

Modelos de evaluación de la madurez y preparación hacia la Industria 4.0: una revisión de literatura

Industry 4.0 models for assessing maturity and readiness: A Literature Review

Marco Vinicio Jacquez-Hernández, Virginia Guadalupe López Torres

Palabras clave: Industria 4.0, modelos, madurez, preparación

Key words: Industry 4.0, models, maturity, readiness

RESUMEN

La denominada cuarta revolución industrial o Industria 4.0 a arribado a las empresas de manufactura y la mayor parte de las veces, estas no saben cómo responder. Esta revisión de literatura busca aportar un estudio de lo que se ha hecho hasta ahora en términos de modelos de madurez o preparación hacia la industria 4.0. Para este propósito se realizó una búsqueda sistemática de literatura en bases de datos como: *Science Direct*, *Web of Science*, EBSCO y otras. Para el análisis de la información se construyeron tablas y gráficas para una mayor comprensión de los diferentes modelos analizados. Se encontraron 16 modelos, en su mayoría diferentes respecto a su enfoque de aplicación y contexto, la principal conclusión es que las empresas deben planear su adhesión a este nuevo paradigma con un enfoque estratégico de lo contrario pueden perecer.

INTRODUCCIÓN

El término Industria 4.0 fue utilizado por primera vez en Alemania en el año 2011 dentro de su iniciativa "Plan de Acción Estrategia de Alta Tecnología 2020" como una oportunidad para lograr el liderazgo tecnológico y establecerse como líder de

ABSTRACT

The so-called fourth industrial revolution or Industry 4.0 has arrived at the manufacturing companies and, most of the time; they do not know how to respond. This literature review seeks to provide a study of what has been done so far in terms of models of maturity or preparation for industry 4.0. For this purpose, a systematic literature search was carried out in databases such as: *Science Direct*, *Web of Science*, EBSCO and others. For the analysis of the information tables and graphs were built for a better understanding of the different models analyzed. We found 16 models, mostly different with regard to their application and context approach, the main conclusion is that companies should plan their adherence to this new paradigm with a strategic approach otherwise they may perish.

mercado y proveedor de la naciente Industria 4.0 y que se posicionara como un ícono dentro de la cuarta revolución industrial (Germany Trade & Invest, 2016). Antes de continuar es pertinente describir brevemente la historia para contextualizar,

la primera revolución industrial se dio alrededor de 1890, se caracterizó por la mecanización de la industria y el uso de vapor como fuente de energía. La segunda revolución industrial sucedió alrededor de 1929 cuya característica principal fue la masificación de la producción y el uso como fuente de poder de la energía eléctrica. La tercera revolución inicia alrededor de 1970 de la mano de una mayor automatización de la producción, el uso de la electrónica y las tecnologías de la información (TI). Mientras que, la cuarta revolución industrial está basada en sistemas ciber-físicos. Estos últimos son dispositivos que están formados por una parte física y una parte virtual, mismos que pueden ser embebidos casi en cualquier cosa (Germany Trade & Invest, 2017).

Como en las anteriores revoluciones se espera que esta cuarta revolución represente ganancias en productividad y reducciones de costo (PwC, 2016; Ynzunza et al., 2017). Por ejemplo, un distintivo es la creación de la fábrica inteligente, caracterizadas por ser modular y estructurada, donde los sistemas ciber-físicos supervisan procesos físicos, crean una copia virtual del mundo físico y toman decisiones descentralizadas (Sung, 2018), es decir, la principal característica es el uso de TI en el contexto de la economía digital. Sin embargo, al ser un fenómeno relativamente incipiente, incierto y caótico desde los países en desarrollo como México es pertinente y relevante analizar ¿Cómo las empresas de manufactura se integrarán a esta nueva industria? ¿Cómo saber si

están listas o no? Son solo algunas de las muchas interrogantes que deben ser reflexionadas como fundamento de la decisión acerca de lo que implica este cambio que conlleva un rompimiento de paradigmas.

Pero el contexto mexicano demanda muchos retos, según el Foro Económico Mundial a través del Informe Global de Tecnología de la Información 2016, en particular el Índice NRI (Networked Readiness Index) ilustra los países líderes de la cuarta revolución industrial, México se ubica en la posición 76 de 139, por debajo de seis países latinoamericanos encabezados por Chile.

En tal sentido, las empresas mexicanas tienen problemas para, por un lado, captar la idea general de Industria 4.0 y conceptos particulares y por otro tienen capacidad limitada para relacionarla a sus dominios y su estrategia de negocios particular. También tienen problemas para determinar el estado de desarrollo con respecto a la visión de Industria 4.0 y por lo tanto fallan en identificar acciones, programas y proyectos concretos. Para superar estos problemas se requieren nuevos métodos y herramientas para proveer guía y soporte que permita alinear la estrategia de negocios y la de operaciones (Schumacher, Erol & Sihm, 2016). En las etapas iniciales de la transformación de los negocios, es cuando el uso de los modelos de madurez es más útil, ya que permiten identificar las áreas donde se pueden hacer cambios (Cimini, Pinto & Cavalieri, 2017).

El tema Industria 4.0 en general, y la medición del grado de madurez y/o preparación en particular son temas recientes y que han sido estudiados principalmente en Europa. En tal sentido el presente documento tiene como objetivo hacer una revisión de la literatura de los modelos de evaluación del grado de preparación y/o madurez para proporcionar un punto de partida que facilite realizar investigaciones del tema

trasladando lo aprendido a México en particular y a Latinoamérica en general.

Definiciones

Industria 4.0. Académicos, profesionistas, universidades y empresas de todo el mundo vienen estudiando el tema Industria 4.0. Constructo que viene evolucionando, en cuya definición se distingue la presencia de tecnología. En la tabla 1 se presentan algunas proposiciones al respecto.

Tabla 1. Industria 4.0

Autores	Definición
Kagermann, Wahlster & Helbig (2013)	Es la integración técnica de sistemas ciber-físicos en la manufactura y la logística y el uso del Internet de las cosas y de los Servicios en los procesos industriales. Esto tendrá implicaciones para la creación de valor, los modelos de negocios, los servicios derivados y la organización del trabajo (p14).
Hermann, Pentek & Otto (2015)	Término colectivo para tecnologías y conceptos de la organización de la cadena de valor. Dentro de la estructura modular de las fábricas inteligentes (<i>Smart Factories</i>) de la Industria 4.0, los sistemas ciber-físicos (CPS, <i>cyberphysical systems</i>) supervisan procesos físicos, crean una copia virtual del mundo físico y toman decisiones descentralizadas. Utilizando el Internet de las cosas (<i>IoT, Internet of Things</i>) los CPS se comunican y cooperan entre sí y con los humanos en tiempo real. A través del Internet de los servicios (<i>IoS, Internet of Services</i>) los participantes de la cadena de valor ofrecen y utilizan servicios internos e inter-organizacionales (p11).
Kopp & Basl (2017)	Se puede caracterizar como una transformación de la producción de fábricas automatizadas separadas a entornos de fabricación totalmente automatizados y optimizados. Los procesos de producción están vinculados vertical y horizontalmente dentro de los sistemas empresariales. Sensores, máquinas y sistemas de TI están interconectados dentro de la cadena de valor a través de los límites de la empresa (p40).
Sung (2018)	Significa que las máquinas operarán de manera independiente o se coordinarán con los humanos para producir una fabricación orientada al cliente que trabaje constantemente para mantenerse. Más bien, la máquina se convierte en una entidad independiente que puede recopilar datos, analizarlos y asesorar sobre ellos. Esto se hace posible al introducir la auto-optimización, la auto-cognición y la auto-personalización en la industria, y los fabricantes podrán comunicarse con las computadoras en lugar de solo operar máquinas (p.41).

La definición de trabajo de Industria 4.0 para este documento: es la utilización de nuevas tecnologías: sistemas ciber-físicos, Internet de la cosas e Internet de los servicios, etc., en el diseño, manufactura y comercialización de los productos, utilizando nuevos modelos de negocios que consideren la nueva dinámica entre dichas tecnologías y los empleados, así como entre las empresas, los proveedores y clientes.

En general, Industria 4.0 y cuarta revolución industrial son dos constructos que han sido comparados y utilizados indistintamente, para Yang *et al.* (2018), la industria 4.0 se refiere a la cuarta etapa de la industrialización, que apunta a un alto nivel de automatización en la industria de fabricación mediante la adopción de TI omnipresentes, donde los límites entre el entorno virtual y el mundo real se difuminan cada vez más, lo que se denomina sistemas de producción ciberfísica (CPPS). En términos simples, en los CPPS, los componentes electrónicos y mecánicos se conectan a través de sensores en una red, que proporciona una plataforma inteligente para el flujo de datos y el análisis de datos. Sin embargo, Sung (2018) puntualiza que la cuarta revolución industrial se refiere a una transformación sistémica que incluye un impacto en la sociedad civil, las estructuras de gobierno y la identidad humana, además de las ramificaciones económicas y de fabricación.

Feng, Zhang, & Zhou (2018) argumentan que los países de todo el mundo han lanzado políticas para aumentar la inversión a favor de promover la fabricación inteligente, se esfuerzan por lograr la transformación y la modernización de sus industrias manufactureras, México como un país manufacturero (maquilador), no es la excepción. Es importante destacar que las empresas tienden a centrarse en el aspecto

tecnológico de la Industria 4.0 para alcanzar ventajas de mercado a corto plazo. Empero, la Industria 4.0 cambiará toda la cadena de valor interna de una empresa, desde el diseño, la fabricación, la operación y el servicio de los productos y sistemas de producción (Ganzarain & Errasti, 2016).

Madurez y/o nivel de preparación. El término "madurez" normalmente se refiere a estar en estado completo, estar perfecto o listo, también puede implicar un progreso en el desarrollo de un sistema (Schumacher *et al.*, 2016). Los modelos de madurez son muy importantes para el nivel organizacional y pueden ser utilizados para crear una hoja de ruta para mejoras (Tonelli *et al.*, 2016). Los modelos de madurez han sido desarrollados para asistir a las empresas a identificar maneras de reducir costos, de mejorar la calidad y a reducir el tiempo de comercialización de manera que puedan obtener y conservar una ventaja competitiva (De Bruin *et al.*, 2005; Goncalves & Waterson, 2018).

Para la medición de la madurez existen tres tipos de modelos de acuerdo con su propósito: descriptivo, prescriptivo y comparativo (De Carolis *et al.*, 2017; Klötzer & Pflaum, 2017). Aunque parecen tres modelos distintos, son fases evolutivas del ciclo de vida de un modelo (De Carolis *et al.*, 2017). Considerados como sinónimos están los modelos de preparación que permiten capturar el punto de partida y permitir la iniciación del proceso de desarrollo. La diferencia entre la preparación y la madurez está en que la evaluación de la primera se lleva a cabo antes de iniciar el proceso de maduración, mientras que la evaluación de la segunda se hace para obtener el estado instantáneo durante el proceso de maduración (Schumacher *et al.*, 2016).

La definición de trabajo de madurez para este documento: es el grado de preparación o

implementación de elementos de Industria 4.0 en un momento dado con respecto a una lista completa de elementos de Industria 4.0.

MATERIALES y MÉTODOS

Para la revisión de la literatura, primero se establecieron los objetivos, el alcance y el método para la selección y síntesis de datos. Como segundo paso se realizó la búsqueda sistemática de artículos en las bases de datos de referencia. Los artículos de investigación son una fuente importante de información ya que son puntuales y breves, y los artículos de revisión presentan un avance de lo que se ha investigado de un tema en particular (Chicaíza & García, 2011).

Las bases de datos utilizadas fueron en el área de las ciencias computacionales: ACM (Association for Computing Machinery); multidisciplinaria y económica-administrativas: EBSCO, Science Direct; de ingeniería eléctrica y electrónica: IEEE; interdisciplinarias y de referencia: Web of Science, Springer, Google Académico y Researchgate. Los términos de búsqueda fueron los siguientes: Industry 4.0 maturity; Industry 4.0 readiness; Industry 4.0 AND maturity; Industry 4.0 AND readiness; Industry 4.0 implementation; e Industry 4.0 AND implementation. Se buscó en: el título; resumen (abstract); palabras claves: y en el texto completo. Se incluyeron todos los años y todos los idiomas.

Los criterios de selección utilizados fueron: que incluyera un modelo de madurez, de

evaluación de la preparación en la Industria 4.0 o sus tecnologías, o de implementación de Industria 4.0 o sus tecnologías. Se usaron artículos científicos y presentaciones de conferencias. Criterios de exclusión: que solo mencionara los criterios de búsqueda sin incluir los mismos, que no estuviera disponible. El tercer paso fue revisar los resúmenes para descartar aquellos que no fueran relevantes para el estudio.

En una primera instancia se encontraron 162 artículos con los términos de búsqueda, después de revisar el resumen, el número de artículos a considerar fue de 51, mismos documentos que fueron revisados, al final el número de artículos que cumplieron con los criterios de inclusión fueron 16. Las razones por no considerar los otros 35 artículos fueron: no presentaba un modelo específico, solo presentaba preguntas de investigación, los términos de búsqueda estaban solo en las referencias, solo se presentaba un marco de referencia, el proceso de madurez se presentaba para una función específica, o resultados de encuesta solamente sin descripción de dimensiones evaluadas. El proceso detallado de selección se presenta en la figura 1.

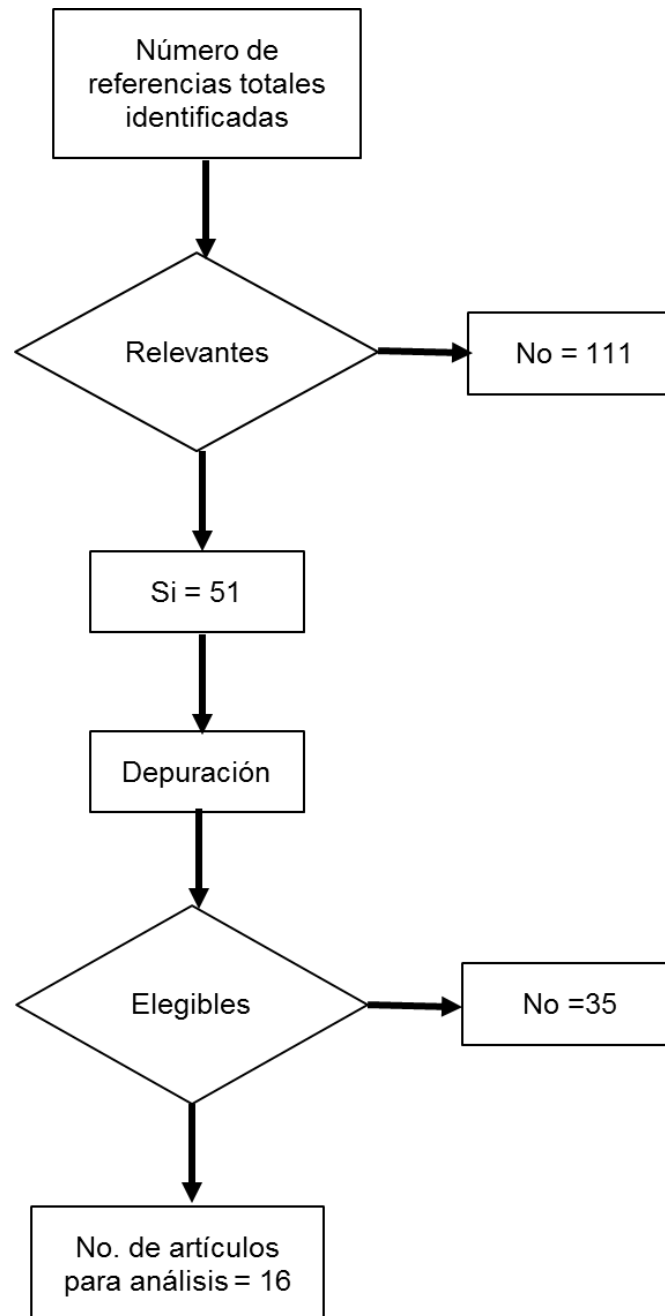


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de selección de artículos para análisis.

Los datos de los artículos se vaciaron en una hoja de cálculo donde se incluyó: autores, año de publicación, título del artículo, fuente donde se encontró, palabras claves, tipo de artículo, forma apropiada de citación, información DOI o dirección web del artículo si era necesaria,

país de los autores o estudio. De esta matriz de información, se extrajeron datos pertinentes, y después de la lectura detallada se agregaron las dimensiones y fases específicas del modelo para preparar la tabla 2 que muestra los artículos de esta revisión de literatura.

Tabla 2. Medición de madurez, rumbo a Industria 4.0

Autor (es)	Año	Modelo/Estudio	Dimensiones/Categorías	Niveles/Etapas
De Carolis <i>et al.</i>	2017	Modelo de Madurez de Evaluación de Preparación Digital (DREAMY, Digital Readiness Assessment Maturity model)	(4): Proceso; monitoreo y control; tecnología; organización	(5): Inicial; gestionado; definido; integrado e interoperable; orientado digitalmente
Gökalp <i>et al.</i>	2017	Modelo de Madurez de Industria 4.0 (<i>Industry 4.0-MM</i>)	(5): Gestión de activos; control de datos; gestión de aplicación; transformación de proceso; alineación organizacional	(6): Incompleto; realizado; gestionado; establecido; predecible; optimizado
Gracel & Lebkowsky	2017	Modelo de Madurez Tecnología de Manufactura (MTMM, ManuTech Maturity Model)	(8) Tecnologías esenciales; gente y cultura; gestión del conocimiento; integración en tiempo real; infraestructura; alineación y conciencia estratégica; excelencia de proceso; ciberseguridad	(5) 1 – 5
Jæger & Halse	2017	Modelo de madurez tecnológica de IoT	Tecnologías de IoT	(8): Madurez 3.0; madurez 4.0 inicial; conectado; mejorado; innovador; integrador; extensivo; madurez 4.0
Kermer-Meyer	2017	Modelo de evaluación de madurez	(6): Soluciones inteligentes; innovación inteligente; redes inteligentes; producción inteligente; modelos de negocios; condiciones del marco de referencia	(5): Marco de referencia; visibilidad; transparencia; predictabilidad, adaptabilidad
Klötzer & Pflaum	2017	Modelo de madurez para la digitalización	Dos perspectivas: realización inteligente de productos y aplicación inteligente de productos. Dimensiones (9): Desarrollo estratégico; ofreciendo al cliente; producto inteligente; sistema de TI complementario; cooperación; organización estructural; organización de proceso; competencias; cultura innovadora	(5): conciencia de digitalización; productos inteligentes en red; empresa orientada a servicio; pensar en sistemas de servicio; empresa impulsada por los datos
Kopp & Basl	2017	Modelo de preparación	(5): Estrategia; innovación y cambios; tecnología; datos y seguridad; empleados	(6): 0 – 5
Leyh <i>et al.</i>	2017	Modelo de madurez SIMMI 4.0 (System Intefgration Maturity Model Industry 4.0)	(4): Integración vertical; Integración horizontal; desarrollo digital de producto; criterios de tecnología transversales	(5): Nivel básico de digitalización; digitalización interdepartamental; digitalización horizontal y vertical; digitalización total, digitalización total optimizada
Rojko	2017	Estudio sobre la preparación	(6) Estrategia y organización; fábrica inteligente; operación inteligente; productos inteligentes; servicios impulsados por datos; recursos humanos	(5) 1 – 5

... continuación **Tabla 2.** Medición de madurez, rumbo a Industria 4.0

Autor (es)	Año	Modelo/Estudio	Dimensiones/Categorías	Niveles/Etapas
Reder & Klünder	2017	Métricos flexibles del SCOR	(15): Conciencia del IoT; utilización de tecnología; aplicaciones de TI en la nube; intercambio de habilidades de cadena de suministros (SC); saber como SC; disposición a la reconfiguración; dependencia económica de la SCN; alineación estratégica hacia arriba de la SC; alineación estratégica hacia arriba de la SC; grado de colaboración; tiempo necesario para entrenar mano de obra adicional; tiempo de ciclo de manufactura; velocidad de procesamiento; capacidad de desempeño hacia arriba; capacidad de desempeño hacia arriba	(4) Rígida; mediana; promedio; avanzada
Erol, <i>et al.</i>	2016	Modelo de tres etapas para la transformación a Industria 4.0	(3): Imaginar, habilitar; promulgar	N/A
Ganzarain & Errasti	2016	Modelo de madurez de tres etapas	(3): Visión (visualizar 4.0); mapa de ruta (habilitar 4.0); proyectos (promulgar 4.0)	(5): inicial; gestionado; definido; transformado; modelo de negocios detallado
Leyh <i>et al.</i>	2016	Modelo SIMMI 4.0	(4): Integración vertical; Integración horizontal; desarrollo digital de producto; criterios de tecnología transversales	(5): Nivel básico de digitalización; digitalización interdepartamental; digitalización horizontal y vertical; digitalización total, digitalización total optimizada
Pérez-Lara <i>et al.</i>	2016	Caracterización del modelo de negocio	(3) Integración vertical; Integración horizontal; bloques de industria 4.0	(4) 1 – 4
Schagerl <i>et al.</i>	2016	Modelo de madurez Industria 4.0	(3) datos (big data, enfoques abiertos, seguridad), inteligencia (habilitador, uso de inteligencia) y transformación digital (empleados, transformación)	Máximo 10 puntos por dimensión
Schumacher <i>et al.</i>	2016	Modelo de madurez Industria 4.0	(9): Productos; clientes; operaciones; tecnología; estrategia; liderazgo; sistema de gobierno; cultura; gente	(5): 1 – 5
Soldatos <i>et al.</i>	2016	Modelo de preparación de adopción en manufactura	(3): tamaño y capacidad de inversión de la industria de manufactura y su cadena de suministros colaborativa; sector y dominio industrial y su conciencia de ICT; ambiente político y social donde opera la cadena de suministros de manufactura	N/A

RESULTADOS

Los modelos publicados hasta ahora son diversos, con base en las variables que incluyen y al espacio de aplicación. Por ejemplo, modelos de madurez con dimensiones y niveles: Gökalp et al., Kermer-Meyer, Schagerl et al.; Modelos de madurez con dimensiones y niveles con aplicación específica: De Carolis et al., Klötzer & Pflaum, Schumacher et al., en industria manufacturera; Leyh et al., orientado a TI; Reder & Klünder, aplicado a redes de cadenas de suministros; Pérez-Lara et al., orientado a modelo de negocios;

Gracel & Lebkowsky, orientado a tecnologías de manufactura; Jæger & Halse, a IoT.

También se encontraron modelos de preparación con dimensiones y niveles: Kopp & Basl, y Roko; Modelos de transformación a Industria 4.0: Erol, Schumacher & Sihm. Modelos de transformación y madurez a Industria 4.0: Ganzarain & Errasti. Con dimensiones aplicado a una tecnología específica: Soldatos et al., aplicado a IoT. En la tabla 3 se puede observar un resumen de esta información.

Tabla 3. Modelos de medición de madurez, preparación e implementación de Industria 4.0

Estudio	Tipo	Dimensiones	Niveles	Específico u orientado a	Revisión de modelos previos
De Carolis <i>et al.</i>	Madurez	Si	Si	Empresas de manufactura	No
Gökalp <i>et al.</i>	Madurez	Si	Si	No	Siete
Gracel & Lebkowsky	Madurez	Si	Si	Tecnologías de manufactura	Diez
Jæger & Halse	Madurez	Si	Si	IoT	No
Kermer-Meyer	Madurez	Si	Si	No	No
Klötzer & Pflaum	Madurez	Si	Si	No	No
Kopp & Basl	Preparación	Si	Si	No	No
Rojko	Preparación	Si	Si	No	No
Reder & Klünder	Madurez	Si	Si	Redes de cadenas de suministros	No
Erol <i>et al.</i>	Transformación	Si	No	No	No
Ganzarain & Errasti	Madurez	Si	Si	PyME	No
Leyh <i>et al.</i>	Madurez	Si	Si	Tecnologías de Información	No
Pérez-Lara et al.	Madurez	Si	Si	Aplicado a modelo de negocios	No
Schagerl, M.	Madurez	Si	Si	No	No
Schumacher <i>et al.</i>	Madurez	Si	Si	Empresas de manufactura	Cinco
Soldatos <i>et al.</i>	Preparación	Si	No	Aplicado a IoT	No

De los 16 artículos seleccionados para análisis, nueve se publicaron en 2017 y siete en 2016, estudios contemporáneos como muestra de tratarse de un tema novedoso y de interés global. Asimismo, la mayoría de los artículos están publicados en inglés, aunque también hay artículos en otros

idiomas como polaco, alemán y español. Los países de procedencia de los autores y/o estudios fueron: Italia, Turquía, Polonia, Noruega, Alemania (5), República Checa, Austria (3), España, México, así como multipaís (Grecia, Italia, Portugal).

DISCUSIÓN

Dentro de la revisión bibliográfica no se encontraron otros estudios de revisión de literatura de modelos de madurez o preparación en la Industria 4.0, pero se puede contrastar este análisis con los estudios en los cuales se revisaron otros modelos de madurez.

Gökalp et al. (2017), revisaron siete modelos los cuales consideraron incompletos y no los usaron para la construcción de su modelo ya que buscaban uno que fuera aplicable de manera general y consideraron que los elaborados hasta ese momento no proveían esa perspectiva. El modelo que desarrollaron está orientado a suministrar una guía completa que permita a las organizaciones observar sus debilidades y áreas problemáticas, así como la aplicación de prácticas que permitan la transformación a Industria 4.0 de forma consistente. El modelo lo construyeron basándose en el modelo SPICE (Software Process Improvement and Capability dEtermination, mejora de procesos de software y determinación de capacidad).

Gracel & Lebkowsky (2017), por su parte revisaron diez modelos previos de

madurez, pero no encontraron ninguno para su objeto de estudio (tecnologías de manufactura). El modelo lo desarrollaron para ayudar a la alta gerencia a evaluar el nivel actual de avance tecnológico de la fábrica y como las tecnologías de manufactura deben de ser desplegadas para asegurar la ejecución efectiva de una nueva estrategia de Industria 4.0. Para el desarrollo de su modelo utilizaron la metodología propuesta por Becker, Knackstedt & Pöppelbuß (2009), la cual comprende las siguientes etapas: definición del problema, comparación de modelos de madurez existentes, determinación de una estrategia de desarrollo, desarrollo iterativo del modelo de madurez, concepción de la transferencia y evaluación.

El modelo de Schumacher et al. (2016), fue desarrollado con un doble propósito: científico y práctico. El primero fue para obtener datos sólidos del estado de las empresas y de las estrategias para la Industria 4.0 y también para extraer factores de éxito potenciales. El propósito práctico fue permitir a las empresas evaluar su madurez en relación a Industria 4.0 y

reflexionar, basados en esa evaluación, en la adecuación de sus estrategias actuales. Para el desarrollo del modelo de madurez se enfocaron en cinco modelos y herramientas para evaluar la preparación o la madurez. El objetivo del modelo presentado fue realizar una extensión de modelos existentes a través de un enfoque en aspectos organizacionales. Adicionalmente buscaron transformar los conceptos que consideraron abstractos de manufactura inteligente en elementos que pudieran ser medidos en ambientes reales de producción.

Así que, para la construcción de modelos de madurez, los estudios revisados se basaron en diferentes modelos o metodologías. En el caso de Gökalp et al. (2017), en SPICE, Gracel & Lebkowsky (2017) en la metodología propuesta por Becker et al. (2009), mientras que Schumacher et al. (2016), buscaron expandir los modelos desarrollados hasta ese momento. La primera diferencia en el resultado se puede ver en las dimensiones de evaluación. Mientras que Gökalp et al. (2017), manejan cinco: gestión de activos; control de datos; gestión de aplicaciones; alineación organizacional y transformación de proceso; Gracel & Lebkowsky (2017) determinaron ocho: tecnologías esenciales; gente y cultura; gestión del conocimiento; integración en tiempo real; infraestructura; alineación y conciencia estratégica; excelencia de proceso; y ciber-seguridad.

Schumacher et al. (2016), usaron nueve: productos; clientes; operaciones; tecnología; estrategia; liderazgo; sistema de gobierno; cultura; y gente.

Otra diferencia, aunque no necesariamente pudo ser debida solo al enfoque usado, es en los niveles de madurez. El modelo de Gökalp et al. (2017), tiene seis niveles: incompleto; realizado; gestionado; establecido; predecible; y optimizado. El modelo de Gracel & Lebkowsky (2017) tiene 5, sin asignar un nombre para cada nivel. Y el modelo de Schumacher et al. (2016), también tiene cinco e igual sin asignar nombre para los niveles. En general los otros modelos usaron cuatro, cinco, seis y ocho, siendo el más usado cinco niveles. En el caso de este estudio se propone un modelo preliminar partiendo de los modelos ya desarrollados, los niveles a usar, serían cinco, ya que es el número que parece es el más adecuado de acuerdo con la bibliografía analizada. Este modelo se puede mejorar y enriquecer por medio de más estudios, especialmente del tipo empírico.

En la figura 2 se muestra un modelo que puede permitir a las empresas de cualquier orientación insertarse en las nuevas cadenas de valor, mientras que la figura 3 exhibe las etapas de la construcción de un modelo de madurez para ser aplicado en Industria 4.0.

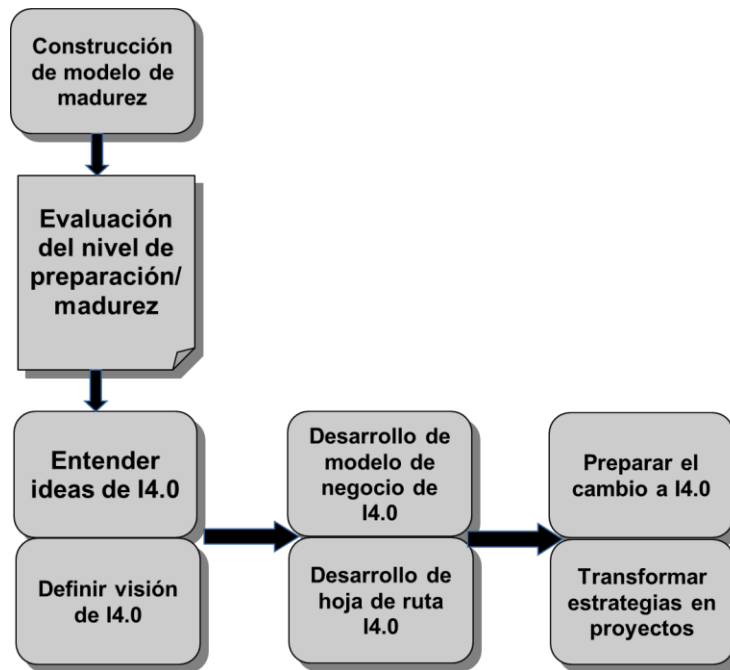


Figura 2. Modelo de transición a Industria 4.0

Fuente: Elaboración propia con la revisión de la literatura especialmente Erol et al. (2016) y Ganzarain & Errasti (2016).

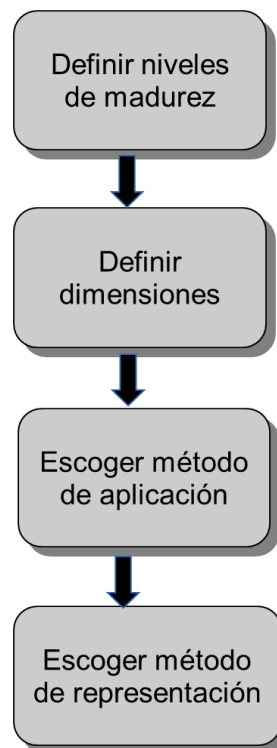


Figura 5. Etapas para la construcción del modelo de madurez

Fuente: Elaboración propia con base en la revisión de la literatura.

De forma preliminar con base en la revisión de literatura y expandiendo el modelo de Schumacher et al. (2016), se propone en la Tabla 4, la lista de verificación aplicable a cualquier tipo de empresa con el objetivo de evaluar su grado de preparación para incorporarse a la Industria 4.0.

Tabla 4.- Lista de verificación para evaluación del grado de preparación para la Industria 4.0

No.	Elemento	Descripción
1	Productos	Incorporación de sistemas ciberfísicos y/o IoT en el diseño de los productos o capacidad para hacerlo
2	Clientes	Utilización de datos de los clientes, digitalización de ventas y servicio
3	Operaciones	Modelado y simulación, colaboración interdepartamental
4	Tecnología	Grado de modernización del sistema de tecnología de la información y comunicación, uso de dispositivos móviles
5	Estrategia	Disponibilidad de hoja de ruta para Industria 4.0, adaptación de modelos de negocio
6	Liderazgo	Liderazgo comprometido con el cambio de paradigma, habilidades y competencias de gestión
7	Sistema de gobierno	Regulaciones laborales para I4.0, protección de propiedad intelectual
8	Cultura	Intercambio de conocimiento, innovación abierta
9	Gente	Competencias y habilidades del personal, apertura del personal a nuevas tecnologías
10	Organización	Alineación organizacional para la adopción de I4.0

Las definiciones de Industria 4.0 y madurez en el contexto de Industria 4.0, junto con estos tres elementos: modelo de transición, etapas del modelo de madurez y lista de verificación, constituyen la aportación de este estudio, construidas con base en el conocimiento previo y abierto a mejoras y refinamiento posterior.

CONCLUSIONES

Es evidente por los modelos revisados que no hay hasta ahora un modelo que sea ampliamente aceptado y cada autor lo personaliza de acuerdo a su formación e intereses. Por otro lado, esta disparidad en enfoques también puede ser resultado del contexto donde se aplicó el estudio o el país de procedencia de los autores. En consecuencia, se plantea que un modelo único no pudiera ser representativo para

todas las industrias y todos los países; por un lado, las industrias tienen una gran variedad de procesos diferentes que hace que unas dimensiones sean útiles en algunas industrias, pero en otras no. Y por el lado de los países, tampoco hay homogeneidad ni siquiera entre países con el mismo nivel de desarrollo económico. Así mismo, siendo la Industria 4.0 un tema novedoso, esto también influye en esta gran disparidad de enfoques y aproximaciones.

Este nuevo escenario representa una oportunidad de investigación, ya que como se comprobó no existe un modelo que sea representativo, y por lo tanto se puede seguir investigando para el desarrollo de un modelo específico a una región e industria. Dado que la Industria 4.0 representa el nuevo escenario de competencia. La industria en general cada día innova vía la digitalización, la sustitución o incorporación a sus productos de componentes inteligentes, ello implica que integrarse a esta nueva industria no es una elección, es imprescindible, de lo contrario su mercado se limita cada día más por encontrarse en etapa de declive a un paso de perecer.

Respecto a cómo saber si las empresas se encuentran listas para incursionar en las cadenas de valor que se gestan bajo este nuevo paradigma del internet de las cosas, es necesario realizar un diagnóstico, en tal sentido este estudio pretende ser una guía. Aunque es preciso enfatizar que se trata de

un escenario reciente y en construcción, que se alimenta con cada innovación, y que evoluciona hacia la digitalización aprovechando las TI y el poder de análisis del big data, entre otros avances.

Es relevante señalar la importancia de que las empresas latinoamericanas empiecen a desarrollar estrategias para su incorporación a la cuarta revolución, ya que si bien es cierto que ahora solo hay estimaciones de los beneficios que esta incorporación traerá, lo cierto es que es un cambio de paradigma y que al igual que la calidad de los productos no dan a las empresas una ventaja competitiva, lo mismo sucederá con la Industria 4.0. Sin embargo, la falta de calidad o la no incorporación a la cuarta revolución, hará que la empresa pierda competitividad y eventualmente enfrente problemas de solvencia.

Si se examina el modelo de efectividad de manufactura de cuatro etapas de Hayes & Wheelwright (E1: corregir los peores problemas, E2: adoptar la mejor práctica, E3: ligar estrategia con operaciones, y E4: dar una ventaja a operaciones), pero en reversa de la etapa 4 a la etapa 1 se puede ver las consecuencias de no adoptar la Industria 4.0. Las empresas dominantes en este momento no definirán las expectativas de la industria, ni tampoco serán las mejores de la industria. Solo serán tan buenos como otros competidores que tampoco adoptaron la Industria 4.0 (Davies, Coole, & Smith, 2017).

REFERENCIAS

- Becker, J.; Knackstedt, R. & Pöppelbuß, J. (2009). Developing maturity models for IT management. A Procedure Model and its Application. *Business & Information Systems Engineering*, 1(3), 213-222. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12599-009-0044-5>
- Chicaíza, L. & García, M. (2011). Guía de fuentes para la investigación en ciencias económicas. Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de http://www.bdigital.unal.edu.co/3228/1/docgarcia_fce_ee_22.pdf
- Cimini, C., Pinto, R. & Cavalieri, S. (2017). The business transformation towards smart manufacturing: a literature overview about reference models and research agenda. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 14952-14957. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2548>
- Davies, R., Coole, T. y Smith, A. (2017). Review of Socio-technical Considerations to Ensure Successful Implementation of Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11. 1288-1295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.256>
- De Bruin, T.; Freeze, R.; Kaulkarni, U. & Rosemann, M. (2005). Understanding the main phases of developing a maturity assessment model. ACIS 2005 Proceedings. 109. Recuperado de <http://aisel.aisnet.org/acis2005/109>
- De Carolis A., Macchi M., Negri E. & Terzi S. (2017). A Maturity Model for Assessing the Digital Readiness of Manufacturing Companies. In: Lödding H., Riedel R., Thoben KD., von Cieminski G., Kiritsis D. (eds) *Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing. APMS 2017. IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 513, 13-20. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-66923-6_2
- Erol, S., Schumacher, A. & Sihn, W. (2016). Strategic guidance towards Industry 4.0—a three-stage process model. *Conference: International Conference on Competitive Manufacturing 2016 (COMA'16)*, 495-500. Stellenbosch, South Africa. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Selim_Erol/publication/286937652_Strategic_guidance_towards_Industry_40_-_a_three-stage_process_model/links/5671898308ae90f7843f2d27/Strategic-guidance-towards-Industry-40-a-three-stage-process-model.pdf
- Feng, L., Zhang, X. & Zhou, K. (2018). Current problems in China's manufacturing and countermeasures for industry 4.0. *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, 90(1), 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13638-018-1113-6>
- Ganzarain, J. & Errasti, N. (2016). Three stage maturity model in SME's toward industry 4.0. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 9(5), 1119-1128. DOI: <https://doi.org/10.3926/jiem.2073>
- Germany Trade & Invest. (2017). Industrie 4.0 – What Is It?. Recuperado de <https://industrie4.0.gtai.de/INDUSTRIE40/Navigaion/EN/Topics/Industrie-40/what-is-it.html?view=renderPrint>
- Germany Trade & Invest. (2016). INDUSTRIE 4.0 - Smart Manufacturing for the Future. Recuperado de <https://www.gtai.de/GTAI/Navigation/EN/Invest/Service/Publications/business-information,t=industrie-40--smart-manufacturing-for-the-future,did=917080.html>
- Gökalp, E.; Şener, U. & Eren, P. E. (2017, October). Development of an Assessment Model for Industry 4.0: Industry 4.0-MM. *International Conference on Software Process Improvement and Capability Determination*. 128-142. Springer, Cham.

- Goncalves, F. A. & Waterson, P. (2018). Maturity models and safety culture: A critical review. *Safety Science*, 105, 192-211. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.02.017>
- Gracel, J. & Lebkowsky, P. (2017). The Concept of Industry 4.0 Related Manufacturing Technology Maturity Model (Manutech Maturity Model, Mtm). Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/320830841_The_concept_of_Industry_40_related_manufacturing_technology_maturity_model_Manutech_Maturity_Model_MTMM
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016, Enero). Design principles for industrie 4.0 scenarios. In System Sciences (HICSS), 2016 49th Hawaii International Conference on. 3928-3937. Recuperado de <http://www.snom.mb.tu-dortmund.de/cms/de/forschung/Arbeitsbericht/Design-Principles-for-Industrie-4-0-Scenarios.pdf>
- Jæger, B., & Halse, L. L. (2017, September). The IoT Technological Maturity Assessment Scorecard: A Case Study of Norwegian Manufacturing Companies. In IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems. 143-150. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-66923-6_17
- Kagermann, H.; Wahlster, W. & Helbig, J. (2013). Securing the future of German manufacturing industry. Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0. Frankfurt: Acatech-National Academy of Science and Engineering. Recuperado de <https://www.din.de/blob/76902/e8cac883f42bf28536e7e8165993f1fd/recommendations-for-implementing-industry-4-0-data.pdf>
- Kermer-Meyer A. (2017). Industry 4.0 Maturity Assessment. Conference: Hannover Messe 2017, At Hannover, Germany. 1-9. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/317720108_Industry_40_Maturity_Assessment
- Klötzer, C., & Pflaum, A. (2017). Toward the development of a maturity model for digitalization within the manufacturing industry's supply chain. Recuperado de <http://hl-128-171-57-22.library.manoa.hawaii.edu/bitstream/10125/41669/1/paper0520.pdf>
- Kopp, J. & Basl, J. (2017). Study of the Readiness of Czech Companies to the Industry 4.0. *Journal of Systems Integration*, 8(3), 40-45. DOI: <https://doi.org/10.20470/jsi.v8i2.313>
- Leyh, C., Bley, K., Schäffer, T., & Forstenhäusler, S. (2016, September). SIMMI 4.0-a maturity model for classifying the enterprise-wide it and software landscape focusing on Industry 4.0. In Computer Science and Information Systems (FedCSIS), Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems. ACSIS, 81, 297-1302. IEEE. DOI: <https://doi.org/10.15439/2016F478>
- Pérez-Lara, M., Saucedo-Martínez, J. A., Salais-Fierro, T. E. & Marmolejo-Saucedo, J. A. Caracterización de modelo de negocio en el marco de industria 4.0. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Magdiel_Perez-Lara/publication/320336233_Caracterizacion_de_modelo_de_negocio_en_el_marco_de_industria_40/links/59de8c68a6fdcca0d3204d75/Caracterizacion-de-modelo-de-negocio-en-el-marco-de-industria-40.pdf
- PwC (2016). Global Industry 4.0 Survey: Industry 4.0: Building the digital enterprise. Recuperado de <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/landing-page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf>
- Reder, L., & Klünder, T. (2017). Application of SCOR flexibility metrics to assess the Industry

- 4.0-Readiness of Supply Chain Networks: an empirical study. Recuperado de http://www.prowi.rub.de/mam/images/2016/arbeitbericht_nr_16_september_2017_reder_kluender.pdf
- Rojko, A. (2017). Industry 4.0 Concept: Background and Overview. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (ijim)*, 11 (5), 77-90. DOI: <https://doi.org/10.3991/ijim.v11i5.7072>
- Soldatos, J.; Gusmeroli, S.; Malo, P. & Di Orio, G. (2016). Internet of Things Applications in Future Manufacturing. Digitising Industry- Internet of Things Connecting the Physical, Digital and Virtual Worlds. 153-183. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Giovanni_Di_Orio/publication/305033020_Internet_of_Things_Applications_in_Future_Manufacturing/links/577f776608ae01f736e45913/Internet-of-Things-Applications-in-Future-Manufacturing.pdf
- Schagerl, M. (2016) Reifegradmodell Industrie 4.0. 49-52. Recuperado de http://www.mechatronik-luster.at/fileadmin/user_upload/Cluster/MC/Presetexte/biz-up_reifegradmodell_i40.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 (The Sixth International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV2016)), 161-166. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.040>
- Sung, T. (2018). Industry 4.0: A Korea perspective. *Technological Forecasting & Social Change*, 132, 40-45. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.11.005>
- Tonelli, F., Demartini, M., Loleo, A. & Testa, C. (2016). A novel methodology for manufacturing firms value modeling and mapping to improve operational performance in the industry 4.0 Era. *Procedia CIRP*, 57, 122-127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.022>
- Yang, S., Raghavendra, M., Kaminski, J., Pepin, H. (2018). Opportunities for industry 4.0 to support remanufacturing. *Applied Sciences*. 8(7), 1177. DOI: <https://doi.org/10.3390/app8071177>
- Ynzunza, C.; Izar, J.; Bocarando, J.; Aguilar, F. & Larios, M. (2017). El Entorno de la Industria 4.0: Implicaciones y Perspectivas Futuras. *Conciencia Tecnológica*, 54. Recuperado de <http://www.redalyc.org/jatsRepo/944/94454631006/94454631006.pdf>
- World Economic Forum (2016). Global Information Technology Report. Recuperado de <http://reports.weforum.org/global-information-technology-report-2016/>

Autores

Marco Vinicio Jacquez-Hernández. Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3247-0878>

Email: marco.jacquez@uabc.edu.mx

Virginia Guadalupe López Torres. Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2795-8951>

Email: vglopeztorres@gmail.com

Recibido: 01-01-2018

Aceptado: 19-06-2018