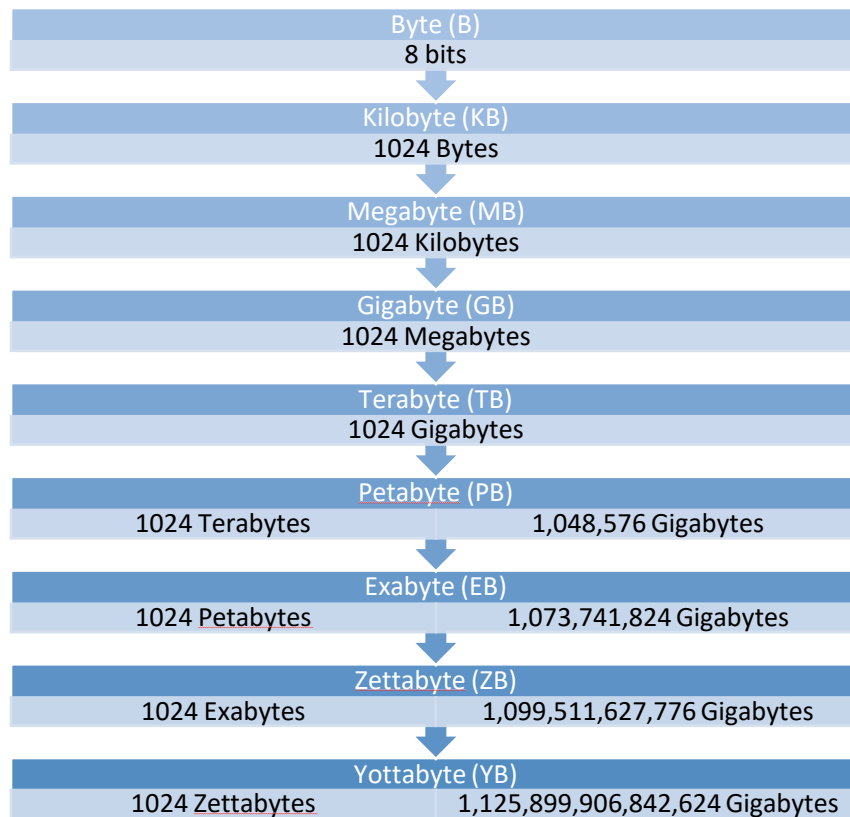


Figura 2.3. Unidades de almacenamiento de información y sus equivalencias

Fuente: elaboración propia.

Debido a este incremento sustancial de datos, compañías en prácticamente todas las industrias se han visto en la necesidad de sacar el máximo provecho de estos con el fin de generar ventajas competitivas (Mayer-Schönberger & Cukier, 2014). Ante esta necesidad, nace una de las nuevas disciplinas del siglo XXI llamada *Data Science* o “Ciencia de datos” en su traducción al español. Esta disciplina es definida según Provost & Fawcet (2013) como “*el conjunto de principios fundamentales que soportan y guían la extracción de información y conocimiento a partir de datos con el fin de apoyar la toma de decisiones*”. En este orden de ideas, es posible afirmar que la Ciencia de datos se encarga de estudiar las técnicas empleadas en el Big Data, o en un sentido más amplio, que la ciencia de datos es al Big Data como la tecnología lo es a la técnica.

Algunos de los usos del Big Data en el ámbito industrial son la detección de tendencias y patrones de comportamiento de clientes y/o recursos de la compañía tales como máquinas o empleados, análisis predictivos para anticiparse a fluctuaciones de mercado, optimización de procesos, sistemas de alerta inteligentes capaces de prever problemas en las líneas de producción y ofrecer información acerca de sus consecuencias y posibles alternativas de solución, identificación de nuevas oportunidades de negocio, mejoras en la experiencia del cliente, etc. (Govindan, Cheng, Mishra, & Shukla, 2018) (Kumar, Singh, & Lamba, 2018). El uso del Big Data en las organizaciones representa un cambio disruptivo en la manera como estas se conocen convencionalmente (Tseng, Tan, Chiu, Chien, & Kuo, 2018).

En ámbitos no industriales, el Big Data es utilizado para predicción y prevención del crimen gracias al análisis de flujo de datos en redes de telecomunicaciones y redes sociales con el objetivo de detectar posibles amenazas y adelantarse a los hechos antes que sucedan. Así mismo, es usado en ciberseguridad para detectar patrones de comportamiento fuera de lo normal que puedan indicar transacciones fraudulentas en cuentas bancarias, espionaje, intrusos, e incluso ciberterrorismo. Así mismo, es utilizado en el ámbito de la medicina para detectar tempranamente enfermedades, analizar el genoma humano, identificar pandemias, entre otros usos (Cobb, Benjamin, Huang, & Kuo, 2018).

Blockchain

Blockchain, o Cadena de Bloques en español, es un sistema informático caracterizado por utilizar un tipo de estructura de datos que agrupa información en conjuntos de datos llamados *blocks* o bloques, en donde gracias al uso de técnicas criptográficas, es posible formar bases de datos seguras en donde la información contenida no puede ser eliminada o modificada (Tapscott & Tapscott, 2016). Los inicios del *blockchain* datan de 1991 cuando Stuart Haber y W. Scott Stornetta crearon una red de bloques asegurada por criptografía con el fin de implementar un sistema en donde las marcas de tiempo de documentos digitales no pudiesen ser manipuladas (Haber & Stornetta, 1991).

Posteriormente, en 1992, el trabajo de Haber y Stornetta fue mejorado junto con Dave Bayer gracias a la inclusión de Árboles de Merkle, lo cual aumentó la eficiencia de la red previamente diseñada debido a que varios datos podían, a partir de este nuevo avance, ser identificados en un solo bloque con un único código *hash* (Bayer, Haber, & Stornetta, 1993). Sin embargo, fue hasta 2009 cuando una persona, o grupo de personas, detrás del seudónimo *Satoshi Nakamoto* tomaron el concepto de Haber, Stornetta y Bayer y lo mejoraron conceptualizándolo bajo el nombre de *block chain* con el objetivo de utilizarlo para desarrollar la popular criptomoneda conocida como Bitcoin (Buterin, 2014). El término fue unificado en 2016 como una única palabra debido a su popularización y es utilizado actualmente en diversos campos como la medicina, finanzas, sistemas de información, sistemas electorales, gestión de derechos de autor, entre otros (Rodrigues, Bocek, & Stiller, 2018).

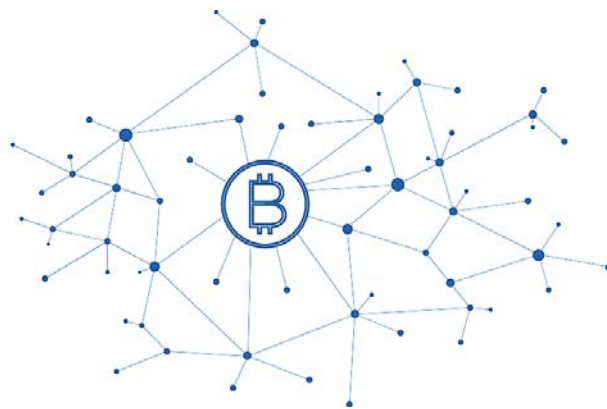


Figura 2.4. Estructura de red tipo distribuida utilizada por Blockchain

Fuente: infocoin.net

Un concepto fundamental en el *blockchain* es el de “*hash*”. El término *hash* deriva de las funciones *hash* criptográficas, las cuales derivan a su vez de las funciones *hash* también conocidas como funciones resumen o funciones *digest*. Este tipo de funciones se encargan de resumir un determinado conjunto de datos en una cadena de caracteres de longitud finita compuesta por caracteres alfanuméricos. De esta manera, es posible identificar a un conjunto o bloque de datos con un único e irrepetible código *hash* que permite reconocer cada bloque de la *blockchain* y por ende la información contenida en este (Swan, 2015). En la Figura 2.5 es posible apreciar el funcionamiento de la función *hash* “SHA-1” para codificar los mensajes “Industria 4.0”, “Blockchain” e “Industria 4.0 como 4ta Revolución Industrial” a códigos *hash* compuestos por 40 caracteres alfanuméricos. El número finito de caracteres que poseen los códigos *hash* suele variar dependiendo de la función *hash* utilizada. Cabe resaltar que las funciones *hash* admiten tanto caracteres como archivos, por lo cual codificar un archivo es igualmente posible gracias a esta técnica de criptografía. De igual manera, es posible codificar varios archivos en un único código *hash* utilizando Árboles de Merkle (Muzammal, Qu, & Nasrulin, 2019).

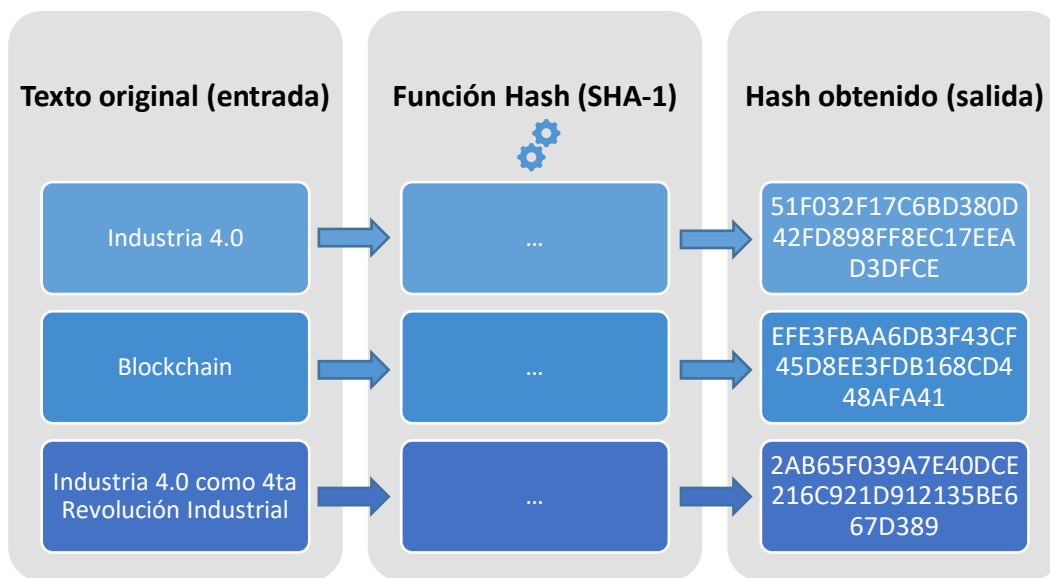


Figura 2.5. Ejemplo de codificación de texto con función hash SHA-1

Fuente: elaboración propia.

En la *blockchain* cada bloque contiene 3 tipos de datos: la información contenida en el bloque, el *hash* propio del bloque, y el *hash* del bloque anterior. De esta manera, cada bloque está relacionado

con su antecesor y su sucesor. Formando así, una cadena de bloques en donde los *hashes*, además de servir como identificadores, sirven como vínculos que conectan a cada bloque (Swan, 2015).

En la red, cada usuario posee una copia de la base de datos general a través de la cual puede realizar operaciones que generen nuevos bloques. Sin embargo, todos los usuarios se encuentran vigilando constantemente que las copias particulares de cada usuario coincidan con la de la base de datos general. Teniendo en cuenta que el código *hash* varía en función del contenido del bloque, si el contenido de un bloque es modificado por un usuario de la red en su copia local de la base de datos general, el *hash* del bloque en cuestión cambiará. Esto provocará que el nuevo código *hash* no coincida con el registrado en el bloque antecesor y el bloque sucesor, lo cual da un aviso a los demás usuarios de la red que ese usuario ha tratado de modificar un bloque. Cuando esto sucede, la versión de la base de datos generada por este usuario es anulada y queda sin efecto. Impidiendo así, que la información contenida en los bloques de la base de datos general pueda ser alterada (Minoli & Occhiogrosso, 2018).

Para que un usuario pueda modificar con éxito un bloque, debe recalcular los códigos *hash* de todos los n bloques anteriores, esta operación de recalcular códigos *hash* es equivalente a la de crear nuevos códigos *hash* para crear nuevos bloques en la red y se le conoce como “minado” (Minoli & Occhiogrosso, 2018). En el caso de las criptomonedas, encontrar un sólo código *hash* que permita crear un nuevo bloque requiere resolver un complejo problema matemático que involucra la generación de códigos *hash* correspondientes a la función SHA-256 de manera aleatoria e iterativa hasta encontrar el *hash* adecuado que permita que el nuevo bloque encaje en la cadena (Khan & Salah, 2018). Esto demanda una gran potencia computacional que incluso a potentes ordenadores de mesa puede tomar decenas o cientos de años en resolver. Ante esto, existen varias “granjas de minado” alrededor del mundo, las cuales son grandes clústeres de cómputo con hardware dedicado al minado que se encargan exclusivamente de este tipo de procesamientos, el cual se mide en *hashes* por segundo (Hs/s) y hace referencia a la cantidad de *hashes* que un ordenador puede generar por segundo. Debido al costo energético que supone tener funcionando permanentemente esta infraestructura tecnológica que demanda eficientes sistemas de refrigeración y un alto consumo energético, las mayores granjas de minado del mundo se ubican en China y Singapur donde la

energía es más económica, o en lugares fríos y con costos energéticos reducidos como Islandia (Vranken, 2017).

Teniendo en cuenta lo anterior, y el hecho de que se genera en promedio un nuevo bloque cada 10 minutos en la *blockchain* de las criptomonedas, es posible afirmar que es computacionalmente inviable que un usuario pueda modificar los 547100 bloques² que, al 24 de octubre de 2018, hay en dicha *blockchain*. Es debido a esto que *blockchain* se considera como un sistema seguro e impenetrable (Hammi, Hammi, Bellot, & Serhrouchni, 2018).

Ante lo anterior, *blockchain* está comenzando a ser utilizado en sistemas de información encargados de comunicar “*Cadenas Digitales de Suministro*”, término acuñado para referir a las Cadenas de Suministro de Industria 4.0 (Casado-Vara, Prieto, De la Prieta, & Corchado, 2018) (Korpela, Hallikas, & Dahlberg, 2017) (Tjahjono, Esplugues, Ares, & Pelaez, 2017) (Kshetri, 2018) (Büyükköçkan & Göçer, 2018). Esto, con el objetivo de garantizar un intercambio seguro de información entre los eslabones de la cadena y fomentar la confianza y disposición de los eslabones para integrar sus sistemas de gestión de la información (Angrish, Craver, Hasan, & Starly, 2018). De esta manera, diversos eslabones de la cadena de suministro pueden intercambiar información de manera segura en un entorno descentralizado y con una estructura de seguridad que se protege a sí misma, como es el caso de *Blockchain* (Lin, He, Huang, Choo, & Vasilakos, 2018) (Li, Liu, Barenji, & Wang, 2018).

Computación en la nube

La computación en la nube, también conocida en inglés como *cloud computing*, es una metáfora en la cual el término “nube” hace referencia a un grupo de recursos computacionales (físicos y virtuales) que interactúan entre sí para proveer servicios de alto nivel a un conjunto de usuarios con el mínimo esfuerzo de gestión posible a través de internet (Subramanian & Jeyaraj, 2018). La computación en la nube provee a las organizaciones servicios en donde la tarea de adquirir y mantener una infraestructura tecnológica (computadoras, servidores, redes, software, etc.) es realizada por la empresa que presta el servicio de computación en la nube. De esta manera, las

² Para consultar la cantidad de bloques actuales dirigirse a <https://blockexplorer.com/api/status?q=getBlockCount>

organizaciones pueden concentrarse en sus actividades principales y despreocuparse por gran parte de su infraestructura tecnológica y respectivo mantenimiento (Thames & Schaefer, 2016).

Existen tres principales modelos de servicio que un proveedor de computación en la nube suele ofertar, estos son:

- **Infraestructura como servicio (IaaS):** sus siglas IaaS derivan del inglés *Infrastructure as a Service*, hace referencia a un modelo de servicios de computación en la nube donde lo que se oferta es capacidad de almacenamiento y servicios estandarizados de red para la captura, procesamiento y gestión de la información. Por ejemplo: servidores, conexiones, enrutadores, interfaces de gestión de información, cortafuegos, entre otros. Este modelo es conocido también como Hardware como Servicio (HaaS) debido a que el principal componente ofertado son recursos computacionales físicos.
- **Plataforma como servicio (PaaS):** en este tipo de modelo de servicio lo que se oferta es una plataforma informática que permite a las organizaciones desarrollar, ejecutar y administrar aplicaciones, dejando a un lado la complejidad que requiere construir y mantener una infraestructura física para ello. Como ventaja, los usuarios pueden dedicar más tiempo a sus desarrollos debido a la estructura de tipo integrada o “*built-in*” en la cual se desarrollan las aplicaciones. Por otra parte, como desventaja se tiene una reducción en las herramientas que un desarrollador usualmente tiene disponibles. Este tipo de modelo abarca las funcionalidades del modelo IaaS.
- **Software como servicio: (SaaS):** es un modelo de servicio de computación en la nube que permite a usuarios utilizar aplicaciones basadas en la nube sin necesidad de tener que preocuparse por el funcionamiento y mantenimiento de la aplicación. Así como también, la infraestructura física necesaria para su respectivo funcionamiento. En este tipo de modelos el usuario generalmente paga por lo que utiliza en términos de capacidades y tiempo, es decir, el usuario paga por la cantidad de funcionalidades que posea el software y el tiempo por el cual lo use. Usualmente los softwares de este tipo de modelo están diseñados modularmente, de tal manera que el usuario pueda comprar sólo los módulos que necesita,

pudiendo incluso modificar o desarrollar nuevos módulos acorde a las necesidades específicas de la organización. Este modelo incluye las funcionalidades de IaaS y puede incluir las funcionalidades de PaaS. En la Figura 2.6 se muestran los diferentes modelos mencionados de forma esquemática.

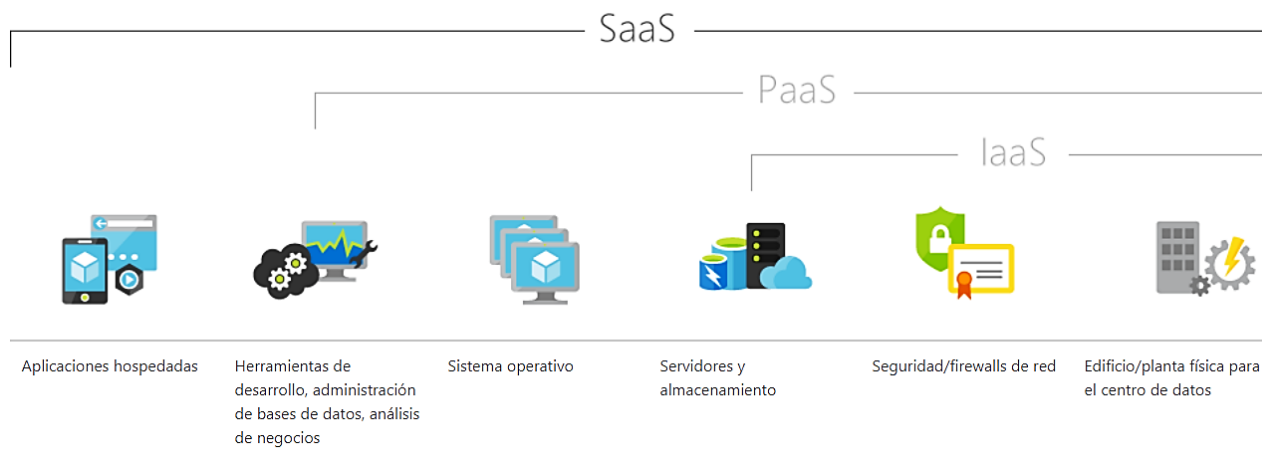


Figura 2.6. Modelos de servicio de computación en la nube

Fuente: azure.microsoft.com

Un ejemplo relevante de computación en la nube aplicable a diversos sectores industriales es el de la empresa SAP. SAP, cuyas siglas provienen del alemán *Systeme, Anwendungen und Produkte in der Datenverarbeitung* que significa “*Systems, Applications & Products in Data Processing*”, es una multinacional alemana principal proveedora de soluciones ERP en el mundo. La mayoría de sus servicios son basados en la nube, dentro de los cuales resaltan diversas aplicaciones (SaaS), permitiendo a los usuarios acceder a la plataforma *SAP Cloud Platform*, en la cual pueden diseñar sus propias aplicaciones y módulos personalizados con posibilidad de integrarlos a los módulos predefinidos (PaaS). Todo lo anterior, soportado por una eficaz infraestructura tecnológica (IaaS) (Nieuwenhuis, Ehrenhard, & Prause, 2018). En la Figura 2.7 se muestran algunos de los principales proveedores de computación en la nube actualmente disponibles organizados en cada uno de los modelos de servicio anteriormente mencionados (Alles, 2018).

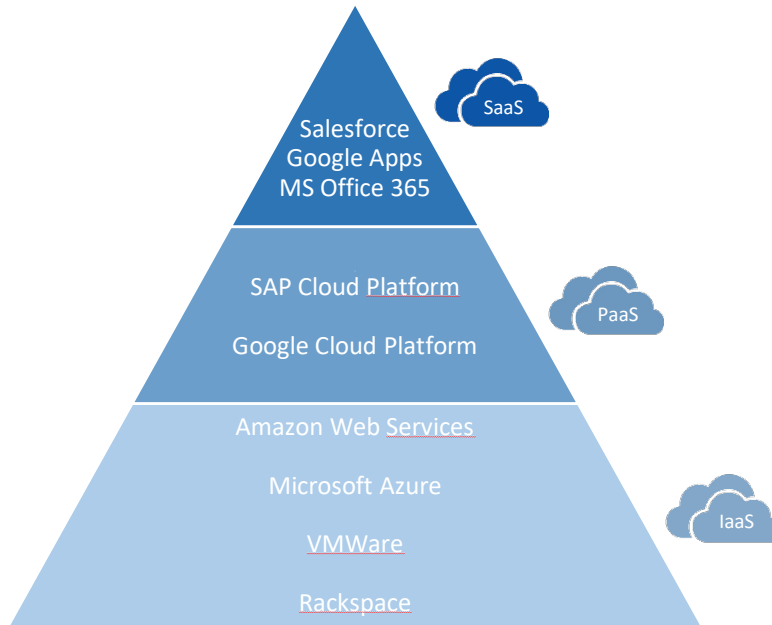


Figura 2.7. Principales proveedores de computación en la nube por modelos de servicio

Fuente: elaboración propia.

Aspectos clave a considerar a la hora de elegir un proveedor de servicios de computación en la nube son:

- Seguridad frente a la protección de la información.
- Rapidez, confiabilidad y rendimiento.
- Esquemas contractuales y de precio.
- Certificaciones y estándares del proveedor.
- Portafolio de servicios.
- Latencia del sistema en conexiones distantes.
- Soporte al cliente.
- Capacidad de almacenamiento.

En términos de Industria 4.0, la computación en la nube pasa a tener un rol fundamental ya que sirve de medio para almacenar y distribuir la información generada por sensores, robots, dispositivos RFID, móviles, y en general, todos los dispositivos bajo el concepto del Internet de las Cosas (IoT) que produzcan información que permita generar valor agregado para la

organización y pueda ser almacenada, procesada y analizada (Thames & Schaefer, 2016). Un ejemplo de ello es el estrecho vínculo que hay entre el IoT, el Big Data y la computación en la nube: el Internet de las Cosas (IoT) permite interconectar digitalmente diversos dispositivos u objetos a través de Internet, estos generan información que es almacenada en la nube (IaaS) y posteriormente procesada mediante técnicas de Big Data por aplicaciones que igualmente se encuentran en la nube (SaaS) (Pedone & Mezgár, 2018). Lo anterior, permite dar cumplimiento a uno de los principios de diseño de Industria 4.0: la interconexión (conectividad) (Hermann, Pentek, & Otto, 2016).

Fabricación aditiva

La fabricación aditiva consiste en la elaboración de piezas cuyo proceso de conformación se da capa por capa hasta conseguir una forma o estructura deseada. Los materiales con los que se crean las piezas pueden ser plásticos, metales, resinas, entre otros. Este tipo de fabricación se inicia a partir de la concepción de diseño de una pieza en un software asistido por computadora, también conocidos como softwares CAD (*Computer Aided Design*) (Eyers & Potter, 2017). Estos softwares permiten crear un modelo digital en 3D de la pieza deseada, el cual es almacenado en un archivo y posteriormente enviado a una impresora capaz de interpretar la información contenida en este y calcular dónde y cuándo debe añadir material.

Los términos “impresión 3D” y “fabricación aditiva” son comúnmente confundidos o tomados como sinónimos. No obstante, la impresión 3D es sólo una pequeña parte de la fabricación aditiva. En la impresión 3D se tienen varias limitantes como el tipo de material a utilizar y el proceso llevado a cabo para solidificar o unir las capas de material. Estos procesos en la impresión 3D suelen ser de solidificación por luz UV o por deposición de filamentos de plástico fundido. Así mismo, las piezas que se fabrican usualmente suelen tener prestaciones limitadas como por ejemplo: juguetes, carcasas, artículos de decoración, entre otros (Bourell, y otros, 2017).

Por otra parte, la fabricación aditiva, además de utilizar plástico, utiliza diversos materiales como metales, resinas y derivados del papel. Así mismo, utiliza procesos de conformación tales como el Sinterizado Láser Selectivo (SLS), la Estereolitografía (SLA), Polyjet, Sinterizado Directo de

Metal Láser (DMLS), Chorro de polvo multicolor, entre otras (Bourell, y otros, 2017). En la Figura 2.8 se muestra el resultado final de una pieza de metal fabricada de forma aditiva mediante la técnica de Sinterizado Directo de Metal Láser (DMLS).



Figura 2.8. Pieza de metal elaborada mediante proceso de fabricación aditiva DMLS

Fuente: sculpteo.com

Las aplicaciones de la fabricación aditiva en Industria 4.0 son muchas, van desde la personalización de productos, hasta la potenciación de las capacidades humanas mediante el uso de exoesqueletos. Esta tecnología es especialmente útil cuando se desea diseñar componentes de gran complejidad geométrica sin costos adicionales ya que el costo de producir una unidad es proporcional al de producir n unidades. Así mismo, resulta útil para acelerar plazos de entrega y gestionar de mejor manera el riesgo asociado a los costos de inventario gracias los cortos tiempos de procesamiento que pueden tener las piezas (Dilberoglu, Gharehpapagh, Yaman, & Dolen, 2017).

Inteligencia Artificial

De acuerdo con Salehi y Burgueño (2018), la Inteligencia Artificial (IA) es una rama de las ciencias de la computación encargada de desarrollar máquinas y programas con métodos que pretenden emular la inteligencia humana. La Inteligencia Artificial es especialmente útil como una alternativa de solución a modelos clásicos en donde se pretende disminuir incertidumbres, reconocer patrones, resolver problemas matemáticamente complejos, entre otras aplicaciones (Fazal, Patel, Tye, & Gupta, 2018). De esta manera, es posible agilizar y descentralizar procesos de toma de decisiones, disminuir tasas de error, y encontrar soluciones a diversos problemas del entorno real en múltiples áreas del conocimiento (Mata, Ignacio, Durán, Merayo, & Singh, 2018).

Una de las herramientas más destacadas de la Inteligencia Artificial son las Redes Neuronales Artificiales (RNA). Estas, son algoritmos inspirados en el comportamiento de las redes neuronales biológicas existentes en el cerebro (Cao, Wang, Ming, & Gao, 2018). Su objetivo es simular la manera en la cual el cerebro humano recibe, procesa y genera información. Consisten en un sistema de capas de entrada, procesamiento (capas ocultas), y salida que se encargan de recibir, procesar y exportar información incluso hacia otras RNA o sistemas de información. Sus usos se extienden desde la mejora y control de sistemas, hasta la creación de modelos predictivos (Sieniutycz & Szwest, 2018). Se muestra en la Figura 2.9 la topología de una red neuronal del tipo perceptrón multicapa.

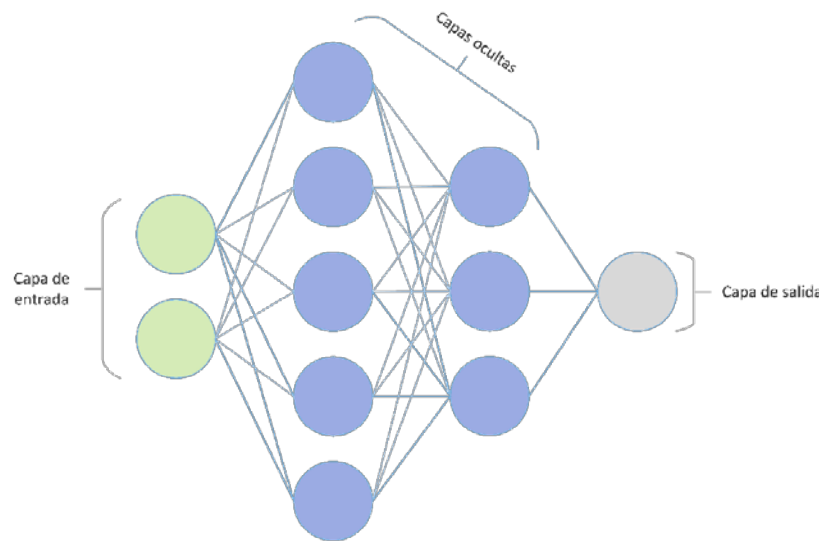


Figura 2.9. Topología básica de una red neuronal artificial de tipo perceptrón multicapa

Fuente: elaboración propia.

La Lógica Difusa es igualmente una herramienta destacada de la IA, esta herramienta utiliza una forma de lógica plurivalente en la cual valores lógicos pueden ser expresados como cualquier número real entre 0 y 1 (en contraste con la lógica booleana tradicional donde sólo se admiten enteros entre 0 y 1). Este tipo de lógica es empleada para manejar el concepto de “verdad parcial” (Omolbanin & Scott, 2018). Sus usos se extienden desde los sistemas dinámicos (sistemas cuyo estado cambia en función del tiempo) en el campo de la teoría de control, hasta la IA con el fin de permitirle a un ordenador analizar información que en el mundo real se presenta en una escala entre lo falso y lo verdadero (en vez de ser totalmente falso o totalmente verdadero). Un ejemplo de la Lógica Difusa en la IA es la manipulación de conceptos vagos y subjetivos relativos a la

temperatura tales como “caliente”, “tibio” o “frío”, con el fin de convertirlos en valores manipulables por un ordenador (Van Hung & Khanh, 2018).

Por otro lado, se tiene a los Algoritmos Genéticos (AG), los cuales son una metaheurística inspirada en el proceso de selección natural. Estos pertenecen a una categoría superior llamada “algoritmos evolutivos”. Los AG son comúnmente usados para encontrar soluciones de alta calidad (posiblemente no óptimas pero en menor tiempo) en un espacio de solución determinado (Dao, Abhary, & Marian, 2017). Lo anterior, mediante la inclusión de procesos de mutación, recombinación y selección que hacen que una población inicial de “soluciones candidatas” evolucione continuamente hacia mejores soluciones. Los AG pueden ser utilizados en diversas áreas del conocimiento, lo cual los hace una herramienta de gran relevancia en el ámbito de las ciencias de la computación y la investigación de operaciones (Senoussi, Dauzère-Pérès, Brahim, Penz, & Kinza M., 2018).

Internet de las cosas

Para entender este concepto, se propone iniciar con la definición de internet, esta, según la Real Academia Española, es una “*red informática mundial, descentralizada, formada por la conexión directa entre computadoras mediante un protocolo especial de comunicación*” (Real Academia Española, 2014). Aplicando este concepto a la palabra “cosas”, se puede entender al “internet de las cosas” como un paradigma tecnológico que busca conectar todas las “cosas” en tiempo y espacio a través de “internet” con el fin de propiciar el intercambio de datos entre las cosas conectadas (Lu, Papagiannidis, & Alamanos, 2018). En la Figura 2.10 se puede apreciar una representación esquemática de la manera en cómo los dispositivos se encuentran conectados a través de internet. El internet de las cosas es comúnmente conocido bajo las siglas “IoT” debido a su traducción al inglés “*Internet of Things*”.

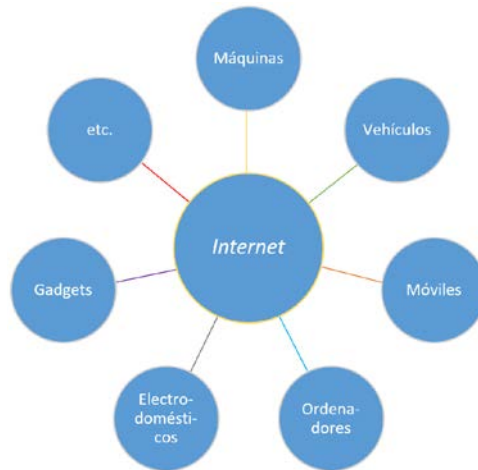


Figura 2.10. Representación tipo red del Internet de las Cosas

Fuente: elaboración propia.

En términos de Industria 4.0, el internet de las cosas juega un papel fundamental debido a que es uno de los principales paradigmas tecnológicos que habilitan o soportan esta filosofía. El IoT permite a máquinas, personas y sistemas conectarse entre sí, intercambiar datos, y con la ayuda de varias tecnologías, tomar decisiones descentralizadas (Dalenogare, Benitez, Ayala, & Frank, 2018). Varios autores adoptan el término “*Industrial Internet of Things*” (IIoT), propuesto inicialmente por la compañía General Electric en 2012, para referirse al paradigma del internet de las cosas pero aplicado al sector industrial (Boyes, Hallaq, Cunningham, & Watson, 2018). Dado que el paradigma se mantiene igual en ambos términos, en el presente documento se adoptará el término “Internet de las cosas” o “IoT” en vez de IIoT. Esto, con el fin de evitar caer en ramificaciones conceptuales que no aporten un valor claro a los conceptos originales.

Realidad aumentada

La realidad aumentada o AR (*Augmented Reality*) hace referencia a la experiencia interactiva que se da entre objetos del mundo real, uno o más usuarios, y visualizaciones generadas por computadora que permiten aumentar las propiedades físicas de uno o más objetos de dicho mundo real. El término “aumentar” hace referencia a que las representaciones generadas por computadora brindan información adicional que un objeto por sí solo no es capaz de mostrar. Para la computadora reconocer lo que tiene en frente o a su alrededor, se suelen utilizar sensores de escucha (micrófonos), visuales (cámaras) tacto, olfato, entre otros. Una vez la computadora reconoce y

analiza un objeto del mundo real, procede a brindar información acerca de sus propiedades (Mourtzis, Zogopoulos, & Vlachou, 2018).

Un ejemplo de realidad aumentada se muestra en la Figura 2.11. En esta figura se puede apreciar cómo un usuario coloca un dispositivo móvil en sus ojos a modo de lentes y el dispositivo, mediante una cámara, identifica el objeto que está en frente y procede a mostrar información referente a los planos de la máquina y demás información relevante para el mantenimiento o reparación de esta.



Figura 2.11. Ejemplo de realidad aumentada en tareas de mantenimiento

Fuente: blogs.cisco.com

En Industria 4.0, los usos de la realidad aumentada son diversos. Esta tecnología se puede utilizar para soportar el diseño de productos, apoyar las tareas de mantenimiento, reducir la curva de aprendizaje de nuevos trabajadores, e incluso guiar remotamente el mantenimiento de equipos, entre otros usos (Masoni, y otros, 2017). Lo anterior hace de la Realidad Aumentada una de las principales tecnologías de tipo disruptivo que integra Industria 4.0 (Gattullo, y otros, 2019).

Sistemas ciber-físicos

Debido al reto que supone integrar la realidad con la virtualidad, es necesario que una fábrica inteligente (*Smart Factory*) implemente un Sistema Ciber-Físico (CPS) que sirva como puente entre el mundo físico y el virtual (Bagheri, Yang, Kao, & Lee, 2015). Dicho sistema es conocido como *calm-system*, y se encuentra relacionado con los sistemas de fondo, también llamados

background systems, los cuales funcionan en segundo plano monitorizando constantemente el comportamiento del mundo exterior y los objetos que interactúan en este (Sung, 2018). Weiser & Brown (1995) describen la tecnología *calm-system* como "aquello que nos informa pero no demanda nuestra atención". Este tipo de sistemas están diseñados para captar la atención del usuario sólo cuando es necesario, de lo contrario, se mantienen en la zona periférica de atención del usuario sin distraerlo de sus tareas.

Los sistemas ciber-físicos están estrechamente relacionados con el concepto de *Machine As a Service*, el cual refiere a la utilización de máquinas no como reemplazo total de los seres humanos en las líneas de producción, sino como un recurso para hacer el trabajo de los humanos más seguro, confiable y eficiente. Esto, potencializa los beneficios que supone la integración de las ventajas mecánicas que brinda una máquina y la capacidad de razonamiento que poseen los seres humanos.

2.1.4. Hiperconectividad: integración vertical y horizontal

La visión de Industria 4.0 enfatiza en redes globales de máquinas en un entorno de fábrica inteligente capaz de intercambiar información y controlarse entre sí de forma autónoma (Zhong, Xu, Klotz, & Newman, 2017). Ante esto, se hace evidente que deban existir fuertes vínculos que permitan conectar máquinas, sistemas de información, personas, cadenas de suministros, e incluso ecosistemas empresariales alrededor del mundo (Sung, 2018) (Tjahjono, Esplugues, Ares, & Pelaez, 2017). Esta hiperconectividad propicia que se genere valor en los procesos a través de los datos (*data-driven businesses*) y se gane agilidad gracias a la descentralización de la toma de decisiones. Para lograr esto, Industria 4.0 demanda dos tipos de integración empresarial: la integración vertical y la integración horizontal.

La integración vertical hace referencia a la conexión que deben tener los sistemas TIC a través de todos los elementos de una misma organización con el fin de que la información existente esté disponible en todo momento para todas las partes relacionadas. Lo anterior, permite una descentralización de la información que, mediante una correcta integración de procesos, puede automatizar gran parte de las actividades de la organización (Zezulka, Marcon, Vesely, & Sajdl, 2016). Un ejemplo claro de ello es el de una empresa cuyo sistema de inventarios se basa en

dispositivos de radiofrecuencia que permiten saber en todo momento en dónde está cada pieza y en qué etapa del proceso productivo se encuentra. Esto, permite que el sistema de inventarios se vaya actualizando en tiempo real, alimentando a su vez un sistema ERP que informe al departamento de compras la cantidad de suministros a requerir y al departamento de ventas la producción estimada para determinado periodo según las proyecciones actuales, entre otros ejemplos. Esto, permite a la organización aumentar su productividad gracias a la automatización de tareas, pasando las tareas repetitivas a ser realizadas por máquinas y ordenadores, y las tareas que involucran profundo razonamiento, a ser realizadas por los seres humanos (Nasser, 2014) (Trstenjak & Cosic, 2017) (Benešová & Tupaa, 2017).

Por otra parte, la integración horizontal hace referencia a la interconexión y descentralización de la información a nivel de los eslabones de una cadena de suministros. En este tipo de integración, los elementos de una cadena de suministros comparten información con el objetivo de lograr la sinergia en los procesos de la cadena. Flujos de información vitales como las cantidades en inventario de determinado insumo de una empresa manufacturera y el sistema de producción del proveedor de dicho insumo, están conectados. Replicando este ejemplo hacia todos los eslabones de una cadena de suministro en diversos procesos, es posible concebir a toda la cadena como un único ente que funciona de manera sincronizada y sinérgica para el cumplimiento de sus objetivos. Esto, supone un cambio de paradigma en la industria tal como convencionalmente es concebida (Tjahjono, Esplugues, Ares, & Pelaez, 2017). La Figura 2.12 pretende esquematizar los conceptos de integración vistos en esta sección para un mejor entendimiento de estos.

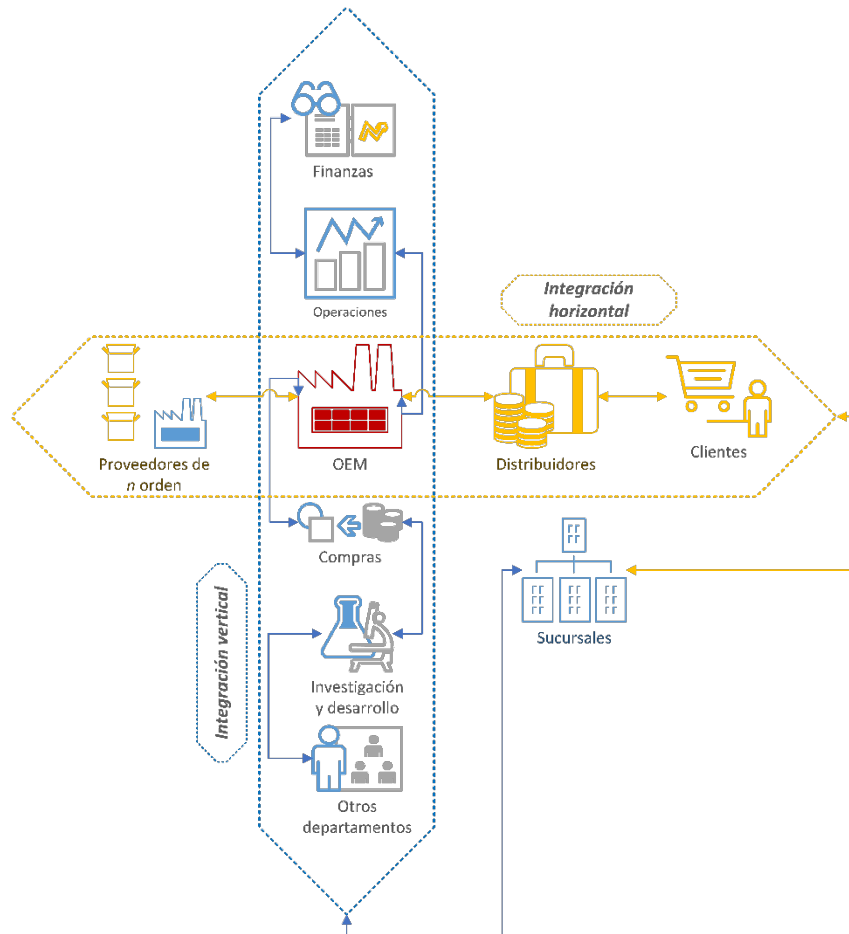


Figura 2.12. Integración vertical y horizontal en Industria 4.0

Fuente: elaboración propia.

2.1.5. Estado actual de Industria 4.0 en el mundo

Varios países se encuentran actualmente adelantando esfuerzos a nivel gubernamental para aumentar la competitividad de sus sectores industriales, enfocándose en temas digitales relacionados a Industria 4.0. Algunos de ellos son referentes mundiales de Industria 4.0, otros por el contrario, se encuentran realizando sus primeros esfuerzos. A continuación se mencionan los casos más relevantes encontrados, proporcionando además una breve descripción de cada estrategia gubernamental.

Alemania: el gobierno alemán, como se mencionó previamente, fue el pionero de Industria 4.0. Actualmente se encuentra implementado desde 2012 un proyecto gubernamental a gran escala

llamado *The New High Tech Strategy Innovations for Germany*. El nuevo plan de innovación tecnológica se basa en cinco pilares que buscan sustentar el liderazgo del país en términos innovación tecnológica. Estos pilares son: retos prioritarios para crear valor y mejorar la calidad de vida, creación y transferencia en red, paz de innovar en la industria, marco de referencia para una innovación amigable, y por último, transparencia y participación. Compañías alemanas como Siemens y Bosch ofrecen actualmente soluciones para organizaciones que están implementando Industria 4.0, estas soluciones suelen ser servicios de automatización, software y hardware orientados a la conectividad, servicios de computación en la nube, entre otros (BMBF, 2014).

Estados Unidos de América: en el año 2011 el entonces presidente Barack Obama anunció el programa *Advanced Manufacturing Partnership (AMP)* como parte de las recomendaciones hechas por el Consejo de Asesores en Ciencia y Tecnología (PCAST). A raíz de esto, la Red Nacional para la Innovación de la Manufactura (*Nationwide Network for Manufacturing Innovation - NNMI*) creó una asociación de carácter público-privado para promocionar el uso de tecnologías en la manufactura y brindar soporte a Pymes y Startups de tal manera que estas pudieran estar a la altura de los requerimientos de las grandes empresas. Así mismo, el actual presidente Donald Trump ha declarado mediante una orden ejecutiva a la Inteligencia Artificial como área foco de estímulos para el desarrollo y la regulación en los próximos años (Metz, 2019).

Canadá: el gobierno canadiense ha elaborado un proyecto llamado *Digital Canada 150 (DC-150)*, el cual consiste en 150 iniciativas soportadas en 5 pilares: conectividad, ciberseguridad, oportunidades económicas, gobierno digital, y contenido digital. Este proyecto cuenta con más de 200 millones de dólares destinados al apoyo de Pymes y Startups en la inclusión de tecnologías de la información y comunicación en los procesos productivos. Además, busca extender la cobertura de internet hacia zonas rurales del país, y mejorar la conectividad en los centros urbanos (ISED, 2015).

Unión Europea: las principales políticas relacionadas a Industria 4.0 en Europa son propuestas por la Comisión Europea en 2012 bajo el nombre *Reindustrializing Europe*, estas hacen alusión al potenciamiento de las Pymes como factor clave de éxito para la inclusión de Industria 4.0 en la industria europea. Dichas políticas poseen un horizonte de tiempo al 2020. Para su ejecución se

espera una inversión de 80 billones de euros entre 2014 y 2020. Uno de los principales objetivos es incrementar el valor agregado de los bienes de las compañías europeas en por lo menos un 20% durante el horizonte de tiempo definido (Klitou et al., 2017).

China: el gigante asiático ha establecido en 2015 un plan estratégico de gobierno llamado *Made in China 2025* (*中国制造2025*), el cual busca potenciar y actualizar la industria de China acorde a conceptos estrechamente relacionados con Industria 4.0 para 2025. Para 2035, China espera posicionarse entre las principales potencias mundiales de manufactura (MERICS, 2016). Actualmente China es el principal productor y exportador de bienes industriales en el mundo, lo cual lo coloca en una posición favorable para cumplir sus objetivos. No obstante, el gobierno de Estados Unidos decidió imponer en abril y mayo de 2018 aranceles de hasta el 25% a determinados productos importados de China como medida de contracción, haciendo alusión específicamente a productos de la iniciativa *Made in China 2025* (The White House, 2018). Esto ha provocado que las tensiones comerciales entre China y Estados Unidos vayan en aumento (Swanson, 2018).

República checa: en septiembre de 2015 fue creada una iniciativa gubernamental llamada *Průmysl 4.0*, la cual identifica y promueve las áreas de oportunidad del país en torno a Industria 4.0. Esto, teniendo en cuenta un amplio enfoque que abarca no solamente aspectos en su sector industrial, sino también cambios en los programas académicos, consideraciones legales, creación de ciudades inteligentes, y una amplia disposición de recursos para la ejecución de proyectos relacionados con Industria 4.0. La visión general de esta iniciativa se basa en los conceptos de integración horizontal, integración vertical y conectividad entre procesos (Mařík & Kol, 2015). Otras estrategias relacionadas con Industria 4.0 a nivel mundial son ilustradas en la Figura 2.13.

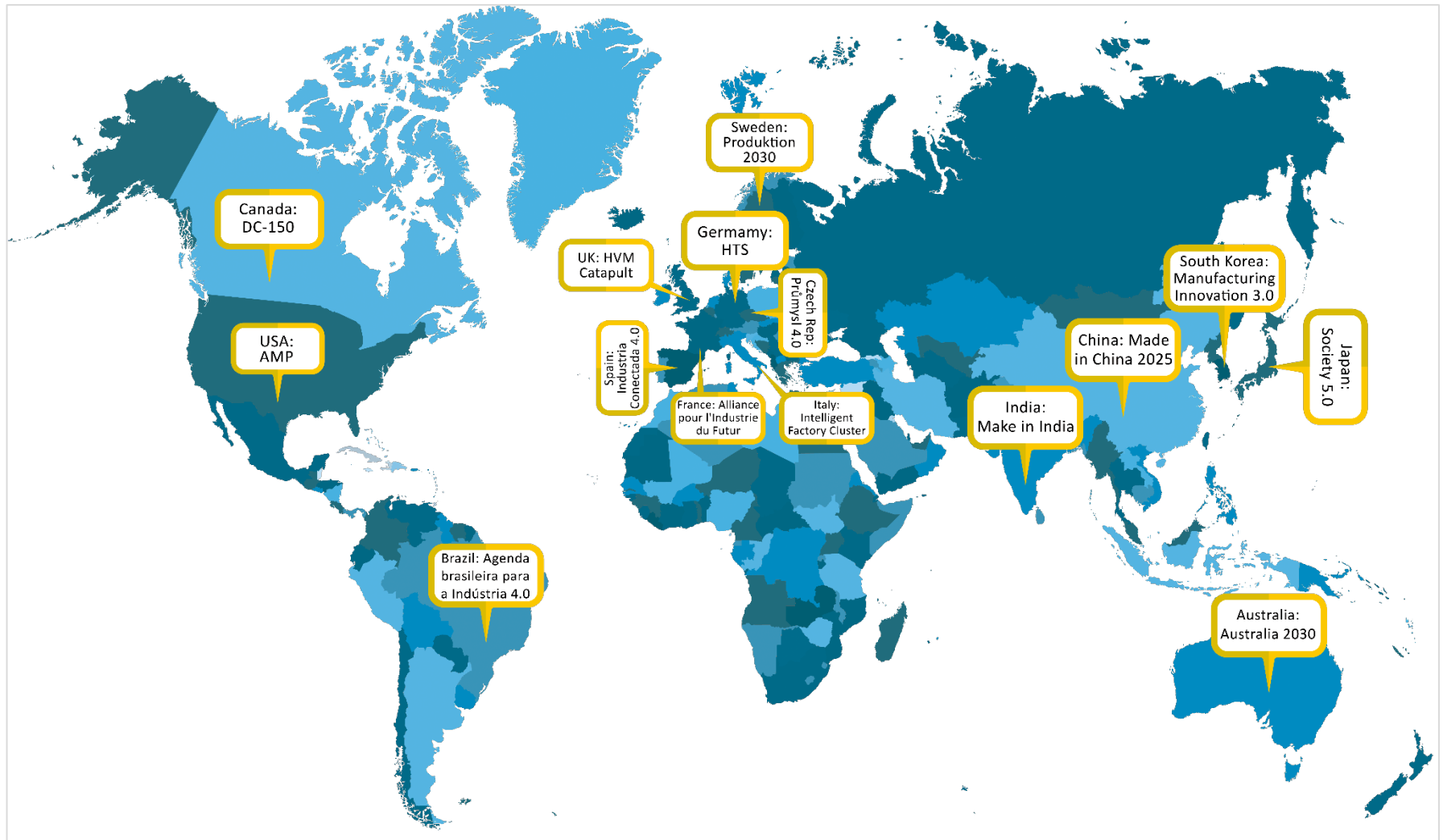


Figura 2.13. Estrategias gubernamentales de Industria 4.0 a nivel mundial

Fuente: elaboración propia.

Índices globales de competitividad

Actualmente, varias aplicaciones tecnológicas como optimización en tiempo real, rutas y máquinas flexibles, mantenimiento predictivo, realidad aumentada, control digital de la calidad, entre otras, han sido desarrolladas a un punto significativo de madurez (Sung, 2018). Sin embargo, de acuerdo con una encuesta llevada a cabo en USA, Japón y Alemania durante 2015 por la consultora McKinsey & Company, muchas organizaciones no son conscientes del potencial que ofrecen estas herramientas tecnológicas digitales. De una muestra compuesta por 300 empresas productoras, líderes en el campo industrial de cada país estudiado, sólo el 48% de estas se consideraron preparadas para Industria 4.0, mientras que el 76% de los proveedores de estas tecnologías manifestaron sí estarlo (McKinsey & Company, 2015).

Con el fin de tratar de bosquejar la competitividad que tienen los países estudiados en relación a Industria 4.0, la *Tabla 2.1*, muestra un ranking global en términos de competitividad con los 24 países que, con base a tres diferentes rankings de competitividad (UBS, 2016) (WEF, 2016) (IMD World Competitiveness Center, 2017), se encuentran mejor preparados para la llegada de Industria 4.0.

Tabla 2.1.

Índices de competitividad global frente a Industria 4.0

Posición	País	UBS ³	WEF ⁴	IMD ⁵	Promedio ⁶
1	Singapur	2	1	1	1,33
2	Finlandia	4	2	4	3,33
3	USA	5	5	3	4,33
4	Holanda	3	6	6	5,00
5	Suiza	1	7	8	5,33
6	Suecia	11	3	2	5,33
7	Noruega	8	4	10	7,33
8	Dinamarca	9	11	5	8,33

³ UBS: del acrónimo “Union Bank of Switzerland”, es una entidad suiza de servicios financieros.

⁴ WEF: del acrónimo “World Economic Forum”, es una fundación que reúne anualmente a diferentes líderes para analizar los principales problemas económicos que afronta el mundo.

⁵ IMD: del acrónimo “International Institute of Management Development”, es una de las más reconocidas escuelas de negocios a nivel internacional.

⁶ Menor es mejor.

Continuación de Tabla 2.1. Índices de competitividad global frente a Industria 4.0

Posición	País	UBS ³	WEF ⁴	IMD ⁵	Promedio ⁶
9	Reino Unido	7	8	11	8,67
10	Hong Kong	7	12	7	8,67
11	Canadá	15	14	9	12,67
12	Nueva Zelanda	10	17	14	13,67
13	Alemania	13	15	17	15,00
14	Taiwán	16	19	12	15,67
15	Japón	12	10	27	16,33
16	Australia	17	18	15	16,67
17	Austria	18	20	16	18,00
18	Israel	21	21	13	18,33
19	Corea	25	13	19	19,00
20	Irlanda	14	25	21	20,00
21	Bélgica	19	23	22	21,33
22	Francia	20	24	25	23,00
23	Malasia	22	31	24	25,67
24	Portugal	23	30	33	28,67

Fuente: Elaboración propia basada en Sung (2018).

Lo anterior, pone en manifiesto el estado actual de desarrollo industrial de los países que encabezan la lista. Así mismo, es una señal de alerta para que países latinoamericanos comiencen a invertir en sus sectores industriales de tal manera que, ante una creciente y constante globalización, las empresas latinoamericanas no sean absorbidas por grandes multinacionales.

2.1.6. Industria 4.0 vs Cuarta Revolución Industrial

En varios países el término cuarta revolución industrial ha tenido más acogida que el término Industria 4.0, soliendo considerarse como sinónimos. No obstante, existe una pequeña diferencia conceptual entre estos dos términos. Como se mencionó a principios de este documento, una revolución industrial implica una “transformación económica, social y tecnológica”. Dicha transformación debe sistemáticamente generar impactos en la sociedad civil y la estructura de los gobiernos; y no solamente impactos en términos de economía e industria (tecnología). Por lo tanto, si se habla de una nueva revolución industrial, el fenómeno que la origina debe impactar en cada una de las tres componentes de transformación anteriormente mencionadas.

En este orden de ideas, dado que el término Industria 4.0 impacta momentáneamente en el contexto tecnológico y económico y no en el social, es posible establecer una diferencia conceptual en términos del alcance que cada término posee (Sung, 2018). Sin embargo, cabe resaltar la relación de causalidad que existe entre ambos, ya que el origen y propagación de Industria 4.0 puede ser el detonante clave hacia la cuarta revolución industrial, lo cual es actualmente una realidad en crecimiento debido al creciente interés que despierta Industria 4.0 en diversos sectores de la sociedad incluyendo el sector educativo, en el cual se espera que en los próximos años instituciones de educación de todo el mundo adapten su oferta académica acorde a las necesidades que tendrán los profesionales del futuro.

2.1.7. Impactos en la industria actual

Según Löffler & Tschiesner (2013), el principio básico de Industria 4.0 es que, mediante la conexión de máquinas, flujos de trabajo y sistemas, las compañías puedan implementar redes inteligentes a lo largo de la cadena de suministro para interactuar dinámicamente, de manera que exista una sinergia entre los eslabones que la componen. Bajo este nuevo enfoque, se busca que las máquinas puedan tomar decisiones descentralizadas e incluso reorganizar sus flujos de trabajo en función de las necesidades del día a día, esto pone en manifiesto varios de los principios de diseño anteriormente mencionados (Tjahjono, Esplugues, Ares, & Pelaez, 2017). Sin embargo, también pone en manifiesto que la complejidad de las operaciones internas, y de la manera como se conciben los flujos de información en la cadena de suministro, crecerá en gran medida (Sung, 2018).

Debido lo anterior, Industria 4.0 demanda el resquebrajamiento de las fronteras que limitan a los eslabones de la cadena de suministro, e incluso aquellas que limitan a las compañías con sus extensiones o filiales en otras zonas geográficas. El cambio hacia este nuevo tipo de industrias implicará una serie de retos para las empresas actuales, entre los cuales se destacan según Sung (2018), Pereira & Romero (2017), y Benešovaa & Tupaa (2017) los siguientes:

- Enfoque de producción en masa a personalización en masa.
- Conectar sistemas productivos con cadenas de suministro.

- Modelos de negocio orientados hacia la conectividad.
- Sistemas de seguridad informática que permitan resguardar información valiosa.
- Protección de la propiedad intelectual.
- Confiabilidad y estabilidad en las relaciones máquina-máquina y humano-máquina.
- Poca latencia del sistema con la finalidad de lograr una sincronización efectiva.
- Tecnologías de optimización en tiempo real que contemplen los costos que implican las decisiones autónomas del sistema.
- Aumento en la complejidad de sistemas interconectados debido a posibles conflictos de intereses.
- La pérdida de empleos, especialmente en trabajadores pertenecientes a los sectores menos educados de la sociedad.
- Creación de un gran número de empleos relacionados con las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC).
- Cambios en las habilidades requeridas por los trabajadores.

Por otra parte, de acuerdo con un estudio llevado a cabo por Rüßmann et al. (2015) las posibilidades de reducción de costos con Industria 4.0 se estiman hasta de un 30% en lo referente a costos de mano de obra, costos operativos y demás gastos generales de producción en un lapso de cinco a diez años. Así mismo, gracias al nivel de conectividad y automatización de una fábrica inteligente, los procesos de logística para la principal empresa manufacturera de una cadena de suministro pueden ser reducidos hasta en un 50%. Así mismo, se podrán reducir los tiempos de ciclo hasta en un 30% dependiendo del tipo de actividades que realice la compañía. Sin embargo, los costos por depreciación pueden aumentar hasta e un 40%.

Comparando Industria 4.0, como cuarta revolución industrial, con otras revoluciones industriales en términos de costos, se puede observar que esta nueva revolución tendrá un impacto

relativamente bajo debido a que las máquinas actuales no necesitarían ser del todo reemplazadas. Según el estudio realizado por la consultora McKinsey (2015), sólo del 40% al 50% de la actual infraestructura industrial deberá ser reemplazada. Una comparación de esta información con relación al porcentaje de reemplazo de máquinas de pasadas revoluciones industriales es presentada en la Figura 2.14:

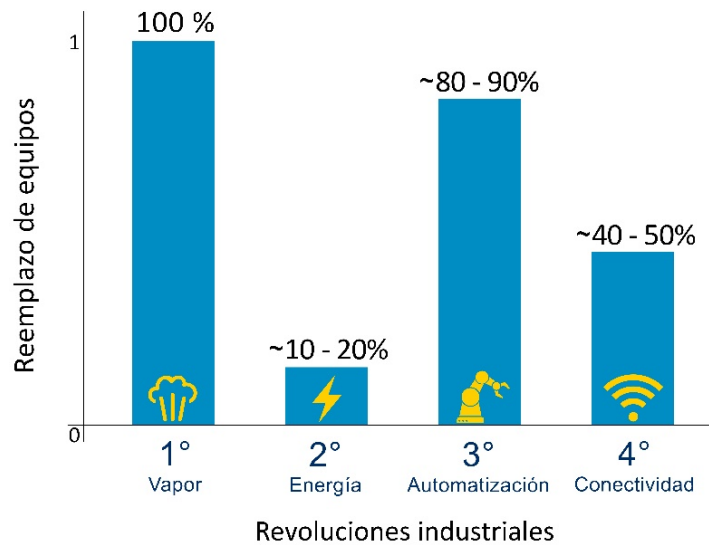


Figura 2.14. Reemplazo de equipos a lo largo de las diferentes revoluciones industriales

Fuente: elaboración propia con datos de McKinsey & Company (2015)

De lo anterior figura se puede inferir que Industria 4.0 no se trata de reemplazar activos, sino de afrontar los retos gerenciales que suponen las tecnologías disruptivas a través de las tres siguientes dimensiones (McKinsey & Company, 2015):

1. Nuevo horizonte de efectividad operacional.
2. Nuevos modelos comerciales.
3. Transformación digital de la empresa.

2.2. Modelos de evaluación de madurez

2.2.1. Descripción

Los modelos de evaluación de madurez son esquemas de medición que valoran el grado de inclusión o desarrollo que posee determinada filosofía dentro de los procesos de una organización, a través de una escala compuesta por diferentes categorías basadas en “niveles de madurez”. El término “madurez” refiere al grado de desarrollo, perfeccionamiento u optimización que posee determinado proceso dentro de una organización. A mayor nivel de madurez, se considera que el proceso se encuentra más cerca de alcanzar su estado óptimo; a menor nivel de madurez, se considera que el proceso se encuentra en una fase inicial o punto de partida (Chrissis, 2012). Los modelos de evaluación de madurez se derivan de los Modelos de Madurez también llamados Modelos de Madurez de Capacidades por su equivalencia en inglés *Capability Maturity Models (CMM)*, de los cuales adoptan una estructura que comprende los siguientes elementos (Gökalp, Sener, & Eren, 2017):

Áreas Clave de Proceso (ACP): del inglés *Key Process Areas*, son áreas de la organización que recopilan un conjunto importante de procesos o actividades que, cuando son ejecutadas de manera sincrónica, permiten alcanzar un conjunto de metas u objetivos considerados importantes dentro de la organización. A estas áreas clave de proceso se les conoce de igual forma en la literatura bajo el nombre de “**dimensiones de madurez**” o “*maturity dimensions*”.

Prácticas clave: del inglés *Key Practices*, son los principales elementos que contribuyen al correcto desarrollo de un área clave de proceso. Dicho de otra manera, son cada uno de los elementos que, de poseer un buen desempeño, darán cuenta del buen estado de un área clave de proceso. Para cada Área Clave de Proceso se define un conjunto de Prácticas clave, las cuales deben ser definidas, medibles y verificables. A las Prácticas clave se les conoce comúnmente bajo el nombre de “**elementos de madurez**” o “*maturity items*”.

Niveles de madurez: es la escala de medición que emplean los modelos de evaluación de madurez para situar la madurez de un proceso dentro de una escala numérica del 0 al 5. En la Figura 2.15 se

muestran los diferentes niveles de madurez a contemplar, así como una breve descripción de cada uno de ellos.



Figura 2.15. Niveles de madurez de CMMI v2.0

Fuente: elaboración propia con datos de CMMI Institute.

En el nivel de madurez 0 se puede apreciar el término “**ad hoc**”, el cual es una locución latina que significa “*para esto*” o “*para este propósito*” (Real Academia Española, 2014). En el contexto de la presente investigación, se refiere a actividades o procesos creados exclusivamente para un fin determinado, que son incapaces de estructurarse o interconectarse con otros procesos o áreas clave de negocio tal que, entre estos, puedan intercambiar materiales o información.

Objetivos: son los niveles de madurez que una organización desea tener en cada una de sus Áreas Clave de Proceso. Los objetivos deben estar acorde con las necesidades reales de la compañía y sus aspiraciones en el corto, mediano o largo plazo. Estos, servirán posteriormente para planificar cómo pasar de un estado actual de madurez a un estado deseado de madurez.

Características comunes: son propiedades que indican si la implementación y apropiación de un determinado proceso es efectiva, repetible y duradera a través del tiempo en toda la organización. Estas son: compromiso de realización, capacidad de realización, número de actividades planificadas y realizadas, mediciones y análisis, y verificación de la implementación. Estas características deben ser tenidas en cuenta en la planificación para migrar de un estado actual a un estado deseado.

Cuestionario: es el método de recolección de la información que permite obtener la información necesaria para valorar cada uno de los elementos de madurez o prácticas clave. La evaluación de los elementos de madurez dará, por medio de ponderaciones, valoración a cada una de las dimensiones de madurez o Áreas Clave de Proceso. Esta actividad puede ser realizada por uno o varios auditores internos o externos.

Teniendo en cuenta lo anterior, se propone en la Figura 2.16 una representación esquemática de la estructura de un modelo de evaluación de madurez con las interrelaciones presentes entre cada uno de los elementos que lo componen. Esto, tomando como referencia la estructura básica propuesta por el *CMMI Institute*, en donde se pretende evaluar el grado de madurez que posee una organización en torno a Industria 4.0 a través de sus principales Áreas Clave de Proceso y Prácticas clave. Para la presente investigación se propondrá un modelo que posee un componente adicional, el cual es “Subdimensiones de madurez”, esto se verá posteriormente en la sección 2.3 (*Estado del arte*).

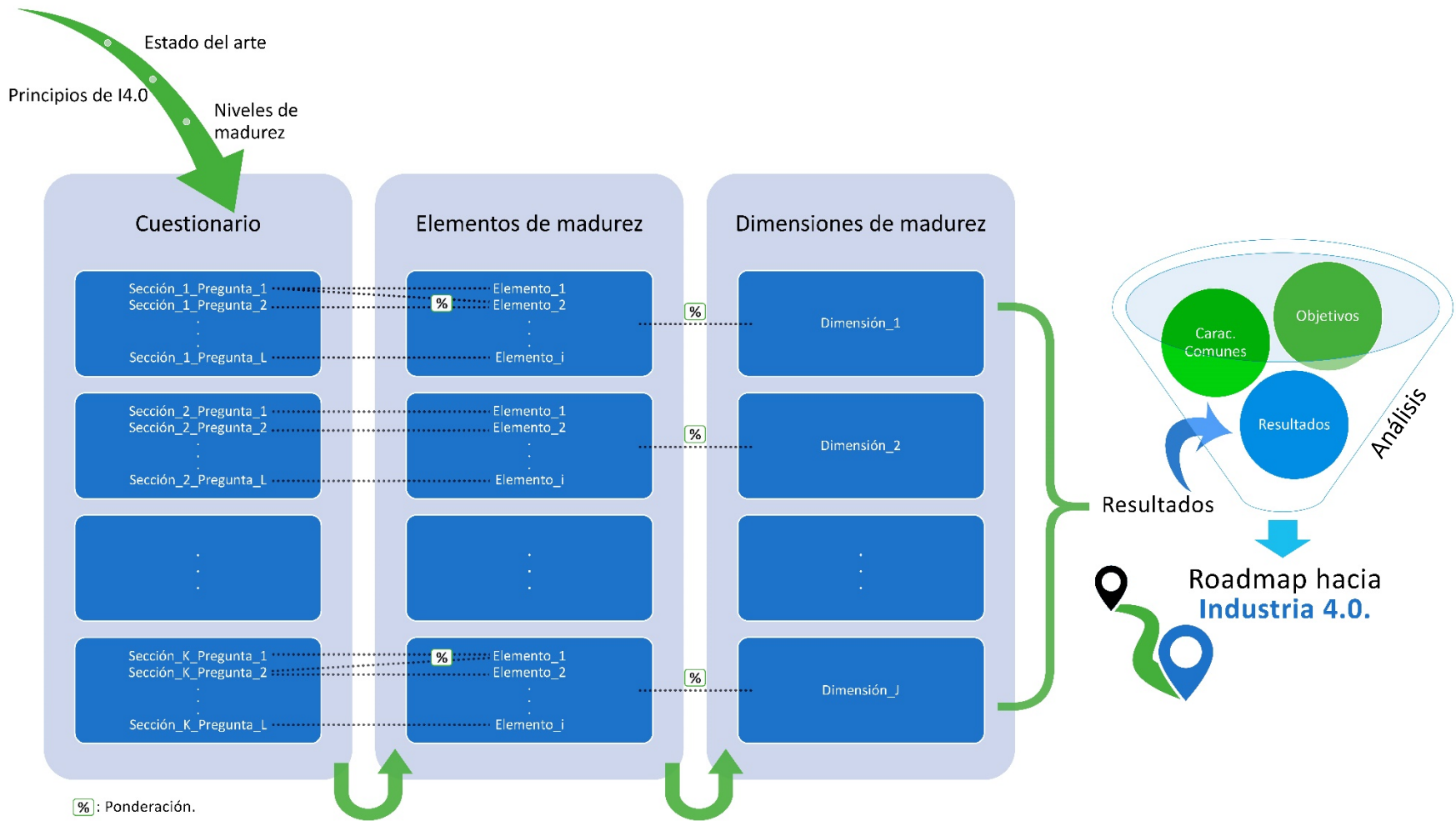


Figura 2.16. Forma básica de modelo de evaluación de madurez de Industria 4.0.

Fuente: elaboración propia.

2.2.2. Historia de los modelos de evaluación de madurez

Los modelos de evaluación de madurez son una de las últimas ramificaciones de los modelos de madurez de capacidades CMM (*Capability Maturity Models*). Para entender como se ha llegado hasta el modelo a utilizar en la presente investigación, se realiza un breve recuento histórico de los principales sucesos que explican cómo se ha llegado de los modelos CMM a los modelos de evaluación de madurez.

Inicialmente, el Software Engineering Institute⁷ (SEI) creó el primer modelo CMM en el año 1991. Este modelo fue concebido para evaluar la madurez de las organizaciones de desarrollo de software y constaba de 5 niveles de madurez, su última versión fue la v1.1 la cual fue terminada en enero de 1993. En 1995, el SEI publicó el modelo en un libro llamado “*The Capability Maturity Model: Guidelines for improvement the Software Process*”, cimentando así, los principios de los modelos CMM (Paulk, 1995).

Entre los años 1997 y 2001, el SEI ya había creado variantes del CMM v1.1 orientadas al desarrollo de software y al de productos: SW-CMM (*Capability Maturity Model for Software*) e IPD-CMM (*Integrated Product Development Capability Maturity Model*) respectivamente. Posteriormente en el año 2002, integró los modelos anteriormente mencionados junto con el modelo SECM (*Systems Engineering Capability Model*) en un único modelo llamado CMMI (*Capability Maturity Model Integration*). Esta integración se dio debido a la problemática que suponía tener múltiples modelos de madurez en el mercado para tareas muy específicas que podían ser integradas en un único modelo, a este último modelo se le versionó como CMMI v1.1 (SEI, 2010).

En el año 2010, fue cuando ocurrió el primer gran salto del modelo CMMI: el CMMI v1.3. En esta nueva versión se redefinen de mejor manera los niveles de madurez y la manera en cómo se representan los resultados. Así mismo, se brinda un mayor soporte a las empresas de desarrollo de software para aumentar su productividad y disminuir sus costos. Además, los resultados de los procesos de evaluación de madurez de cada empresa pueden ser publicados en línea a petición de

⁷ El SEI es uno de los centros de investigación más destacados a nivel mundial en términos de ciencias de la computación y robótica, es financiado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos y gestionado en gran medida por la Carnegie Mellon University.

la empresa evaluada. En enero de 2013, toda la suite de productos CMMI del SEI fue adquirida por el *CMMI Institute*, una subsidiaria de la Asociación de Auditoría y Control de Sistemas de Información (ISACA) (Chrissis, 2012) (Stefan, Thom, Dominik, Dieter, & Bernd, 2018).

A partir de la versión 1.3 del CMMI, se derivan los modelos de evaluación de madurez. Estos últimos adoptan todos los elementos que involucra la etapa de evaluación de procesos a través de las diferentes Áreas Clave de Proceso y Prácticas clave de una organización. Adoptan igualmente los niveles de madurez y las técnicas empleadas para la medición y análisis de resultados, dejando a un lado lo referente a las etapas que prosiguen al análisis de los resultados. Esto, debido a que los modelos CMMI se enfocan en el área del desarrollo de software o en procesos organizacionales convencionales, mientras que los modelos de evaluación de madurez intentan ser más flexibles al pretender evaluar la inclusión de determinadas filosofías dentro de una organización y crear métodos propios para pasar de un estado actual a un estado deseado. Esto, hace que puedan ser aplicables a un gran número de usos que involucren la evaluación de procesos organizacionales con relación a filosofías como Industria 4.0, manufactura esbelta, cero defectos, entre otras (Gökalp, Sener, & Eren, 2017).

La última actualización del modelo CMMI se dio en abril de 2018 bajo el versionado de CMII v2.0. En esta nueva versión se incluyen 6 niveles de madurez (comenzado por 0 y terminando en 5), un conjunto de buenas prácticas para las empresas, capacidad de adopción acelerada, capacitaciones, guías, y técnicas de benchmarking para mejorar la competitividad de las organizaciones (CMMI Institute, 2018). Al incluir esta versión cambios sustanciales en la fase de evaluación como son la inclusión de 6 niveles de evaluación de madurez, se decide acoger la versión 2.0 para desarrollar el modelo de evaluación de madurez de la presente investigación. La Figura 2.17 representa las principales evoluciones de los modelos CMM a CMMI y a partir de qué punto se derivan los modelos de evaluación de madurez.

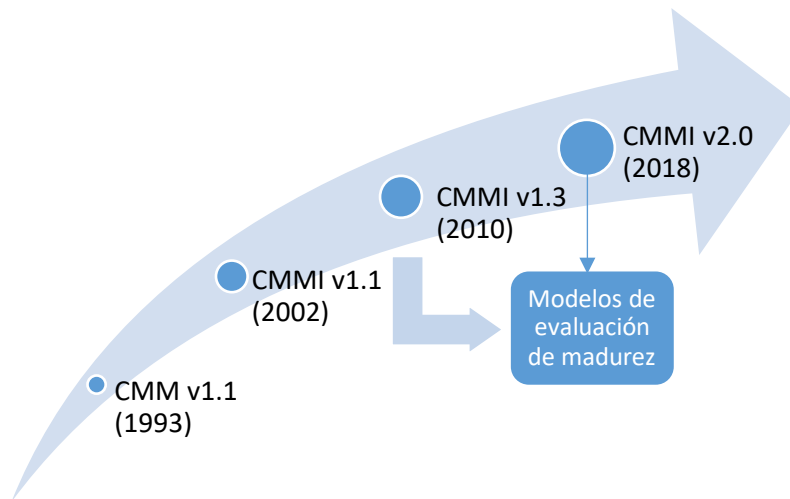


Figura 2.17. Principales evoluciones de los modelos CMM

Fuente: elaboración propia.

2.2.3. Criterios de calificación

Los siguientes criterios de clasificación, como se explicó previamente, son adoptados del modelo CMMI v2.0. Otra de las razones por las que decidió acoger un sistema de evaluación con una escala de medición del 0 al 5 (CMMI v2.0) en vez de uno con escala del 1 al 5 (CMMI v1.3) es debido a que con la existencia de un nivel de madurez 0 es posible clasificar correctamente los procesos que en una organización posean un grado de inclusión nulo de Industria 4.0. Bajo el antiguo esquema del CMMI v1.3, los procesos aunque no tuvieran ningún grado de inclusión partían como mínimo de un nivel de madurez 1 (CMMI Institute, 2018). Teniendo en cuenta lo anterior, se provee a continuación una explicación más detallada de los criterios que se deben tener en cuenta a la hora de definir un nivel de madurez tomando en consideración los niveles de madurez establecidos en la Figura 2.15.

- **Nivel de madurez 0 (incompleto):** en este nivel de madurez se sitúan los procesos cuyo grado de madurez, con respecto a determinado punto de referencia o filosofía organizacional, es nulo. Se observa que las actividades realizadas son de tipo *ad hoc* y que se vienen realizando de manera convencional con poca disposición al cambio. Se le denomina incompleto debido a que los esfuerzos por incluir determinada filosofía en el área clave de proceso pueden ser nulos o bien estar implementados parcialmente a un punto en

el cual no se ha logrado implementar ninguna actividad de manera completa. De igual manera, se observa que la filosofía objeto de valoración no está incluida en la estrategia de la organización ni en los estándares de procesos.

- **Nivel de madurez 1 (inicial):** en este nivel de madurez se comienzan a implementar actividades de inclusión de determinada filosofía con acciones llevadas a cabo de manera completa, aunque pueden no estar ligadas a la estrategia organizacional. Las actividades que se realizan poseen una frecuencia no definida y no son medidas, controladas y/o mejoradas (enfoque de proyectos). Así mismo, se observa que el éxito de la implementación de determinadas actividades corresponde más a un gran esfuerzo colectivo del equipo de trabajo que a un correcto diseño y estandarización del proceso. Los procesos con nivel de madurez 1 se caracterizan por la tendencia de comprometerse con objetivos demasiado ambiciosos, abandonarlos en tiempos de crisis, depender en exceso de las correctas reacciones del equipo de trabajo, y por la incapacidad de replicar los buenos resultados obtenidos en determinado periodo (impredecibilidad y reactividad).
- **Nivel de madurez 2 (gestionado):** los esfuerzos por integrar determinada filosofía dentro de los procesos ya pasan a tener un enfoque de proyectos. Es decir, son planificados, medidos, controlados y mejorados. El equipo de trabajo comienza a tener ciertos conocimientos sobre las buenas prácticas de la filosofía y se comienzan a producir resultados controlados y replicables. En este nivel de madurez las prácticas llevadas a cabo para incluir determinada filosofía se mantienen aún en tiempos de crisis. De igual manera, la planificación de las acciones y la manera en cómo estas se deben ejecutar, medir y mejorar, se encuentra debidamente documentada.
- **Nivel de madurez 3 (definido):** en un nivel de madurez 3 la inclusión de determinada filosofía en un proceso se encuentra correctamente caracterizada y comprendida por todo el equipo de trabajo. En este nivel, la filosofía que se pretende implementar se encuentra incluida dentro de los lineamientos institucionales que rigen la misión, visión y políticas de la empresa. Una de las principales diferencias con el nivel de madurez 2, es que en este nivel el direccionamiento estratégico de la organización pasa a tener un papel fundamental

en el logro de los objetivos y la concientización de la importancia de la inclusión de determinada filosofía a través de todas las diferentes áreas clave de proceso que integran la compañía. De ahí que este nivel de madurez se le denomine como “definido”, ya que hace alusión a la definición de objetivos claros no solamente para el equipo de trabajo de un área clave de proceso, sino para toda una organización.

- **Nivel de madurez 4 (gestionado cuantitativamente):** en este nivel de madurez se establecen objetivos cuantitativos en términos de la calidad y eficiencia del proceso. Estos objetivos son utilizados como criterios para medir, controlar y mejorar dichos procesos y deben estar basados en las necesidades de los clientes internos del proceso. Así como también, de las partes interesadas o *stakeholders* de la compañía. De igual manera, se identifican las fuentes de variación en los procesos y se ponen en marcha planes para controlarlas. La principal diferencia de este nivel de madurez con respecto a su antecesor es que el rendimiento de los procesos es medido y controlado utilizando técnicas estadísticas que permiten describir y predecir el comportamiento futuro del proceso; mientras que en el nivel de madurez 3 los procesos son normalmente predecibles bajo un enfoque cualitativo.
- **Nivel de madurez 5 (en optimización):** en este último nivel de madurez la inclusión de determinada filosofía dentro de la organización ha llegado a su más alto grado de inserción. En este nivel la organización es capaz de mejorar continuamente los procesos referentes a la inclusión de dicha filosofía, así como también, de estar a la vanguardia de las últimas tendencias y vertientes de dicha filosofía gracias a una estructura organizacional abierta al cambio y que genera espacios para la innovación, la investigación y el desarrollo. Los objetivos trazados se verifican constantemente y el cumplimiento de estos se refleja en los objetivos de negocio. Una de las principales diferencias con el anterior nivel de madurez es que el nivel 4 se enfoca en el control estadístico, predictibilidad de los procesos, y en el control de las variaciones asociadas. No obstante, los procesos pueden producir resultados predecibles sin que esto se traduzca necesariamente en el alcance de los objetivos establecidos por la compañía. Por ello, el nivel de madurez 5 contempla, además, que los

resultados obtenidos representen un cumplimiento verificable de los objetivos de negocio que, a su vez, se deben transformar en beneficios tangibles para la compañía.

2.2.4. Hojas de ruta (*roadmaps*)

Hoja de ruta es la traducción aceptada y popularizada a partir del siglo XXI del término inglés *roadmap*, el cual hace alusión a un documento que contiene la planificación en el corto, mediano y largo plazo para alcanzar una visión o conjunto de objetivos organizacionales establecidos (Cambridge University Press, 2018). Se le denomina hoja de ruta debido a la analogía existente entre “hoja” y “documento”, y “ruta” con “planificación” o “camino a seguir”. Debido a esto, es posible inferir que las hojas de ruta muestran la planificación desde un punto de origen (estado actual), hasta un punto de destino (estado deseado), en donde la ruta que se sigue para llegar desde el punto de origen al punto destino son todas las acciones que la compañía considera que debe implementar para llegar al estado deseado. En el caso de los modelos de evaluación de madurez, las hojas de ruta se utilizan como una herramienta para planificar cómo migrar de un nivel de madurez actual, a un nivel de madurez deseado. No se debe confundir esta adaptación con la definición oficial aceptada por la Real Academia Española, la cual es: “*documento en el que constan las instrucciones e incidencias de un viaje o transporte de personas o mercancías*” (Real Academia Española, 2014).

La hoja de ruta debe ser única para cada organización. Esto, debido a que cada organización posee condiciones y recursos diferentes que la hacen única. Generalizar una hoja de ruta a múltiples casos es un error común en empresas que desean copiar casos exitosos de otras organizaciones siguiendo un método que fue diseñado exclusivamente para una organización en un entorno específico (Akdeniz, 2015) (Mittal, Khan, Romero, & Wuest, 2018). No obstante, existen características comunes que son transversales a todas las hojas de ruta y que se deben cumplir para contribuir a una adecuada planificación en las organizaciones. Estas características según Sloan (2014) son:

- **Tener una meta bien definida:** se debe saber con exactitud qué se desea. Esto debe ser plasmado por escrito con el mayor nivel de detalle posible. Así, se le facilitará al equipo de

planeación definir sus objetivos, alcances, y delimitaciones. Los objetivos deben ser claros, concisos, medibles y cuantificables.

- **Ser flexible:** en la actualidad se tienen variables de entorno que cambian a ritmos inesperados. Es por esto, que las hojas de ruta deben ser capaces de adaptarse a los cambios y permitir hacer reajustes fácilmente con el fin de aprovechar nuevas oportunidades o encarar adversidades inesperadas que se puedan presentar en el transcurso de su ejecución. Lo anterior se debe poder cumplir sin que ello suponga una distracción o desviación de la meta principal de la organización.
- **Se define con claridad la ruta a seguir:** una buena hoja de ruta debe incluir lo más detalladamente posible el conjunto de estrategias y actividades a seguir de manera agregada (por conjunto de actividades) y desagregada (las actividades de cada conjunto de actividades) de manera lógica y fácil de seguir. Asignando además, los respectivos responsables a cada actividad. Las actividades deben tener una fecha de inicio y una fecha máxima de finalización. Se debe especificar el orden en el que las actividades deben ser ejecutadas y cuáles se encuentran supeditadas a otras.
- **Es realista y creativa:** refiere a la práctica de definir objetivos alcanzables y ajustados a las condiciones de la compañía, sin que ello suponga la definición de objetivos que no generen retos para la organización. Así mismo, la hoja de ruta debe poder ser capaz de alcanzar la principal meta establecida, sin que ello suponga que debe ser el máximo resultado a conseguir. Esta puede extralimitarse al alcanzar resultados más allá de los establecidos.

Cabe aclarar que las hojas de ruta, como herramienta para planificar cómo implementar Industria 4.0, se emplean después de la fase de diagnóstico o evaluación de madurez. Esto, para contar primero con resultados claros que permitan a la organización conocer su estado actual (punto de origen) y luego encaminar esfuerzos para llegar a un estado deseado (punto de destino) (Issa, Hatiboglu, Bildstein, & Bauernhansl, 2018). La anterior es una actividad que está por fuera de los alcances de la presente investigación. Se presenta a continuación en la Figura 2.18 una

representación visual de una hoja de ruta o *roadmap* en donde se puede apreciar como “inicio” el punto de origen o estado actual y como “llegada” el punto de destino o estado deseado.



Figura 2.18. Representación visual de una hoja de ruta
Fuente: elaboración propia.

2.3. Estado del arte

Con el fin de comprender los modelos de evaluación de madurez de Industria 4.0 desarrollados hasta la fecha, y los métodos utilizados para su diseño y aplicación, fue llevada a cabo una exhaustiva revisión bibliográfica utilizando importantes bases de datos científicas tales como Science Direct (Elsevier), Springer, ISI Web of Knowledge, y Google Scholar. Fueron consultados artículos de revistas, artículos de conferencias, libros, capítulos de libro, e informes de entidades que estudian temas relacionados a Industria 4.0 desde el periodo de 2011 hasta 2019. Las búsquedas

en estas bases de datos fueron realizadas en los idiomas inglés, español, portugués y alemán. Las siguientes palabras clave fueron utilizadas: *Industry 4.0, Maturity Model, Assessment, Readiness, Tool, Migration, Transformation, Transition, Implementation, Guideline, Smart Factory, Digital, Industria 4.0, Modelo, Madurez, Evaluación, Migración, Transición, Transformación, Indústria 4.0, Avaliação, Maturidade, Transição, Implementação, Industrie 4.0, Reifegradmodell, Digitale.*

Los objetivos de esta actividad consistieron en (1) identificar los estudios principales acerca de modelos de evaluación de madurez de Industria 4.0, (2) caracterizar cada estudio con el fin de analizar su diseño, método de aplicación, y manera de mostrar resultados, y finalmente (3) exponer las principales evoluciones y cambios que han tenido los modelos de evaluación de madurez de Industria 4.0 a lo largo del periodo mencionado. En todo el periodo estudiando se encontraron 18 trabajos directamente relacionados con el tema de investigación. Estos correspondieron a artículos, capítulos de libros e informes de entidades relacionadas con Industria 4.0. La Figura 2.19 muestra cada uno de los trabajos encontrados en orden cronológico descendente para el periodo estudiado.

INDUSTRY 4.0 MATURITY MODELS



Figura 2.19. Línea de tiempo de modelos de evaluación de madurez de Industria 4.0 desarrollados desde 2011 hasta 2019

Fuente: elaboración propia.

A continuación se detallan los trabajos más relevantes de la bibliografía encontrada sobre modelos de evaluación de madurez de Industria 4.0. Esto, teniendo en cuenta el grado de detalle que posee cada modelo, las explicaciones que brinda, y el soporte teórico y práctico que posee (*background*). Así mismo, se contemplan trabajos como el de Bildstein & Seidelmann (2014) que, aunque no provean un modelo de evaluación de madurez para Industria 4.0, plantean métodos de suma relevancia que sientan las bases para un correcto diagnóstico e implementación de Industria 4.0.

Inicialmente, **Bildstein & Seidelmann** (2014) proponen un método para migrar hacia la *Smart Factory* de la Industria 4.0. Este método consiste en, primero, identificar, registrar y analizar los procesos clave que una organización debe considerar para la migración hacia Industria 4.0. Segundo, identificar el estado actual de la empresa con relación a Industria 4.0 y reconocer las debilidades y fortalezas que pueda tener la organización. Finalmente, como tercer paso se propone a la empresa crear diferentes escenarios de migración con el fin de visionar el impacto que tienen diferentes posibles acciones en el cumplimiento del objetivo principal que es llegar a un estado deseado de Industria 4.0. Los autores proponen que en cada posible escenario se contemplen los conceptos de “Integración vertical y horizontal”, “Conexión en red en tiempo real” y “Servicios en la nube”. Adicionalmente, se sugiere a las Pymes que deseen migrar hacia la *Smart Factory* de la Industria 4.0 que opten por soluciones ERP basadas en la nube en vez de soluciones ERP basadas en bases de datos locales. Cabe resaltar que los autores describen un método de manera general, sin tener en cuenta un modelo de evaluación de madurez que permita conocer de manera cuantitativa el estado actual de Industria 4.0 en la empresa. Sin embargo, en la fase número 2 de su método, se propone la evaluación de madurez como herramienta de diagnóstico para coadyuvar a la planificación.

En el mismo año, la compañía estadounidense **Rockwell Automation** (2014) propone el primer modelo de evaluación de madurez para Industria 4.0 el cual consta de tres dimensiones: infraestructura de la información, controles y dispositivos, y políticas de seguridad. Las dimensiones de madurez contempladas en el modelo así como los elementos de madurez presentes en cada una de ellas son mostradas en la *Tabla 2.2*.

Tabla 2.2.

Dimensiones y elementos de madurez propuestos por Rockwell Automation

DIMENSION	ITEMS
Information infrastructure	Hardware Software
Controls and devices	Sensors, actuators, motor controls, switches, any device that feed Data.
Security policies	Understanding Organization Enforcement

Fuente: elaboración propia basada en Rockwell Automation (2014)

La compañía autora no brinda información detallada acerca del modelo de evaluación de madurez. Sin embargo, propone un método de cinco fases para la migración hacia la *Smart Factory* de la Industria 4.0. Estas etapas son:

1. **Evaluación:** hace referencia a inclusión de un modelo de evaluación de madurez como primera etapa para el proceso de transición. Este modelo debe evaluar objetivamente los procesos críticos de la empresa. El método de evaluación propuesto es basado en un cuestionario.
2. **Redes y controles seguros y actualizados:** en esta etapa se propone crear talleres de trabajo en donde equipos multidisciplinarios, con base a los resultados obtenidos en la primera fase, traten de bosquejar el estado futuro deseado de la compañía en términos de Industria 4.0. El objetivo de esta fase es priorizar proyectos en función del beneficio que puedan generar para la compañía.
3. **Capital de datos de trabajo definido y organizado:** en esta etapa se identifican y priorizan las áreas de negocio, procesos y dispositivos que puedan producir datos capaces de generar valor agregado para la compañía. Lo anterior, con el objetivo de producir datos que puedan ser transformados en beneficios reales para la compañía. De lo contrario, una compañía

puede pasar de tener faltantes de datos a tener datos en exceso sin que ello repercuta de una u otra manera a la productividad de la compañía.

4. **Analítica:** en esta cuarta etapa el enfoque pasa de estar en la infraestructura tecnológica a estar en la mejora continua. Esta etapa consiste en transformar los grandes volúmenes de datos generados en la fase anterior en “conocimiento” que permita generar ventajas competitivas para la organización (*Big Data & Analytics*). La compañía autora advierte que se puede producir resistencia al cambio dentro del personal de la organización al pasar de una manera de operar tipo *ad hoc* a una manera de operar basada en tecnologías disruptivas. Ante esto, los líderes de la organización deben asumir el reto que este cambio de paradigma supone en todas las áreas organizacionales.
5. **Colaboración:** en esta última etapa se propone crear un ambiente de colaboración entre todos los eslabones de la cadena de suministros, de tal manera que estos se puedan comportar como socios en vez del tradicional esquema de compra y venta. Se propone que en las relaciones de proveedor se compartan recursos y esfuerzos para producir propiedad intelectual, innovaciones, ahorro de costos, etc.

Posteriormente en 2015, **IMPULS**, fundación perteneciente a la Asociación Alemana de Ingeniería Mecánica (VDMA), creó uno de los modelos de evaluación de madurez más relevantes hasta la fecha. El modelo de IMPULS (2015) contempla 6 niveles de madurez que van desde 0 hasta 5. Así mismo, contempla 6 dimensiones de madurez, 18 elementos de madurez, y 3 categorías en las cuales se pueden encajar los resultados del modelo de evaluación de madurez. A estas categorías se les denomina como “categorías de encaje”. En la Tabla 2.3 se pueden apreciar las dimensiones y elementos de madurez propuestos por IMPULS.

Tabla 2.3.

Dimensiones y elementos de madurez propuestos por IMPULS

DIMENSION	ITEMS
Strategy and organization	Strategy
	Investments
	Innovation management
Smart Factory	Digital modeling
	Equipment infra structure
	Data usage
	IT systems
	Cloud usage
Smart Operation	IT security
	Autonomous processes
	Information sharing
	Data analytics in usage phase
Smart Products	ICT add-on functionalities
	Share of data used
Data-driven services	Share of revenues
	Data-driven services
	Skill acquisition
Employees	Employee skill sets

Fuente: elaboración propia basada en IMPULS (2015)

Los niveles de madurez contemplados poseen cierto grado de correspondencia con el modelo CMMI 2.0 el cual no fue publicado hasta 3 años después. Estos niveles de madurez son mostrados en la Figura 2.20, en la cual el término *outsider* puede ser traducido como “forastero” o “intruso” y hace alusión a una dimensión o elemento de madurez que posee un grado de inclusión prácticamente nulo de Industria 4.0 y por tanto, no pertenece al conjunto de organizaciones que implementan Industria 4.0. Por otra parte, el término *top performer* puede ser traducido como “mejor desempeño” o “el mejor intérprete” y hace referencia a aquellas organizaciones que poseen

dimensiones o elementos de madurez en el nivel más alto de madurez. *Outsider* y *top performer* son clasificados como los niveles de madurez 0 y 5 respectivamente.

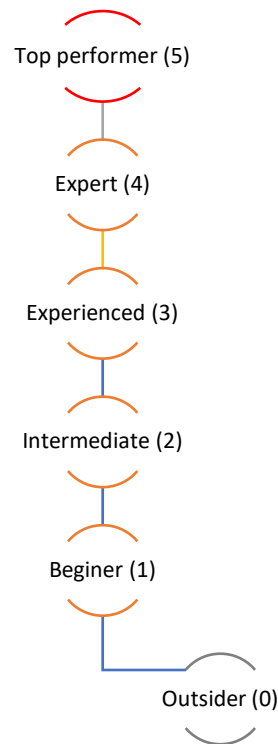


Figura 2.20. Niveles de madurez considerados en el modelo IMPULS

Fuente: elaboración propia basada en IMPULS (2015)

IMPULS considera las siguientes tres categorías de encaje para ubicar la calificación global⁸ de una organización:

- **Recién llegados (*newcomers*):** esta categoría está dedicada a aquellas organizaciones que han realizado nulos o pocos esfuerzos por implementar Industria 4.0, y por lo tanto, obtienen una calificación global entre 0 y 1.99.

⁸ La calificación global de una organización está dada por la ponderación simple de los resultados obtenidos para cada una de las dimensiones de madurez contempladas en el modelo IMPULS.

- **Aprendices (*learners*):** a esta categoría pertenecen las empresas que han comenzado a implementar Industria 4.0 y que se encuentran en una fase de aprendizaje o consolidación. En esta categoría se enmarcan las calificaciones globales entre 2 y 2.99.
- **Líderes (*leaders*):** en esta categoría se incluyen las compañías que han comenzado a consolidarse en Industria 4.0 y han obtenido beneficios observables a partir de ello. Las compañías en esta categoría pueden ser consideradas como un grupo de referencia para otras compañías que se encuentren en las categorías de encaje más bajas. Las calificaciones globales tomadas en consideración como referencia para esta categoría son aquellas que se encuentran entre 3.0 y 5.0.

La herramienta de recolección de información propuesta por IMPULS es el cuestionario de tipo auditoría interna. El siguiente enlace dirige hacia la página web de la fundación, en la cual se podrá realizar una evaluación de madurez de Industria 4.0 de manera gratuita: <https://www.industrie40-readiness.de/?lang=en>.

En 2016, la Asociación Alemana de Ingeniería Mecánica (**VDMA**) publicó un estudio llamado “*Guideline Industrie 4.0: Guiding principles for the implementation of Industrie 4.0 in small and medium sized businesses*”, también conocido como “*Industrie 4.0 Tool Box*”. En este estudio se propone un modelo de evaluación de madurez compuesto por 2 dimensiones y 12 elementos de madurez, los cuales se presentan en la Tabla 2.4 (VDMA, 2016).

Tabla 2.4.

Dimensiones y elementos de madurez propuestos por VDMA

DIMENSION	ITEMS
Products	Integration of sensors / actuators Communication / Connectivity Functionalities for data storage and information exchange Monitoring Product-related IT services Business models around the product

Continuación de Tabla 2.4. Dimensiones y elementos de madurez propuestos por VDMA

DIMENSION	ITEMS
Production	Data processing in the production Machine-to-machine Communication (M2M) Company wide networking with the production ICT infrastructure in Production Man-machine interfaces Efficiency with small batches

Fuente: elaboración propia basada en VDMA (2016).

Los niveles de madurez que contempla el estudio presentado por VDMA son 6, y al igual que el modelo de IMPULS, contempla niveles de madurez que van desde el 0 (nivel más bajo) hasta el 5 (nivel más alto). Así mismo, este modelo posee un alto nivel de detalle para cada una de sus dimensiones y elementos de madurez, la herramienta de recolección de información propuesta por VDMA es igualmente el cuestionario de tipo auditoría interna. Sin embargo, este modelo tiene la particularidad de estar dirigido a las Pymes, lo cual lo convierte en el primer modelo en ser desarrollado con este enfoque.

En el mismo año, **Schumacher, Erol, & Sihm** (2016) proponen un modelo de evaluación de madurez de Industria 4.0 compuesto por 9 dimensiones y 62 elementos de madurez. Este modelo propone un método de ponderación asistido por software en el cual cada elemento de madurez posee un peso diferente para la calificación de su respectiva dimensión. Los niveles de madurez contemplados van desde 1 (nivel más bajo) hasta 5 (nivel más alto). Un resumen de las dimensiones contempladas por Schumacher, Erol, & Sihm (2016) se muestran en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5.

Dimensiones y elementos de madurez propuestos por Schumacher et al.

DIMENSION	ITEMS
Strategy	Implementation I40 roadmap, Available resources for realization, Adaption of business models, ...
Leadership	Willingness of leaders, Management competences and methods, Existence of central coordination for I40, ...

Continuación de Tabla 2.5. Dimensiones y elementos de madurez propuestos por Schumacher et al.

DIMENSION	ITEMS
Customers	Utilization of customer data, Digitalization of sales/services, Customer's Digital media competence, ...
Products	Individualization of products, Digitalization of products, Product integration into other systems, ...
Operations	Decentralization of processes, Modelling and simulation, Interdisciplinary, interdepartmental collaboration, ...
Culture	Knowledge sharing, Open-innovation and cross company collaboration, Value of ICT in company, ...
People	ICT competences of employees, openness of employees to new technology, autonomy of employees, ...
Governance	Labour regulations for I40, Suitability of technological standards, Protection of intellectual property, ...
Technology	Existence of modern ICT, Utilization of mobile devices, Utilization of machine-to-machine communication, ...

Fuente: Schumacher et al. (2016).

Los autores proponen que se deben tener en cuenta las tendencias de Industria 4.0 a futuro, ya que Industria 4.0 es un concepto que aún se encuentra madurando y tomando forma. Así mismo, se propone que los siguientes modelos de evaluación de madurez de Industria 4.0 que se desarrollen pregunten por el estado actual y el estado deseado simultáneamente a la hora de diligenciar el respectivo cuestionario con el objetivo de mejorar el análisis de resultados y la generación de *roadmaps*.

Posteriormente, el Instituto Tecnológico **AIDIMME** en conjunto con el Instituto Tecnológico de Informática (**ITI**) en España, proponen en 2016 un modelo de evaluación de madurez de Industria 4.0 orientado hacia los sectores Madera-Mueble y Metalmecánico en el marco de un proyecto gubernamental llamado “*Sistemas Avanzados de eficiencia productiva para la Industria 4.0 (SAIN4)*”, el cual fue financiado por la Unión Europea a través del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) y el Instituto Valenciano de Competitividad Empresarial (IVACE) (AIDIMME & ITI, 2016).

Inicialmente los autores proponen un modelo compuesto por 5 dimensiones y 18 elementos de madurez. No obstante, luego de aplicar el modelo a varias organizaciones tomadas como casos de estudio se decidió redimensionar el modelo a sólo 4 dimensiones y 9 elementos de madurez. Esto, debido a que los autores consideraron que existía redundancia en determinadas dimensiones y elementos. El modelo final planteado se puede apreciar en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6.

Dimensiones y elementos de madurez propuestos por AIDIMME & ITI

DIMENSIÓN	ELEMENTOS
Innovación	Producto/Servicio. Proceso.
Mercado	Información hacia el mercado. Información desde el mercado.
Fabricación	Gestión de operaciones. Gestión y utilización de activos.
Red de Suministro	Gestión de compras/proveedores. Gestión de inventarios. Transporte y distribución.

Fuente: elaboración propia basada en AIDIMME & ITI (2016).

Adicionalmente, los autores proponen un método de validación del modelo basado en la diferencia de calificaciones que dan dos auditores expertos a la misma organización utilizando el mismo modelo y aplicándolo en el mismo espacio y tiempo. Al final las diferencias apreciadas fueron pocas, lo cual permitió dar por validado el modelo bajo el concepto de que los resultados serán replicables bajo condiciones similares. Además, los autores argumentan que las diferencias en las calificaciones de ambos expertos existirán con frecuencia debido a que, usualmente, el concepto de Industria 4.0 varía de persona en persona y de organización en organización.

En 2017, la Academia Alemana de Ciencia e Ingeniería (**Acatech**) propone en su estudio titulado “*Industrie 4.0 Maturity Index*” un modelo de evaluación de madurez de Industria 4.0 compuesto por 5 dimensiones, 27 elementos de madurez, y 6 niveles de madurez donde 1 representa el nivel

más bajo y 6 el nivel más alto. Este modelo tiene la particularidad de incluir “subdimensiones de madurez” las cuales son un subconjunto que reúne a diferentes elementos de madurez. Las subdimensiones, a su vez, se encuentran contenidas dentro de las dimensiones de madurez (Schuh, Anderl, Gausemeier, ten Hompel, & Wahlster, 2017). Por lo tanto, este modelo emplea un modelo de ponderación de dos etapas: (1) la ponderación de los elementos de madurez dentro de cada subdimensión de madurez, y (2) la ponderación de cada subdimensión dentro de cada dimensión de madurez. La estructura de este modelo es mostrada en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7.

Dimensiones y elementos de madurez propuestos por Schuh et al.

DIMENSION	SUB-DIMENSION	ITEMS
Resources	Digital capability	Provide digital competencies. Automated data acquisition through sensors and actuators. Decentralized (pre)-processing of sensor data.
	Structured communication	Efficient communication. Task based interface design.
Information systems	Information processing	Data analysis (Automated data analysis). Contextualized data delivery (Deliver contextualized information). Application-specific user interface (Task-specific user interfaces). Resilient IT infrastructure (Build a resilient IT infrastructure and implement situation-based data storage).

Continuación de Tabla 2.7. Dimensiones y elementos de madurez propuestos por Schuh et al.

DIMENSION	SUB-DIMENSION	ITEMS
	Integration	Horizontal and vertical integration (Integrate information systems vertically and horizontally). Data governance (Implement data governance). Standard data interface (Standardize data interfaces). IT security (Upgrade IT security).
Culture	Social collaboration	Democratic leadership style. Open communication. Confidence in processes and information systems.
	Willingness to change	Recognize the value of mistakes Openness to innovation. Data-based learning and decision-making. Continuous professional development Shaping change.
Organizational structure	Organic internal organization	Flexible communities. Decision rights management. Motivational goal systems Agile management.
	Dynamic collaboration in value networks	Focus on customer benefits. Cooperation within the network.

Fuente: elaboración propia basada en Schuh et al. (2017).

Este modelo tiene la particularidad de ser aplicado a 5 áreas funcionales de negocio, las cuales son definidas por los autores como: desarrollo, producción, logística, servicios, y mercadeo y ventas. Debido a esto, se deben realizar cinco evaluaciones de madurez, una para cada área funcional definida. Como ventaja, se observa un alto grado de detalle en los resultados. Por otra parte, se

observa como desventaja que el alto grado de detalle del modelo puede dificultar la aplicación e interpretación de los resultados.

Posteriormente en el mismo año **Agca et al.** (2017) proponen un modelo que, al igual al modelo propuesto por Schuh et al. (2017), posee una estructura de dimensiones, subdimensiones y elementos de madurez. Este modelo consta de 6 dimensiones, 37 elementos de madurez, y 4 niveles de madurez que van desde 1 (nivel más bajo) hasta 4 (nivel más alto). Lo novedoso de este modelo es que incluye una dimensión de madurez llamada “*consideraciones legales*”, y en esta se engloban los siguientes elementos de madurez: modelos de contrato, riesgo, protección de datos, y propiedad intelectual.

Debido a lo anterior, este modelo atiende una de las principales tendencias de investigación que se prevén para Industria 4.0: las consideraciones legales en contrataciones y protección de datos (Pereira, Barreto, & Amaral, 2017). Esto, debido a la necesidad de ajuste de políticas y modelos de contrato que implica Industria 4.0 en las organizaciones que decidan implementarla. La estructura de este modelo se puede apreciar en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8.

Dimensiones y elementos de madurez propuestos por Agca et al.

DIMENSION	SUBDIMENSION	ITEMS
Product and services	Product and services	Product customization Digital features of products Data-driven services Level of product data usage Share of revenue
Manufacturing and Operations	Technology integration	Automation Machine and operations system integration (M2M)
	Autonomous workplace	Self-optimizing processes Autonomously guided workpieces

DIMENSION	SUBDIMENSION	ITEMS
	Data	Operations data collection Operations data usage Cloud solution usage IT and data security
	Resource capability	Digital modelling Equipment readiness for Industry 4.0
Strategy and Organization	Strategy and Organization	Degree of strategy implementation Measurement Investments People capabilities Collaboration Leadership Finance
Supply Chain	Supply Chain	Inventory control using real-time data management Supply chain integration Supply chain visibility Supply chain flexibility Lead times
Business Model	Business Model	'As a service' business model Data driven decisions Real-time tracking Real-time and automated scheduling Integrated marketing channels IT supported business
Legal Considerations	Legal Considerations	Contracting models

Continuación de Tabla 2.8. Dimensiones y elementos de madurez propuestos por Agca et al.

DIMENSION	SUBDIMENSION	ITEMS
		Risk
		Data protection
		Intellectual property

Fuente: elaboración propia basada en Agca et al. (2017).

Un año más tarde, **Akdil, Ustundag, & Cevikcan** (2018) proponen un modelo que igualmente contempla dimensiones, subdimensiones y elementos de madurez. No obstante, este sólo está compuesto por 3 dimensiones, 5 subdimensiones, y 13 elementos de madurez. Los niveles de madurez contemplados son 4:

- **Nivel 0 (ausencia):** a este nivel pertenecen las organizaciones que no alcanzan ninguno de los requerimientos mínimos de Industria 4.0 o en su defecto han obtenido una calificación global entre 0 y 0.99.
- **Nivel 1 (existencia):** en este nivel las compañías muestran iniciativas piloto para implementar Industria 4.0 pero aún no consiguen realizar implementaciones completas que den paso a una transformación digital de la compañía. Las organizaciones situadas en este nivel poseen una calificación global entre 1.0 y 1.99.
- **Nivel 2 (sobreviviente):** en este nivel se encuentran compañías cuyos procesos se basan en los datos y la hiperconectividad. En esta etapa ya se han realizado implementaciones completas de Industria 4.0 en determinados sectores de la compañía y la alta dirección toma la iniciativa para emprender proyectos de Industria 4.0. Las organizaciones situadas en este nivel poseen una calificación global entre 2.0 y 2.99.
- **Nivel 3 (madurez):** en este nivel de madurez los productos y servicios que ofrece la empresa son definidos como inteligentes debido a su capacidad de comunicarse y cooperar con otros productos o procesos. Además, la organización posee ventajas competitivas en términos de Industria 4.0 las cuales se transforman en beneficios tangibles para la organización. En general, los procesos de la organización cumplen con los principios de

diseño de Industria 4.0. Según los autores en cuestión, estos son: gestión de datos en tiempo real, interoperabilidad, virtualización, descentralización, agilidad, orientación a servicios, y procesos de negocio integrados (Akdil, Ustundag, & Cevikcan, 2018). Las organizaciones situadas en este nivel poseen una calificación global entre 3.0 y 4.0.

La estructura de este modelo es mostrada en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9.

Dimensiones y elementos de madurez propuestos por Akdil et al.

DIMENSION	SUBDIMENSION	ITEMS
Smart products and services	Smart products and services	Smart products. Smart services.
Smart business processes	Smart production and operations	Production, logistics and procurement. Product development.
	Smart marketing and Sales operations	After sales service. Pricing/Promotion. Sales and Distribution channels.
	Supportive operations	Human resources. Information technologies. Smart finance.
Strategy and Organization	Strategy and Organization	Business models. Strategic partnerships. Technology investments. Organizational structure and Leadership.

Fuente: elaboración propia basada en Akdil et al. (2018)

Del anterior estado del arte se pudieron evidenciar dos aspectos sobresalientes:

1. Ningún modelo de evaluación de madurez abarca el aspecto financiero desde el punto de vista de las inversiones estratégicas. Implementar Industria 4.0 demanda la inversión de cuantiosas sumas de dinero que deben realizarse gradual y estratégicamente a través del tiempo para conseguir los resultados deseados, sin que esto signifique socavar el capital de trabajo o patrimonio de la compañía de golpe. Además, las inversiones realizadas deben estar soportadas por beneficios tangibles que las respalden (retorno a la inversión). Actualmente, muchas compañías realizan inversiones en Industria 4.0 sin tener en cuenta estos aspectos. Debido a lo anterior, se consideró en la presente investigación incluir como una tendencia “inversiones estratégicas” con el objetivo de medir no solamente aspectos técnicos, sino también aspectos estratégicos para valorar la madurez de una compañía en torno a Industria 4.0.
2. Desde 2017 los modelos de evaluación de madurez desarrollados cuentan con una estructura de tres niveles: dimensión, subdimensión, y elemento de madurez. Analizando los resultados de estas investigaciones se llegó a la conclusión de que este tipo de estructura permite obtener un mayor nivel de detalle que se traduce en resultados más comprensibles para las organizaciones. Debido a lo anterior, se ha optado por adoptar una estructura de tres niveles para el modelo de evaluación de madurez propuesto en la presente investigación.

A continuación, se muestra en la Tabla 2.10 aspectos generales de la estructura de los principales modelos de evaluación de madurez de Industria 4.0 tomados en consideración en el estado del arte de la presente investigación.

Tabla 2.10.

Resumen de principales modelos de evaluación de madurez de Industria 4.0 consultados

Autores	Dimensiones de madurez	Subdimensiones de madurez	Elementos de madurez	Niveles de madurez	Rango de los niveles	Enfoque	Origen del estudio
Rockwell Automation (2014)	3	NA	6	NA	NA	Tecnología	Estados Unidos
IMPULS (2015)	6	NA	18	6	0 – 5	General - Manufactura	Alemania
VDMA (2016)	2	NA	12	6	0 – 5	Pymes - Manufactura	Alemania
Schumacher et al. (2016)	9	NA	62	5	1 – 5	General - Manufactura	Alemania
AIDIMME & ITI (2016)	4	NA	9	5	0 – 100	Manufactura	España
Schuh et al. (2017)	5	8	27	6	1 – 6	General - Manufactura	Alemania
Agca et al. (2017)	6	9	37	4	1 – 4	General - Manufactura	Inglaterra
Akdil (2018)	3	5	13	4	0 – 3	General - Manufactura	Turquía
PROMEDIO	4,75	7,33	23,00	5,14	-	-	-
DESV. EST.	2,25	2,08	18,76	0,90	-	-	-

Fuente: elaboración propia.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Descripción del método de investigación

La presente investigación es de tipo aplicada-cuantitativa debido a que busca hallar un método para diagnosticar la madurez de los procesos de las empresas en torno a Industria 4.0. Esto, mediante un abordaje práctico y datos procesados de manera cuantitativa. La presente investigación se desarrolló en 4 etapas, una por cada objetivo específico. Las etapas planteadas se ilustran en la Figura 3.1.

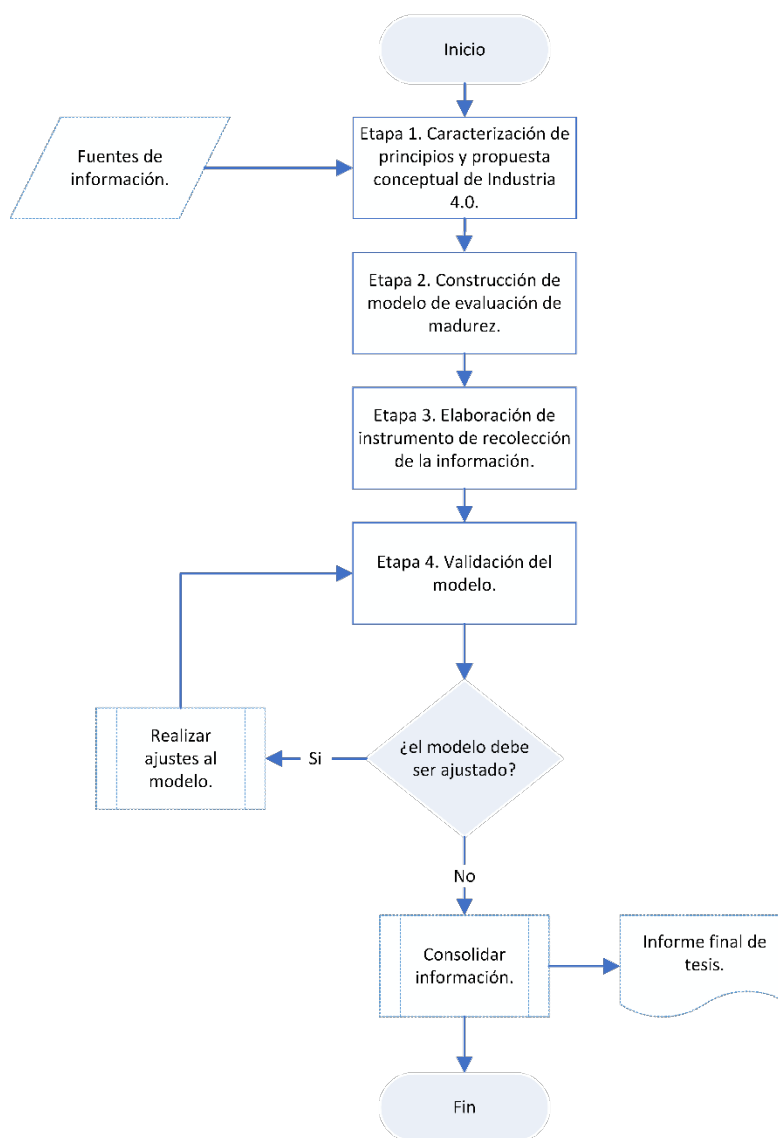


Figura 3.1. Método de investigación propuesto

Fuente: elaboración propia.

3.1.1. Caracterización de principios y propuesta conceptual de Industria 4.0

Inicialmente, se realizó una extensa búsqueda bibliográfica con el fin de comprender correctamente el concepto de Industria 4.0 a través de los diversos abordajes que se le han dado a esta filosofía (Pereira & Romero, 2017). Así mismo, se caracterizaron los principios de diseño de Industria 4.0 con el objetivo de poseer una sólida base teórica que permitiera diferenciar cuándo una organización se encuentra implementado parcial o totalmente Industria 4.0, o caso contrario, cuando no lo está haciendo. Igualmente, se llevó a cabo una extensa búsqueda bibliográfica que permitió identificar las estrategias gubernamentales relacionadas con Industria 4.0 alrededor del mundo y los impactos que Industria 4.0 posee para la industria actual. Así mismo, una nueva propuesta conceptual de Industria 4.0 es realizada.

Para lo anterior, fue llevada a cabo una exhaustiva revisión bibliográfica utilizando relevantes bases de datos científicas tales como Science Direct (Elsevier), SpringerLink (Springer) y Google Scholar. Fueron consultados artículos de revistas, artículos de conferencias, libros, capítulos de libro, e informes de entidades que estudian temas relacionados a Industria 4.0 desde el periodo de 2011 hasta el primer trimestre de 2019. Las búsquedas en estas bases de datos fueron realizadas en los idiomas inglés, español, portugués y alemán. Las siguientes palabras clave fueron utilizadas: *Industry 4.0, Definition, Meaning, Concept, Principles, Technologies, Global, Implementation, Guideline, Fourth Industrial Revolution, Smart Factory, Supply Chain, Logistic, Digital Supply Chain, Industria 4.0, Cuarta Revolución Industrial, Definición, Significado, Concepto, Principios, Tecnologías, Logística, Indústria 4.0, Quarta Revolução Industrial, Indústria 4.0, Definição, Significado, Conceito, Industrie 4.0, Cyber-Physikalische Systeme, Intelligente Fabrik, Smart Product, Digitale*. En todo el periodo estudiando se encontraron 22 trabajos directamente relacionados con el tema de investigación. Estos correspondieron a artículos, libros, e informes de entidades relacionadas con Industria 4.0.

3.1.2. Construcción del modelo de evaluación de madurez

En esta segunda etapa se elaboró un modelo de evaluación de madurez de Industria 4.0 tomando como referencia los modelos planteados hasta la fecha (*ver 2.3. Estado del arte*), los principios de

diseño caracterizados, y tendencias de Industria 4.0 identificadas por Pereira, Barreto, & Amaral (2017), Agca et. al (2017), Kamble, Gunasekaran, & Gawankar (2018), y una nueva tendencia propuesta por la presente investigación: “Inversiones estratégicas” (*ver pág. 69*). En esta etapa se centró una de las mayores partes del trabajo de la presente investigación ya que, con base a la información obtenida en la etapa 1 y el estado del arte de la presente investigación, se definieron cada uno de los elementos que componen el modelo de evaluación de madurez y las interrelaciones presentes entre estos. Para definir dichas interrelaciones fue llevada a cabo una ponderación de componentes del modelo recurriendo a 4 expertos en la temática de Industria 4.0.

3.1.3. Elaboración de instrumento de recolección de la información

En esta tercera etapa se procedió a construir el instrumento encargado de recolectar la información que sirvió como insumo para que el modelo propuesto en la etapa anterior pueda realizar las respectivas valoraciones. El tipo de instrumento definido fue una encuesta online con preguntas abiertas y cerradas. Las abiertas fueron utilizadas para tomar datos del encuestado y las cerradas para los fines del modelo de evaluación de madurez. Estas preguntas cerradas poseen respuestas de selección múltiple a lo largo de dos diferentes columnas, permitiéndose una única respuesta por cada columna. Esto, con el fin de que el encuestado responda en términos del estado actual de Industria 4.0 en su compañía en una columna y, en la otra columna, por el estado futuro (el estado al cual quisiera llegar la compañía en el corto-mediano plazo con relación a las respuestas de esa pregunta), atendiendo así una de las recomendaciones realizadas por Schumacher et al. (2016). En la Figura 3.2 se pretende ejemplificar de mejor manera este concepto:

4. ¿Hasta qué punto las máquinas de producción se pueden comunicar entre sí?
 PRO-INF-INT3_P1

	Estado actual	Estado deseado
Las máquinas no generan datos que les permitan comunicarse entre sí.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Las máquinas funcionan con el apoyo de alguna computadora. Sin embargo, diversos datos de salida deben ser extraídos manualmente para ser entregados a otras máquinas.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Las máquinas de la compañía se encuentran conectadas alámbricamente a una red local centralizada de cómputo.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Todas las máquinas de la compañía se encuentran conectadas vía internet e intercambian entre sí información de las actividades que realizan con el fin de hacer más eficientes las operaciones de producción.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 3.2. Ejemplo de pregunta de tipo estado actual – estado futuro

Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, para asignar el valor de nivel de madurez que cada posible respuesta representa, fueron tomados en consideración los niveles de madurez propuestos por el *CMMI Institute* en el modelo CMMI versión 2.0. Esto permitió definir objetivamente a qué niveles de madurez apunta cada posible respuesta. No obstante, debido a que los niveles de madurez del modelo CMMI 2.0 poseen 6 categorías de madurez, las respuestas del cuestionario fueron simplificadas a entre 3 a 5 categorías dependiendo la pregunta, permitiéndose saltos de niveles de madurez entre las respuestas. Lo anterior, con el fin de simplificar la aplicación del cuestionario teniendo en cuenta sólo las respuestas más representativas. El cuestionario elaborado posee 45 preguntas (3 preguntas abiertas y 42 cerradas).

3.1.4. Validación del modelo

En esta etapa se validó el modelo de evaluación de madurez propuesto mediante un caso de estudio en una importante empresa del sector automovilístico del estado de Guanajuato, México. Esta empresa se encarga de producir autopartes para diferentes marcas como Audi, Chevrolet, Toyota, entre otras; Recientemente, esta compañía ha comenzado a realizar esfuerzos por implementar Industria 4.0. El nombre de esta empresa se tomará como “ABC Company” debido a acuerdos de confidencialidad de la información. Los siguientes aspectos fueron tomados en consideración para la validación del modelo:

- a. **Replicabilidad de los resultados:** hace referencia al grado de similitud que deben tener varios resultados del modelo de evaluación de madurez cuando este es aplicado a una misma organización, en un mismo espacio y tiempo, y con auditores que posean un grado equiparable de conocimiento de Industria 4.0 y la organización. Esto, con el fin de asegurar que el modelo de evaluación de madurez es objetivo y consistente en la manera en cómo recaba y procesa la información (AIDIMME & ITI, 2016). Para este criterio se definió que el promedio de las desviaciones estándar de las partes que integran cada componente del modelo de evaluación de madurez deberá ser menor a 0.5. Más detalles sobre este valor son dados en la sección 4.4.4.
- b. **Correspondencia de los resultados:** hace referencia al grado de concordancia o equivalencia que deben tener los resultados del modelo de evaluación de madurez con respecto a la situación real de la compañía, visto desde el punto de vista de uno o más representantes de la compañía. Lo anterior busca dar por sentado que el modelo cumple su propósito principal que es reflejar el estado actual de la compañía en términos de Industria 4.0.

Se estableció que en caso de detectarse alguna inconsistencia en el modelo este deberá ser ajustado y sometido a validación nuevamente hasta satisfacer los aspectos previamente mencionados. Una vez validado el modelo, se procedió a elaborar los respectivos informes de resultados y a

consolidarlos en el presente documento generando las respectivas conclusiones a las que hubo lugar.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

En este capítulo se expondrán los resultados de la presente investigación a lo largo de 4 secciones. Estas secciones corresponden a las etapas definidas en el anterior capítulo, las cuales a su vez corresponden con lo definido en cada objetivo específico.

4.1. Caracterización de principios y propuesta conceptual de Industria 4.0

Los resultados de esta etapa fueron consignados en el CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO. En dicho capítulo se caracterizaron los principios de diseño de Industria 4.0, se expusieron sus principales componentes tecnológicos y la manera en cómo estos se relacionan. Así mismo, se expusieron conceptos básicos y el estado de Industria 4.0 en términos de estrategias gubernamentales de inclusión a nivel global. Además, se hace una comparación entre los términos Industria 4.0 y cuarta revolución industrial. En la presente sección, se presenta uno de los aportes de la presente investigación a la línea de estudios relacionados con Industria 4.0, el cual fue producto de la caracterización de los principios de Industria 4.0 y el análisis de demás aspectos abordados en el Capítulo II. Este resultado es la propuesta de una nueva definición para el término Industria 4.0.

A partir de la primera definición de Industria 4.0 propuesta por Kagermann et al. (2013) en donde se expresa que Industria 4.0 es *“la integración técnica de sistemas ciber-físicos (CPS) en la manufactura y la logística, y el uso del Internet de las cosas y los servicios en los procesos industriales”* y en donde el versionado “4.0” refleja el enfoque de informatización a la industria y la connotación de cuarta revolución industrial que se le pretende dar, diversos investigadores y entidades alrededor del mundo han mostrado diferentes puntos de vista acerca de lo que consideran como Industria 4.0. De acuerdo con Shafiq, Sanin, Szczerbicki, & Toro (2015) Industria 4.0 es la *“combinación de máquinas inteligentes, sistemas de producción y procesos para formar una red sofisticada”*. Según Hermann et al. (2016) Industria 4.0 es *“un término colectivo para tecnologías y conceptos de la cadena de valor”*. Así mismo, Lu (2017) describe a Industria 4.0 como *“un proceso de manufactura integrado, adaptado, optimizado, orientado al servicio, e interoperable que se correlaciona con algoritmos, big data, y tecnologías de punta”*. Por otra parte, De Sousa,

Jabbour, Foropon, & Filho (2018), describen Industria 4.0 como “*una nueva y poderosa ola industrial orientada a las tecnologías digitales y virtuales, y centrada en el servicio.*”⁹

Tomando en consideración lo anterior, se propone la siguiente definición de Industria 4.0: “filosofía que comprende la integración sinérgica de diversas tecnologías con el objetivo de alcanzar altos niveles de eficiencia y competitividad en organizaciones, y cadenas de suministro, a través de la conectividad”. El uso del término Filosofía es soportado debido a que Industria 4.0 es una nueva manera de concebir las organizaciones y cadenas de suministro, es un pensamiento organizacional basado en la idea de conectividad. A partir de esta idea, se observan los cambios en sistemas productivos y cadenas de suministro. De acuerdo con la Real Academia de la lengua Española (2014), filosofía es un “*conjunto de saberes que busca establecer, de manera racional, los principios más generales que organizan y orientan el conocimiento de la realidad...*”. Aplicando lo anterior al presente contexto, el “*conjunto de saberes*” representa el conjunto de principios de diseño, tecnologías, y demás conceptos relacionados que “*organizan y orientan*” la visión de “*realidad*” relacionada con las fábricas inteligentes o *smart factories* de la Industria 4.0.

Así mismo, la expresión “*integración sinérgica de diversas tecnologías*” es utilizada debido a que la potencia combinada de dichas tecnologías debe ser mayor a la potencia de estas cuando trabajan aisladamente. En este contexto, refiere al principal principio de diseño de Industria 4.0 (conectividad) y al hecho de que la integración de estas tecnologías debe permitir aumentar el desempeño de indicadores organizacionales relacionados con eficiencia y competitividad. De lo contrario, de poco servirá conectar máquinas, personas y sistemas si no se obtiene un beneficio real de ello.

⁹ Traducciones propias. Para definiciones originales por favor referirse a la referencia bibliográfica relacionada.

4.2. Construcción de modelo de evaluación de madurez

Para la construcción del modelo de evaluación de madurez se analizaron los modelos de evaluación de madurez de Industria 4.0 creados hasta la revisión del estado del arte. Este análisis consistió en identificar las características en común que cada modelo de evaluación de madurez posee. Como resultado, se identificaron 4 grandes categorías que abarcan todas las dimensiones, subdimensiones, y elementos de madurez de los modelos analizados. Estas categorías constituyen las dimensiones del modelo de evaluación de madurez propuesto, las cuales son:

- **Dirección:** los procesos del área directiva de la compañía juegan un papel fundamental a la hora de implementar Industria 4.0. En esta dimensión de madurez se evaluarán aspectos relacionados a liderazgo, estrategia organizacional, estrategias de ciberseguridad y consideraciones legales. En donde estos últimos dos aspectos atienden una de las tendencias de Industria 4.0 identificadas por Pereira, Barreto, & Amaral (2017) y Agca et. al (2017).
- **Operaciones:** en esta dimensión de madurez se evaluarán los procesos de las diferentes operaciones de la compañía, se hará énfasis en el enfoque de datos y la manera en cómo la compañía aprovechada dicho enfoque para generar beneficios reales. Además, se hará énfasis en el recurso humano de la compañía, atendiendo así una de las tendencias de Industria 4.0 identificadas por Kamble, Gunasekaran, & Gawankar (2018).
- **Producción:** en esta dimensión de madurez se evaluarán aspectos relacionados exclusivamente al proceso productivo. Estos aspectos son: infraestructura tecnológica y productos. A través de estos aspectos se pretende valorar el estado de la infraestructura tecnológica de la compañía en torno a Industria 4.0 y la capacidad que esta posee para atender requerimientos complejos como personalización de productos.
- **Conectividad:** en esta dimensión se evaluará el principio de diseño más importante de Industria 4.0: la conectividad (interconexión). Este, en el contexto de Industria 4.0, refiere a la habilidad de máquinas, personas, y sistemas para conectarse y comunicarse entre sí a través del Internet de las Cosas (IoT). Conceptos como integración horizontal (integración

de la empresa con los eslabones de la cadena de suministro) e integración vertical (integración de los sistemas TIC a través de los distintos niveles jerárquicos y procesos de la compañía) serán evaluados en esta última sección. Así mismo, se hará hincapié en los beneficios reales que la compañía obtiene por dicha conectividad.

Para el modelo de evaluación de madurez propuesto se adoptó una estructura de 3 niveles: dimensiones, subdimensiones, y elementos de madurez. Esto, debido a que este tipo de estructura facilita a las organizaciones focalizar esfuerzos y provee una valoración más detallada. El procedimiento para definir las subdimensiones y elementos de madurez fue similar al empleado en la definición de dimensiones de madurez. A continuación, se presentan las dimensiones de madurez definidas acompañadas de sus respectivas subdimensiones y elementos de madurez. Así como también, su justificación mediante la relación que cada subdimensión y elemento de madurez definido posee con los principios de diseño y tendencias de Industria 4.0 identificadas.



Figura 4.1. Dimensiones de modelo de evaluación de madurez propuesto

Fuente: elaboración propia.

Subdimensión	Elemento de madurez	Interconexión	Descentralización	Transparencia de la información	Asistencia Técnica	Tendencia abordada
Estrategia	Adaptación hacia un modelo de negocio de I4.0	x	x	x	x	
	Apertura a la innovación	x	x	x	x	
	Inversiones estratégicas	x	x	x	x	Inversiones estratégicas
Liderazgo	Competencias de los líderes frente a I4.0	x				Recursos Humanos
	Estilo de liderazgo	x				Recursos Humanos
Ciberseguridad	Protección de datos	x				Ciberseguridad
	Protección a la propiedad intelectual	x				Consideraciones Legales
	Modelos de contrato	x				Consideraciones Legales

Figura 4.2. Subdimensiones y elementos de madurez de dimensión "Dirección"

Fuente: elaboración propia.

Subdimensión	Elemento de madurez	Interconexión	Descentralización	Transparencia de la información	Asistencia Técnica	Tendencia
Enfoque de datos	Recopilación de datos	x	x	x	x	
	Aprendizaje y toma de decisiones basada en datos		x	x	x	
	Uso efectivo de datos	x	x	x	x	Inversiones estratégicas
Procesos	Descentralización	x	x	x	x	
	Canales de mercadeo integrados	x				
Recursos Humanos	Competencias frente a I4.0	x				Recursos Humanos
	Apertura hacia el cambio y nuevas tecnologías	x				Recursos Humanos
	Desarrollo profesional continuo	x				Recursos Humanos
	Autonomía		x			Recursos Humanos

Figura 4.3. Subdimensiones y elementos de madurez de dimensión "Operaciones"

Fuente: elaboración propia.

Subdimensión	Elemento de madurez	Interconexión	Descentralización	Transparencia de la información	Asistencia Técnica	Tendencia
Infraestructura	Infraestructura tecnológica	x	x	x	x	
	Interfaces de datos estandarizadas	x	x	x	x	
	Integración sistémica M2M	x	x	x	x	
	Flexibilidad y Modularidad	x	x	x	x	
Productos	Personalización de productos	x	x	x	x	
	Productos inteligentes	x	x	x	x	

Figura 4.4. Subdimensiones y elementos de madurez de dimensión "Producción"

Fuente: elaboración propia.

Subdimensión	Elemento de madurez	Interconexión	Descentralización	Transparencia de la información	Asistencia Técnica	Tendencia
Integración horizontal	Cadena Digital de Suministros	x	x	x		
	Visibilidad y Flexibilidad de la Cadena de Suministro	x				
	Beneficios reales de la cooperación entre eslabones	x				Inversiones estratégicas
	Integración de sucursales con Cadena de Suministro	x				
Integración vertical	Integración entre áreas de negocio	x	x	x		
	Beneficios de la cooperación entre áreas de negocio	x				Inversiones estratégicas
	Integración con sucursales	x				

Figura 4.5. Subdimensiones y elementos de madurez de dimensión "Conectividad"

Fuente: elaboración propia.

Como es posible apreciar, cada elemento de madurez guarda relación con al menos un principio de diseño de Industria 4.0. Para el caso del principio de diseño "Interconexión", se observa que este está presente en el 93.33% de los elementos de madurez considerados, lo cual reafirma la importancia que este principio de diseño representa para Industria 4.0. Por otra parte, los principios de diseño "Descentralización", "Transparencia de la información", y "Asistencia técnica", estuvieron presentes en el 53.33%, 50.00%, y 43.33% de los elementos de madurez considerados respectivamente. Así mismo, las tendencias de Industria 4.0 identificadas fueron abordadas a través del 43.33% de los elementos de madurez considerados.

A nivel general, el modelo de evaluación de madurez propuesto posee la estructura esquematizada en la Figura 4.6.



Figura 4.6. Conteo de componentes de modelo de evaluación de madurez propuesto

Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, la estructura mostrada en la Figura 4.6 puede variar dependiendo de una condición: si la compañía posee sucursales. Como se puede apreciar en la Figura 4.5, existen dos elementos de madurez llamados “Integración de sucursales con Cadena de Suministro” y “Integración con sucursales”. Estos dos elementos serán removidos del modelo de evaluación de madurez, y por ende de la ponderación que se explica en la siguiente sección, si la compañía a la cual se aplica el modelo no posee sucursales. En dicho caso, solamente los elementos de madurez del modelo serán redimensionados a 28, dado que las subdimensiones “Integración horizontal” y “Integración vertical” pierden cada una un elemento de madurez.

4.2.1. Ponderación de componentes del modelo

Un modelo de evaluación de madurez además de proveer valoraciones individuales para cada uno de los elementos, subdimensiones, y dimensiones de madurez, también debe proveer una valoración global que permita unificar en un solo escaler el grado general de madurez que la compañía posee en torno a Industria 4.0 (IMPULS, 2015). Debido a esto, los componentes del presente modelo de evaluación de madurez (elementos, subdimensiones y dimensiones) fueron ponderados mediante un grupo de expertos académicos de Industria 4.0 para alcanzar consenso sobre la importancia que cada componente del modelo posee sobre otro. Debido a lo anterior, se

logró obtener un sistema de pesos que permiten proveer una calificación global a las compañías que lo apliquen. Los resultados de dicha ponderación son mostrados en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1.

Ponderación de componentes de modelo de evaluación de madurez de Industria 4.0

Dimensión	Media de peso	Subdimensión	Media de peso	Elemento de madurez	Media de peso	Desv. Est.	
Dirección	27	Estrategia	12	Adaptación hacia un modelo de negocio de I4.0	6,25	1,7854	
				Apertura a la innovación	3	1,2247	
				Inversiones estratégicas	2,75	0,8292	
		Liderazgo	6,5	Competencias de los líderes frente a I4.0		4	1,0000
				Estilo de liderazgo	2,5	1,6583	
		Ciberseguridad	8,5	Protección de datos		3,75	0,4330
				Protección a la propiedad intelectual		2,25	1,4790
				Modelos de contrato	2,5	1,1180	
Operaciones	20,25	Enfoque de datos	8,25	Recopilación de datos	3	0,7071	
				Aprendizaje y toma de decisiones basada en datos		2,75	0,4330
				Uso efectivo de datos		2,5	0,8660
		Procesos	6,75	Descentralización		5,25	1,9203
				Canales de mercadeo integrados		1,5	0,5000
		Recursos Humanos	5,25	Competencias frente a Industria 4.0		1,875	0,5449
				Apertura hacia el cambio y nuevas tecnologías		1,25	0,8292
				Desarrollo profesional continuo	0,875	0,2165	
				Autonomía	1,25	0,4330	
Producción	17	Infraestructura	10,5	Infraestructura tecnológica	3,5	0,5000	
				Interfaces de datos estandarizadas		2,25	0,4330
				Integración sistémica M2M		2,25	0,8292
				Flexibilidad y Modularidad		2,5	0,8660
		Productos	6,5	Personalización de productos		3,75	1,6394
				Productos inteligentes		2,75	0,8292
Conectividad	35,75	Integración horizontal	18	Cadena Digital de Suministros	7,5	1,5000	
				Visibilidad y Flexibilidad de la Cadena de Suministro		3	1,2247
				Beneficios reales de la cooperación entre eslabones		4,75	0,4330
				Integración de sucursales con Cadena de Suministro		2,75	1,2990
		Integración vertical	17,75	Integración entre áreas de negocio		9,25	1,0897
				Beneficios de la cooperación entre áreas de negocio		5,75	1,2990
				Integración con sucursales		2,75	0,8292
TOTALES	100		100		100		

Fuente: elaboración propia.

4.2.2. Categorías de madurez

Con base a los criterios de calificación de niveles de madurez definidos en el modelo CMMI 2.0, la revisión bibliográfica realizada en el estado del arte, y la caracterización de principios y conceptos de Industria 4.0, se establecen las categorías de madurez observables en la Tabla 4.2. Estas categorías servirán para ubicar a las compañías dentro de rangos de clase de madurez a partir de la calificación global obtenida mediante el modelo propuesto. Además, sirven de guía para interpretar dicha calificación global.

Tabla 4.2.

Categorías de madurez para calificación global de madurez

Calificación general obtenida	Nombre de la categoría	Descripción de la categoría
0.00 – 0.99	Incompleta	<p>En esta categoría de madurez se sitúan las compañías cuyo grado de inclusión de Industria 4.0 es nulo. Así mismo, se sitúan compañías cuyos procesos corresponden a una fábrica de primera o segunda revolución industrial, con muy poca o nula integración de herramientas digitales dentro de sus procesos de negocio. Empresas situadas en esta categoría por lo general llevan a cabo procesos de tipo <i>ad hoc</i> y poseen poca o nula disposición al cambio.</p> <p>Se le denomina Incompleta debido a que los esfuerzos por incluir Industria 4.0 pueden ser nulos o bien estar implementados parcialmente, de tal manera que no se ha logrado implementar ninguna actividad de manera completa. De igual manera, se observa que Industria 4.0 no está incluida dentro de la estrategia organizacional ni dentro de los estándares de proceso.</p>
1.00 – 1.99	Inicial	<p>Esta categoría de madurez refleja que una compañía se encuentra dando sus primeros pasos hacia la Smart Factory de Industria 4.0. Actividades piloto de inclusión de Industria 4.0 están siendo llevadas a cabo de manera completa, aunque pueden no estar ligadas a la estrategia</p>

		<p>organizacional. Las actividades de inclusión de Industria 4.0 que se realizan poseen una frecuencia no definida y no son medidas, controladas y/o mejoradas (enfoque de proyectos). Así mismo, se observa que el éxito de los casos de implementación corresponde más a un gran esfuerzo colectivo del equipo de trabajo encargado que a un correcto diseño y estandarización del proceso de implementación.</p> <p>Por lo general, en esta categoría se sitúan compañías que se caracterizan por la tendencia de comprometerse con objetivos demasiado ambiciosos, abandonarlos en tiempos de crisis, depender en exceso de las correctas reacciones del equipo de trabajo, y por la incapacidad de replicar los buenos resultados obtenidos en determinado proceso de implementación (impredecibilidad y reactividad).</p>
2.00 – 2.99	Gestionada	<p>En esta categoría los esfuerzos por integrar Industria 4.0 dentro de la empresa poseen un enfoque de proyectos. Es decir, son planificados, medidos, controlados y mejorados. El equipo de trabajo comienza a tener ciertos conocimientos sobre las buenas prácticas de Industria 4.0 y se comienzan a producir resultados controlados y replicables. En este nivel de madurez las prácticas llevadas a cabo para incluir Industria 4.0 se mantienen aún en tiempos de crisis.</p> <p>Sin embargo, Industria 4.0 aún no se encuentra totalmente incluida dentro de los lineamientos institucionales que rigen la misión, visión y políticas de la empresa. El direccionamiento estratégico no juega un papel fundamental en el logro de los objetivos y la concientización de la importancia de incluir Industria 4.0 en la compañía. Los objetivos que la empresa tiene en torno a Industria 4.0 son claros para el equipo de trabajo de las áreas claves definidas, pero no para toda la organización.</p> <p>Adicionalmente, aún no se tiene un alto grado de conectividad en la organización. Los datos recabados no se transforman aún en beneficios tangibles para la organización, lo cual puede deberse a que los esfuerzos</p>

		<p>por implementar Industria 4.0 son recientes y/o no se ha realizado un correcto aprovechamiento de los datos.</p>
3.00 – 3.99	Definida	<p>En la categoría de madurez “Definida”, la filosofía Industria 4.0 se encuentra correctamente caracterizada y comprendida por todo el equipo de trabajo de la compañía. En esta categoría, Industria 4.0 se encuentra incluida dentro de los lineamientos institucionales que rigen la misión, visión y políticas de la empresa. En esta categoría el direccionamiento estratégico de la organización pasa a tener un papel fundamental en el logro de los objetivos y la concientización de la importancia de incluir Industria 4.0 en las diferentes áreas que integran la compañía. Así mismo, los objetivos de Industria 4.0 son claros para toda la organización.</p> <p>En términos de conectividad, compañías situadas en esta categoría comienzan a ver pequeñas recompensas tangibles producto del proceso de recolección y análisis de datos. Nuevos procedimientos y estándares son definidos para la recolección y tratamiento de datos.</p>
4.00 – 4.49	Completa	<p>En esta categoría se encuentran las compañías que han logrado implementar correcta y completamente la mayoría de los proyectos de implementación de Industria 4.0 definidos. Se observan procesos de implementación de Industria 4.0 planificados, medidos, controlados y mejorados. Todo el recurso humano se encuentra empoderado y capacitado en torno a Industria 4.0 en la medida de lo necesario dependiendo los distintos cargos que existan. Los resultados son controlados y replicables y los esfuerzos por implementar Industria 4.0 se mantienen aún en tiempos de crisis.</p> <p>Adicionalmente, Industria 4.0 se encuentra incluida dentro de los lineamientos institucionales que rigen la misión, visión y políticas de la empresa. El direccionamiento estratégico juega un papel fundamental en el logro de los objetivos y el empoderamiento de las personas de las diferentes áreas que integran la compañía. Así mismo, los objetivos de Industria 4.0 son claros para toda la organización.</p>

		<p>En términos de conectividad, compañías situadas en esta categoría obtienen grandes recompensas en términos de eficiencia y competitividad gracias al proceso de recolección y análisis de datos. Así mismo, dichas compañías poseen un alto nivel de conectividad vertical y horizontal. Las áreas de negocio alcanzan mayores niveles de sinergia gracias a la inclusión de las tecnologías de la información y la comunicación. Así mismo, los eslabones de la cadena de suministro se ven entre sí como socios que trabajan en pro de un único objetivo: la satisfacción al cliente.</p> <p>Esta categoría se denomina “Completa” debido a que se logra una implementación completa de Industria 4.0 y, además, se alcanza el principal objetivo de esta filosofía: generar mayor eficiencia y competitividad en las organizaciones.</p>
4.49 – 5.00	En optimización	<p>Finalmente, en la categoría “En optimización” se encuentran las compañías que han llegado a su más alto grado de inserción de Industria 4.0. En esta categoría, además de lo resaltado en la categoría de madurez “Completa”, la organización es capaz de mejorar continuamente los procesos referentes a la inclusión de Industria 4.0. Así como también, de estar a la vanguardia de las últimas tendencias y vertientes de dicha filosofía gracias a una estructura organizacional abierta al cambio y que genera espacios para la innovación, la investigación y el desarrollo.</p>

Fuente: elaboración propia.

4.3. Instrumento de recolección de la información

El instrumento encargado de recolectar la información que sirvió como insumo para el modelo de evaluación de madurez propuesto fue una encuesta online elaborada en la plataforma Google Forms. Como se explicó en el Capítulo III (*ver pág. 73*), se emplearon 3 preguntas abiertas y 42 preguntas cerradas de selección múltiple a lo largo de dos diferentes columnas, permitiéndose una única respuesta por cada columna. Esto, con el fin de que el encuestado responda en términos del

estado actual de Industria 4.0 en su compañía en una columna y, en la otra columna, por el estado futuro al cual quisiera llegar la compañía en el corto-mediano plazo con relación a las respuestas de esa pregunta (ver Figura 3.2. Ejemplo de pregunta de tipo estado actual – estado futuro *Figura 3.2*), atendiendo así una de las recomendaciones realizadas por Schumacher et al. (2016).

Para cada elemento de madurez se definieron entre 1 y 4 preguntas, en donde cada pregunta posee el mismo peso para cualquier elemento de madurez. Dicho de otra manera, cuando un elemento de madurez posea varias preguntas, se hará un promedio simple de las calificaciones obtenidas en esas preguntas para determinar la calificación del elemento de madurez. Para identificar cada pregunta, fue utilizada una codificación la cual consistió en tomar las primeras 3 letras del nombre de la dimensión en la cual está contenida la pregunta, seguido de un guion. Así mismo, para las tres primeras letras del nombre de la subdimensión y del elemento de madurez, en donde este último en vez de finalizar con guion finaliza con la posición ordinal que ocupa el elemento de madurez al cual hace alusión la pregunta dentro de su respectiva subdimensión de madurez. Finalmente, se emplea un guion bajo seguido de la letra P y el número que la pregunta representa dentro del respectivo elemento de madurez. Para una mejor comprensión de esta codificación se emplea la *Figura 4.7*.

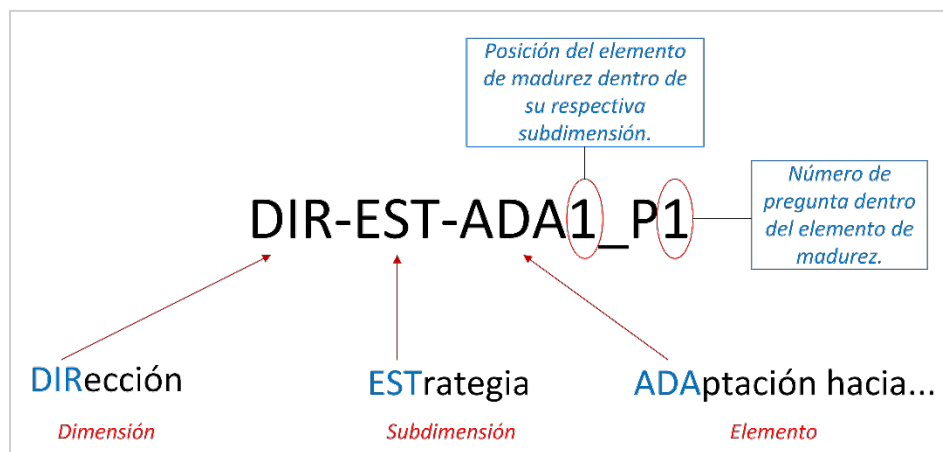


Figura 4.7. Explicación de codificación utilizada para la identificación de preguntas

Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, existen preguntas cuya posible respuesta hace innecesaria la aplicación de una o más preguntas siguientes debido a que estas últimas se responden indirectamente. Un ejemplo de ello son las preguntas con código DIR-EST-ADA1_P1 y DIR-EST-ADA1_P2. La primera pregunta es “¿Posee la compañía una estrategia para implementar Industria 4.0?”, una posible respuesta es “*No se cuenta con una estrategia orientada hacia Industria 4.0. Esfuerzos por implementar Industria 4.0 no están siendo realizados.*”. En caso de que dicha respuesta sea seleccionada, no tendría utilidad aplicar la pregunta DIR-EST-ADA1_P2, la cual es “¿Hasta qué punto los esfuerzos por implementar Industria 4.0 son medidos por la compañía?”. Esto, debido a que si ya se respondió que no se están realizando esfuerzos por implementar Industria 4.0 no tendría sentido preguntar cómo se miden esfuerzos que la compañía no está implementando. Este tipo de casos se relacionan en la columna “Anulaciones” de la Tabla 4.3, en donde si se selecciona determinada opción de la pregunta X , las preguntas $X.n$ serán anuladas.

Otra particularidad del sistema de preguntas diseñado es que la respuesta de una pregunta perteneciente a un elemento de madurez Y , puede estar relacionada con un elemento de madurez Z . Por lo que la calificación de la respuesta a ese elemento Y también afectará del mismo modo anteriormente explicado a la calificación del elemento Z , y viceversa. Este tipo de casos están relacionados con un “*” sobre el nombre del elemento de madurez y en la columna “Relación” de la Tabla 4.3 la cual es mostrada a continuación.

Tabla 4.3.

Esquema general del sistema de preguntas elaborado

Dimensión	Subdimensión	Elemento de madurez	Código de pregunta	Anulaciones	Relación	
Dirección	Estrategia	Adaptación hacia un modelo de negocio de I4.0	DIR-EST-ADA1_P1	a	Apertura a la innovación*	
			DIR-EST-ADA1_P2	a.1		
			DIR-EST-ADA1_P3			
			DIR-EST-ADA1_P4			
		Apertura a la innovación*	DIR-EST-APE2_P1			
			DIR-EST-APE2_P2			
	Inversiones estratégicas	DIR-EST-INV3_P1	b			
		DIR-EST-INV3_P2	b.1			
	Liderazgo	Competencias de los líderes frente a I4.0	DIR-LID-COM1_P1			
			Estilo de liderazgo	DIR-LID-EST2_P1		
	Ciberseguridad	Protección de datos	DIR-CIB-PRO1_P1			
			DIR-CIB-PRO1_P2			
Protección a la propiedad intelectual			DIR-CIB-PRO2_P1			
Modelos de contrato			DIR-CIB-MOD3_P1			
Operaciones	Enfoque de datos	Recopilación de datos	OPE-ENF-REC1_P1	c		
		Aprendizaje y toma de decisiones basada en datos	OPE-ENF-APR2_P1	c.1		
			Uso efectivo de datos	OPE-ENF-USO3_P1	c.2	
	Procesos	Descentralización	OPE-PRO-DES1_P1			
			OPE-PRO-DES1_P2			
			OPE-PRO-DES1_P3			
			OPE-PRO-DES1_P4			
	Recursos Humanos	Canales de mercadeo integrados	OPE-PRO-CAN2_P1			
			Competencias frente a I4.0	OPE-REC-COM1_P1		
				Apertura hacia el cambio y nuevas tecnologías	OPE-REC-APE2_P1	
				Desarrollo profesional continuo	OPE-REC-DES3_P1	
			Autonomía	OPE-REC-AUT4_P1		
Producción	Infraestructura	Infraestructura tecnológica	PRO-INF-INF1_P1			
		PRO-INF-INF1_P2				
		Interfaces de datos estandarizadas	PRO-INF-INT2_P1			
		Integración sistémica M2M	PRO-INF-INT3_P1			
		Flexibilidad y Modularidad	PRO-INF-FLE4_P1			
	Productos	Personalización de productos	PRO-PRO-PER1_P1			
		Productos inteligentes	PRO-PRO-PRO2_P1			

Continuación de Tabla 4.2. Esquema general del sistema de preguntas elaborado

Conectividad		Cadena Digital de Suministros	CON-INT-CAD1_P1	Integración entre áreas de negocio*	
	Integración horizontal	Visibilidad y Flexibilidad de la Cadena de Suministro	CON-INT-VIS2_P1		
			CON-INT-VIS2_P2		
		Beneficios reales de la cooperación entre eslabones	CON-INT-BEN3_P1		
		Integración de sucursales con Cadena de Suministro	CON-INT-INT4_P1	d	
		Integración entre áreas de negocio*		CON-INT-INT1_P1	←
	Integración vertical		CON-INT-INT1_P2		
		Beneficios de la cooperación entre áreas de negocio	CON-INT-BEN2_P1		
	Integración con sucursales	CON-INT-INT3_P1	d.1		

Fuente: elaboración propia

4.3.1. Valoración de las respuestas

Para asignar el valor de madurez que representa cada posible respuesta de la encuesta, fueron tomados en consideración los niveles de madurez propuestos por el *CMMI Institute* en el modelo CMMI 2.0 (ver Figura 2.15). Esto permitió definir objetivamente a qué niveles de madurez apunta cada posible respuesta. A continuación, en la Tabla 4.4, se realiza un ejemplo del procedimiento llevado a cabo para relacionar niveles de madurez a las posibles respuestas de la pregunta DIR-CIB-PRO1_P1. En la tercera columna (Nivel de madurez otorgado) se puede apreciar el nivel de madurez considerado para cada posible respuesta, luego se observa en la cuarta columna (CMMI 2.0) la descripción que provee el *CMMI Institute* para el nivel de madurez previamente otorgado a la respuesta. Posteriormente, en la quinta columna (Justificación), se realiza una breve relación entre la respuesta y los criterios provistos por el modelo CMMI 2.0. De esta manera, con base en la descripción que provee el *CMMI Institute* (2018), se justificaron los niveles de madurez otorgados a todas las posibles respuestas de preguntas cerradas del instrumento elaborado. Estos niveles de madurez pueden ser consultados en el Anexo 1 del presente documento.

Tabla 4.4.

Justificación del otorgamiento de niveles de madurez a posibles respuestas de encuesta

DIR-CIB-PRO1_P1	¿CÓMO GARANTIZA LA COMPAÑÍA LA SEGURIDAD DE LOS DATOS?	NIVEL DE MADUREZ OTORGADO	CMMI 2.0	JUSTIFICACIÓN
RPTA. 1	El concepto de seguridad informática de la compañía se ajusta rápidamente a los nuevos riesgos. Brechas de seguridad son identificadas y corregidas inmediatamente. Además, los procesos de cifrado y autenticación se encuentran implementados y optimizados en toda la compañía y cadena de suministro.	5	En Optimización -Los <u>procesos son estables y flexibles</u> . -La organización se encuentra en constante <u>mejora continua</u> , es abierta al cambio, y provee espacios para la innovación.	El concepto de seguridad informática de la compañía se ajusta rápidamente a los nuevos riesgos. Brechas de seguridad son identificadas y corregidas inmediatamente (<u>Procesos estables y flexibles</u>). Además, los procesos de cifrado y autenticación se encuentran implementados y optimizados en toda la compañía y cadena de suministro. (<u>Mejora continua</u>).
RPTA. 2	Se cuenta con una extensa protección de acceso para los datos y dispositivos. Además, se trabaja con los proveedores de servicios en la nube para, en conjunto, desarrollar nuevos conceptos de seguridad (ejemplo: sistemas de control de acceso basados en roles, etc.).	4	Gestionado Cuantitativamente - <u>Procesos medidos y controlados</u> . -La forma de operar de la organización está basada en los datos (<i>data-driven</i>) y se alinea a las necesidades de sus partes interesadas (<i>stakeholders</i>).	Se cuenta con una extensa protección de acceso para los datos y dispositivos (<u>Procesos medidos y controlados</u>). Además, se trabaja con los proveedores de servicios en la nube para, en conjunto, desarrollar nuevos conceptos de seguridad (ejemplo: sistemas de control de acceso basados en roles, etc.). (<u>Procesos medidos y controlados</u>).
RPTA. 3	Los dispositivos de la compañía cuentan con mecanismos de protección de datos. Procesos de cifrado y autenticación se encuentran implementados en toda la empresa.	3	Definido -Los <u>estándares definidos</u> por la organización proporcionan orientación al proceso y sus subprocesos relacionados. -Anticipación como acción preventiva en contraposición a acciones reactivas.	Los dispositivos de la compañía cuentan con mecanismos de protección de datos. Procesos de cifrado y autenticación se encuentran implementados en toda la empresa (<u>Estándares definidos</u>).
RPTA. 4	Se utilizan mecanismos clásicos de protección tales como cortafuegos, VPN, SSL/TPS, entre otros.	1	Inicial - <u>Demandas satisfechas</u> , pero usualmente con retrasos y sobrecostos. -Resultados impredecibles y acciones reactivas.	Se utilizan mecanismos clásicos de protección tales como cortafuegos, VPN, SSL/TPS, entre otros. (<u>Demanda de seguridad básica satisfecha</u>).
RPTA. 5	La compañía no posee un concepto definido de seguridad informática y/o protección de datos, la seguridad de la información no está garantizada.	0	Incompleto -Procesos ad hoc. - <u>Demandas internas/externas insatisfechas</u> .	La compañía no posee un concepto definido de seguridad informática y/o protección de datos, la seguridad de la información no está garantizada (<u>Demanda de seguridad básica insatisfecha</u>).

Fuente: elaboración propia

La encuesta elaborada puede ser consultada accediendo al siguiente enlace: <https://forms.gle/mXzurTEaNAmHuF9Z6>. Así mismo, puede ser consultada en el Anexo 1 del presente documento. En la siguiente sección se mostrarán los resultados de la aplicación del modelo de evaluación de madurez a la empresa manufacturera previamente descrita en la sección 3.1.4 (*ver pág. 75*), cuyo nombre, debido a acuerdos de confidencialidad, se ha denominado como “ABC Company”.

4.4. Aplicación y validación del modelo

4.4.1. Aplicación del modelo

Para la aplicación del modelo propuesto se realizó en ABC Company una explicación del modelo construido ante representantes del área encargada de la implementación de Industria 4.0. En dicha explicación se expuso la estructura del modelo y la relación que sus elementos, subelementos y dimensiones de madurez poseen con respecto a los principios de Industria 4.0. Así mismo, se resaltaron objetivamente los aspectos calificados por el modelo y la manera en cómo se debe responder la encuesta de recolección de la información e interpretar los resultados. En dicha área encargada de la implementación de Industria 4.0 en ABC Company, se seleccionaron dos voluntarios para ser los auditores internos de la empresa, los cuales fueron los encargados de diligenciar la encuesta. Esto, teniendo en cuenta que los auditores manifestaron tener un grado equiparable de conocimiento de Industria 4.0 y un conocimiento general suficiente de la organización para poder desarrollar la actividad de evaluación. Así mismo, se recalcó que en caso de poseer dudas sobre la calificación de una pregunta se debe ir al área relacionada con la pregunta para así recabar información confiable y verificable desde fuentes primarias.

El proceso de evaluación fue llevado a cabo en mismo tiempo y espacio por los dos auditores. Adicionalmente, la comunicación entre auditores fue permitida. Sin embargo, cada auditor fue libre de discrepar de la calificación del otro. Este proceso de evaluación culminó con el envío del formulario web alojado en Google Forms y tomó aproximadamente 45 minutos de comienzo a fin. Luego de finalizado el formulario, se pactó un tiempo de entrega de resultados menor o igual a 20

días. Los resultados del modelo de evaluación de madurez construido y aplicado en ABC Company son mostrados en la sección 4.4.2.

4.4.2. Resultados del modelo

A continuación, se muestran los resultados de evaluación de madurez de Industria 4.0 obtenidos para ABC Company desde lo general a lo específico. Es decir, desde las dimensiones de madurez hasta los elementos de madurez. Se presentan simultáneamente los resultados obtenidos por los dos auditores, los cuales han sido identificados como Auditor A y Auditor B. Así mismo, se presenta la calificación global de madurez obtenida producto del proceso de ponderación previamente expuesto en la sección 4.2.1.

4.4.2.1. Aspectos generales

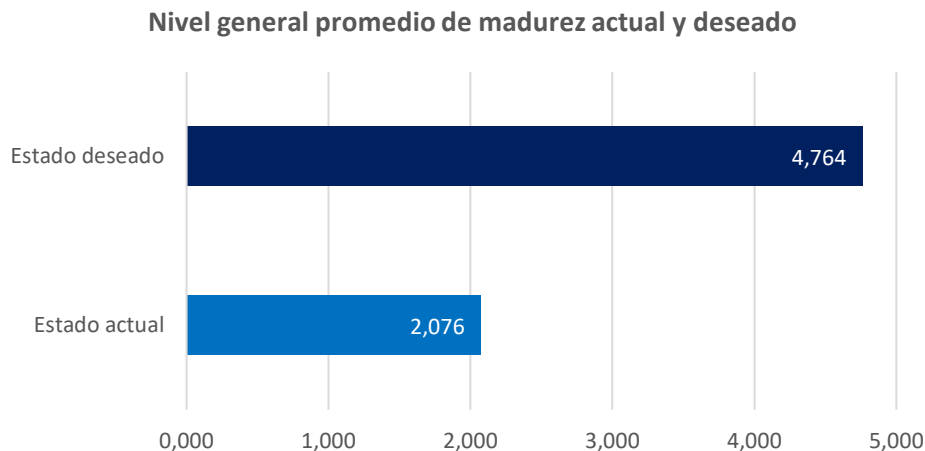


Figura 4.8. Nivel general promedio de madurez actual y deseado

Fuente: elaboración propia.

Como es posible apreciar en la Figura 4.8, el nivel actual de madurez calculado para ABC Company fue 2.076. Esto coloca a la empresa en la categoría “Gestionado”¹⁰. En este nivel, los esfuerzos por integrar Industria 4.0 dentro de la empresa poseen un enfoque de proyectos. Es decir, las acciones de implementación son planificadas, medidas, controladas y mejoradas. El equipo de

¹⁰ Ver Categorías de madurez en sección 4.2.2.

trabajo comienza a tener ciertos conocimientos sobre las buenas prácticas de Industria 4.0 y se comienzan a producir resultados controlados y replicables. En este nivel de madurez, las prácticas llevadas a cabo para incluir Industria 4.0 se mantienen aún en tiempos de crisis.

Sin embargo, Industria 4.0 aún no se encuentra totalmente incluida dentro de los lineamientos institucionales que rigen la misión, visión y políticas de la empresa. Adicionalmente, el direccionamiento estratégico no juega aún un papel fundamental en el logro de los objetivos y la concientización de la importancia de incluir Industria 4.0 en la compañía. Así mismo, los objetivos que la empresa tiene en torno a Industria 4.0 son claros para los equipos de trabajo de áreas claves definidas; pero no para toda la organización.

Así mismo, no se tiene un alto grado de conectividad en la organización. Los datos recabados no se transforman aún en beneficios tangibles, lo cual puede deberse a que los esfuerzos por incluir esta filosofía organizacional son recientes y/o no se ha realizado un correcto aprovechamiento de estos datos. Se debe trabajar especialmente en este aspecto para avanzar así hacia un mayor nivel de madurez. En la Figura 4.9 es posible apreciar los niveles generales de madurez obtenidos con base a las calificaciones individuales de cada auditor.

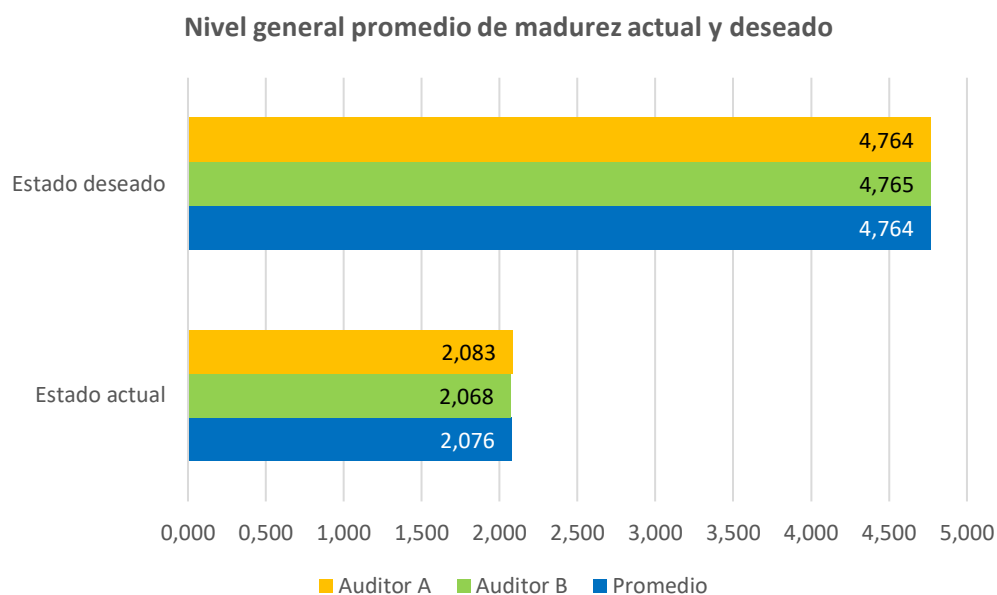


Figura 4.9. Nivel general de madurez actual y deseado – Auditores A y B

Fuente: elaboración propia.

En cuanto al nivel de madurez deseado, se obtuvo una calificación general de madurez deseada de 4.764, lo cual ubica a la compañía en la categoría de madurez “En optimización”. En esta categoría se encuentran las compañías que han llegado a su más alto grado de inserción de Industria 4.0, lo cual representa una correcta y completa implementación de la mayoría de los principios de Industria 4.0. En este tipo de compañías, se observan procesos de implementación de Industria 4.0 planificados, medidos, controlados y mejorados. Todo el recurso humano se encuentra empoderado y capacitado en torno a Industria 4.0 en la medida de lo necesario dependiendo los distintos cargos que existan. Los resultados son controlados y replicables y los esfuerzos por continuar implementando esta filosofía se mantienen aún en tiempos de crisis.

En términos de conectividad, compañías situadas en esta categoría obtienen grandes recompensas en términos de eficiencia y competitividad gracias al proceso de recolección y análisis de datos. Así mismo, dichas compañías poseen un alto grado de integración vertical y horizontal que se refleja en mayores niveles de sinergia y descentralización gracias a la inclusión de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) en distintos procesos organizacionales. Así mismo, los eslabones de la cadena de suministro se ven entre sí como socios que trabajan en pro de un único objetivo: la satisfacción al cliente.

Adicionalmente, Industria 4.0 se encuentra incluida dentro de los lineamientos institucionales que rigen la misión, visión y políticas de la empresa. El direccionamiento estratégico juega un papel fundamental en el logro de los objetivos y el empoderamiento de las personas de las diferentes áreas que integran la compañía. Así mismo, los objetivos de Industria 4.0 son claros para toda la organización y esta es capaz de mejorar continuamente los procesos referentes a la inclusión de Industria 4.0 y estar a la vanguardia de las últimas tendencias y vertientes de dicha filosofía gracias a una estructura organizacional abierta al cambio y que genera espacios para la innovación, la investigación y el desarrollo.

Por otra parte, en cuanto a las calificaciones obtenidas en las dimensiones de madurez, la Figura 4.10 representa el estado actual y deseado de madurez de la compañía a lo largo de las 4 dimensiones evaluadas. Cabe resaltar que debido a que fueron dos auditores los que evaluaron la compañía, los resultados que se muestran a partir de este punto se diferencian con la terminación

“A” para el primer auditor y “B” para el segundo auditor. El resumen de todas las calificaciones obtenidas en cada componente del modelo puede ser encontrado en las Tablas 4.5, 4.6 y 4.7. Así mismo, se muestra en dichas tablas la calificación oficial (promedio) del respectivo componente de modelo evaluado.

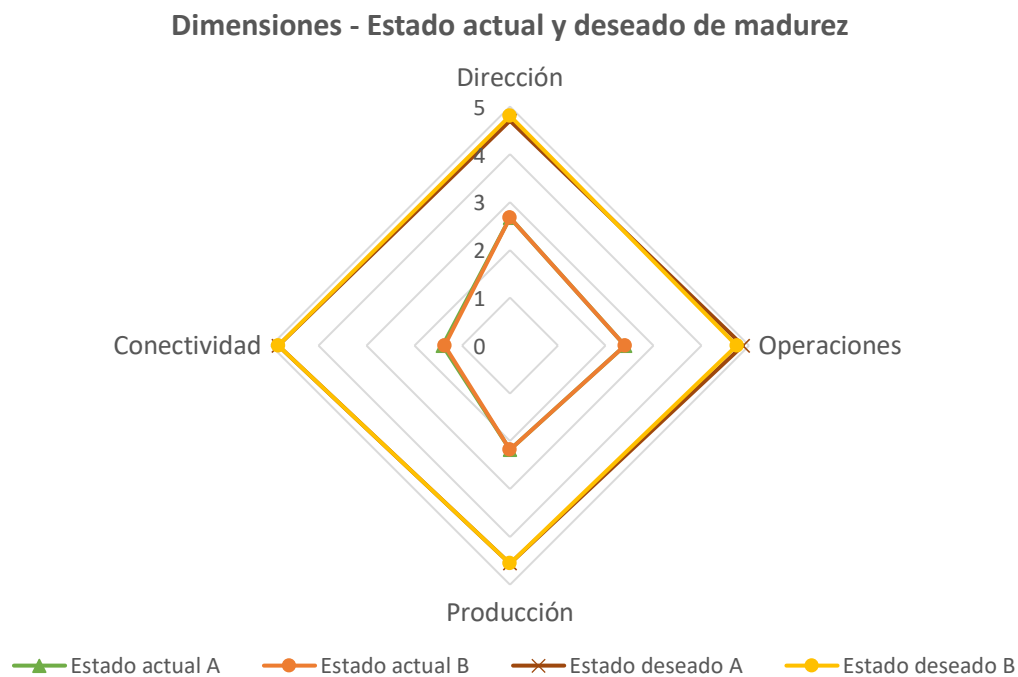


Figura 4.10. Madurez de las dimensiones evaluadas – Auditores A y B

Fuente: elaboración propia.

De las calificaciones obtenidas en las dimensiones Dirección, Operaciones y Producción con respecto al estado actual, se observa que estas corresponden al nivel general de madurez obtenido, cuya interpretación ya fue dada en párrafos anteriores. Sin embargo, cabe resaltar que la dimensión con más peso (Conectividad), se encuentra en un nivel de madurez Inicial. Las causas de que esta dimensión posea un nivel de madurez más bajo obedecen a la poca integración vertical y horizontal que posee actualmente la compañía. En cuanto a las calificaciones del estado deseado de madurez de la compañía, estas son coherentes con la categoría general de madurez deseada “En optimización”, la cual fue explicada igualmente en párrafos anteriores de esta sección.

En términos de las subdimensiones de madurez, se aprecia en la Figura 4.11 que la subdimensión Enfoque de datos, con una calificación de 3.12, superó el nivel general de madurez obtenido por la compañía. Esto se debe a la alta tasa de recopilación de datos que posee la compañía (más del 90% en las operaciones clave definidas por la compañía) y al uso de estos datos como apoyo para la toma de decisiones. En contraste, la subdimensión Integración horizontal obtuvo un nivel promedio de madurez de 0.986, lo cual refleja una baja interconexión y descentralización de la información en los procesos a nivel de los eslabones de la cadena de suministros.

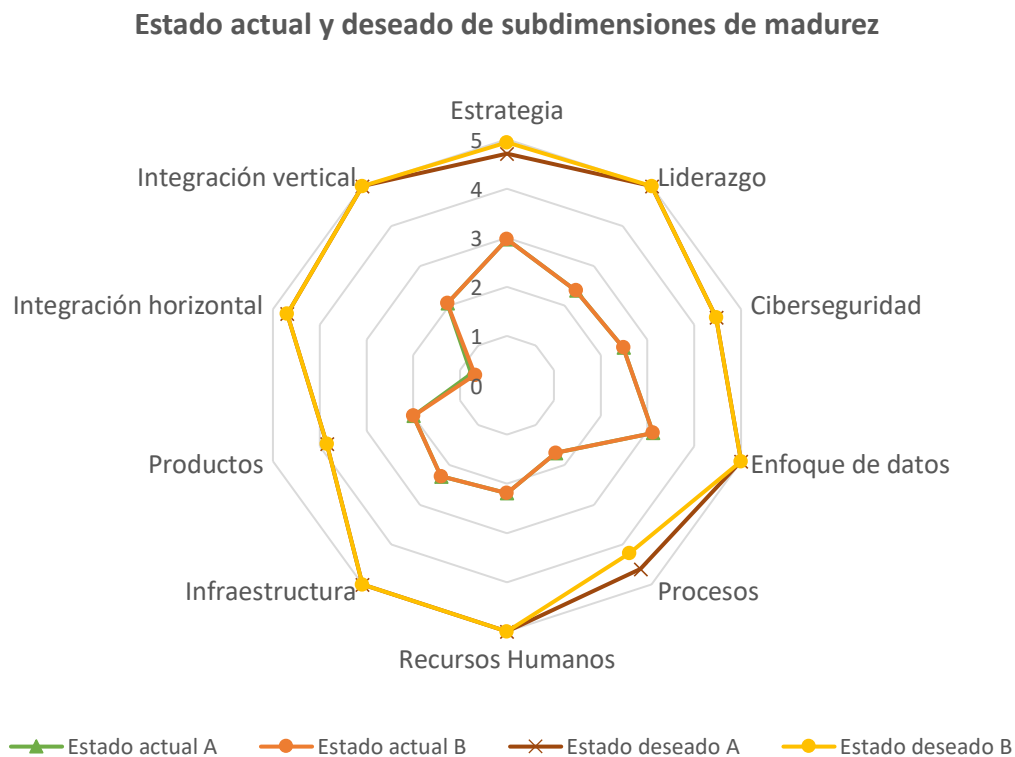


Figura 4.11. Madurez de las subdimensiones evaluadas – Auditores A y B

Fuente: elaboración propia.

En lo referente al estado deseado de las subdimensiones de madurez, las respectivas calificaciones se muestran igualmente coherentes con la categoría general de madurez deseada “En optimización”. Sin embargo, la subdimensión Productos mostró tener un nivel deseado de madurez de 3.846, lo cual ubica a esta dimensión en la categoría Definida. Esto es el reflejo de la necesidad de la compañía de ofrecer productos altamente personalizables, lo cual fue manifestado

en la encuesta y es una muestra de la capacidad del presente modelo de permitir que las compañías puedan definir su propio estado deseado de Industria 4.0 acorde a sus necesidades reales.

A continuación, se muestran en las Tablas 4.5, 4.6 y 4.7 las calificaciones obtenidas en ABC Company para cada componente del presente modelo. Esto, teniendo en consideración las calificaciones obtenidas por cada auditor y los respectivos promedios de estas calificaciones. Adicionalmente, dado que el resultado de dimensiones y subdimensiones son información agregada, más detalles sobre las calificaciones obtenidas son presentados en la sección 4.4.2.2.

Tabla 4.5.

Resumen de resultados para dimensiones de madurez

Dimensión	Calif. Dim. Aud. A¹¹	Calif. Dim. Aud. B¹²	Prom.¹³	Calif. Dim. E.D. Aud. A¹⁴	Calif. Dim. E.D. Aud. B¹⁵	Prom.
Dirección	2,676	2,676	2,676	4,704	4,806	4,755
Operaciones	2,404	2,404	2,404	4,870	4,741	4,806
Producción	2,176	2,176	2,176	4,559	4,559	4,559
Conectividad	1,409	1,367	1,388	4,846	4,846	4,846

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.6.

Resumen de resultados para subdimensiones de madurez

Subdimensiones	Calif. Subdim. Aud. A	Calif. Subdim. Aud. B	Prom.	Calif. Subdim. E.D. Aud. A	Calif. Subdim. E.D. Aud. B	Prom.
Estrategia	2,969	2,969	2,969	4,708	4,938	4,823
Liderazgo	2,385	2,385	2,385	5,000	5,000	5,000
Ciberseguridad	2,485	2,485	2,485	4,471	4,471	4,471
Enfoque de datos	3,121	3,121	3,121	5,000	5,000	5,000

¹¹ Calificación de dimensión por Auditor A.

¹² Calificación de dimensión por Auditor B.

¹³ Promedio simple.

¹⁴ Calificación de estado deseado (E.D.) de dimensión por Auditor A.

¹⁵ Calificación de estado deseado (E.D.) de dimensión por Auditor B.

Continuación de Tabla 4.6. Resumen de resultados para subdimensiones de madurez

Subdimensiones	Calif.	Calif.	Prom.	Calif.	Calif.	Prom.
	Subdim.	Subdim.		Subdim.	Subdim.	
	Aud. A	Aud. B		E.D. Aud. A	E.D. Aud. B	
Procesos	1,694	1,694	1,694	4,611	4,222	4,417
Recursos Humanos	2,190	2,190	2,190	5,000	5,000	5,000
Infraestructura	2,286	2,286	2,286	5,000	5,000	5,000
Productos	2,000	2,000	2,000	3,846	3,846	3,846
Integración horizontal	0,763	0,680	0,708	4,694	4,694	4,694
Integración vertical	2,063	2,063	2,063	5,000	5,000	5,000

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.7.

Resumen de resultados para elementos de madurez

Elementos de madurez	Calif.	Calif.	Prom.	Calif.	Calif. Elem.	Prom.
	Elem.	Elem.		Elem. E.D.	E.D. Aud.	
	Aud. A	Aud. B		Aud. A	B	
<i>Adaptación hacia un modelo de negocio de I4.0</i>	2,5	2,5	2,50	5	5	5,00
<i>Apertura a la innovación</i>	3	3	3,00	4,75	4,75	4,75
<i>Inversiones estratégicas</i>	4	4	4,00	4	5	4,50
<i>Competencias de los líderes frente a I4.0</i>	2	2	2,00	5	5	5,00
<i>Estilo de liderazgo</i>	3	3	3,00	5	5	5,00
<i>Protección de datos</i>	2,5	2,5	2,50	5	5	5,00
<i>Protección a la propiedad intelectual</i>	3	3	3,00	3	3	3,00
<i>Modelos de contrato</i>	2	2	2,00	5	5	5,00
<i>Recopilación de datos</i>	5	5	5,00	5	5	5,00
<i>Aprendizaje y toma de decisiones basada en datos</i>	3	3	3,00	5	5	5,00
<i>Uso efectivo de datos</i>	1	1	1,00	5	5	5,00

Elementos de madurez	Calif. Elem. Aud. A	Calif. Elem. Aud. B	Prom.	Calif. Elem. E.D. Aud. A	Calif. Elem. E.D. Aud. B	Prom.
<i>Descentralización</i>	0,75	0,75	0,75	4,5	4	4,25
<i>Canales de mercadeo integrados</i>	5	5	5,00	5	5	5,00
<i>Competencias frente a Industria 4.0</i>	1	1	1,00	5	5	5,00
<i>Apertura hacia el cambio y nuevas tecnologías</i>	5	5	5,00	5	5	5,00
<i>Desarrollo profesional continuo</i>	1	1	1,00	5	5	5,00
<i>Autonomía</i>	2	2	2,00	5	5	5,00
<i>Infraestructura tecnológica</i>	1,5	1,5	1,50	5	5	5,00
<i>Interfaces de datos estandarizadas</i>	1	1	1,00	5	5	5,00
<i>Integración sistémica M2M</i>	4	4	4,00	5	5	5,00
<i>Flexibilidad y Modularidad</i>	3	3	3,00	5	5	5,00
<i>Personalización de productos</i>	2	2	2,00	3	3	3,00
<i>Productos inteligentes</i>	2	2	2,00	5	5	5,00
<i>Cadena Digital de Suministros</i>	0,03	0	0,02	5	5	5,00
<i>Visibilidad y Flexibilidad de la Cadena de Suministro</i>	3	2,5	2,75	5	5	5,00
<i>Beneficios reales de la cooperación entre eslabones</i>	1	1	1,00	5	5	5,00
<i>Integración de sucursales con Cadena de Suministro</i>	0,03	0	0,02	3	3	3,00
<i>Integración entre áreas de negocio</i>	1,5	1,5	1,50	5	5	5,00

Continuación de Tabla 4.7. Resumen de resultados para elementos de madurez

Elementos de madurez	Calif.	Calif.	Prom.	Calif.	Calif. Elem.	Prom.
	Elem.	Elem.		Elem. E.D.	E.D. Aud.	
	Aud. A	Aud. B		Aud. A	B	
<i>Beneficios de la cooperación entre áreas de negocio</i>	3	3	3,00	5	5	5,00
<i>Integración con sucursales</i>	2	2	2,00	5	5	5,00

Fuente: elaboración propia.

4.4.2.2. Dirección: aspectos específicos y recomendaciones

Las siguientes cuatro secciones presentan las calificaciones obtenidas por ABC Company en los diferentes elementos de madurez de cada dimensión contemplada en el presente modelo. Así mismo, recomendaciones a partir de estas calificaciones y demás hallazgos relevantes encontrados son realizados. Al igual que en la sección pasada, calificaciones con leyendas terminadas en “A” representan las calificaciones del auditor A y aquellas terminadas en “B”, las del auditor B. Adicionalmente, los nombres de los respectivos elementos en cuestión son colocados en negritas para una mejor identificación. A continuación, se presentan en la Figura 4.12 los resultados obtenidos por ABC Company en los elementos de madurez evaluados en la dimensión “Dirección”.

Madurez de elementos - Dimensión: Dirección

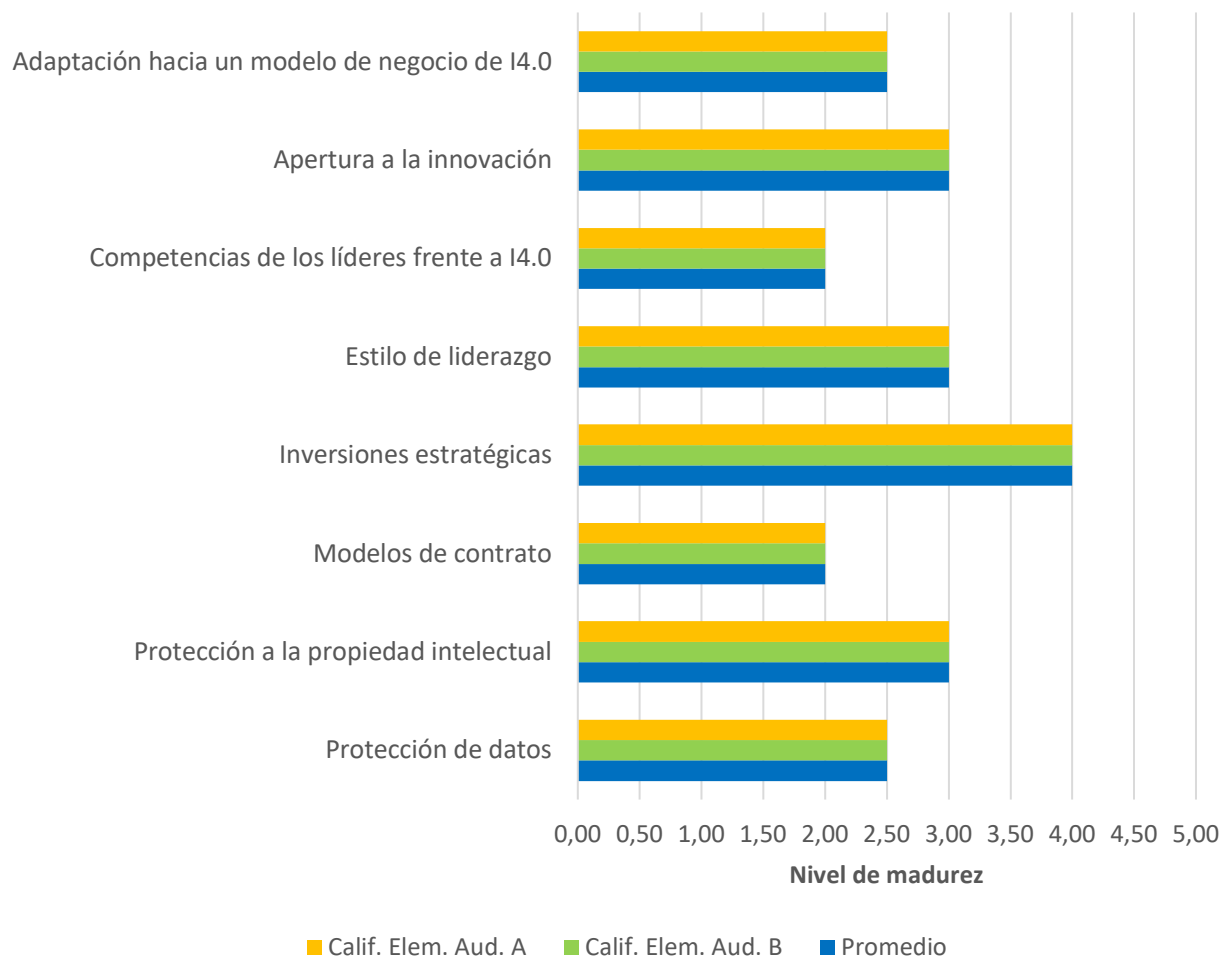


Figura 4.12. Madurez de elementos evaluados en dimensión 'Dirección'

Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la **adaptación de un modelo de negocio de Industria 4.0**, se pudo observar que ABC Company y algunas de sus sucursales poseen una estrategia orientada hacia Industria 4.0 y que proyectos piloto de Industria 4.0 están siendo implementados en varios departamentos de la empresa y en sucursales. Sin embargo, una estrategia holística para implementar Industria 4.0 no ha sido definida e introducida en toda la compañía. Se recomienda a ABC Company incluir Industria 4.0 dentro de su estrategia corporativa para propiciar así una implementación más eficaz de esta filosofía.

Se constató igualmente para este elemento, que han sido creadas métricas en torno a la implementación y el efecto que Industria 4.0 tiene en la compañía. Sin embargo, estas métricas no son tenidas en cuenta para promover acciones de mejora al proceso de implementación. Dado que el control y seguimiento de estas métricas impacta positivamente en los objetivos de Industria 4.0 trazados por ABC Company, se recomienda tomar en consideración estas métricas para promover acciones de mejora al proceso de implementación de Industria 4.0 en la compañía. Así mismo, dado que los auditores manifestaron que la compañía posee una estructura organizacional poco flexible, se recomienda trabajar en este aspecto para lograr una estructura organizacional flexible que permita agilizar procesos e incentivar la innovación y propuestas de mejora en la empresa.

En cuanto a la **apertura a la innovación**, se recomienda a la compañía seguir manteniendo la alta disposición a innovar que actualmente poseen la mayoría de las áreas empresariales. Así como también, la cultura de retroalimentación instaurada en la compañía. Por otra parte, ABC Company debe trabajar en considerar los fallos de los trabajadores de la misma manera independientemente de la persona o grupo de personas que los hayan ocasionado. Esto permitirá afianzar la confianza en los equipos de trabajo e incentivar la creatividad y capacidad innovadora de estos.

En cuanto a las **competencias de los líderes frente a Industria 4.0**, fue constatado por medio de los auditores que sólo algunos de los líderes de la compañía reconocen el valor de invertir esfuerzos en Industria 4.0. Para la implementación de este tipo de filosofía dentro de la empresa es importante que todos los líderes posean por lo menos conocimientos básicos en TICs y reconozcan el valor de invertir esfuerzos en Industria 4.0. De esta manera, sus equipos de trabajo tenderán a sentirse más empoderados hacia el cumplimiento de los objetivos.

En lo referente al **estilo de liderazgo**, se constató que los líderes de ABC Company emplean un estilo de liderazgo participativo, apoyando activamente a sus equipos de trabajo al logro de las metas propuestas. No obstante, para llegar al nivel de madurez deseado para este elemento, los líderes deben verse a sí mismos como entrenadores y compañeros de aprendizaje, empleando un estilo de liderazgo participativo y transformacional. Con esto, se propicia aún más el desarrollo continuo de las competencias en los trabajadores (Helming, Ungermann, Hierath, Stricker, & Lanza, 2019).

Por otra parte, dado que la compañía realiza inversiones en Industria 4.0 llevando a cabo primeramente análisis financieros para determinar la pertinencia y prioridad de los proyectos a implementar, y ha dispuesto recursos financieros para las áreas de negocio consideradas como "prioritarias", el elemento **inversiones estratégicas** mostró ser el más alto dentro de su respectiva dimensión. En este elemento se observa un importante comprometimiento financiero de la compañía frente a Industria 4.0. Se recomienda a ABC Company realizar un seguimiento detallado a estas inversiones y comparar la tasa de retorno estimada con la tasa de retorno real en el corto, mediano y largo plazo a fin de hacer más precisas futuras estimaciones financieras.

En términos de ciberseguridad, se observó que los **modelos de contrato** han tenido algunos cambios para incluir dichos aspectos de seguridad cibernética. Sin embargo, estos cambios no se han extendido a los modelos de contrato de todas las áreas relacionadas con ciberseguridad en ABC Company. Para proteger los datos y la propiedad intelectual de la empresa, este es un aspecto que requiere un atendimento prioritario. Se recomienda a la compañía que además de la anterior extensión de modelos de contratos expuesta, dichos modelos sean actualizados periódicamente en función de la legislación nacional e internacional vigente aplicable y los nuevos riesgos y amenazas que se vayan presentando en términos de ciberseguridad.

Siguiendo con aspectos de ciberseguridad, se constató que la **propiedad intelectual** de los productos y servicios ofrecidos por la compañía, así como la legislación nacional e internacional vigente aplicable, se encuentran identificadas y protegidas por políticas internas. Sin embargo, no se cuenta con un plan de actualización de dichas políticas en función de los cambios normativos y las dinámicas del sector automotivo. En este caso, se realiza la misma recomendación del párrafo anterior.

En cuanto a la **protección de datos**, se evidenció que la compañía cuenta con mecanismos de protección como procesos de cifrado y autenticación para sus dispositivos. No obstante, se sugiere a la empresa prestar especial atención a protocolos de seguridad para sus datos almacenados en la nube y trabajar con los proveedores de estos servicios de nube para, en conjunto, desarrollar altos niveles de protección de la información. Esto último fue un aspecto que no fue marcado por los auditores dentro del estado deseado, y sobre el cual se recomienda prestar mayor atención dada la

importancia que posee la seguridad en una *Smart Factory* del tipo de madurez general que la empresa desea alcanzar. La Figura 4.15 resume el estado actual de madurez y el estado deseado (E.D.) de madurez de los elementos de la dimensión en cuestión.

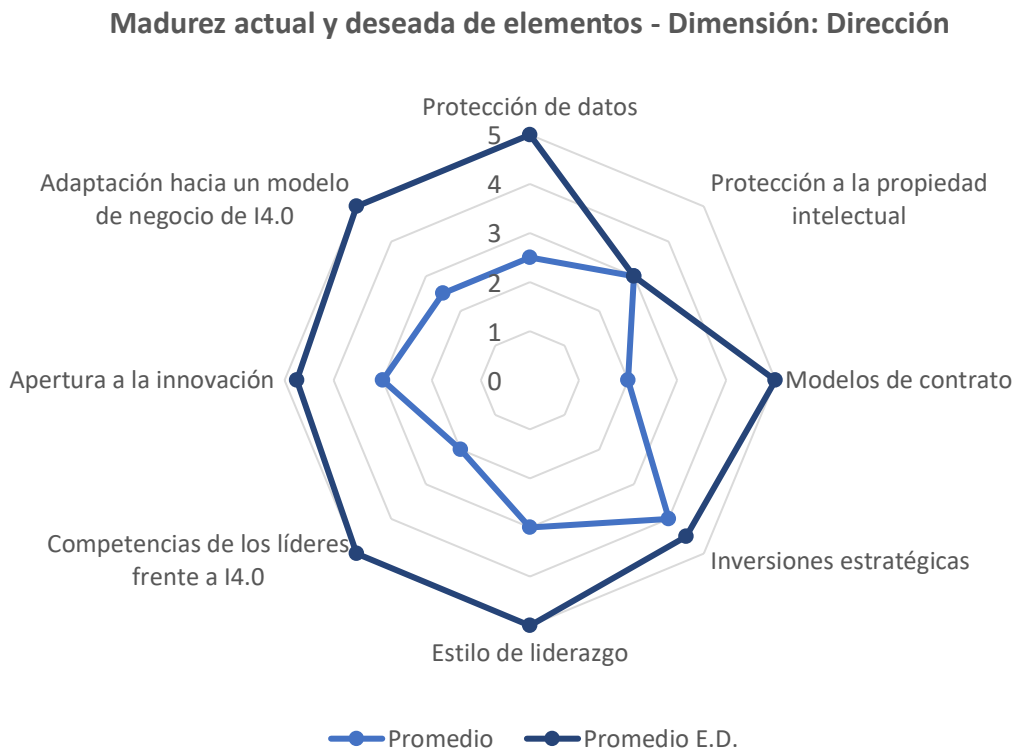


Figura 4.13. Madurez actual y deseada de elementos de dimensión 'Dirección'

Fuente: elaboración propia.

4.4.2.3. Operaciones: aspectos específicos y recomendaciones

Los elementos de madurez de la dimensión Operaciones mostraron tener un comportamiento menos equilibrado en comparación con los elementos de la dimensión Dirección. En la Figura 4.14 es posible observar elementos con altos niveles de madurez y otros con niveles de madurez que no alcanzan una calificación de 1. Esta situación es explicada en los siguientes párrafos tomando en consideración las particularidades de ABC Company.

Madurez de elementos - Dimensión: Operaciones

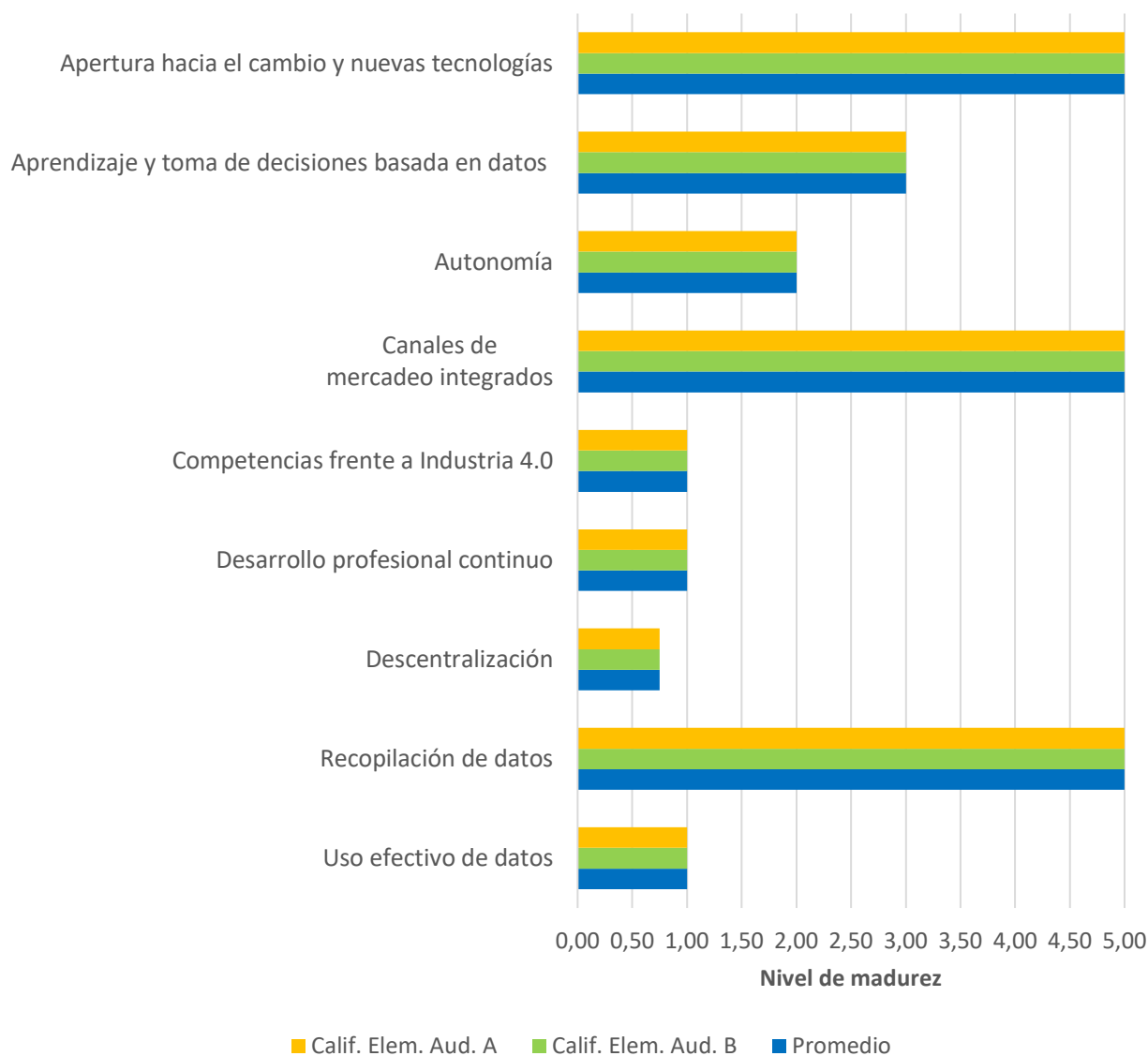


Figura 4.14. Madurez de elementos evaluados en dimensión 'Operaciones'

Fuente: elaboración propia.

En lo referente a los elementos de madurez de la subdimensión Recursos Humanos, se observó que la empresa posee el máximo nivel de **apertura hacia el cambio y nuevas tecnologías**. Esto, debido a que los auditores manifestaron que el recurso humano de la compañía no posee resistencia al cambio alguna que dificulte la inclusión de nuevas tecnologías en las operaciones. Además, se manifestó que los empleados, en general, se encuentran dispuestos a aprender conceptos nuevos y a aplicarlos en sus entornos de trabajo.

Sin embargo, las ventajas de esta apertura al cambio no están siendo aprovechadas para potenciar las **competencias del recurso humano de la compañía frente a Industria 4.0**. Esto, debido a que solamente en algunas áreas de negocio se cuenta con personal competente, por lo menos a un nivel básico, para desarrollar Industria 4.0. Así mismo, se observa falta de competencias en parte del recurso humano perteneciente a las áreas de negocio definidas como prioritarias.

Además de lo anterior, con relación al **desarrollo profesional continuo**, se observa que la compañía sólo informa a sus empleados acerca de los cambios presentes y futuros en términos de Industria 4.0. Además, esta no posee un programa de capacitación para todos sus empleados con el fin de prepararlos y concientizarlos para los nuevos cambios. El mejoramiento de estas falencias, en conjunto con las expuestas en el párrafo anterior, permitirá aprovechar de mejor manera la alta apertura hacia el cambio y nuevas tecnologías que la empresa actualmente posee. Potencializando así, las calificaciones del presente y anterior elemento de madurez.

En lo referente a la **autonomía** de los equipos de trabajo, se observó que los empleados en general poseen cierto grado de autonomía para tomar decisiones. Sin embargo, son parcialmente dependientes de un jefe para tomarlas. Dado el estado deseado que a compañía desea poseer en este aspecto (ver Figura 4.17), se recomienda emplear un enfoque de Equipos Autodirigidos y que al finalizar los proyectos de implementación se realicen análisis autocríticos sobre las decisiones tomadas y los resultados obtenidos. Esto, generalmente, permitirá mejorar progresivamente el desempeño de los equipos de trabajo (Mantilla & García, 2010).

Por otra parte, en relación a la subdimensión Enfoque de datos, se aprecia que se tiene un alto nivel de madurez en el elemento **recopilación de datos** (datos recopilados en más del 90% de las operaciones relevantes). Sin embargo, a pesar de que estos datos son analizados mediante técnicas estadísticas convencionales para apoyar el proceso de **toma de decisiones**, estos parecen estar siendo subutilizados ya que el elemento **uso efectivo de datos** posee un nivel de madurez de categoría Inicial. En este sentido, el enfoque de datos implementado por la compañía no ha permitido aumentar las utilidades a pesar de poseer un alto índice de recopilación de estos. Sin embargo, los auditores expresaron tener proyectados aumentos en las utilidades en el corto-

mediano plazo debido a los esfuerzos actualmente implementados. Se recomienda prestar especial atención a la relación costo-beneficio de los esfuerzos adelantados en esta subdimensión para que no se sobredimensionen esfuerzos puedan resultar en la obtención de datos ociosos.

Finalmente, en la subdimensión Procesos se constató que en el elemento de madurez denominado **descentralización**, el control de la producción es gestionado de manera centralizada y determinística. No involucra análisis de datos y es gestionado por sistemas ERP convencionales. Para lograr llegar a las metas deseadas de la compañía en torno a Industria 4.0, se recomienda implementar sistemas de análisis de datos en tiempo real que permitan tener una alta predictibilidad en los procesos. Esto, con el fin de tener un sistema capaz de sugerir acciones en tiempo real cuyas decisiones finales, tal como lo sugirió la compañía, sean tomadas por humanos.

Así mismo, se constató que la gestión del inventario se realiza mediante datos recolectados manualmente. Dichos datos no se encuentran sincronizados con el sistema de órdenes de los proveedores o, en su defecto, las operaciones de compra de la compañía. Para lograr avanzar en este aspecto hacia el estado deseado manifestado por los auditores, se recomienda que la gestión del inventario se realice mediante una base de datos alimentada en tiempo real por los diversos dispositivos inteligentes proveedores de datos que actualmente la compañía posee. Dicha base de datos debe encontrarse sincronizada con el sistema de órdenes de los proveedores. De esta manera, se logrará descentralizar gran parte de las operaciones básicas de gestión de inventarios.

De igual manera, se recomienda dejar de registrar manualmente el 100% de los estados de los equipos de producción y, gradualmente, dejar de seguir exclusivamente un plan de mantenimiento convencional del tipo prevención/corrección. Esto debido a que, para lograr llegar al estado deseado expresado por los auditores en este aspecto, es preciso que el estado de los equipos sea registrado de manera automática y sean estos datos analizados automáticamente con el fin de realizar, además, mantenimientos predictivos que permitan coadyuvar a una producción con menos contratiempos. Las anteriores recomendaciones permitirán a ABC Company poseer procesos más ágiles y eficientes en términos de descentralización (Ruiz, et al., 2020).

Con respecto a los **canales de mercadeo integrados** de la compañía, se recomienda seguir con las actuales prácticas en donde los mensajes y valores de marca que se emiten en los canales on-line (Facebook, Twitter, YouTube, Página Web, Plataformas de servicio, etc.) son iguales a los emitidos en canales off-line (TV, publicidad impresa, etc.). Además, se posee un buen sistema de gestión de experiencia del cliente con enfoque individualizado que permite dirigir los mensajes idóneos acorde a cada tipo de cliente. Lo anterior refleja el nivel de madurez 5 obtenido por la compañía en este elemento de madurez. La Figura 4.17 resume el estado actual de madurez y el estado deseado (E.D.) de madurez de los elementos de la dimensión en cuestión.

Madurez actual y deseada de elementos - Dimensión: Operaciones

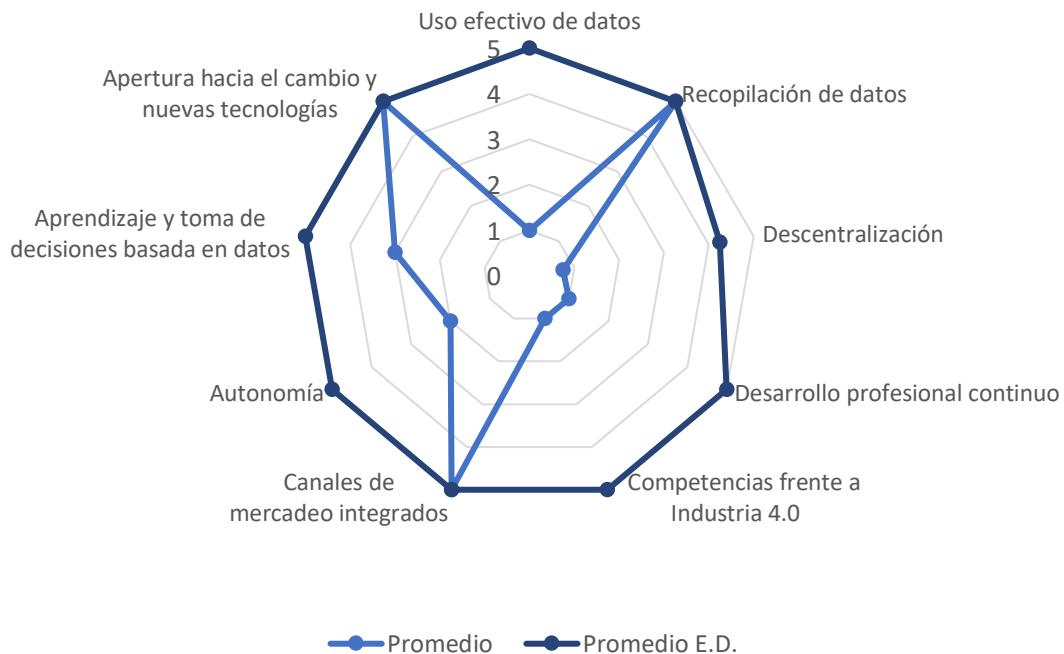


Figura 4.15. Madurez actual y deseada de elementos de dimensión 'Operaciones'

Fuente: elaboración propia.

4.4.2.4. Producción: aspectos específicos y recomendaciones

Los elementos de madurez de esta dimensión tuvieron un comportamiento más estable en comparación con la dimensión 'Operaciones'. En la Figura 4.16 se muestran los respectivos niveles

de madurez obtenidos en la presente dimensión. Seguidamente, se realiza una explicación de cada uno de los resultados obtenidos.

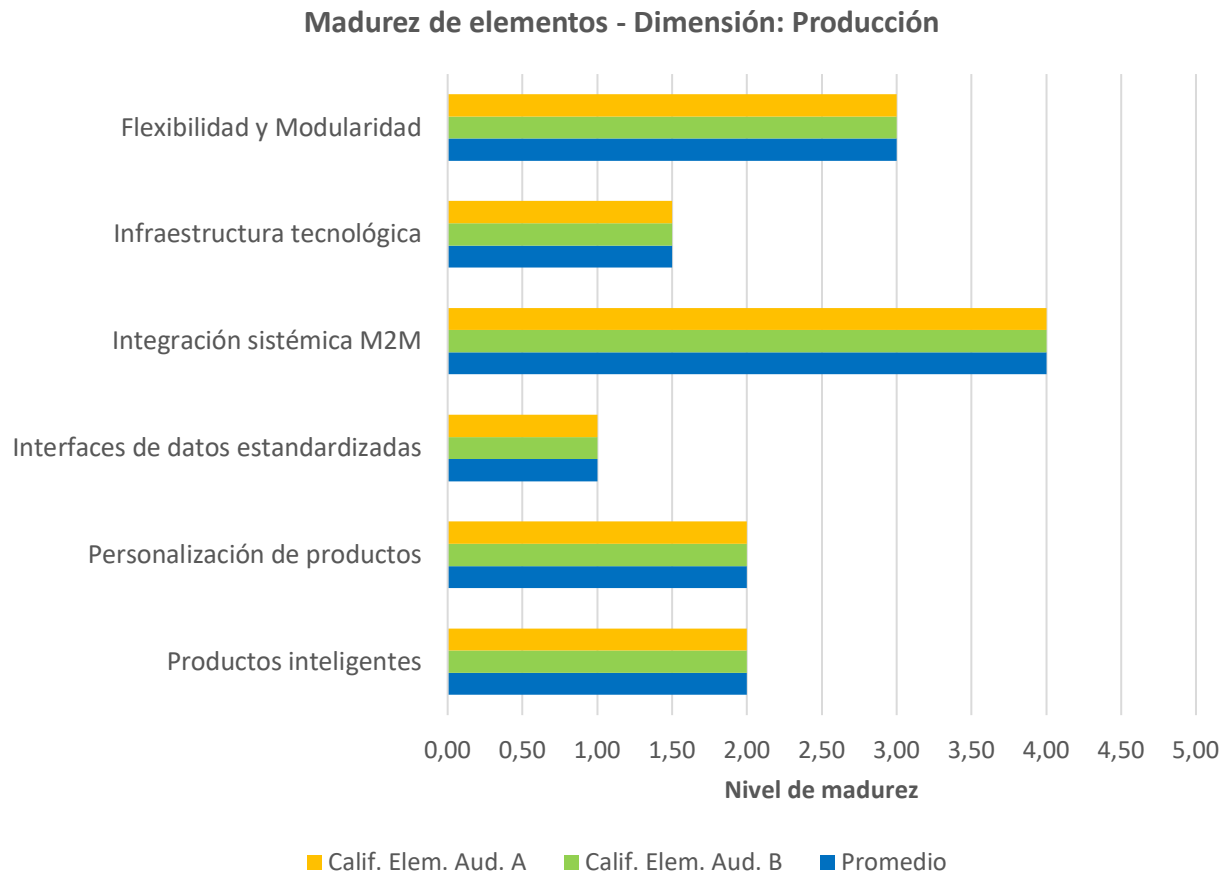


Figura 4.16. Madurez de elementos evaluados en dimensión 'Producción'

Fuente: elaboración propia.

En la subdimensión Infraestructura, el elemento de madurez **infraestructura tecnológica** reflejó que las máquinas y sistemas no cumplen con los requerimientos de Industria 4.0. Sin embargo, las máquinas pueden ser acondicionadas/instrumentadas y los sistemas expandidos. En lo referente a computación en la nube, la compañía ha implementado soluciones piloto sólo en algunas áreas de negocio. Con el fin de alcanzar el nivel de madurez deseado, se recomienda a ABC Company evaluar el uso estratégico de servicios en la nube con el fin de ganar eficiencia a la hora de procesar datos y lograr una disminución en la carga y costos asociados a servidores, instalaciones eléctricas, entre otros.

En cuanto a las **interfaces de datos estándar**, los auditores manifestaron que la compañía no posee interfaces de datos estandarizadas para toda su infraestructura productiva. Sin embargo, máquinas de procesos priorizados han sido instrumentadas con una interfaz estándar que ha permitido conectar estas a una red local centralizada de cómputo. Este último aspecto da a la compañía una alta madurez en el elemento **integración sistémica *Machine to Machine*** (M2M). Por otra parte, en términos de **flexibilidad y modularidad**, los auditores manifestaron que el sistema productivo de la compañía se basa en estructuras modulares de tipo Plug & Produce. Sin embargo, los cambios herramientas y reconfiguraciones de líneas son realizadas por humanos. Para llegar al nivel de madurez deseado, se recomienda a ABC Company hacer uso la tecnología Plug & Produce en conjunto con el concepto de Producto Inteligentes para lograr así cambios automáticos de línea que permitan disminuir los tiempos de cambio de herramienta y configuración de línea.

En la subdimensión Productos, el elemento **productos inteligentes** mostró un nivel de madurez de 2 debido a que los productos de la compañía sólo pueden ser identificados en pocas etapas del proceso productivo, mermando esto la capacidad de descentralización de dicho sistema. Para llegar al nivel de madurez deseado de este elemento (ver Figura 4.19), se recomienda a la compañía almacenar parámetros de producción al interior de los productos mediante dispositivos RFID, códigos QR, e-Kanbans, entre otras alternativas que permitan que los parámetros del proceso productivo y demás instrucciones sean leídas por las máquinas de las respectivas líneas y, mediante un intercambio bidireccional de información, lograr que máquinas y productos puedan intercambiar información que permita hacer más eficientes los procesos y reducir así el *Lead Time* de las órdenes de producción.

Por último, en el elemento **personalización de productos**, se observó que la compañía fabrica sus productos en grandes lotes de producción en donde la personalización está disponible sólo para algunos tipos de clientes. Sin embargo, este parecer ser un aspecto de poco interés para ABC Company debido a que las piezas que fabrican son con base a modelos estándar en donde características visuales tienen poca importancia frente a las características funcionales del producto en términos mecánicos. Esto se ve reflejado en el estado deseado al cual la compañía pretende llegar en este elemento de madurez, el cual puede ser observado igualmente en la Figura 4.19.

Madurez actual y deseada de elementos - Dimensión: Producción

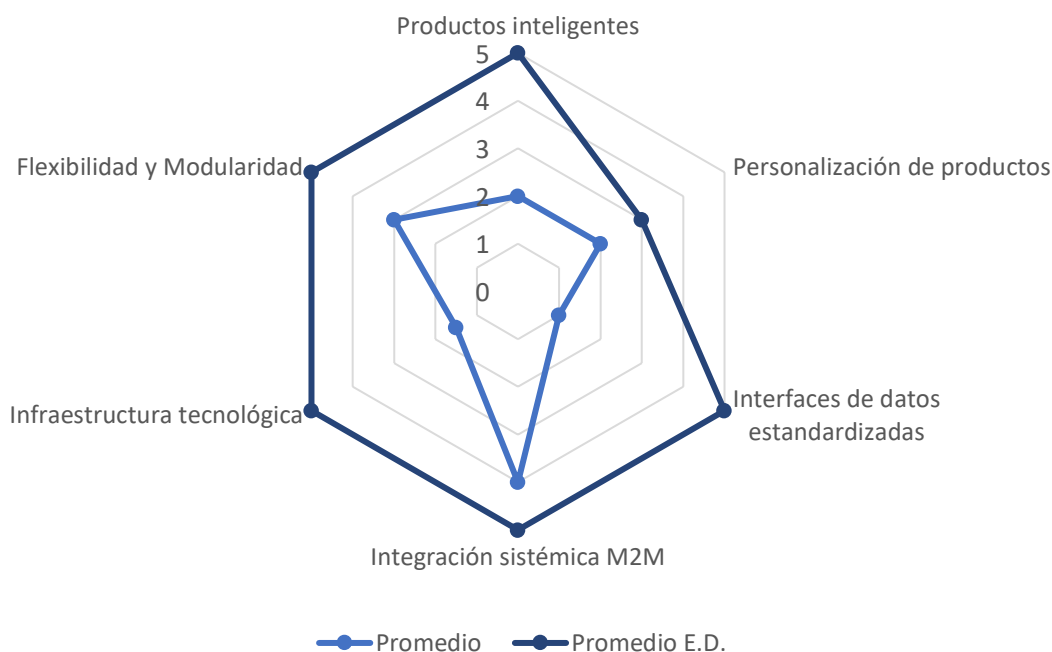


Figura 4.17. Madurez actual y deseada de elementos de dimensión 'Producción'

Fuente: elaboración propia.

4.4.2.5. Conectividad: aspectos específicos y recomendaciones

En esta sección se evaluó el principio de diseño más importante de Industria 4.0: la Conectividad (Interconexión) (Hermann, Pentek, & Otto, 2016) (Kagermann, Wahlster, & Helbig, 2013). Este, en el contexto de Industria 4.0, refiere a la habilidad de máquinas, personas, y sistemas para conectarse y comunicarse entre sí a través del Internet de las Cosas (IoT). Conceptos como integración horizontal (integración de la empresa con los eslabones de la cadena de suministro) e integración vertical (integración de los sistemas TIC a través de los distintos niveles jerárquicos y procesos de áreas de negocio de la compañía) fueron evaluados en esta última sección. La Figura 4.18 muestra la calificación obtenida por ABC Company en los elementos de madurez de la presente dimensión.

Madurez de elementos - Dimensión: Conectividad

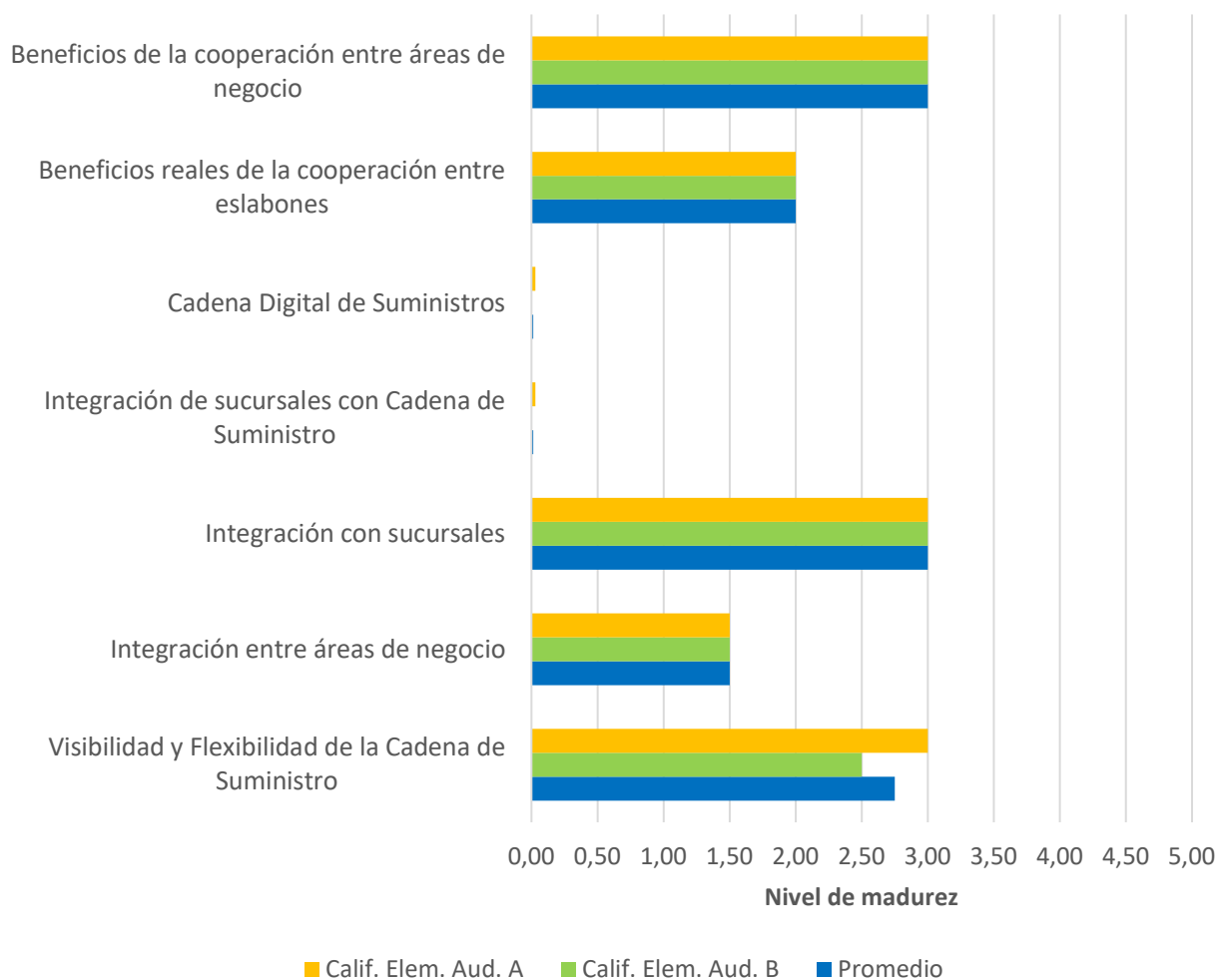


Figura 4.18. Madurez de elementos evaluados en dimensión 'Conectividad'

Fuente: elaboración propia.

En términos de integración horizontal, en el elemento **cadena digital de suministros**, se observó que no existe un flujo de información digital entre las operaciones de los eslabones de la cadena de suministro. Para alcanzar el nivel de integración y descentralización deseado por la compañía, se recomienda que los eslabones de la cadena de suministros de ABC Company compartan información con el objetivo de lograr sinergia en los procesos de la cadena. La interconexión de sistemas de producción entre eslabones permitirá descentralizar gran parte de las operaciones que competen al trabajo conjunto entre eslabones. Lo anterior, permitirá ver a los demás eslabones no como un ente externo, sino como una misma área de negocio propia de la compañía. Esto, a su vez,

permitirá concebir a toda la cadena como un único ente que funciona de manera sincronizada y sinérgica para el cumplimiento de sus objetivos (Tjahjono, Esplugues, Ares, & Pelaez, 2017).

En cuanto a la **visibilidad de la cadena de suministro**, los auditores manifestaron que existe actualmente visibilidad en toda la cadena. Sin embargo, esta visibilidad no es utilizada para la monitorización y optimización de las operaciones de la cadena. En términos de **flexibilidad**, se manifestó que la cadena de suministros posee una respuesta moderada a los cambios del mercado y los cambios de requerimientos individuales de cada cliente. Sin embargo, la cadena no es capaz de brindar una respuesta inmediata a los cambios del mercado y de requerimientos individuales de cada cliente. Así como también, a sucesos extraordinarios e imprevistos del entorno (gestión del riesgo). Dadas las anteriores condiciones, el nivel de madurez del elemento **visibilidad y flexibilidad de la cadena de suministro** fue de 2.75.

En lo referente al elemento **beneficios reales de la cooperación entre eslabones**, se observó que la nula cooperación entre eslabones en términos de cadena digital de suministros no ha permitido que las utilidades de la compañía mejoren producto de esta integración digital. Sin embargo, se tienen proyectados aumentos en las utilidades en el corto-mediano plazo debido a esfuerzos que se encuentran actualmente en fases iniciales de implementación. Esto coloca a este elemento en un nivel de madurez 1 (Inicial) debido a que, aunque se está comenzando a implementar un enfoque de proyectos, aún no se han llevado a cabo acciones completas que permitan dar cuenta de un avance significativo.

Dentro de la subdimensión en cuestión, se encuentra finalmente el elemento **integración de sucursales con cadena de suministro**, el cual posee una calificación de categoría de madurez Incompleta. Esto, debido a que no se han realizado esfuerzos por integrar horizontalmente las sucursales de ABC Company y sus respectivas cadenas de suministro. La anterior situación es coherente con el nivel de madurez obtenido en el elemento Cadena Digital de Suministro, y obedece a que la compañía aún está comenzando a implementar proyectos piloto de cadena digital de suministros en su casa matriz y aún no los extiende hacia sus sucursales.

Por otra parte, en la subdimensión integración vertical, el elemento de madurez **integración entre áreas de negocio**, se observó que las operaciones de la compañía se encuentran conectadas parcialmente con los sistemas TIC (entre el 1% y 24% de las operaciones). Además, se observó que varias áreas de negocio trabajan conjuntamente en determinados proyectos, lo cual permite tener un punto de vista interdisciplinar para abordar problemas. Sin embargo, estos equipos de trabajo en ocasiones no están basados en la cualificación y experiencia de sus integrantes. Además, las áreas de negocio de ABC Company aún no se ven entre ellas como socias que trabajan por un mismo fin: la satisfacción al cliente externo e interno. Debido a lo anterior, el presente elemento de madurez obtuvo una calificación de 1.5. Se recomienda prestar especial atención a las falencias resaltadas en este elemento para potencializar la implementación de Industria 4.0 en la organización.

En cuanto a los **beneficios de la cooperación entre áreas de negocio**, los auditores constataron que la colaboración e integración actualmente existente ha permitido aumentar ligeramente las utilidades y algunos indicadores de gestión. Para aumentar la madurez de este elemento se recomienda a ABC Company trabajar estratégicamente en los aspectos resaltados en términos de integración entre áreas de negocio. Lo anterior, permitirá a futuro aumentar en mayor proporción utilidades y diversos indicadores de gestión que se transforman en beneficios reales y significativos para los clientes, colaboradores, socios y demás partes interesadas (*stakeholders*) (Rüßmann, y otros, 2015).

Finalmente, el elemento **integración con sucursales** obtuvo un nivel de madurez de 2 debido a que se han realizado esfuerzos por integrar las áreas de negocio de la casa matriz con las áreas de negocio de sucursales. Además, estos proyectos poseen un enfoque de proyectos: son planificados, medidos, controlados y mejorados. Para llegar al nivel de madurez deseado por la compañía, se recomienda ajustar dichos proyectos de implementación acorde a las necesidades que cada sucursal tendrá a corto, mediano y largo plazo. La Figura 4.21 muestra a continuación la calificación obtenida por ABC Company en los diferentes elementos de madurez de la presente dimensión.

Madurez actual y deseada de elementos - Dimensión: Conectividad

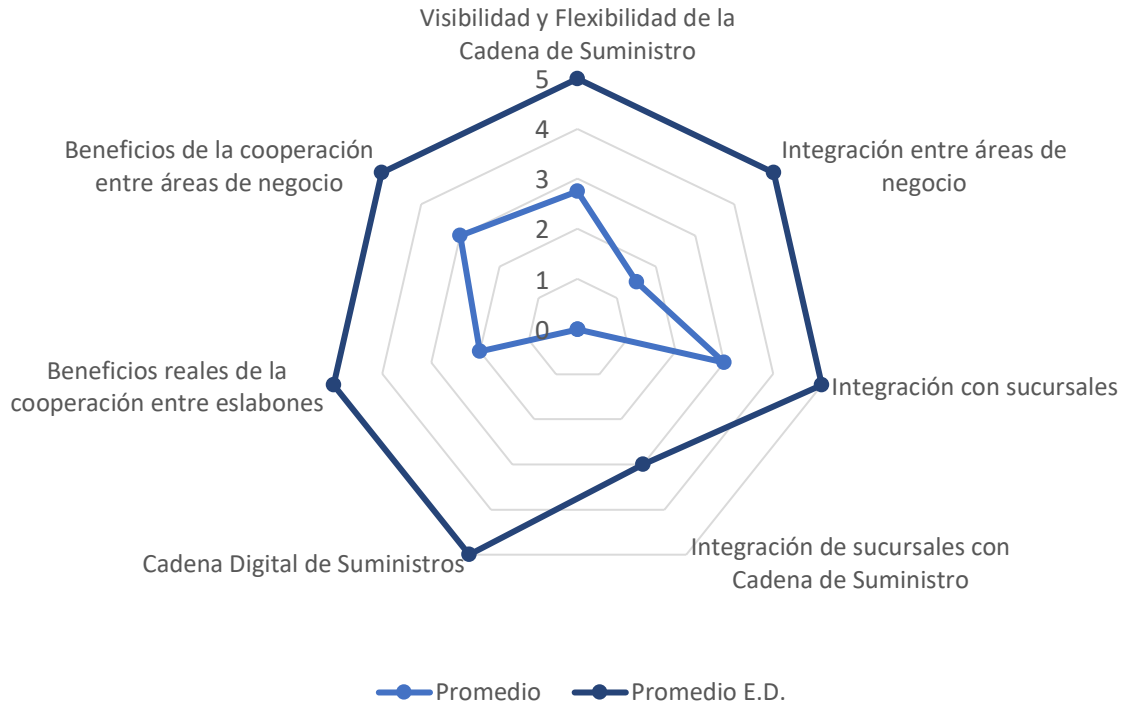


Figura 4.19. Madurez actual y deseada de elementos de dimensión 'Conectividad'

Fuente: elaboración propia.

4.4.3. Síntesis de recomendaciones

Con el fin de facilitar la comprensión de las recomendaciones realizadas en la pasada sección, se presentan a continuación dichas recomendaciones de manera resumida. Estas recomendaciones se encuentran divididas en categorías alusivas a la dimensión de madurez a la cual pertenecen.

4.4.3.1. Dirección: síntesis de recomendaciones

- A. Incluir Industria 4.0 dentro de la estrategia corporativa para propiciar así una implementación más eficaz de esta filosofía.
- B. Tomar en consideración las métricas creadas de Industria 4.0 para promover acciones de mejora al proceso de implementación.

- C. Trabajar a favor de una estructura organizacional más flexible que permita agilizar procesos e incentivar la innovación y propuestas de mejora.
- D. Seguir manteniendo la alta disposición a innovar que actualmente poseen la mayoría de las áreas de la compañía.
- E. Trabajar en considerar los fallos de los trabajadores de la misma manera independientemente de la persona o grupo de personas que los hayan ocasionado.
- F. Lograr que más líderes de la compañía reconozcan el valor de invertir esfuerzos en Industria 4.0 y capacitar a estos en conocimientos TIC.
- G. Lograr que los líderes se vean a sí mismos como entrenadores y compañeros de aprendizaje, empleando un estilo de liderazgo participativo y transformacional.
- H. Realizar un seguimiento detallado a las inversiones realizadas en Industria 4.0 y comparar la tasa de retorno estimada con la tasa de retorno real en el corto, mediano y largo plazo para mejorar las futuras estimaciones.
- I. Incluir aspectos de ciberseguridad en todos los modelos de contrato relacionados y ejecutar planes periódicos de actualización de estos modelos en función de la legislación nacional e internacional vigente aplicable y los nuevos riesgos y amenazas que se presenten en términos de ciberseguridad.
- J. Ejecutar un plan de actualización de políticas de propiedad intelectual en función de los cambios normativos.
- K. Crear protocolos de seguridad para los datos de la compañía almacenados en la nube y trabajar con los proveedores de estos servicios de nube para, en conjunto, desarrollar altos niveles de protección de la información.

4.4.3.2. Operaciones: síntesis de recomendaciones

- A. Mantener la alta apertura al cambio de la compañía y aprovechar esta para potenciar las competencias del recurso humano frente a Industria 4.0.
- B. Ampliar las capacitaciones de los trabajadores en términos de Industria 4.0 con el fin de prepararlos y concientizarlos para los nuevos cambios.
- C. Emplear un enfoque de Equipos Autodirigidos en los equipos de trabajo de la compañía.
- D. Hacer un mejor uso de los datos recopilados en la compañía y analizar la relación costo-beneficio de los esfuerzos adelantados en recolectar datos de las operaciones para que no se sobredimensionen esfuerzos que puedan resultar en la obtención de datos ociosos.
- E. Implementar sistemas de análisis de datos en tiempo real que permitan tener una alta predictibilidad y descentralización en los procesos.
- F. Realizar una gestión de inventarios automatizada mediante el monitoreo de niveles de stock en tiempo real y la sincronización de estos niveles con el sistema de órdenes de los proveedores.
- G. Incluir sistemas de mantenimiento predictivo dentro del plan de mantenimientos de la compañía.
- H. Seguir con las actuales prácticas de integración de canales de mercadeo y gestión de experiencia de cliente con enfoque individualizado.

4.4.3.3. Producción: síntesis de recomendaciones

- A. Adaptar máquinas y sistemas a las necesidades futuras que la compañía tenga previstas en términos de Industria 4.0.
- B. Evaluar el uso estratégico de servicios en la nube con el fin de ganar eficiencia a la hora de procesar datos y lograr una disminución en la carga y costos asociados a servidores, instalaciones eléctricas, entre otros.
- C. Hacer uso la tecnología Plug & Produce en conjunto con el concepto de Producto Inteligentes para lograr cambios automáticos de línea que permitan disminuir los tiempos de cambio herramental y configuración de línea.
- D. Iniciar proyectos piloto de almacenamiento de parámetros de producción al interior de los productos mediante dispositivos RFID, códigos QR, e-Kanbans, entre otras alternativas, que permitan que máquinas y productos puedan intercambiar información que permita hacer más eficientes los procesos y reducir así el *Lead Time* de las órdenes de producción.

4.4.3.4. Conectividad: síntesis de recomendaciones

- A. Lograr que los eslabones de la cadena de suministros compartan información/datos que permitan lograr sinergia en los procesos de la cadena.
- B. Aprovechar la alta visibilidad de la cadena de suministros con fines de monitorización y optimización de las operaciones de esta.
- C. Mejorar la gestión del riesgo en la cadena de suministros y aumentar su flexibilidad tal que dicha cadena pueda responder inmediatamente a los cambios de mercado y requerimientos individuales de cliente.

- D. Aumentar en más de un 24% la integración de sistemas TIC con los procesos de las áreas de negocio de la compañía (integración vertical).
- E. Realizar mayores esfuerzos por integrar las sucursales de la compañía con sus respectivas cadenas de suministro en términos de integración horizontal.
- F. Ajustar proyectos de integración de casa matriz con sucursales de acuerdo con las necesidades que cada sucursal tendrá a corto, mediano y largo plazo.

4.4.4. Validación del modelo

El modelo propuesto, tal como se comentó en la sección 3.1.4, fue validado atendiendo los criterios de replicabilidad y correspondencia de resultados. A continuación, se detalla el procedimiento utilizado para validar el presente modelo con relación a estos dos criterios.

4.4.4.1. *Replicabilidad de los resultados.*

Retomando el significado de este criterio, este hace referencia al grado de similitud que deben tener varios resultados del modelo de evaluación de madurez cuando este es aplicado a una misma organización, en un mismo espacio y tiempo, y con auditores que posean un grado equiparable de conocimiento de Industria 4.0 y la organización. Esto, con el fin de asegurar que el modelo de evaluación de madurez es objetivo y consistente en la manera en cómo recaba y procesa la información (AIDIMME & ITI, 2016).

Con relación a lo anterior, se estableció como criterio que el promedio de las desviaciones estándar entre los resultados de los auditores para cada tipo de componente del modelo debe ser menor a 0.5 para considerarse como satisfecho este criterio de validación. Esto, a razón de que la diferencia común entre una categoría de madurez y otra es de 1 punto de madurez, lo cual permite inferir que para que dos o más calificaciones a pesar de ser diferentes refieran en promedio a una misma categoría de madurez con una dispersión máxima menor a 1 punto de madurez, la desviación

estándar debe ser menor a distancia usual entre una categoría de madurez y otra. Dicho de otra manera, si el auditor A da una calificación de 4 puntos a un elemento de madurez X y el auditor B una calificación de 5 puntos para el mismo elemento de madurez X, la desviación estándar de estas dos calificaciones estará calculada por la Ecuación 4.1.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N |x_i - \mu|^2}{N}} \quad (\text{Ecuación 4.1})$$

Donde:

σ : desviación estándar de las calificaciones de un componente de madurez.

μ : promedio simple de las calificaciones de un componente de madurez.

x : calificación obtenida en un componente de madurez x por un auditor i .

N : número total de calificaciones obtenidas para el componente de madurez x .

Utilizando la Ecuación 4.1 se tiene que:

$$\sigma = \sqrt{\frac{|3 - 3.5|^2 + |4 - 3.5|^2}{2}} = 0.5$$

Como es posible apreciar, se tiene una desviación estándar mayor o igual a 0.5, lo cual informa que la dispersión es mayor o igual a 1 punto de madurez y no se tiene un claro consenso sobre a qué categoría de madurez pertenece determinado componente del modelo. En el caso de que sean 3 auditores (Auditor A, B y C) y sus calificaciones sean 3, 3 y 4 respectivamente, el valor de σ sería el siguiente:

$$\sigma = \sqrt{\frac{|3 - 3.\widehat{33}|^2 + |3 - 3.\widehat{33}|^2 + |4 - 3.\widehat{33}|^2}{3}} = 0.4714$$

En este caso, hay una clara predominancia de la calificación 3 sobre la calificación 4, y el valor de la desviación estándar da cuenta de ello. Dicho esto, se procedió a calcular la media de las

desviaciones estándar para cada tipo de componente de modelo de evaluación de madurez: elementos, subdimensiones, y dimensiones de madurez. Lo anterior, tomando en consideración las calificaciones de estado actual y estado futuro. Nótese que el anterior criterio es aplicado a cada tipo de componente del modelo y no a cada elemento de cada tipo de componente, esto con el fin de penalizar las grandes desviaciones globales y no las pequeñas desviaciones locales de cada elemento de madurez que naturalmente pueden ocurrir por divergencias en el juicio de los auditores. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 4.8.

Resultado de validación para elementos de madurez

Elementos de madurez	Calif. Elem. Aud. A	Calif. Elem. Aud. B	Desv. Est.	Calif. Elem. E.D. A1	Calif. Elem. E.D. A2	Desv. Est.
Adaptación hacia un modelo de negocio de I4.0	2,5	2,5	0,00	5	5	0,00
Apertura a la innovación	3	3	0,00	4,75	4,75	0,00
Inversiones estratégicas	4	4	0,00	4	5	0,50
Competencias de los líderes frente a I4.0	2	2	0,00	5	5	0,00
Estilo de liderazgo	3	3	0,00	5	5	0,00
Protección de datos	2,5	2,5	0,00	5	5	0,00
Protección a la propiedad intelectual	3	3	0,00	3	3	0,00
Modelos de contrato	2	2	0,00	5	5	0,00
Recopilación de datos	5	5	0,00	5	5	0,00
Aprendizaje y toma de decisiones basada en datos	3	3	0,00	5	5	0,00
Uso efectivo de datos	1	1	0,00	5	5	0,00
Descentralización	0,75	0,75	0,00	4,5	4	0,25
Canales de mercadeo integrados	5	5	0,00	5	5	0,00
Competencias frente a Industria 4.0	1	1	0,00	5	5	0,00
Apertura hacia el cambio y nuevas tecnologías	5	5	0,00	5	5	0,00
Desarrollo profesional continuo	1	1	0,00	5	5	0,00
Autonomía	2	2	0,00	5	5	0,00
Infraestructura tecnológica	1,5	1,5	0,00	5	5	0,00
Interfaces de datos estandarizadas	1	1	0,00	5	5	0,00
Integración sistémica M2M	4	4	0,00	5	5	0,00
Flexibilidad y Modularidad	3	3	0,00	5	5	0,00
Personalización de productos	2	2	0,00	3	3	0,00
Productos inteligentes	2	2	0,00	5	5	0,00
Cadena Digital de Suministros	0	0	0,00	5	5	0,00
Visibilidad y Flexibilidad de la Cadena de Suministro	3	2,5	0,25	5	5	0,00

Continuación de Tabla 4.8. Resultado de validación para elementos de madurez

Elementos de madurez	Calif. Elem. Aud. A	Calif. Elem. Aud. B	Desv. Est.	Calif. Elem. E.D. A1	Calif. Elem. E.D. A2	Desv. Est.
Beneficios reales de la cooperación entre eslabones	2	2	0,00	5	5	0,00
Integración de sucursales con Cadena de Suministro	0	0	0,00	3	3	0,00
Integración entre áreas de negocio	1,5	1,5	0,00	5	5	0,00
Beneficios de la cooperación entre áreas de negocio	3	3	0,00	5	5	0,00
Integración con sucursales	3	3	0,00	5	5	0,00
	DESV. EST. PROM.		0,01	DESV. EST. PROM.		0,03

Fuente: elaboración propia.

Dado que los valores promedio de desviación estándar para el componente “elementos de madurez” fueron de 0.01 y 0.03 para estado actual y estado deseado respectivamente, y además estos valores son menores que 0.5, se da por validado el componente “elementos de madurez” del modelo propuesto. Por otra parte, aplicando este mismo procedimiento al componente “subdimensiones de madurez”, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9.

Resultado de validación para subdimensiones de madurez

Subdimensiones	Calif. Subdim. A1	Calif. Subdim. A2	Desv. Est.	Calif. Subdim. E.D. A1	Calif. Subdim. E.D. A2	Desv. Est.
Estrategia	2,969	2,969	0,000	4,708	4,938	0,115
Liderazgo	2,385	2,385	0,000	5,000	5,000	0,000
Ciberseguridad	2,485	2,485	0,000	4,471	4,471	0,000
Enfoque de datos	3,121	3,121	0,000	5,000	5,000	0,000
Procesos	1,694	1,694	0,000	4,611	4,222	0,194
Recursos Humanos	2,190	2,190	0,000	5,000	5,000	0,000
Infraestructura	2,286	2,286	0,000	5,000	5,000	0,000
Productos	2,000	2,000	0,000	3,846	3,846	0,000
Integración horizontal	1,028	0,944	0,042	4,694	4,694	0,000
Integración vertical	2,218	2,218	0,000	5,000	5,000	0,000
		DESV. EST. PROM.	0,004		DESV. EST. PROM.	0,031

Fuente: elaboración propia.

Dado que los valores promedio de desviación estándar para el componente “subdimensiones de madurez” fueron de 0.004 y 0.031 para estado actual y estado deseado respectivamente, y además estos valores son menores que 0.5, se da por validado el componente “subdimensiones de madurez” del modelo propuesto. Por otra parte, aplicando este mismo procedimiento al componente “dimensiones de madurez”, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10.

Resultado de validación para dimensiones de madurez

Dimensión	Calif. Dim. A1	Calif. Dim. A2	Desv. Est.	Calif. Dim. E.D. A1	Calif. Dim. E.D. A2	Desv. Est.
Dirección	2,676	2,676	0,000	4,704	4,806	0,051
Operaciones	2,404	2,404	0,000	4,870	4,741	0,065
Producción	2,176	2,176	0,000	4,559	4,559	0,000
Conectividad	1,619	1,577	0,021	4,846	4,846	0,000
		DESV. EST. PROM.	0,005		DESV. EST. PROM.	0,029

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, dado que los valores promedio de desviación estándar para el componente “dimensiones de madurez” fueron de 0.005 y 0.029 para estado actual y estado deseado respectivamente, y además estos valores son menores que 0.5, se da por validado el componente “dimensiones de madurez” del modelo propuesto. De esta manera, se han validado exitosamente los tres principales componentes del modelo de evaluación de madurez de Industria 4.0 propuesto en la presente investigación. Cabe resaltar que dado a que no fueron detectadas inconsistencias en el presente modelo durante su aplicación, no se hizo necesario hacer modificaciones a este.

4.4.4.2. Correspondencia de los resultados

Retomando el concepto de correspondencia de resultados, este hace referencia al grado de concordancia o equivalencia que deben tener los resultados del modelo de evaluación de madurez con respecto a la situación real de la compañía, visto desde el punto de vista de uno o más representantes de esta. Lo anterior busca dar por sentado que el modelo cumple su propósito principal que es reflejar el estado actual de la compañía en términos de Industria 4.0.

Teniendo en cuenta lo anterior, una encuesta sobre el grado de concordancia de resultados con la situación actual y deseada de la compañía fue aplicada a los auditores A y B de ABC Company. Además, se preguntaron aspectos sobre satisfacción y utilidad del presente modelo. Dicha encuesta puede ser consultada mediante el enlace <https://forms.gle/hvHmHKHU97AorhPZ6>. Los resultados obtenidos son mostrados a continuación en la Figuras 4.20, 4.21, 4.22 y 4.23.

1. ¿Considera que los resultados del modelo de evaluación de madurez reflejan en gran medida el estado actual y deseado de la compañía?

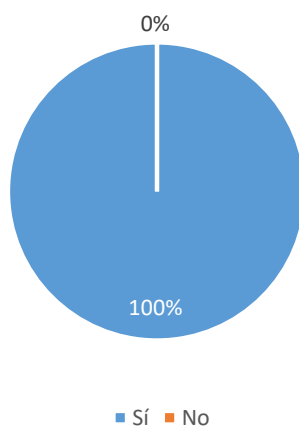


Figura 4.20. Opinión de correspondencia de resultados de ABC Company

Fuente: elaboración propia.

2. ¿Qué tan satisfecho(a) se encuentra con el modelo de evaluación de madurez utilizado?

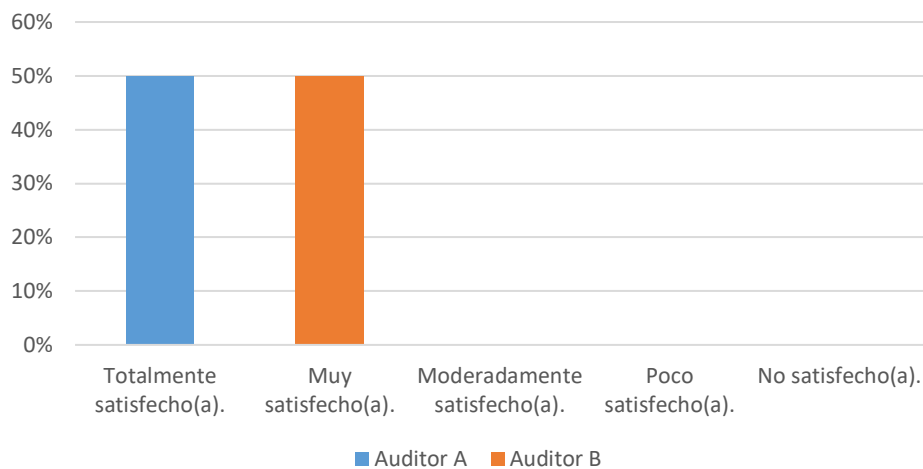


Figura 4.21. Satisfacción de ABC Company con respecto al modelo de evaluación de madurez propuesto
Fuente: elaboración propia.

3. ¿Considera al modelo de evaluación de madurez utilizado como una herramienta útil para definir estrategias de implementación de Industria 4.0?

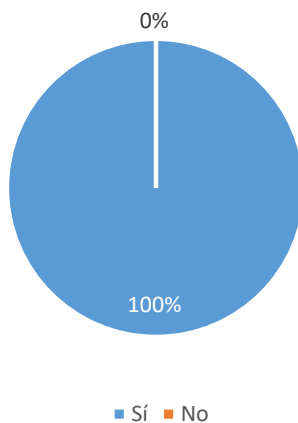


Figura 4.22. Opinión de utilidad del modelo de evaluación de madurez según ABC Company
Fuente: elaboración propia.

4. ¿Posee alguna sugerencia o recomendación?

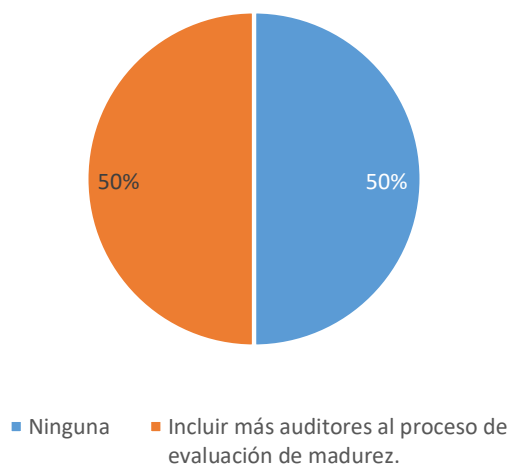


Figura 4.23. Sugerencias y recomendaciones de ABC Company

Fuente: elaboración propia.

De la Figura 4.20 es posible apreciar que el 100% de los auditores considera que los resultados del modelo de evaluación de madurez reflejan en gran medida el estado actual y deseado de la compañía. Esto, da por validado el criterio de “Correspondencia de resultados”. De manera complementaria, se observa en la Figura 4.21 que existe una gran satisfacción de la compañía con relación al modelo de evaluación de madurez desarrollado y, como es posible apreciar en la Figura 4.22, dicho modelo es percibido por ABC Company como una herramienta útil para definir estrategias de implementación de Industria 4.0. Por otra parte, en la Figura 4.23 el Auditor B manifestó la sugerencia de “*incluir más auditores al proceso de evaluación de madurez*”. Ante esto, a pesar de que el cuestionario puede ser desarrollado por un sólo auditor, esta sugerencia es acatada y se tendrá en cuenta para futuras aplicaciones del modelo de evaluación de madurez propuesto.

De esta manera, se han aprobado exitosamente los dos criterios de validación del modelo propuesto. Con esto, y los resultados representados por las Figuras 4.20 y 4.22, se comprueba que la inclusión de un modelo de evaluación de madurez de Industria 4.0 y sus tendencias coadyuva a diagnosticar el grado de desarrollo de Industria 4.0 en empresas manufactureras. Constituyéndose el modelo

desarrollado como una importante herramienta para el diagnóstico y planificación de empresas manufactureras convencionales hacia la *Smart Factory* de la Industria 4.0.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo proponer un modelo de evaluación de madurez orientado a valorar el grado de desarrollo que empresas manufactureras tienen con relación a Industria 4.0. Lo anterior, acompañado de la elaboración de la respectiva herramienta de recolección de la información para el modelo propuesto. Dicho modelo es de carácter conceptual y fue desarrollado tomando en consideración una revisión sistemática del estado del arte de Industria 4.0 y modelos relacionados. Además, fueron utilizados métodos cuantitativos y cualitativos para validar el modelo y definir la ponderación de sus componentes respectivamente.

En contraste con otros modelos desarrollados, la principal contribución de esta investigación es un modelo de evaluación de madurez que atiende las tendencias de Industria 4.0 y expone los resultados de una manera comprensible para las organizaciones en función de su estado actual y deseado de madurez. Además, dado que dicho estado deseado es definido por las empresas evaluadas, son estas quienes definen sus objetivos de Industria 4.0 acorde a sus necesidades particulares. Lo anterior convierte al modelo desarrollado en uno de carácter general aplicable tanto a Pymes como a grandes empresas.

Cabe resaltar que el modelo desarrollado puede servir no sólo para evaluar la madurez de empresas manufactureras, sino también para llevar a cabo diagnósticos de madurez de Industria 4.0 en sectores industriales de ciudades, estados, o países enteros. Esto, convierte a dicho modelo en una herramienta que puede coadyuvar a la construcción de estrategias gubernamentales de fomento de Industria 4.0 al brindar un panorama inicial de desarrollo sobre el cual definir dichas estrategias. Así mismo, al poder ser este modelo aplicado en diferentes periodos de tiempo, constituye también una herramienta para medir de manera periódica el grado de avance de implementación de Industria 4.0 en organizaciones manufactureras.

Por otra parte, en términos de Industria 4.0, la revisión bibliográfica realizada mostró que las tecnologías Sistemas Ciber-físicos e Internet de las Cosas fueron las más relevantes a la hora de idear escenarios productivos de Industria 4.0. No obstante, al analizar los principios de diseño de Industria 4.0 se observa que más importante que las tecnologías es la forma en cómo estas son

utilizadas para lograr altos niveles de eficiencia y competitividad en organizaciones y cadenas de suministro. Esto coadyuvó a realizar una de las principales contribuciones de la presente investigación, la cual consistió en realizar una nueva propuesta conceptual para el término Industria 4.0 atendiendo aspectos centrales, medios, y fines. Dado lo anterior, cabe igualmente resaltar como conclusión dicha definición: Industria 4.0 es una filosofía que comprende la integración sinérgica de diversas tecnologías con el objetivo de alcanzar altos niveles de eficiencia y competitividad en organizaciones, y cadenas de suministro, a través de la conectividad.

En términos de oportunidades de exploración para futuras investigaciones se sugiere ahondar en el presente modelo mediante la creación de una herramienta web para su aplicación y exposición de resultados con el fin de facilitar su aplicación y reducir los tiempos de entrega de resultados. Así mismo, se sugiere la creación de una herramienta estándar de evaluación de conocimientos de Industria 4.0 para auditores. Esto, con el fin de avalar en estos los conocimientos de Industria 4.0 antes de diligenciar el cuestionario de evaluación del presente modelo, estableciendo así un riguroso filtro para escoger auditores idóneos que pueden ser internos o externos a las organizaciones evaluadas. Esto, en conjunto con otras acciones, podría permitir escalar el método propuesto en la presente investigación a un sistema de estándares que permita certificar a organizaciones en Industria 4.0.

Así mismo, se sugiere la realización de estudios empíricos que permitan realizar estimaciones sobre cuánto tiempo le lleva a las organizaciones pasar de una categoría de madurez a otra en función del sector industrial al cual pertenezcan. Esto, analizando a su vez las inversiones realizadas en diferentes áreas y la repercusión que estas inversiones tienen en las utilidades de las compañías a través del tiempo. Lo anterior, coadyuvará a seguir construyendo conocimiento en el campo de estudios relacionados con Industria 4.0.

BIBLIOGRAFÍA

- Agca, O., Gibson, J., Godsell, J., Ignatius, J., & Davis, C. W. (2017). *An Industry 4 readiness assessment tool*. University of Warwick, Crimson & Co., Pinsent Mason. Coventry: WMG. Recuperado el 4 de noviembre de 2018, de https://warwick.ac.uk/fac/sci/wmg/research/scip/industry4report/final_version_of_i4_report_for_use_on_websites.pdf
- Ahuett-Garza, H., & Kurfess, T. (2015). A brief discussion on the trends of habilitating technologies for Industry 4.0 and Smart manufacturing. *Manufacturing Letters*, 15, 60-63. doi:10.1016/j.mfglet.2018.02.011
- AIDIMME & ITI. (2016). *Sistemas Avanzados de Eficiencia Productiva para la Industria 4.0: Modelo de referencia de la Industria 4.0*. Valencia: IVACE.
- Akdeniz, C. (2015). *Why Strategic Plans Fail: Deadly Mistakes of Strategic Planning Explained*. Scotts Valley: CreateSpace Independent Publishing Platform.
- Akdil, K. Y., Ustundag, A., & Cevikcan, E. (2018). Maturity and Readiness Model for Industry 4.0 Strategy. En A. Ustundag, & E. Cevikcan, *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation* (págs. 61-94). Cham: Springer. doi:10.1007/978-3-319-57870-5_4
- Alles, M. (2018). Examining the role of the AIS research literature using the natural experiment of the 2018 JIS conference on cloud computing. *International Journal of Accounting Information Systems*, 30, 1-17. doi:10.1016/j.accinf.2018.09.001
- Angrish, A., Craver, B., Hasan, M., & Starly, B. (2018). A Case Study for Blockchain in Manufacturing: "FabRec": A Prototype for Peer-to-Peer Network of Manufacturing Nodes. *Procedia Manufacturing*, 26, 1180-1192. doi:10.1016/j.promfg.2018.07.154
- Bagheri, B., Yang, S., Kao, H. A., & Lee, J. (2015). Cyber-physical systems architecture for self-aware machines in industry 4.0 environment. *IFAC-PapersOnLine*, 28(3), 1622-1627. doi:10.1016/j.ifacol.2015.06.318
- Bayer, D., Haber, S., & Stornetta, W. S. (1993). Improving the Efficiency and Reliability of Digital Time-Stamping. *Sequences II: Methods in Communication, Security, and Computer Science* (págs. 329-334). New York: Springer-Verlag. doi:10.1007/978-1-4613-9323-8_24
- Benešová, A., & Tupaa, J. (2017). Requirements for Education and Qualification of People in Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11, 2195-2202. doi:10.1016/j.promfg.2017.07.366

- Bildstein, A., & Seidelmann, J. (2014). Industrie 4.0-Readiness: Migration zur Industrie 4.0-Fertigung. En T. Bauernhansl, M. t. Hompel, & B. Vogel-Heuser, *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik* (págs. 581-597). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- BMBF. (2014). *The new High-Tech Strategy Innovations for Germany*. Berlin: Federal Ministry of Education and Research (BMBF). Recuperado el 14 de noviembre de 2018, de https://www.bmbf.de/pub/HTS_Broschuere_eng.pdf
- Bourell, D., Kruth, J. P., Leu, M., Levy, G., Rosen, D., Beese, A. M., & Clare, A. (2017). Materials for additive manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 66, 659-681. doi:10.1016/j.cirp.2017.05.009
- Boyes, H., Hallaq, B., Cunningham, J., & Watson, T. (2018). The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework. *Computers in Industry*, 101, 1-12. doi:10.1016/j.compind.2018.04.015
- Brassil, J. (2014). Improving Indoor Positioning Accuracy with Dense, Cooperating Beacons. *Procedia Computer Science*, 40(C), 1-8. doi:10.1016/j.procs.2014.10.025
- Buterin, V. (2014). *Ethereum White Paper: A next generation smart contract and decentralized application platform*. Zug: Ethereum. Obtenido de Ethereum.org.
- Büyüközkan, G., & Göçer, F. (2018). Digital Supply Chain - Literature review and a proposed framework for future research. *Computers in Industry*, 97, 157-177. doi:10.1016/j.compind.2018.02.010
- Cambridge University Press. (2018). *road map*. Obtenido de Cambridge Dictionary: <https://dictionary.cambridge.org/us/dictionary/english/road-map>
- Cao, W., Wang, X., Ming, Z., & Gao, J. (2018). A review on neural networks with random weights. *Neurocomputing*, 275, 278-287. doi:10.1016/j.neucom.2017.08.040
- Casado-Vara, R., Prieto, J., De la Prieta, F., & Corchado, J. M. (2018). How blockchain improves the supply chain: Case study alimentary supply chain. *Procedia Computer Science*, 134, 393-398. doi:10.1016/j.procs.2018.07.193
- Chrissis, M. B. (2012). *CMMI, Guía para la integración de procesos y la mejora de productos*. Madrid: Editorial Universitaria Ramón Areces.
- CMMI Institute. (2018). *CMMI Adoption and Transition Guidance V2.0*. Pittsburgh: CMMI Institute Publications.

- Cobb, A. N., Benjamin, A. J., Huang, E. S., & Kuo, P. C. (2018). Big data: More than big data sets. *Surgery*, *164*(4), 640-642. doi:10.1016/j.surg.2018.06.022
- Dalenogare, L. S., Benitez, G. B., Ayala, N. F., & Frank, A. G. (2018). The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. *International Journal of Production Economics*, *204*, 383-394. doi:10.1016/j.ijpe.2018.08.019
- Dao, S. D., Abhary, K., & Marian, R. (2017). A bibliometric analysis of Genetic Algorithms throughout the history. *Computers & Industrial Engineering*, *110*, 395-403. doi:10.1016/j.cie.2017.06.009
- De Sousa, A., Jabbour, C., Foropon, C., & Filho, M. (2018). When titans meet – Can industry 4.0 revolutionise the environmentally-sustainable manufacturing wave? The role of critical success factors. *Technological Forecasting and Social Change*, *132*, 18-25. doi:10.1016/j.techfore.2018.01.017
- Dilberoglu, U. M., Gharehpapagh, B., Yaman, U., & Dolen, M. (2017). The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, *11*, 545-554. doi:10.1016/j.promfg.2017.07.148
- Dumbill, E. (2013). Making Sense of Big Data. *Big Data*, *1*(1), 1-2. doi:10.1089/big.2012.1503
- Erol, S., Jäger, A., Hold, P., Ott, K., & Sihn, W. (2016). Tangible Industry 4.0: A Scenario-Based Approach to Learning for the Future of Production. *Procedia CIRP*, *54*, 13-18. doi:10.1016/j.procir.2016.03.162
- Eyers, D. R., & Potter, A. T. (2017). Industrial Additive Manufacturing: A manufacturing systems perspective. *Computers in Industry*, *92-93*, 208-218. doi:10.1016/j.compind.2017.08.002
- Fazal, M., Patel, M., Tye, J., & Gupta, Y. (2018). The past, present and future role of artificial intelligence in imaging. *European Journal of Radiology*, *105*, 246-250. doi:10.1016/j.ejrad.2018.06.020
- Gattullo, M., Scurati, G. W., Fiorentino, M., Uva, A. E., Ferrise, F., & Bordegoni, M. (2019). Towards augmented reality manuals for industry 4.0: A methodology. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, *56*, 276-286. doi:10.1016/J.RCIM.2018.10.001
- Gökalp, E., Sener, U., & Eren, P. E. (2017). Development of an Assessment Model for Industry 4.0: Industry 4.0-MM. *International Conference on Software Process Improvement and Capability Determination* (págs. 128-142). Palma de Mallorca: Springer. doi:10.1007/978-3-319-67383-7_10

- Govindan, K., Cheng, T. C., Mishra, N., & Shukla, N. (2018). Big data analytics and application for logistics and supply chain management. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *114*, 343-349. doi:10.1016/j.tre.2018.03.011
- GTAI. (2014). *Industrie 4.0 - Smart Manufacturing for the Future*. Berlin: German Trade & Invest.
- Haber, S., & Stornetta, W. S. (1991). How to time-stamp a digital document. *Journal of Cryptology*, *3*(2), 99-111. doi:10.1007/BF00196791
- Hajirahimova, M. S., & Aliyeva, A. S. (2017). About Big Data Measurement Methodologies and Indicators. *International Journal of Modern Education and Computer Science (IJMECS)*, *9*(10), 1-9. doi:10.5815/ijmeecs.2017.10.01
- Hammi, M. T., Hammi, B., Bellot, P., & Serhrouchni, A. (2018). Bubbles of Trust: A decentralized blockchain-based authentication system for IoT. *Computers and Security*, *78*, 126-142. doi:10.1016/j.cose.2018.06.004
- Heddebaut, M., Ghys, J. P., Sanz, M., & Elbahhar, F. (2013). Road traffic information using a dedicated radio beacon. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *35*, 20-33. doi:10.1016/j.trc.2013.06.003
- Helming, S., Ungermann, F., Hierath, N., Stricker, N., & Lanza, G. (2019). Development of a training concept for leadership 4.0 in production environments. *Procedia Manufacturing*, *31*, 38-44. doi:10.1016/j.promfg.2019.03.007
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016). Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review. *Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)* (pág. 16). Dortmund: Technische Universität Dortmund. doi:10.13140/RG.2.2.29269.22248
- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2015). *Investigación de Operaciones* (Décima ed.). México D.F.: McGraw Hill.
- Hitpass, B. (2017). *Business Process Management: Fundamentos y Conceptos de Implementación* (Cuarta ed.). Santiago de Chile: CreateSpace Independent Publishing Platform.
- IMD World Competitiveness Center. (2017). *World Competitiveness Ranking*. Zúrich: IMD.
- IMPULS. (2015). *Industrie 4.0 Readiness*. Aachen: VDMA. Recuperado el 7 de noviembre de 2018, de <http://industrie40.vdma.org/documents/4214230/5356229/Industrie%204.0%20Readiness%20Study%20English.pdf/f6de92c1-74ed-4790-b6a4-74b30b1e83f0>

- ISED. (2015). *Digital Canada 150 2.0*. Edmonton: Innovation, Science and Economic Development Canada. Recuperado el 13 de noviembre de 2018, de [https://www.ic.gc.ca/eic/site/028.nsf/vwapj/DC150-2.0-EN.pdf/\\$FILE/DC150-2.0-EN.pdf](https://www.ic.gc.ca/eic/site/028.nsf/vwapj/DC150-2.0-EN.pdf/$FILE/DC150-2.0-EN.pdf)
- Issa, A., Hatiboglu, B., Bildstein, A., & Bauernhansl, T. (2018). Industrie 4.0 roadmap: Framework for digital transformation based on the concepts of capability maturity and alignment. *Procedia CIRP*, 72, 973-978. doi:10.1016/j.procir.2018.03.151
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0*. Frankfurt: Industrie 4.0 Working Group.
- Kamble, S. S., Gunasekaran, A., & Gawankar, S. A. (2018). Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. *Process Safety and Environmental Protection*, 117, 408-425. doi:10.1016/j.psep.2018.05.009
- Khan, M. A., & Salah, K. (2018). IoT security: Review, blockchain solutions, and open challenges. *Future Generation Computer Systems*, 82, 395-411. doi:10.1016/j.future.2017.11.022
- Kim, S., Park, S., Sun, M. R., & Lee, J. H. (2016). A Study of Smart Beacon-based Meeting, Incentive Trip, Convention, Exhibition and Event (MICE) Services Using Big Data. *Procedia Computer Science*, 91, 761-768. doi:10.1016/j.procs.2016.07.072
- Klitou, Demetrius, Conrads, J., Rasmussen, M., Probst, L., & Pedersen, B. (2017). *Key lessons from national industry 4.0 policy initiatives in Europe*. European Commission. Bruselas: Digital Transformation Monitor. Recuperado el 15 de noviembre de 2018, de https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/dem/monitor/sites/default/files/DTM_Policy%20initiative%20comparison%20v1.pdf
- Korpela, K., Hallikas, J., & Dahlberg, T. (2017). Digital Supply Chain Transformation toward Blockchain Integration. *Proceedings of the 50th Hawaii International Conference on System Sciences* (págs. 4182-4191). Hawaii: HICCS. doi:10.24251/HICSS.2017.506
- Kshetri, N. (2018). 1 Blockchain's roles in meeting key supply chain management objectives. *International Journal of Information Management*, 39, 80-89. doi:10.1016/j.ijinfomgt.2017.12.005

- Kumar, R., Singh, S. P., & Lamba, K. (2018). Sustainable robust layout using Big Data approach: A key towards industry 4.0. *Journal of Cleaner Production*, 204, 643-659. doi:10.1016/j.jclepro.2018.08.327
- Li, Z., Liu, L., Barenji, A. V., & Wang, W. (2018). Cloud-based Manufacturing Blockchain: Secure Knowledge Sharing for Injection Mould Redesign. *Procedia CIRP*, 72, 961-966. doi:10.1016/j.procir.2018.03.004
- Lin, C., He, D., Huang, X., Choo, K. K., & Vasilakos, A. V. (2018). BSeIn: A blockchain-based secure mutual authentication with fine-grained access control system for industry 4.0. *Journal of Network and Computer Applications*, 116, 42-52. doi:10.1016/j.jnca.2018.05.005
- Löffler, M., & Tschiesner, A. (2013). *The Internet of Things and the future of manufacturing*. Munich: McKinsey & Company.
- Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*, 6, 1-10. doi:10.1016/j.jii.2017.04.005
- Lu, Y., Papagiannidis, S., & Alamanos, E. (2018). Internet of Things: A systematic review of the business literature from the user and organisational perspectives. *Technological Forecasting and Social Change*, 136, 285-297. doi:10.1016/j.techfore.2018.01.022
- Lukač, D. (2015). The fourth ICT-based industrial revolution "Industry 4.0" — HMI and the case of CAE/CAD innovation with EPLAN P8. *2015 23rd Telecommunications Forum Telfor (TELFOR)* (págs. 835-838). Belgrado: IEEE. doi:10.1109/TELFOR.2015.7377595
- Mantilla, M., & García, D. (2010). Trabajo en equipos autodirigidos: competencias personales y conductas necesarias para su éxito. *Revista Venezolana de Gerencia*, 15, 51-71.
- Mařík, V., & Kol, A. (2015). *Národní iniciativa průmysl 4.0*. Praga: Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR.
- Masoni, R., Ferrise, F., Bordegoni, M., Gattullo, M., Uva, A. E., Fiorentino, M., . . . Di Donato, M. (2017). Supporting Remote Maintenance in Industry 4.0 through Augmented Reality. *Procedia Manufacturing*, 11, 1296-1302. doi:10.1016/j.promfg.2017.07.257
- Mata, J., Ignacio, D. M., Durán, R., Merayo, N., & Singh, S. J. (2018). Artificial intelligence (AI) methods in optical networks: A comprehensive survey. *Optical Switching and Networking*, 28, 43-57. doi:10.1016/j.osn.2017.12.006

- Mayer-Schönberger, V., & Cukier, K. (2014). *Big Data: A Revolution That Will Transform How We Live, Work, and Think* (Reimpresa ed.). Chicago: Mariner Books, Houghton Mifflin Harcourt.
- McKinsey & Company. (2015). *Industry 4.0: How to navigate digitization of the manufacturing sector*. Nueva York: McKinsey Digital.
- Meissnera, H., Ilse, R., & Aurich, J. C. (2017). Analysis of Control Architectures in the Context of Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 62, 165-169. doi:10.1016/j.procir.2016.06.113
- MERICs. (2016). *Made in China 2025*. Berlin: Mercator Institute for China Studies. Obtenido de https://www.merics.org/sites/default/files/2017-09/MPOC_No.2_MadeinChina2025.pdf
- Metz, C. (2019). President Signs Executive Order on Artificial Intelligence. *The New York Times*. Recuperado el 10 de Febrero de 2019, de <https://nyti.ms/2UUKwCf>
- Minoli, D., & Occhiogrosso, B. (2018). Blockchain mechanisms for IoT security. *Internet of Things, 1-2*, 1-13. doi:10.1016/j.iot.2018.05.002
- 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, 194-214. doi:10.1016/j.jmsy.2018.10.005
- Mourtzis, D., Zogopoulos, V., & Vlachou, E. (2018). Augmented Reality supported Product Design towards Industry 4.0: A Teaching Factory paradigm. *Procedia Manufacturing*, 23, 207-212. doi:10.1016/j.promfg.2018.04.018
- Muzammal, M., Qu, Q., & Nasrulin, B. (2019). Renovating blockchain with distributed databases: An open source system. *Future Generation Computer Systems*, 90, 105-117. doi:10.1016/j.future.2018.07.042
- Nasser, J. (2014). Cyber physical systems in the context of Industry 4.0. *IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics* (págs. 1-4). Cluj-Napoca: IEEE. doi:10.1109/AQTR.2014.6857843
- Nieuwenhuis, L. J., Ehrenhard, M. L., & Prause, L. (2018). The shift to Cloud Computing: The impact of disruptive technology on the enterprise software business ecosystem. *Technological Forecasting and Social Change*, 129, 308-313. doi:10.1016/j.techfore.2017.09.037

- Nuvolari, A. (2018). Understanding successive industrial revolutions: A "development block" approach. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 1-12. doi:10.1016/j.eist.2018.11.002
- Omolbanin, Y., & Scott, D. (2018). A systematic review of complex fuzzy sets and logic. *Fuzzy Sets and Systems*, 338, 1-22. doi:10.1016/j.fss.2017.01.010
- Paulk, M. C. (1995). *The Capability Maturity Model: Guidelines for Improving the Software Process*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley.
- Pedone, G., & Mezgár, I. (2018). Model similarity evidence and interoperability affinity in cloud-ready Industry 4.0 technologies. *Computers in Industry*, 100, 278-286. doi:10.1016/j.compind.2018.05.003
- Pereira, A., & Romero, F. (2017). A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept. *Procedia Manufacturing*, 13, 1206-1214. doi:10.1016/j.promfg.2017.09.032
- Pereira, T., Barreto, L., & Amaral, A. (2017). Network and information security challenges within Industry 4.0 paradigm. *Procedia Manufacturing*, 13, 1253-1260. doi:10.1016/j.promfg.2017.09.047
- Porter, M., & Heppelmann, J. (2015). *How Smart, Connected Products Are Transforming Competition*. Boston: Harvard Business Review.
- Provost, F., & Fawcett, T. (2013). Data Science and its Relationship to Big Data and Data-Driven Decision Making. *Big Data*, 1(1), 51-59. doi:10.1089/big.2013.1508
- Puentes, J., Figueroa, V., Jiménez, J., & Vázquez, J. (2019). Industry 4.0 – Reference framework and implications for the current industry. *Pistas educativas*, 193-209.
- Qin, J., Liu, Y., & Grosvenor, R. (2016). A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and Beyond. *Procedia CIRP*, 52, 173-178. doi:10.1016/j.procir.2016.08.005
- Radziwon, A., Bilberg, A., Bogers, M., & Skov Madsen, E. (2014). The Smart Factory: Exploring Adaptive and Flexible Manufacturing Solutions. *Procedia Engineering*, 69, 1184-1190. doi:10.1016/j.proeng.2014.03.108
- Real Academia Española. (2014). *ad hoc*. Recuperado el 4 de noviembre de 2018, de Real Academia Española (23.^a ed.): <http://dle.rae.es/srv/search?m=30&w=ad%20hoc>
- Real Academia Española. (2014). *filosofía*. Obtenido de Real Academia Española (23.^a ed.): <https://dle.rae.es/?id=Hw9B3HA>

- Real Academia Española. (2014). *hoja de ruta*. Recuperado el 6 de noviembre de 2018, de Real Academia Española (23.^a ed.): <http://dle.rae.es/?id=KYSU0CJ>
- Real Academia Española. (2014). *internet*. Obtenido de Real Academia Española (23.^a ed.): <http://dle.rae.es/?id=LvskgUG>
- Roblek, V., Meško, M., & Krapež, A. (2016). A Complex View of Industry 4.0. *Sage Open*, 6, 2158244016653987. doi:10.1177/2158244016653987
- Rockwell Automation. (2014). *The Connected Enterprise Maturity Model*. USA: Rockwell Automation.
- Rodrigues, B., Bocek, T., & Stiller, B. (2018). The Use of Blockchains: Application-Driven Analysis of Applicability. En P. Raj, & G. C. Deka, *Blockchain Technology: Platforms, Tools and Use Cases* (Advances in Computers ed., Vol. 111, págs. 163-198). Oxford: Elsevier Science. doi:10.1016/bs.adcom.2018.03.011
- Ruiz, J., Monroy, J., Moreno, F., Galindo, C., Bonelo, J., & Gonzalez, J. (2020). A predictive model for the maintenance of industrial machinery in the context of industry 4.0. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 87, 103289. doi:10.1016/j.engappai.2019.103289
- Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., & Harnisch, M. (2015). Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. *Boston Consulting Group*, 9, 54-89.
- S.E. de México. (2016). *Crafting the future: a roadmap for Industry 4.0 in Mexico*. México DF: Secretaría de Economía de México. Recuperado el 14 de noviembre de 2018, de <https://www.promexico.mx/documentos/mapas-de-ruta/industry-4.0-mexico.pdf>
- Salehi, H., & Burgueño, R. (2018). Emerging artificial intelligence methods in structural engineering. *Engineering Structures*, 171, 170-189. doi:10.1016/j.engstruct.2018.05.084
- Salort, S. (2012). *Revoluciones industriales, trabajo y estado del bienestar: la gran ruptura mundial contemporánea*. Madrid: Sílex.
- Schmidt, R., Möhring, M., Härting, R.-C., & Jozinović, P. (2015). Industry 4.0 - Potentials for Creating Smart Products: Empirical Research Results. *International Conference on Business Information Systems* (págs. 16-27). Poznań: BIS. doi:10.1007/978-3-319-19027-3_2
- Schuh, G., Anderl, R., Gausemeier, J., ten Hompel, M., & Wahlster, W. (. (2017). *Industrie 4.0 Maturity Index: Managing the Digital Transformation of Companies*. Herbert: Acatech

- study. Recuperado el 8 de noviembre de 2018, de https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/03/acatech_STUDIE_Maturity_Index_eng_WEB.pdf
- Schumacher, A., Erol, S., & Sihn, W. (2016). A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises. *Procedia CIRP*, 52, 161-166. doi:10.1016/j.procir.2016.07.040
- Schwab, K. (2017). *The Fourth Industrial Revolution*. Cologny: Currency.
- SEI. (2010). *CMMI for Development, Version 1.3*. Pittsburgh: Carnegie Mellon University.
- Senoussi, A., Dazère-Pérès, S., Brahimi, N., Penz, B., & Kinza M., N. (2018). Heuristics Based on Genetic Algorithms for the Capacitated Multi Vehicle Production Distribution Problem. *Computers & Operations Research*, 96, 108-119. doi:10.1016/j.cor.2018.04.010
- Shafiq, S., Sanin, C., Szczerbicki, E., & Toro, C. (2015). Virtual Engineering Object / Virtual Engineering Process: A specialized form of Cyber Physical System for Industrie 4.0. *Procedia - Procedia Computer Science*, 60, 1146-1155. doi:10.1016/j.procs.2015.08.166
- Sieniutycz, S., & Szwasz, Z. (2018). Neural Networks - A Review of Applications. *Optimizing Thermal, Chemical, and Environmental Systems*, 109-120. doi:10.1016/B978-0-12-813582-2.00004-5
- Sloan, J. (2014). *Learning to Think Strategically* (Segunda ed.). Abingdon-on-Thames: Routledge.
- Spachos, P., & Plataniotis, K. (2018). Beacons and the City: Smart Internet of Things. En Djurić, Petar, & C. Richard, *Cooperative and Graph Signal Processing: Principles and Applications* (págs. 757-776). Ámsterdam: Elsevier. doi:10.1016/C2017-0-00088-5
- Stefan, L., Thom, W., Dominik, L., Dieter, K., & Bernd, K. (2018). Concept for an evolutionary maturity based Industrie 4.0 migration model. *Procedia CIRP*, 72, 404-409. doi:10.1016/j.procir.2018.03.155
- Subramanian, N., & Jeyaraj, A. (2018). Recent security challenges in cloud computing. *Computers and Electrical Engineering*, 71, 28-42. doi:10.1016/j.compeleceng.2018.06.006
- Sung, T. K. (2018). Industry 4.0: A Korea perspective. *Technological Forecasting & Social Change*, 132, 40-45. doi:10.1016/j.techfore.2017.11.005
- Swan, M. (2015). *Blockchain: Blueprint for a New Economy*. New York: O'Reilly Media.
- Swanson, A. (15 de junio de 2018). U.S. and China Expand Trade War as Beijing Matches Trump's Tariffs. *The New York Times*. Recuperado el 12 de noviembre de 2018, de <https://www.nytimes.com/2018/06/15/us/politics/us-china-tariffs-trade.html>

- Tapscott, D., & Tapscott, A. (2016). *Blockchain Revolution: How the Technology Behind Bitcoin Is Changing Money, Business, and the World*. Londres: Penguin.
- Thames, L., & Schaefer, D. (2016). Software-defined Cloud Manufacturing for Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 52, 12-17. doi:10.1016/j.procir.2016.07.041
- The White House. (2018). *President Donald J. Trump is Confronting China's Unfair Trade Policies*. Obtenido de Fact Sheets: <https://www.whitehouse.gov/briefings-statements/president-donald-j-trump-confronting-chinas-unfair-trade-policies/>
- Thomson, J. (2015). The Second Industrial Revolution – A Brief History of Computing. En J. Thomson, *High Integrity Systems and Safety Management in Hazardous Industries* (págs. 127–136). Boston: Butterworth-Heinemann.
- Tjahjono, B., Esplugues, C., Ares, E., & Pelaez, G. (2017). What does Industry 4.0 mean to Supply Chain? *Procedia Manufacturing*, 13, 1175-1182. doi:10.1016/j.promfg.2017.09.191
- Trstenjak, M., & Cosic, P. (2017). Process Planning in Industry 4.0 Environment. *Procedia Manufacturing*, 11, 1744-1750. doi:10.1016/j.promfg.2017.07.303
- Tseng, M. L., Tan, R. R., Chiu, A. S., Chien, C. F., & Kuo, T. C. (2018). Circular economy meets industry 4.0: Can big data drive industrial symbiosis? *Resources, Conservation and Recycling*, 131, 146-147. doi:10.1016/j.resconrec.2017.12.028
- UBS. (2016). *Extreme automation and connectivity: The global, regional, and investment implications of the Fourth Industrial Revolution*. Zúrich: UBS.
- Vaidya, S., Ambad, P., & Bhosle, S. (2018). Industry 4.0 – A Glimpse. *Procedia Manufacturing*, 20, 233-238. doi:10.1016/j.promfg.2018.02.034
- Van Hung, L., & Khanh, D. (2018). Extending fuzzy logics with many hedges. *Fuzzy Sets and Systems*, 345, 126-138. doi:10.1016/j.fss.2018.01.014
- VDMA. (2016). *Guideline Industrie 4.0: Guiding principles for the implementation of Industrie 4.0 in small and medium sized businesses*. Frankfurt: VDMA Verlag. Recuperado el 8 de noviembre de 2018, de <https://industrie40.vdma.org/documents/4214230/0/Guideline%20Industrie%204.0.pdf/70abd403-cb04-418a-b20f-76d6d3490c05>
- VDMA. (2016). *Industrie 4.0 in practice – Solutions for industrial applications*. Frankfurt: Industrie 4.0 newsletter.

- Villamil, A. (2017). *Economía y medio ambiente*. Madrid: Editorial Centro de Estudios Ramon Areces.
- Vranken, H. (2017). Sustainability of bitcoin and blockchains. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 28, 1-9. doi:10.1016/j.cosust.2017.04.011
- WEF. (2016). *The Global Information Technology Report: Innovating in the Digital Economy*. Ginebra: Silja Baller (World Economic Forum), Soumitra Dutta (Cornell University), and Bruno Lanvin (INSEAD) .
- Weiser, M., & Brown, J. (1995). *Designing Calm Technology*. California: Xerox PARC.
- Wittenberg, C. (2016). Human-CPS Interaction - requirements and human-machine interaction methods for the Industry 4.0. *IFAC-PapersOnLine*, 49(19), 420-425. doi:10.1016/j.ifacol.2016.10.602
- Woodrow, C. I., & Grant, M. (2010). The Third Industrial Revolution. En C. I. Woodrow, *Sustainable Communities Design Handbook* (págs. 9-22). Boston: Woodrow W. Clark, II. doi:10.1016/C2009-0-20242-X
- Zezulka, F., Marcon, P., Vesely, I., & Sajdl, O. (2016). Industry 4.0 – An Introduction in the phenomenon. *International Federation of Automatic Control Papers*, 49, 8-12. doi:10.1016/j.ifacol.2016.12.002
- Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., & Newman, S. T. (2017). Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. *Engineering*, 3(5), 616-630. doi:10.1016/J.ENG.2017.05.015

ANEXOS

Anexo 1. Cuestionario de modelo de evaluación de madurez propuesto

DIMENSIÓN: DIRECCIÓN

Subdimensión	Elemento de madurez	Núm.	Pregunta de cuestionario	Núm.	Código de pregunta	Posibles respuestas a pregunta	Anul.	Puntuación de respuesta
Estrategia	Adaptación hacia un modelo de negocio de I4.0	1	¿Posee la compañía una estrategia para implementar Industria 4.0?	1	DIR-EST-ADA1_P1	Una estrategia holística para implementar Industria 4.0 fue definida e introducida en toda la compañía. Industria 4.0 hace parte de la estrategia corporativa. Proyectos de Industria 4.0 están siendo implementados en varias áreas de negocio y/o sucursales.		5
						Algunas áreas de negocio y/o sucursales poseen una estrategia orientada hacia Industria 4.0. Proyectos de Industria 4.0 están siendo implementados en varios departamentos y/o sucursales.		3
						No se cuenta con una estrategia orientada hacia Industria 4.0. Sin embargo, proyectos de Industria 4.0 están siendo implementados en algunos departamentos y/o sucursales.		1
						No se cuenta con una estrategia orientada hacia Industria 4.0. Esfuerzos por implementar Industria 4.0 no están siendo realizados.	a	0
Estrategia	Adaptación hacia un modelo de negocio de I4.0	1	¿Hasta qué punto los esfuerzos por implementar Industria 4.0 son medidos por la compañía?	2	DIR-EST-ADA1_P2	Diversas métricas han sido creadas para todas las áreas de negocio de la compañía. El control y seguimiento de estas métricas impacta positivamente en los objetivos de Industria 4.0 trazados por la compañía.	a.1	5
						Métricas en torno a Industria 4.0 han sido creadas para algunas áreas de negocio, estas métricas son usadas para llevar a cabo acciones de mejora.		4
						Métricas en torno a Industria 4.0 han sido creadas para algunas áreas de negocio. Sin embargo, estas métricas no son tenidas en cuenta para promover acciones de mejora.		2
						La compañía no ha creado métricas en torno a Industria 4.0 para sus áreas de negocio.		0
Estrategia	Adaptación hacia un modelo de negocio de I4.0	1	¿Posee la compañía una coordinación central de Industria 4.0?	3	DIR-EST-ADA1_P3	La compañía posee una coordinación central de Industria 4.0 con integrantes de perfiles idóneos, cada integrante es capaz de concebir la organización de manera holística.		5
						La compañía posee una coordinación central de Industria 4.0, sus integrantes poseen perfiles idóneos.		3

Subdimensión	Elemento de madurez	Núm.	Pregunta de cuestionario	Núm.	Código de pregunta	Posibles respuestas a pregunta	Anul.	Puntuación de respuesta
						La compañía posee una coordinación central de Industria 4.0. Sin embargo, sus integrantes no cuentan con perfiles idóneos y el equipo posee poca multidisciplinariedad.		2
						La compañía no posee una coordinación central de Industria 4.0. Sin embargo, la conformación de esta coordinación se tiene planificada en el corto plazo.		1
						La compañía no posee una coordinación central de Industria 4.0.		0

Estrategia	Adaptación hacia un modelo de negocio de I4.0	1	¿Qué tan flexible considera la estructura organizacional que utiliza actualmente la compañía?	4	DIR-EST-ADA1_P4	La compañía posee una estructura organizacional flexible, esta estructura permite agilizar los procesos e incentiva la innovación y la propuesta de mejoras. Esto ayuda a la compañía a adaptarse rápidamente a los cambios.		5
						La compañía posee una estructura organizacional flexible, esta estructura permite agilizar los procesos e incentiva la innovación y la propuesta de mejoras.		3
						La compañía posee una estructura organizacional poco flexible. Sin embargo, se está trabajando hacia una estructura flexible que permita agilizar procesos e incentivar la innovación y las propuestas de mejora.		2
						La compañía posee una estructura organizacional poco flexible. Se brindan pocos espacios para la innovación y la mejora de procesos. Además, se observa exceso de burocracia dentro de la compañía.		0

Estrategia	Apertura a la innovación	2	¿Cómo describiría la disposición de la compañía hacia la innovación?	1	DIR-EST-APE2_P1	La compañía posee una alta disposición a innovar. Además de lo anterior, se cuenta con un equipo dedicado a Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) en cada área de negocio.		5
						La compañía posee una alta disposición a innovar. La innovación se encuentra definida como uno de los objetivos y métricas que la compañía evalúa periódicamente.		4
						La compañía posee una leve disposición a innovar. Sin embargo, la innovación no se encuentra definida como uno de los objetivos y métricas de la empresa.		2

Subdimensión	Elemento de madurez	Núm.	Pregunta de cuestionario	Núm.	Código de pregunta	Posibles respuestas a pregunta	Anul.	Puntuación de respuesta
						La compañía posee poca o nula disposición a innovar. Los procesos se vienen implementando de la misma manera hace varios años.		0
Estrategia	Apertura a la innovación	2	¿Cómo describiría la reacción ante los errores y la cultura de retroalimentación de la compañía?	2	DIR-EST-APE2_P2	Además de lo anterior, los fallos son considerados de la misma manera independientemente de la persona o grupo de personas que los haya ocasionado.		5
						Una cultura de retroalimentación como herramienta para el desarrollo profesional y la mejora continua es aplicada en toda la compañía. Se reconoce el valor que tienen los errores para el aprendizaje.		3
						En algunas áreas de negocio se posee una cultura de retroalimentación. Otros, encuentran difícil retroalimentar y dar valor a los errores.		2
						La retroalimentación es considerada como una ofensa personal. Los fallos son medidos de manera diferente dependiendo quien o quienes los cometan, cubrirlos es algo habitual por temor a represalias.		0
Estrategia	Inversiones estratégicas	3	¿Hasta qué punto se han dispuesto recursos financieros para implementar Industria 4.0?	1	DIR-EST-INV3_P1	Se han dispuesto recursos para todas las áreas de negocio de la compañía.		5
						Se han dispuesto recursos sólo para las áreas de negocio que la compañía ha considerado como "prioritarias".		3
						Se han dispuesto recursos para un número reducido de áreas de negocio no necesariamente consideradas como "prioritarias".		2
						Se han dispuesto recursos para una única área de negocio.		1
						No se han dispuesto recursos para implementar Industria 4.0.	b	0
Estrategia	Inversiones estratégicas	3	¿Cómo son evaluadas las inversiones que la compañía realiza en torno a Industria 4.0?	2	DIR-EST-INV3_P2	Se realizan las anteriores acciones. Además, se realizan seguimientos periódicos a los fondos invertidos.	b.1	5
						Se realizan las anteriores acciones. Sin embargo, no se realizan seguimientos periódicos a los fondos invertidos.		3

Subdimensión	Elemento de madurez	Núm.	Pregunta de cuestionario	Núm.	Código de pregunta	Posibles respuestas a pregunta	Anul.	Puntuación de respuesta
						La compañía realiza inversiones en Industria 4.0 realizando primeramente algunos análisis financieros para determinar la pertinencia y prioridad de las inversiones.		2
						La compañía realiza inversiones en Industria 4.0 sin analizar estratégicamente hasta qué grado de inversión se obtiene un costo-beneficio favorable.		0

Liderazgo	Competencias de los líderes frente a I4.0	1	¿Hasta qué punto son competentes los líderes de la compañía para encarar los retos que implica Industria 4.0?	1	DIR-LID-COM1_P1	Todos los líderes poseen conocimientos en tecnologías de la información y reconocen el valor de invertir esfuerzos en Industria 4.0.		5
						Sólo algunos de los líderes de la compañía reconocen el valor de invertir esfuerzos en Industria 4.0.		2
						Los líderes de la compañía poseen algunos conocimientos en tecnologías de la información. Sin embargo, estos no reconocen el valor de invertir esfuerzos en Industria 4.0.		1
						En promedio, los líderes de la compañía poseen pocos o nulos conocimientos con tecnologías de la información.		0

Liderazgo	Estilo de liderazgo	2	¿Cómo describiría el estilo de liderazgo de los líderes de la compañía?	1	DIR-LID-EST2_P1	Los líderes se ven a sí mismos como entrenadores y compañeros de aprendizaje, empleando un estilo de liderazgo participativo y transformacional. El objetivo principal es el desarrollo continuo de las competencias del equipo de trabajo.		5
						Los líderes emplean un estilo de liderazgo participativo, apoyando activamente a sus equipos de trabajo al logro de las metas propuestas.		3
						Los líderes emplean un estilo de liderazgo orientado hacia las tareas, estos planifican el correcto desarrollo de las tareas para alcanzar las metas propuestas. Sin embargo, suelen no ser parte activa del proceso y no tienden a pensar mucho en el bienestar de su equipo, por lo que se presentan problemas para motivar y retener a los colaboradores.		1
						Los líderes emplean un estilo de liderazgo autocrático. Los integrantes del equipo pocas veces tienen oportunidad de ofrecer sugerencias, incluso si estas son para el bien del equipo de trabajo o la compañía.		0

Subdimensión	Elemento de madurez	Núm.	Pregunta de cuestionario	Núm.	Código de pregunta	Posibles respuestas a pregunta	Anul.	Puntuación de respuesta
--------------	---------------------	------	--------------------------	------	--------------------	--------------------------------	-------	-------------------------

Ciberseguridad	Protección de datos	1	¿Cómo garantiza la compañía la seguridad de los datos?	1	DIR-CIB-PRO1_P1	El concepto de seguridad informática de la compañía se ajusta rápidamente a los nuevos riesgos. Brechas de seguridad son identificadas y corregidas inmediatamente. Además, los procesos de cifrado y autenticación se encuentran implementados y optimizados en toda la compañía y cadena de suministro.		5
						Se cuenta con una extensa protección de acceso para los datos y dispositivos. Además, se trabaja con los proveedores de servicios en la nube para, en conjunto, desarrollar nuevos conceptos de seguridad (ejemplo: sistemas de control de acceso basados en roles, etc.).		4
						Los dispositivos de la compañía cuentan con mecanismos de protección de datos. Procesos de cifrado y autenticación se encuentran implementados en toda la empresa.		3
						Se utilizan mecanismos clásicos de protección tales como cortafuegos, VPN, SSL/TPS, entre otros.		1
						La compañía no posee un concepto definido de seguridad informática y/o protección de datos, la seguridad de la información no está garantizada.		0

Ciberseguridad	Protección de datos	1	¿Hasta qué punto ha instaurado la compañía políticas de ciberseguridad?	2	DIR-CIB-PRO1_P2	Además de lo anterior. Se cuenta con un plan de actualización periódica en función de nuevos riesgos y amenazas que se puedan ir presentando.		5
						Políticas de ciberseguridad se encuentran actualmente instauradas. Sin embargo, no se cuenta con un plan de actualización periódica que permita atender nuevos riesgos y amenazas.		3
						Políticas de ciberseguridad han comenzado a ser instauradas parcialmente en la compañía.		2
						No se han instaurado políticas de ciberseguridad en la compañía. Sin embargo, se tiene planificado instaurarlas en el corto plazo.		1
						No se han instaurado políticas de ciberseguridad en la compañía ni se tiene planificado instaurarlas en el corto plazo.		0

Subdimensión	Elemento de madurez	Núm.	Pregunta de cuestionario	Núm.	Código de pregunta	Posibles respuestas a pregunta	Anul.	Puntuación de respuesta
Ciberseguridad	Protección a la propiedad intelectual	2	¿Hasta qué punto protege la compañía la propiedad intelectual de sus productos y servicios?	1	DIR-CIB-PRO2_P1	Se realizan las anteriores acciones. Además, se cuenta con un plan de actualización de políticas internas en función de los cambios normativos y las dinámicas del sector.		5
						Se realizan las anteriores acciones. Además, la propiedad intelectual se encuentra protegida por políticas internas.		3
						La propiedad intelectual de los productos y servicios ofrecidos por la compañía, así como la legislación nacional e internacional vigente aplicable, se encuentran identificadas. Sin embargo, no se encuentra protegida por políticas internas.		2
						La propiedad intelectual presente en los productos y servicios ofertados por la compañía no se encuentra identificada ni protegida.		0

Ciberseguridad	Modelos de contrato	3	¿Qué esfuerzos ha realizado la compañía para incluir aspectos de ciberseguridad en sus modelos de contrato?	1	DIR-CIB-MOD3_P1	Además de lo anterior, dichos modelos son actualizados periódicamente en función de la legislación vigente aplicable y los nuevos riesgos y amenazas que se puedan presentar.		5
						Los cambios en los modelos de contrato se han estandarizado a lo largo de toda la compañía.		4
						Los modelos de contrato han tenido algunos cambios para incluir aspectos de ciberseguridad. Sin embargo, estos cambios no se han estandarizado.		2
						Los modelos de contrato (para proveedores, colaboradores, clientes, etc.) no incluyen aspectos de ciberseguridad.		0

DIMENSIÓN: OPERACIONES

Subdimensión	Elemento de madurez	Núm.	Pregunta de cuestionario	Núm.	Código de pregunta	Posibles respuestas a pregunta	Anul.	Puntuación de respuesta
Enfoque de datos	Recopilación de datos	1	¿En qué proporción la compañía recolecta datos de sus operaciones relevantes?	1	OPE-ENF-REC1_P1	Los datos son recolectados en más del 90% de las operaciones relevantes.		5
						Los datos son recolectados entre el 75% y 90% de las operaciones relevantes.		4
						Los datos son recolectados entre el 50% y 74% de las operaciones relevantes.		3
						Los datos son recolectados entre el 25% y 49% de las operaciones relevantes.		2
						Los datos son recolectados entre el 1% y 24% de las operaciones relevantes.		1
						Los datos no son recolectados.	C	0
Enfoque de datos	Aprendizaje y toma de decisiones basada en datos	2	¿Cómo la compañía procesa los datos recolectados de las operaciones?	1	OPE-ENF-APR2_P1	Los datos recolectados son analizados mediante técnicas estadísticas convencionales y de procesamiento de datos avanzado (<i>Inteligencia Artificial, Big Data, Machine Learning</i>) para apoyar el proceso de toma de decisiones.	c.1	5
						Los datos recolectados son analizados mediante técnicas estadísticas convencionales para apoyar el proceso de toma de decisiones.		3
						Los datos no son analizados, sólo recolectados.		0
Enfoque de datos	Uso efectivo de datos	3	¿La compañía obtiene beneficios tangibles de la recopilación y procesamiento de datos?	1	OPE-ENF-USO3_P1	Además de lo anterior, se podido identificar nuevas oportunidades de negocio gracias al enfoque de datos.	c.2	5
						El enfoque de datos implementado por la compañía ha permitido aumentar las utilidades y diversos indicadores de gestión en diferentes áreas del negocio.		4
						El enfoque de datos implementado por la compañía ha permitido aumentar ligeramente las utilidades y algunos indicadores de gestión.		3
						El enfoque de datos implementado por la compañía no ha permitido aumentar las utilidades de la compañía. Sin embargo, se tienen proyectados aumentos en las utilidades en el corto-mediano plazo debido a los esfuerzos actualmente implementados.		1

Subdimensión	Elemento de madurez	Núm.	Pregunta de cuestionario	Núm.	Código de pregunta	Posibles respuestas a pregunta	Anul.	Puntuación de respuesta
						El enfoque de datos implementado por la compañía no ha permitido aumentar las utilidades de la compañía y sólo ha representado egresos que no se encuentran respaldados por un claro y favorable retorno de la inversión.		0
Procesos	Descentralización	1	¿Cómo se realiza el control de la producción en la compañía?	1	OPE-PRO-DES1_P1	El control de la producción es completamente gestionado por Sistemas Ciber-físicos. Estos ayudan a visualizar y gestionar en tiempo real las operaciones, reacciona autónomamente ante cualquier evento.		5
						Además de lo anterior, el sistema sugiere acciones en tiempo real pero las decisiones finales son tomadas por humanos.		3
						El control de la producción es gestionado de manera centralizada. Sin embargo, se tiene una alta predictibilidad de los procesos gracias a un análisis de datos automatizado.		2
						El control de la producción es gestionado de manera centralizada y determinística. No involucra análisis de datos y es gestionado por sistemas ERP convencionales.		0
Procesos	Descentralización	1	¿Sistemas auto-optimizables son usados en las operaciones de manufactura?	2	OPE-PRO-DES1_P2	Sistemas auto-optimizables son implementados en todas las áreas de negocio.		5
						Sistemas auto-optimizables son implementados en áreas de negocio definidas como "prioritarias".		3
						Sistemas auto-optimizables no son implementados en la compañía. Sin embargo, se tiene planificado su inclusión en el corto plazo.		1
						Sistemas auto-optimizables no son implementados en la compañía. No se tiene planificado su inclusión en el corto plazo.		0
Procesos	Descentralización	1	¿Hasta qué punto es el inventario controlado mediante la gestión en tiempo real de los datos de producción?	3	OPE-PRO-DES1_P3	La gestión del inventario se realiza mediante una base de datos alimentada en tiempo real por diversos dispositivos inteligentes proveedores de datos. Dicha base de datos se encuentra sincronizada con el sistema de órdenes de los proveedores.		5
						Se realizan las previas acciones. Sin embargo, los datos sí se encuentran sincronizados con el sistema de órdenes de los proveedores.		3

Subdimensión	Elemento de madurez	Núm.	Pregunta de cuestionario	Núm.	Código de pregunta	Posibles respuestas a pregunta	Anul.	Puntuación de respuesta
						La gestión del inventario se realiza mediante datos recolectados manualmente. Dichos datos no se encuentran sincronizados con el sistema de órdenes de los proveedores o, en su defecto, las operaciones de compra de la compañía.		1
						La gestión del inventario no se realiza mediante la gestión en tiempo real de los datos de producción, esta gestión se basa en procesos Ad-hoc y comunicaciones reactivas.		0

Procesos	Descentralización	1	¿Cómo se gestiona el mantenimiento de equipos en la compañía?	4	OPE-PRO-DES1_P4	Se realizan las acciones previas. Sin embargo, el análisis de datos permite realizar mantenimientos predictivos.		5
						Además de lo anterior, los datos son analizados automáticamente.		3
						El estado de los equipos es registrado de manera automática, los datos son analizados manualmente.		2
						El estado de algunos equipos es registrado manualmente. Se sigue un plan de mantenimiento convencional del tipo prevención/corrección.		0
						El estado de los equipos no es registrado.		0

Procesos	Canales de mercadeo integrados	2	¿Hasta qué punto se encuentran integrados los canales de mercadeo de la compañía?	1	OPE-PRO-CAN2_P1	Además de las previas acciones, se cuenta con un sistema de gestión de experiencia de cliente.		5
						Además de lo anterior, se cuenta con un enfoque individualizado de cliente que permite dirigir los mensajes idóneos acorde a cada tipo de cliente.		3
						Mensajes y valores de marca emitidos en canales on-line y off-line son iguales. Sin embargo, no se cuenta con un enfoque individualizado de cliente.		2
						En algunos casos son iguales los mensajes y valores de marca emitidos en canales on-line y off-line.		1
						Los mensajes y valores de marca que se emiten en los canales on-line (Facebook, Twitter, YouTube, etc.) son diferentes a los emitidos en canales off-line (TV, publicidad impresa, etc.).		0

Subdimensión	Elemento de madurez	Núm.	Pregunta de cuestionario	Núm.	Código de pregunta	Posibles respuestas a pregunta	Anul.	Puntuación de respuesta
Recursos Humanos	Competencias frente a I4.0	1	¿Hasta qué punto es el recurso humano de la compañía es competente frente a las habilidades requeridas por Industria 4.0?	1	OPE-REC-COM1_P1	En todas las áreas de negocio se cuenta con el necesario personal cualificado para implementar Industria 4.0.		5
						En las áreas priorizadas de negocio se cuenta con personal cualificado para desarrollar Industria 4.0.		3
						Sólo en las áreas TIC se cuenta con personal cualificado para desarrollar Industria 4.0.		2
						En algunas áreas de negocio se cuenta con personal con algunas competencias para desarrollar Industria 4.0.		1
						En promedio, los empleados tienen poca o nula experiencia con tecnologías digitales.		0
Recursos Humanos	Apertura hacia el cambio y nuevas tecnologías	2	¿Qué posición considera que tiene el recurso humano de la compañía frente al cambio y las nuevas tecnologías?	1	OPE-REC-APE2_P1	El recurso humano de la compañía no posee resistencia al cambio que dificulte la inclusión de nuevas tecnologías en las operaciones. Los empleados en general se encuentran dispuestos a aprender conceptos nuevos y a aplicarlos en sus entornos de trabajo.		5
						El recurso humano de la compañía posee una leve resistencia al cambio. Acciones para mitigar esta problemática están siendo desarrolladas actualmente.		3
						Además de lo anterior, acciones para mitigar la resistencia al cambio están siendo implementadas actualmente.		1
						El recurso humano de la compañía posee una fuerte resistencia al cambio que dificulta la inclusión de nuevas tecnologías en las operaciones.		0
Recursos Humanos	Desarrollo profesional continuo	3	¿Cómo la compañía prepara a sus empleados para los cambios que implica Industria 4.0?	1	OPE-REC-DES3_P1	Además de lo anterior, los planes de capacitación han producido resultados medibles y positivos que se mejoran continuamente.		5
						La compañía posee un programa de capacitación para todos sus empleados con el fin de prepararlos y concientizarlos para los nuevos cambios.		3
						La compañía sólo informa a sus empleados acerca de los cambios presentes y futuros en términos de Industria 4.0.		1
						La compañía no prepara a sus empleados para los cambios que implica Industria 4.0.		0

Subdimensión	Elemento de madurez	Núm.	Pregunta de cuestionario	Núm.	Código de pregunta	Posibles respuestas a pregunta	Anul.	Puntuación de respuesta
Recursos Humanos	Autonomía	4	¿La compañía concibe un modelo de organización del trabajo en donde sus empleados poseen autonomía para tomar decisiones?	1	OPE-REC-AUT4_P1	Además de lo anterior, al finalizar un proyecto se realiza un profundo análisis autocrítico sobre las decisiones tomadas. Esto permite mejorar progresivamente el desempeño de los equipos de trabajo.		5
						Los empleados en general poseen un alto grado de autonomía para tomar decisiones. La figura de un jefe no es necesaria para la mayoría de las decisiones.		4
						Los empleados en general poseen cierto grado de autonomía para tomar decisiones. Sin embargo, son parcialmente dependientes de un jefe para tomar decisiones.		2
						La compañía no concibe un modelo de organización del trabajo en donde los empleados posean autonomía para tomar decisiones.		0

DIMENSIÓN: PRODUCCIÓN

Subdimensión	Elemento de madurez	Núm.	Pregunta de cuestionario	Núm.	Código de pregunta	Posibles respuestas a pregunta	Anul.	Puntuación de respuesta
Infraestructura	Infraestructura tecnológica	1	¿Cómo se encuentra actualmente la infraestructura tecnológica de la compañía frente a los requerimientos de Industria 4.0?	1	PRO-INF-INF1_P1	Máquinas y sistemas cumplen totalmente con los requerimientos de Industria 4.0.		5
						Máquinas y sistemas cumplen parcialmente con los requerimientos de Industria 4.0.		3
						Máquinas y sistemas no cumplen con los requerimientos de Industria 4.0. Sin embargo, las máquinas pueden ser acondicionadas/instrumentadas.		1
						Máquinas y sistemas no cumplen con los requerimientos de Industria 4.0, para cumplirlos es necesario cambiar de equipos.		0

Infraestructura	Infraestructura tecnológica	1	¿Hasta qué punto la computación en la nube es usada para el procesamiento de datos?	2	PRO-INF-INF1_P2	Además de lo anterior, el servicio de solución en la nube posee suficiente capacidad de almacenamiento y recursos acorde a las necesidades de la compañía.		5
-----------------	-----------------------------	---	---	---	-----------------	--	--	---

Subdimensión	Elemento de madurez	Núm.	Pregunta de cuestionario	Núm.	Código de pregunta	Posibles respuestas a pregunta	Anul.	Puntuación de respuesta
						Producto de la previa acción, la compañía ha incrementado su eficiencia a la hora de procesar datos. Así mismo, ha logrado una disminución en la carga y los costos asociados a servidores, instalaciones eléctricas, etc.).		4
						La compañía ha implementado soluciones piloto de computación en la nube en algunas áreas de negocio.		2
						La compañía actualmente no implementa ninguna solución basada en la nube. Sin embargo, planifica hacerlo en el corto plazo.		1
						La compañía actualmente no implementa ninguna solución basada en la nube.		0

Infraestructura	Interfaces de datos estandarizadas	2	¿La compañía posee interfaces de datos estándar que permiten un eficiente intercambio de información entre máquinas, dispositivos y sistemas de información?	1	PRO-INF-INT2_P1	La compañía posee interfaces de datos estandarizadas para todas las máquinas, dispositivos y operaciones dentro de su infraestructura productiva. Esto permite integrar las máquinas a los sistemas de información.		5
						La compañía posee interfaces de datos estandarizadas sólo para algunas máquinas, dispositivos y operaciones clave dentro de su infraestructura productiva. Esto permite integrar dichas máquinas a los sistemas de información.		3
						La compañía no posee interfaces de datos estandarizadas a lo largo de su infraestructura productiva. Sin embargo, se tienen planificadas acciones en el corto plazo para mitigar esta problemática.		1
						La compañía no posee interfaces de datos estandarizadas a lo largo de su infraestructura productiva.		0

Infraestructura	Integración sistémica M2M	3	¿Hasta qué punto las máquinas de producción se pueden comunicar entre sí?	1	PRO-INF-INT3_P1	Todas las máquinas de la compañía se encuentran conectadas vía internet e intercambian entre sí información de las actividades que realizan con el fin de hacer más eficientes las operaciones de producción.		5
						Las máquinas de la compañía se encuentran conectadas por cable a una red local centralizada de cómputo.		4

Subdimensión	Elemento de madurez	Núm.	Pregunta de cuestionario	Núm.	Código de pregunta	Posibles respuestas a pregunta	Anul.	Puntuación de respuesta
						Las máquinas funcionan con el apoyo de alguna computadora. Sin embargo, diversos datos de salida deben ser extraídos manualmente para ser entregados a otras máquinas.		1
						Las máquinas no generan datos que les permitan comunicarse entre sí.		0
Infraestructura	Flexibilidad y Modularidad	4	¿Cuán adaptable es el sistema productivo de la compañía?	1	PRO-INF-FLE4_P1	El sistema productivo se basa en estructuras modulares de tipo Plug & Produce, las cuales autónomamente realizan cambios herramientales y reconfiguraciones de líneas dependiendo del tipo de bien a producir.		5
						El sistema productivo se basa en estructuras modulares de tipo Plug & Produce. Sin embargo, los cambios herramientales y reconfiguraciones de líneas son realizadas por humanos.		3
						El sistema productivo se basa en estructuras modulares. Sin embargo, los tiempos de cambio herramientales son altos.		2
						El sistema productivo no posee estructuras modulares que permitan añadir flexibilidad a los procesos. Las líneas productivas son diseñadas para un tipo específico de producto (ad-hoc).		0
Productos	Personalización de productos	1	¿Cómo describiría la capacidad de personalización que poseen los productos de la compañía?	1	PRO-PRO-PER1_P1	Además de lo anterior, es posible producir un lote de sólo una unidad de producto.		5
						Se posee un alto nivel de personalización en la mayoría de las características del producto. Sin embargo, lotes de sólo una unidad de producto no son permitidos.		3
						Se posee un mediano nivel de personalización en la mayoría de las características del producto, las posibilidades de personalización son limitadas.		2
						La mayoría de los productos son realizados en grandes lotes de producción, la personalización está disponible sólo para algunos tipos de clientes.		1
						No se permite la personalización de productos.		0

Subdimensión	Elemento de madurez	Núm.	Pregunta de cuestionario	Núm.	Código de pregunta	Posibles respuestas a pregunta	Anul.	Puntuación de respuesta
Productos	Productos inteligentes	2	¿Hasta qué punto los productos (en proceso o terminados) intercambian información con el sistema productivo de la compañía?	1	PRO-PRO-PRO2_P1	Además de lo anterior, los productos están equipados con chips que contienen todos los parámetros de proceso e instrucciones para las máquinas de la línea. Un intercambio bidireccional de información con el sistema productivo es permitido.		5
						Los productos pueden ser identificados en todas las etapas del proceso productivo. Datos de producción son almacenados al interior de los productos mediante dispositivos RFID, códigos QR, e-Kanbans, entre otras alternativas.		4
						Los productos pueden ser identificados sólo en pocas etapas del proceso productivo.		2
						Los productos no pueden ser identificados ni rastreados en el proceso productivo.		0

DIMENSIÓN: CONECTIVIDAD

Subdimensión	Elemento de madurez	Núm.	Pregunta de cuestionario	Núm.	Código de pregunta	Posibles respuestas a pregunta	Anul.	Puntuación de respuesta	Punt. Resp. Rel. (Compañía)
Integración horizontal	Cadena Digital de Suministros	1	¿Hasta qué punto se encuentran conectadas las operaciones de la compañía y la cadena de suministro?	1	CON-INT-CAD1_P1	Todas las operaciones de la compañía se encuentran conectadas entre sí y, a su vez, con todas las operaciones clave de los eslabones de la cadena de suministro.		5	5
						Todas las operaciones de la compañía se encuentran conectadas entre sí y, a su vez, se encuentran conectadas parcialmente con algunas de las operaciones clave de los eslabones de la cadena de suministro.		3	4
						Las operaciones de la compañía y las de la cadena de suministro se encuentran conectadas parcialmente.		2	3
						Las operaciones de la compañía se encuentran conectadas parcialmente. No existe conexión con las operaciones de eslabones de la cadena de suministro.		0	2

Subdimensión	Elemento de madurez	Núm.	Pregunta de cuestionario	Núm.	Código de pregunta	Posibles respuestas a pregunta	Anul.	Puntuación de respuesta	Punt. Resp. Rel. (Compañía)
						No existe conexión entre las operaciones de la compañía ni conexión con la cadena de suministro.		0	0

Integración horizontal	Visibilidad y Flexibilidad de la Cadena de Suministro	2	¿Hasta qué punto posee visibilidad la cadena de suministro de la compañía?	1	CON-INT-VIS2_P1	Existe visibilidad en toda la cadena de suministros. Esta visibilidad es utilizada para la monitorización y optimización de las operaciones de la cadena. Existe visibilidad en toda la cadena de suministros. Sin embargo, esta visibilidad no es utilizada para la monitorización y optimización de las operaciones de la cadena. Existe visibilidad desde los clientes hasta los primeros proveedores (TIER 1).		5	
						Existe visibilidad sólo entre eslabones cercanos de la cadena de suministro.		3	
						No existe visibilidad en la cadena de suministro, información sobre los bienes que transitan por esta no puede ser rastreada incluso entre eslabones cercanos.		2	
								1	
								0	

Integración horizontal	Visibilidad y Flexibilidad de la Cadena de Suministro	2	¿Hasta qué punto posee flexibilidad la cadena de suministro de la compañía?	2	CON-INT-VIS2_P2	La cadena de suministro brinda una respuesta inmediata a los cambios del mercado y los cambios de requerimientos individuales de cada cliente. Así como también, a sucesos extraordinarios e imprevistos del entorno. La cadena de suministro posee una respuesta moderada a los cambios del mercado y los cambios de requerimientos individuales de cada cliente.		5	
						La cadena de suministro posee una respuesta moderada a los cambios del mercado y los cambios de requerimientos de clientes en general.		3	
						La cadena de suministro posee una respuesta moderada a los cambios del mercado y los cambios de requerimientos de clientes en general.		2	
						La cadena de suministro posee una respuesta lenta a los cambios del mercado.		1	

Subdimensión	Elemento de madurez	Núm.	Pregunta de cuestionario	Núm.	Código de pregunta	Posibles respuestas a pregunta	Anul.	Puntuación de respuesta	Punt. Resp. Rel. (Compañía)
--------------	---------------------	------	--------------------------	------	--------------------	--------------------------------	-------	-------------------------	-----------------------------

Integración horizontal	Beneficios reales de la cooperación entre eslabones	3	¿La compañía obtiene beneficios tangibles de la colaboración entre eslabones de la Cadena de Suministro?	1	CON-INT-BEN3_P1	La colaboración entre eslabones ha permitido aumentar significativamente las utilidades y diversos indicadores de gestión en varias áreas del negocio.		5	
						La colaboración entre eslabones ha permitido aumentar ligeramente las utilidades y algunos indicadores de gestión.		3	
						La colaboración entre eslabones no ha permitido aumentar las utilidades de la compañía. Sin embargo, se tienen proyectados aumentos en las utilidades en el corto-mediano plazo debido a los esfuerzos actualmente implementados.		1	
						La colaboración entre eslabones no ha permitido aumentar las utilidades de la compañía y sólo ha representado egresos que no se encuentran respaldados por un claro y favorable retorno de la inversión.		0	

Integración horizontal	Integración de sucursales con Cadena de Suministro	4	¿Hasta qué punto se encuentran integradas horizontalmente las sucursales de la compañía y sus respectivas Cadenas de Suministro?	1	CON-INT-INT4_P1	No se poseen sucursales / no relevante.	d	Eliminar elemento de la ponderación.	
						Se han realizado exitosos esfuerzos por integrar todas las sucursales y sus respectivas cadenas de suministro. Los esfuerzos se encuentran respaldados por un claro y favorable retorno a la inversión.		5	
						Actualmente se realizan esfuerzos por integrar horizontalmente las sucursales y sus respectivas cadenas de suministro.		3	

Subdimensión	Elemento de madurez	Núm.	Pregunta de cuestionario	Núm.	Código de pregunta	Posibles respuestas a pregunta	Anul.	Puntuación de respuesta	Punt. Resp. Rel. (Compañía)
						Respecto a lo anterior, se ha definido realizar esfuerzos de Industria 4.0 en sucursales a corto plazo.		1	
						No se han realizado esfuerzos por integrar horizontalmente las sucursales de la compañía y sus respectivas cadenas de suministro.		0	

Integración vertical	Integración entre áreas de negocio	1	¿Cómo se da la colaboración entre las áreas de negocio de la compañía?	1	CON-INT-INT1_P1	Las área de negocio se ven entre ellas como socios que trabajan por un mismo fin: la satisfacción al cliente externo e interno. Los proyectos son desarrollados por equipos multidisciplinares basados en la cualificación y la experiencia del recurso humano, sin importar el área de negocio al cual pertenezcan los integrantes.		5	
						Las área de negocio se ven entre ellas como socios, tratando de cumplir con los requerimientos de los clientes externos e internos y compartiendo toda la información necesaria.		3	
						Varias áreas de negocio trabajan en conjunto para determinados proyectos, esto permite tener un punto de vista interdisciplinar para abordar los problemas.		2	
						Varias áreas de negocio trabajan en conjunto para determinados proyectos. Sin embargo, cada área se interesa únicamente por sus propios objetivos.		1	
						Las áreas de negocio se ven entre sí como rivales. No existe colaboración entre áreas que pueda producir sinergia para los clientes externos e internos.		0	

Integración vertical	Integración entre áreas de negocio	1	¿Hasta qué punto se encuentran integrados los sistemas informáticos	2	CON-INT-INT1_P2	Integración en más del 90% de los procesos.		5	
----------------------	------------------------------------	---	---	---	-----------------	---	--	---	--

Subdimensión	Elemento de madurez	Núm.	Pregunta de cuestionario	Núm.	Código de pregunta	Posibles respuestas a pregunta	Anul.	Puntuación de respuesta	Punt. Resp. Rel. (Compañía)
			con los diferentes procesos de la compañía?			Integración entre el 75% y 90% de los procesos.		3	
						Integración entre el 50% y 74% de los procesos.		2	
						Integración entre el 25% y 49% de los procesos.		1	
						Integración entre el 1% y 24% de los procesos.		0	
						No se posee integración.			

Integración vertical	Beneficios de la cooperación entre áreas de negocio	2	¿La compañía obtiene beneficios tangibles de la colaboración entre áreas de negocio y la integración de sistemas informáticos con los procesos?	1	CON-INT-BEN2_P1	La colaboración e integración han permitido aumentar las utilidades y diversos indicadores de gestión que se transforman en beneficios reales y significativos para los clientes, colaboradores, socios y demás partes interesadas (<i>stakeholders</i>).		5	
						La colaboración e integración han permitido aumentar ligeramente las utilidades y algunos indicadores de gestión.		3	
						La colaboración e integración no han permitido aumentar las utilidades. Sin embargo, se tienen proyectados aumentos en el corto-mediano plazo debido a los esfuerzos actualmente implementados.		1	
						La colaboración e integración no han permitido aumentar utilidades y sólo han representado egresos que no se encuentran respaldados por un claro y favorable retorno de la inversión.		0	

Subdimensión	Elemento de madurez	Núm.	Pregunta de cuestionario	Núm.	Código de pregunta	Posibles respuestas a pregunta	Anul.	Puntuación de respuesta	Punt. Resp. Rel. (Compañía)
Integración vertical	Integración con sucursales	3	¿Hasta qué punto se encuentran en sincronía los esfuerzos realizados por implementar Industria 4.0 en la casa matriz con las sucursales de la compañía?	1	CON-INT-INT3_P1	No se poseen sucursales / no relevante.	d.1		
						Se han realizado esfuerzos por implementar Industria 4.0 en la casa matriz y en todas las sucursales de la compañía acorde a las necesidades de cada una.		5	
						Se han realizado esfuerzos por implementar Industria 4.0 en la casa matriz y en algunas sucursales.		3	
						Con respecto a lo anterior, se tiene planificado llevar a cabo esfuerzos para implementar Industria 4.0 en sucursales a corto plazo.		1	
						Se han realizado esfuerzos por implementar Industria 4.0 en la casa matriz. Sin embargo estos esfuerzos aún no han sido llevados a cabo en la/s sucursal/es ni se tiene planificado llevarlos a cabo a corto plazo.		0	

Anexo 2. Respuestas obtenidas de Auditor A

Overall score	Dimensión	Peso	Peso relativo	Calif de dim.	Calif de dim. e.d.	Subdimensión	Peso	Peso relativo	Calif de subdim.	Calif de subdim. e.d.	Elemento de madurez	Peso	Peso relativo	Calif de elem.	Calif de elem. e. d.	Código de pregunta	Calif de pregunta	Calif est. deseado
Est. Actual 2,0831	Dirección	27	0,27	2,6759	4,7037	Estrategia	12	0,4444	2,9688	4,7083	Adaptación hacia un modelo de negocio de I4.0	6,25	0,5208	2,5	5	DIR-EST-ADA1_P1	3	5
											Apertura a la innovación*	3	0,2500	3	4,75	DIR-EST-ADA1_P2	2	5
Est. Futuro 4,7638	Dirección	27	0,27	2,6759	4,7037	Estrategia	12	0,4444	2,9688	4,7083	Inversiones estratégicas	2,75	0,2292	4	4	DIR-EST-ADA1_P3	3	5
											Competencias de los líderes frente a I4.0	4	0,6154	2	5	DIR-EST-ADA1_P4	2	5
Est. Futuro 4,7638	Dirección	27	0,27	2,6759	4,7037	Estrategia	12	0,4444	2,9688	4,7083	Estilo de liderazgo	2,5	0,3846	3	5	DIR-EST-APE2_P1	3	4,5
											Protección de datos	3,75	0,4412	2,5	5	DIR-EST-APE2_P2	3	5
Est. Futuro 4,7638	Dirección	27	0,27	2,6759	4,7037	Estrategia	12	0,4444	2,9688	4,7083	Protección a la propiedad intelectual	2,25	0,2647	3	3	DIR-EST-INV3_P1	3	3
											Modelos de contrato	2,5	0,2941	2	5	DIR-EST-INV3_P2	5	5
Est. Futuro 4,7638	Dirección	27	0,27	2,6759	4,7037	Estrategia	12	0,4444	2,9688	4,7083	Recopilación de datos	3	0,3636	5	5	DIR-LID-COM1_P1	2	5
											Recopilación de datos	3	0,3636	5	5	DIR-LID-EST2_P1	3	5
Est. Futuro 4,7638	Dirección	27	0,27	2,6759	4,7037	Estrategia	12	0,4444	2,9688	4,7083	Uso efectivo de datos	2,5	0,3030	1	5	DIR-CIB-PRO1_P1	3	5
											Descentralización	5,25	0,7778	0,75	4,5	DIR-CIB-PRO1_P2	2	5
Est. Futuro 4,7638	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,8704	Enfoque de datos	8,25	0,4074	3,1212	5,0000	Protección de datos	3,75	0,4412	2,5	5	DIR-CIB-PRO2_P1	3	5
											Protección a la propiedad intelectual	2,25	0,2647	3	3	DIR-CIB-PRO2_P2	2	5
Est. Futuro 4,7638	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,8704	Enfoque de datos	8,25	0,4074	3,1212	5,0000	Modelos de contrato	2,5	0,2941	2	5	DIR-CIB-MOD3_P1	2	5
											Recopilación de datos	3	0,3636	5	5	OPE-ENF-REC1_P1	5	5
Est. Futuro 4,7638	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,8704	Enfoque de datos	8,25	0,4074	3,1212	5,0000	Aprendizaje y toma de decisiones basada en datos	2,75	0,3333	3	5	OPE-ENF-APR2_P1	3	5
											Uso efectivo de datos	2,5	0,3030	1	5	OPE-ENF-USO3_P1	1	5
Est. Futuro 4,7638	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,8704	Enfoque de datos	8,25	0,4074	3,1212	5,0000	Descentralización	5,25	0,7778	0,75	4,5	OPE-PRO-DES1_P1	1	3
											Recopilación de datos	3	0,3636	5	5	OPE-PRO-DES1_P2	1	5
Est. Futuro 4,7638	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,8704	Enfoque de datos	8,25	0,4074	3,1212	5,0000	Recopilación de datos	3	0,3636	5	5	OPE-PRO-DES1_P3	1	5
											Uso efectivo de datos	2,5	0,3030	1	5	OPE-PRO-DES1_P4	0	5
Est. Futuro 4,7638	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,8704	Enfoque de datos	8,25	0,4074	3,1212	5,0000	Descentralización	5,25	0,7778	0,75	4,5	OPE-PRO-DES2_P1	1	3
											Recopilación de datos	3	0,3636	5	5	OPE-PRO-DES2_P2	1	5
Est. Futuro 4,7638	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,8704	Enfoque de datos	8,25	0,4074	3,1212	5,0000	Descentralización	5,25	0,7778	0,75	4,5	OPE-PRO-DES2_P2	1	5
											Recopilación de datos	3	0,3636	5	5	OPE-PRO-DES3_P1	1	5
Est. Futuro 4,7638	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,8704	Enfoque de datos	8,25	0,4074	3,1212	5,0000	Descentralización	5,25	0,7778	0,75	4,5	OPE-PRO-DES3_P1	1	5
											Uso efectivo de datos	2,5	0,3030	1	5	OPE-PRO-DES4_P1	2	5
Est. Futuro 4,7638	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,8704	Enfoque de datos	8,25	0,4074	3,1212	5,0000	Descentralización	5,25	0,7778	0,75	4,5	OPE-PRO-DES4_P1	2	5
											Uso efectivo de datos	2,5	0,3030	1	5	OPE-PRO-CAN2_P1	5	5
Est. Futuro 4,7638	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,8704	Enfoque de datos	8,25	0,4074	3,1212	5,0000	Descentralización	5,25	0,7778	0,75	4,5	OPE-PRO-CAN2_P1	5	5
											Uso efectivo de datos	2,5	0,3030	1	5	OPE-REC-COM1_P1	1	5
Est. Futuro 4,7638	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,8704	Enfoque de datos	8,25	0,4074	3,1212	5,0000	Descentralización	5,25	0,7778	0,75	4,5	OPE-REC-COM1_P1	1	5
											Uso efectivo de datos	2,5	0,3030	1	5	OPE-REC-APE2_P1	5	5
Est. Futuro 4,7638	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,8704	Enfoque de datos	8,25	0,4074	3,1212	5,0000	Descentralización	5,25	0,7778	0,75	4,5	OPE-REC-APE2_P1	5	5
											Uso efectivo de datos	2,5	0,3030	1	5	OPE-REC-DES3_P1	1	5
Est. Futuro 4,7638	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,8704	Enfoque de datos	8,25	0,4074	3,1212	5,0000	Descentralización	5,25	0,7778	0,75	4,5	OPE-REC-DES3_P1	1	5
											Uso efectivo de datos	2,5	0,3030	1	5	OPE-REC-AUT4_P1	2	5
Est. Futuro 4,7638	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,8704	Enfoque de datos	8,25	0,4074	3,1212	5,0000	Descentralización	5,25	0,7778	0,75	4,5	OPE-REC-AUT4_P1	2	5
											Uso efectivo de datos	2,5	0,3030	1	5	PRO-INF-INF1_P1	1	5
Est. Futuro 4,7638	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,8704	Enfoque de datos	8,25	0,4074	3,1212	5,0000	Descentralización	5,25	0,7778	0,75	4,5	PRO-INF-INF1_P1	1	5
											Uso efectivo de datos	2,5	0,3030	1	5	PRO-INF-INF1_P2	2	5
Est. Futuro 4,7638	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,8704	Enfoque de datos	8,25	0,4074	3,1212	5,0000	Descentralización	5,25	0,7778	0,75	4,5	PRO-INF-INF1_P2	2	5
											Uso efectivo de datos	2,5	0,3030	1	5	PRO-INF-INT2_P1	1	5
Est. Futuro 4,7638	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,8704	Enfoque de datos	8,25	0,4074	3,1212	5,0000	Descentralización	5,25	0,7778	0,75	4,5	PRO-INF-INT2_P1	1	5
											Uso efectivo de datos	2,5	0,3030	1	5	PRO-INF-INT3_P1	4	5
Est. Futuro 4,7638	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,8704	Enfoque de datos	8,25	0,4074	3,1212	5,0000	Descentralización	5,25	0,7778	0,75	4,5	PRO-INF-INT3_P1	4	5
											Uso efectivo de datos	2,5	0,3030	1	5	PRO-INF-FLE4_P1	3	5
Est. Futuro 4,7638	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,8704	Enfoque de datos	8,25	0,4074	3,1212	5,0000	Descentralización	5,25	0,7778	0,75	4,5	PRO-INF-FLE4_P1	3	5
											Uso efectivo de datos	2,5	0,3030	1	5	PRO-PRO-PER1_P1	2	3
Est. Futuro 4,7638	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,8704	Enfoque de datos	8,25	0,4074	3,1212	5,0000	Descentralización	5,25	0,7778	0,75	4,5	PRO-PRO-PER1_P1	2	3
											Uso efectivo de datos	2,5	0,3030	1	5	PRO-PRO-PRO2_P1	2	5
Est. Futuro 4,7638	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,8704	Enfoque de datos	8,25	0,4074	3,1212	5,0000	Descentralización	5,25	0,7778	0,75	4,5	PRO-PRO-PRO2_P1	2	5
											Uso efectivo de datos	2,5	0,3030	1	5	CON-INT-CAD1_P1	0	5
Est. Futuro 4,7638	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,8704	Enfoque de datos	8,25	0,4074	3,1212	5,0000	Descentralización	5,25	0,7778	0,75	4,5	CON-INT-CAD1_P1	0	5
											Uso efectivo de datos	2,5	0,3030	1	5	CON-INT-VIS2_P1	3	5
Est. Futuro 4,7638	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,8704	Enfoque de datos	8,25	0,4074	3,1212	5,0000	Descentralización	5,25	0,7778	0,75	4,5	CON-INT-VIS2_P1	3	5
											Uso efectivo de datos	2,5	0,3030	1	5	CON-INT-VIS2_P2	3	5
Est. Futuro 4,7638	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,8704	Enfoque de datos	8,25	0,4074	3,1212	5,0000	Descentralización	5,25	0,7778	0,75	4,5	CON-INT-VIS2_P2	3	5
											Uso efectivo de datos	2,5	0,3030	1	5	CON-INT-BEN3_P1	1	5
Est. Futuro 4,7638	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,8704	Enfoque de datos	8,25	0,4074	3,1212	5,0000	Descentralización	5,25	0,7778	0,75	4,5	CON-INT-BEN3_P1	1	5
											Uso efectivo de datos	2,5	0,3030	1	5	CON-INT-INT4_P1	0	3
Est. Futuro 4,7638	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,8704	Enfoque de datos	8,25	0,4074	3,1212	5,0000	Descentralización	5,25	0,7778	0,75	4,5	CON-INT-INT4_P1	0	3
											Uso efectivo de datos	2,5	0,3030	1	5	CON-INT-INT1_P1	2	5
Est. Futuro 4,7638	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,8704	Enfoque de datos	8,25	0,4074	3,1212	5,0000	Descentralización	5,25	0,7778	0,75	4,5	CON-INT-INT1_P1	2	5
											Uso efectivo de datos	2,5	0,3030	1	5	CON-INT-INT1_P2	1	5
Est. Futuro 4,7638	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,8704	Enfoque de datos	8,25	0,4074	3,1212	5,0000	Descentralización	5,25	0,7778	0,75	4,5	CON-INT-INT1_P2	1	5
											Uso efectivo de datos	2,5	0,3030	1	5	CON-INT-BEN2_P1	3	5
Est. Futuro 4,7638	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,8704	Enfoque de datos	8,25	0,4074	3,1212	5,0000	Descentralización	5,25	0,7778	0,75	4,5	CON-INT-BEN2_P1	3	5
											Uso efectivo de datos	2,5	0,3030	1	5	CON-INT-INT3_P1	2	5
Est. Futuro 4,7638	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,8704	Enfoque de datos	8,25	0,4074	3,1212	5,0000	Descentralización	5,25	0,7778	0,75	4,5	CON-INT-INT3_P1	2	5
											Uso efectivo de datos	2,5	0,3030	1	5			

Anexo 3. Respuestas obtenidas de Auditor B

Overall score	Dimensión	Peso	Peso relativo	Calif de dim.	Calif de dim. e.d.	Subdimensión	Peso	Peso relativo	Calif de subdim.	Calif de subdim. e.d.	Elemento de madurez	Peso	Peso relativo	Calif de elem.	Calif de elem. e.d.	Código de pregunta	Calif de pregunta	Calif est. deseado
Est. Actual 2,0681	Dirección	27,00	0,27	2,6759	4,8056	Estrategia	12	0,4444	2,9688	4,9375	Adaptación hacia un modelo de negocio de I4.0	6,25	0,5208	2,5	5	DIR-EST-ADA1_P1	3	5
											Apertura a la innovación*	3	0,2500	3	4,75	DIR-EST-ADA1_P2	2	5
Est. Futuro 4,7650	Dirección	27,00	0,27	2,6759	4,8056	Estrategia	12	0,4444	2,9688	4,9375	Inversiones estratégicas	2,75	0,2292	4	5	DIR-EST-ADA1_P3	3	5
											Competencias de los líderes frente a I4.0	4	0,6154	2	5	DIR-EST-ADA1_P4	2	5
Est. Futuro 4,7650	Dirección	27,00	0,27	2,6759	4,8056	Estrategia	12	0,4444	2,9688	4,9375	Estilo de liderazgo	2,5	0,3846	3	5	DIR-EST-APE2_P1	3	4,5
											Protección de datos	3,75	0,4412	2,5	5	DIR-EST-APE2_P2	3	5
Est. Futuro 4,7650	Dirección	27,00	0,27	2,6759	4,8056	Estrategia	12	0,4444	2,9688	4,9375	Protección a la propiedad intelectual	2,25	0,2647	3	3	DIR-EST-INV3_P1	3	5
											Modelos de contrato	2,5	0,2941	2	5	DIR-EST-INV3_P2	5	5
Est. Futuro 4,7650	Dirección	27,00	0,27	2,6759	4,8056	Liderazgo	6,5	0,2407	2,3846	5,0000	Estilo de liderazgo	2,5	0,3846	3	5	DIR-LID-COM1_P1	2	5
											Protección de datos	3,75	0,4412	2,5	5	DIR-LID-EST2_P1	3	5
Est. Futuro 4,7650	Dirección	27,00	0,27	2,6759	4,8056	Liderazgo	6,5	0,2407	2,3846	5,0000	Protección de datos	3,75	0,4412	2,5	5	DIR-CIB-PRO1_P1	3	5
											Protección a la propiedad intelectual	2,25	0,2647	3	3	DIR-CIB-PRO1_P2	2	5
Est. Futuro 4,7650	Dirección	27,00	0,27	2,6759	4,8056	Liderazgo	6,5	0,2407	2,3846	5,0000	Modelos de contrato	2,5	0,2941	2	5	DIR-CIB-PRO2_P1	3	3
											Recopilación de datos	3	0,3636	5	5	DIR-CIB-MOD3_P1	2	5
Est. Futuro 4,7650	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,7407	Enfoque de datos	8,25	0,4074	3,1212	5,0000	Aprendizaje y toma de decisiones basada en datos	2,75	0,3333	3	5	OPE-ENF-REC1_P1	5	5
											Uso efectivo de datos	2,5	0,3030	1	5	OPE-ENF-APR2_P1	3	5
Est. Futuro 4,7650	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,7407	Enfoque de datos	8,25	0,4074	3,1212	5,0000	Descentralización	5,25	0,7778	0,75	4	OPE-ENF-USO3_P1	1	5
											Procesos	6,75	0,3333	1,6944	4,2222	OPE-PRO-DES1_P1	1	3
Est. Futuro 4,7650	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,7407	Procesos	6,75	0,3333	1,6944	4,2222	Canales de mercadeo integrados	1,5	0,2222	5	5	OPE-PRO-DES1_P2	1	3
											Competencias frente a Industria 4.0	1,88	0,3571	1	5	OPE-PRO-DES1_P3	1	5
Est. Futuro 4,7650	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,7407	Procesos	6,75	0,3333	1,6944	4,2222	Apertura hacia el cambio y nuevas tecnologías	1,25	0,2381	5	5	OPE-PRO-DES1_P4	0	5
											Desarrollo profesional continuo	0,88	0,1667	1	5	OPE-PRO-CAN2_P1	5	5
Est. Futuro 4,7650	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,7407	Procesos	6,75	0,3333	1,6944	4,2222	Autonomía	1,25	0,2381	2	5	OPE-REC-COM1_P1	1	5
											Infraestructura tecnológica	3,5	0,3333	1,5	5	OPE-REC-APE2_P1	5	5
Est. Futuro 4,7650	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,7407	Procesos	6,75	0,3333	1,6944	4,2222	Infraestructura tecnológica	3,5	0,3333	1,5	5	OPE-REC-DES3_P1	1	5
											Interfaces de datos estandarizadas	2,25	0,2143	1	5	OPE-REC-AUT4_P1	2	5
Est. Futuro 4,7650	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,7407	Procesos	6,75	0,3333	1,6944	4,2222	Integración sistémica M2M	2,25	0,2143	4	5	PRO-PRO-DES1_P1	1	3
											Flexibilidad y Modularidad	2,5	0,2381	3	5	PRO-PRO-DES1_P2	1	3
Est. Futuro 4,7650	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,7407	Procesos	6,75	0,3333	1,6944	4,2222	Personalización de productos	3,75	0,5769	2	3	PRO-PRO-DES1_P3	1	5
											Productos inteligentes	2,75	0,4231	2	5	PRO-PRO-DES1_P4	0	5
Est. Futuro 4,7650	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,7407	Procesos	6,75	0,3333	1,6944	4,2222	Productos inteligentes	2,75	0,4231	2	5	PRO-PRO-PER1_P1	2	3
											Cadena Digital de Suministros	7,5	0,4167	0	5	PRO-PRO-PRO2_P1	2	5
Est. Futuro 4,7650	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,7407	Procesos	6,75	0,3333	1,6944	4,2222	Visibilidad y Flexibilidad de la Cadena de Suministro	3	0,1667	2,5	5	CON-INT-CAD1_P1	0	5
											Beneficios reales de la cooperación entre eslabones	4,75	0,2639	1	5	CON-INT-VIS2_P1	3	5
Est. Futuro 4,7650	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,7407	Procesos	6,75	0,3333	1,6944	4,2222	Integración de sucursales con Cadena de Suministro	2,75	0,1528	0	3	CON-INT-VIS2_P2	2	5
											Integración entre áreas de negocio*	9,25	0,5211	1,5	5	CON-INT-BEN3_P1	1	5
Est. Futuro 4,7650	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,7407	Procesos	6,75	0,3333	1,6944	4,2222	Beneficios de la cooperación entre áreas de negocio	5,75	0,3239	3	5	CON-INT-INT4_P1	0	3
											Integración con sucursales	2,75	0,1549	2	5	CON-INT-INT1_P1	2	5
Est. Futuro 4,7650	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,7407	Procesos	6,75	0,3333	1,6944	4,2222	Integración con sucursales	2,75	0,1549	2	5	CON-INT-INT1_P2	1	5
											Beneficios de la cooperación entre áreas de negocio	5,75	0,3239	3	5	CON-INT-BEN2_P1	3	5
Est. Futuro 4,7650	Operaciones	20,25	0,2025	2,4043	4,7407	Procesos	6,75	0,3333	1,6944	4,2222	Integración con sucursales	2,75	0,1549	2	5	CON-INT-INT3_P1	2	5
											Beneficios de la cooperación entre áreas de negocio	5,75	0,3239	3	5	CON-INT-BEN2_P1	3	5



SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO
en Celaya



MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Celaya, Gto., 20/02/2020

Asunto: Carta de cesión de derechos.

C. DR. JOSÉ LÓPEZ MUÑOZ

DIRECTOR DEL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO EN CELAYA

PRESENTE.

En la ciudad de Celaya, Guanajuato, el 20 de febrero 2020, el que suscribe C. ING. Jorge Armando Puentes Márquez, alumno de la carrera de Maestría en Ingeniería Industrial con número de control M1803016, adscrito al Tecnológico Nacional de México en Celaya, manifiesta que es autor intelectual de la presente Tesis y cede los derechos del trabajo titulado “Propuesta de un modelo de evaluación de madurez de industria 4.0 orientado a empresas manufactureras” al Tecnológico Nacional de México en Celaya para su difusión con fines académicos y de investigación.

Jorge Armando Puentes Márquez