



# Propuesta de adopción de tecnologías asociadas a la industria 4.0 en las pymes mexicanas

## Proposal for the incorporation of technologies associated with industry 4.0 in Mexican SMEs

Edgar Buenrostro Mercado<sup>a\*</sup>

### RESUMEN

**Objetivo:** presentar una propuesta para incorporar los elementos tecnológicos básicos que se requieren en las pymes mexicanas para integrarse a la industria 4.0.

**Diseño metodológico:** se realiza un análisis de cuatro fuentes secundarias; las características de las tecnologías digitales asociadas, la revisión de bibliografía sobre estudios de caso, las metodologías y manuales internacionales para su adopción y, las condiciones de digitalización de las pymes en México.

**Resultados:** se propone un proceso compuesto por una etapa pre-industria 4.0 y cuatro fases, determinadas por la complejidad de las tecnologías digitales y en las posibilidades de uso que viabiliza la incorporación de cada una de ellas.

**Limitaciones:** este trabajo es resultado de un análisis de fuentes secundarias, por lo que requiere de la comprobación en estudios de caso para contrastar su viabilidad y solo es válido para el caso mexicano.

**Hallazgos:** debido a las características y condiciones de las empresas, así como del entorno nacional, se requiere de una etapa previa de digitalización para que las pymes puedan incorporar de manera efectiva las tecnologías asociadas a la industria 4.0.

\* Infotec



Recibido: 7 de diciembre de 2021;  
Aceptado: 2 de febrero de 2022;  
Publicado: 18 de febrero de 2022



Palabras clave:  
*industria 4.0, pymes,  
digitalización,  
conectividad,  
transformación*

### ABSTRACT

**Purpose:** To present a proposal to incorporate the basic technological elements that are required in Mexican SMEs to integrate themselves into Industry 4.0.

**Methodological design:** An analysis of four secondary sources is carried out: the characteristics of associated digital technologies, literature review on case studies, international methodologies and manuals for their incorporation, and digitization conditions of SMEs in Mexico.

**Results:** A process consisting of a pre-Industry 4.0 stage and four phases determined by the complexity of digital technologies and the possibilities of use that make the incorporation of each of them feasible is proposed.

**Research limitations:** This work is the result of an analysis of secondary sources; hence, it requires verification in case studies to verify its viability and it is only valid in the context of Mexico.

**Findings:** Due to the characteristics and conditions of the companies, as well as the national environment, a previous digitization stage is required in order for SMEs to be able to effectively incorporate the technologies associated with Industry 4.0.



Keywords: *Industry 4.0, SMEs, digitization, connectivity, transformation*



Se autoriza la reproducción total o parcial de los textos aquí publicados siempre y cuando se cite la fuente completa y la dirección electrónica de la publicación. CC-BY-NC-ND

## INTRODUCCION

La incorporación de las tecnologías digitales en los diferentes aspectos de la sociedad ha traído aparejados una serie de cambios que han modificado la manera en cómo se articulan los actores en el desarrollo de sus actividades. En referencia a la industria, esto ha dado lugar a una reconceptualización de los sistemas productivos (Casalet, 2020) que establece nuevas estructuras y procesos, y reconfigura los existentes para adaptarse a su uso intensivo; así como a las nuevas aplicaciones y la combinación de estas, lo que ha dado lugar a la llamada industria 4.0 (I4.0) como un fenómeno global que abarca a todos aquellos actores que intervienen en los procesos de generación y consumo, dando lugar a nuevos arreglos productivos donde las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) juegan un papel central.

El término industria 4.0 surge en 2011 en Alemania como parte de la estrategia para impulsar el uso de las tecnologías digitales en las empresas, para desarrollar la economía a partir de la generación y uso de sistemas ciberfísicos orientados a la producción (Kagermann, Wahlster y Helbig, 2013), que se diferencia de la digitalización de la producción, cuyo objetivo se limita a la incorporación de las TIC en las actividades de manera individual.

Esta nueva perspectiva es un acercamiento integral para la optimización de las cadenas de valor a través de la implementación de soluciones flexibles y dinámicas complejas (Schuh *et al.*, 2017; Koska *et al.*, 2017). La I4.0 se compone de una serie de tecnologías digitales que se articulan y coordinan entre sí para la producción de manera autónoma por medio de la interrelación entre las máquinas y las personas (Castillo, 2017), que genera una serie de arreglos intra e interempresas que modifican los procesos a través del intercambio y análisis de la información. Por lo que debe ser abordado como un fenómeno derivado de una combinación de tecnologías articuladas que se desempeñan de manera conjunta, así como de los elementos sociales y organizacionales que lo acompañan.

Cuando se aborda el estudio de la I4.0, se debe considerar que es un fenómeno complejo que se desarrolla de manera paralela en diferentes partes del mundo, así como en diferentes sectores económicos, e incluye una serie de tecnologías que se articulan para la producción.

Por lo tanto, en la literatura se presentan distintas definiciones que, desde varias perspectivas, la identifican. Algunas se refieren a los nuevos procesos que surgen en la gestión y coordinación de la cadena de valor de los productos (Kagermann *et al.*, 2013). Algunas otras refieren que es la integración de tecnologías de la información en conjunto con tecnologías operativas para la producción (Bonomi, 2018). Hay otros acercamientos centrados en la gestión y transformación de la producción basada en las externalidades derivadas del conocimiento, su combinación y conectividad (Topleva, 2018).

Para el presente documento, la I4.0 será entendida como la incorporación de sistemas ciberfísicos en el ciclo de vida del producto, que se desempeñan de manera articulada para la producción a través de la generación, distribución y análisis de la información de manera autónoma o con una mínima participación de las personas. Esto incluye no solo a la producción en sí misma, también se encuentran elementos como la logística, el surgimiento de nuevos modelos de negocios, los cambios asociados a la estructura de la producción y todo aquello que se encuentra dentro de las cadenas de valor (Schuh *et al.*, 2017; Calatayud y Katz, 2019; Kolberg y Zühlke, 2015; Weber, 2016).

En lo referente a las tecnologías involucradas, la complejidad de su implementación radica en que cada una de estas presenta su propia senda evolutiva y de innovación, generando altos costos y la necesidad de contar con elevadas capacidades para su integración dentro de los procesos de producción. Esto es particularmente complejo para las pymes que, por sus características, cuentan con una disponibilidad limitada de recursos y de una falta constante de personal capacitado (García, 2019).

En el caso de México, las pymes presentan bajas condiciones de competitividad tecnológica en relación con sus pares de otros países desarrollados (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos [OECD, por sus siglas en inglés], 2020a), encontrándose en desventaja para implementar la I4.0, por lo que se requiere contar con programas de apoyo orientados a aumentar la adquisición y el uso de las tecnologías asociadas; pero para ello se requieren conocer las condiciones que guardan las empresas nacionales en relación con estas, no como

un todo, sino en relación a cada uno de los componentes que la forman, por lo cual, el objetivo es presentar una propuesta para incorporar los elementos tecnológicos básicos que se requieren en las pymes nacionales para integrarse a la I4.0. Para cumplir el objetivo se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿cuál es la ruta de incorporación de las tecnologías asociadas a la I4.0 para las pymes mexicanas de acuerdo con su nivel de desarrollo general? Para responderla se analizan cuatro elementos: *a)* las características de las tecnologías digitales asociadas; *b)* la revisión de bibliografía sobre estudios de caso; *c)* las metodologías y manuales para su adopción, y *d)* las condiciones de digitalización de las pymes en México.

Para abordar este objetivo, el trabajo se divide en tres apartados: en el primero de ellos se presentan las condiciones básicas de las tecnologías que se encuentran en el origen de la I4.0, tales como el internet de las cosas, el *big data*, la manufactura flexible, entre otras, para establecer las particularidades de cada una y las articulaciones entre ellas como parte del fenómeno global y las condiciones en que se ha implementado en las firmas. En el segundo apartado se presentan las condiciones de las TIC asociadas a la producción en México, considerando su uso dentro de los procesos productivos y administrativos de las pymes y la forma en cómo las incorporan, de acuerdo con la información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi] y de los organismos internacionales que cuentan con datos al respecto. En el tercer apartado se realiza un análisis de los datos a la luz de los requerimientos para la I4.0, para establecer cuál es el escenario en el que se encuentran las empresas para adaptarse a los cambios en la producción y la propuesta de proceso de adopción de las tecnologías. El capítulo final cierra con las conclusiones, donde se presentan las aportaciones del trabajo.

## ELEMENTOS PARA LA INTEGRACIÓN DE LAS PYMES EN LA INDUSTRIA 4.0

La I4.0 se ha mostrado como un fenómeno de alcance global que modifica las articulaciones y procesos asociados a la producción, distribución y consumo, y que, de manera transversal, se presenta en todos los sectores de la economía. Desde su formulación en el 2011 (Kagermann *et al.*, 2013) se han desarrollado diferentes

acercamientos para comprender los elementos que intervienen en ella, resultando en una serie de trabajos académicos con diversos orígenes temáticos, metodológicos y geográficos. Por lo que resulta fundamental iniciar con la presentación de las tecnologías que se le asocian considerando sus articulaciones, así como su contribución dentro del proceso global, recordando que cada una conlleva una serie de elementos que inciden en su senda de innovación y uso dentro de las empresas y de las cadenas globales de valor.

### Tecnologías asociadas a la industria 4.0

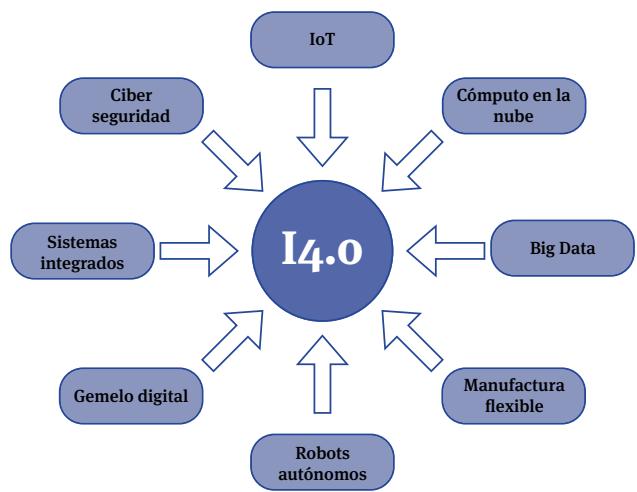
Para comprender la complejidad de la incorporación de las empresas a la I4.0 es fundamental considerar la diversidad de tecnologías que intervienen en su formulación y su funcionamiento de manera integrada, ya que, a diferencia de la digitalización, donde es posible abordar procesos de manera parcial (Schuh *et al.*, 2017), en este caso no es factible, ya que no se cumpliría con la articulación de los sistemas a través de compartir, analizar información y actuar en consecuencia, todo de manera autónoma.

Así como en la literatura se presentan diferentes acercamientos, de igual manera, los autores distinguen distintos grupos de tecnologías que intervienen en la conformación de la I4.0, que se relacionan con su aproximación al tema. En este sentido, se encuentran algunos que sostienen que la base de estos cambios es el internet de las cosas (IoT) y los demás elementos son facilitadores y auxiliares (Morabito, 2014). Una de las clasificaciones más utilizada es aquella que presentó el Boston Consulting Group (BCG), que establece nueve tecnologías y su integración como la base de la industria (BCG, s.f.) y, finalmente, algunos que consideran a los elementos auxiliares como parte central de los procesos (Kovacs, 2019).

Debido a que el objetivo del presente documento se centra en abordar las condiciones de las pymes para incorporarse a la I4.0, es que se consideran aquellas que intervienen en las actividades de producción, observando que estas se interrelacionan con otra serie de elementos para la integración de sus funciones. Por lo tanto, se establecen nueve grandes tecnologías centrales, que se califican como habilitadoras (Bonomi, 2018), que, en conjunto con las facilitadoras (telecomunicaciones,

software, logística), dan lugar a estos nuevos arreglos productivos (figura 1).

Figura 1. Tecnologías habilitadoras de la I4.0



Fuente: elaboración propia

Al estar basada en sistemas ciberfísicos, el primer elemento, y sobre el que algunas de las metodologías establecen la implementación del paso de la digitalización a la I4.0 (Schuh *et al.*, 2017), es el IoT. Esta es una red que resulta de la interconexión de objetos que cuentan con su propia identidad, que a través de sensores, conectores y actuadores, en conjunto con aplicaciones de software, generan un sistema en red altamente dinámico y radicalmente distribuido (Miorandi *et al.*, 2012) que genera, comparte y analiza información y actúa en consecuencia, sin la intervención de personas.

Para que los sistemas físicos se conecten, comparten y analicen información se requiere de la infraestructura y los servicios necesarios para la transmisión. Su adquisición puede resultar costosa y requerir de personal con las capacidades necesarias para su utilización y mantenimiento; esto limita las posibilidades de acceso, en particular para las pyme que cuentan con recursos limitados. Una forma de paliar el inconveniente es a través del *cloud computing*, que se refiere a un modelo de servicio de cómputo bajo demanda que no requiere de grandes inversiones con posibilidades de escalabilidad y flexibilidad (OECD, 2014), donde, por medio de internet, se facilita el intercambio y análisis de información a bajo costo y de manera automática, impulsando el uso

más eficiente de los recursos y el acceso a procesos más complejos para la toma de decisiones (Buenrostro, 2019).

Los objetos conectados generan una gran cantidad de datos que son trasmisidos y almacenados en redes distribuidas a través del cloud computing. Esta información es generada por diversas fuentes en distintos formatos y estructuras, obstaculizando su manejo a través de las técnicas estadísticas tradicionales debido a su naturaleza basada en las cinco "V" (velocidad, variedad, volumen, veracidad y valor) que requieren del análisis en tiempo real para que los sistemas automatizados realicen las adecuaciones necesarias de acuerdo con las condiciones presentes, por lo que se requiere de nuevas técnicas de análisis, donde se utiliza el big data, que surge como resultado del rápido crecimiento en el volumen y la diversidad de los datos generados, transmitidos y almacenados, para identificar los patrones que se encuentran ocultos bajo una gran cantidad de información desestructurada proveniente de fuentes heterogéneas, con el fin de mejorar los procesos y la toma de decisiones (Morabito, 2014).

La I4.0 requiere de una mayor automatización basada en la incorporación de robots industriales, pero a diferencia de los casos anteriores, ahora se demanda que cuenten con capacidad para aprender a través de inteligencia artificial (IA), para que sean capaces de tomar decisiones de manera autónoma, en tiempo real (Blasco *et al.*, 2018) y en conjunto con la cadena de producción de acuerdo con las necesidades y la demanda del mercado, coordinando sus acciones dentro del proceso en que se encuentran como parte de la cadena de valor en su conjunto.

Una de las tecnologías que más se asocia con la I4.0 es la fabricación aditiva, más conocida como impresión 3D; la cual permite a través de la modelación por computadora la generación de prototipos, la creación de diseños y pruebas de concepto a un bajo costo, en diferentes materiales. Así como la generación de productos personalizados que ofrecen más valor a los usuarios finales, a la vez que reducen los costos derivados de los desperdicios y de los tiempos de fabricación y el desarrollo de herramientas especializadas (Motta, Moreno y Ascúa, 2019). Esto permite hacer frente a las demandas del mercado de manera más efectiva e impulsa la producción personalizada desde una pieza lo que permite acceder a nichos de mercado de cualquier tamaño y especialización.

Para disminuir los tiempos de desarrollo de produc-

tos, así como las modificaciones en los procesos de producción, se hace uso de la realidad aumentada para impulsar una serie de servicios asociados tales como la selección de piezas y el envío de instrucciones para la operación y reparación de máquinas y robots autónomos (BCG, s.f.), ya que permite vincular el mundo real con la información generada en tiempo real para la realización de pruebas y procedimientos. Esto se acompaña con el llamado gemelo digital, que se refiere a contar con modelos virtuales que reflejan el mundo físico para probar y optimizar nuevas configuraciones en el mundo virtual antes de llevarlas al físico (Albrieu *et al.*, 2019), con el fin de hacer más eficientes las cadenas de producción actuales o establecer nuevas líneas, reduciendo los tiempos de prueba y mejorando la calidad.

Una de las principales diferencias entre la incorporación de las tecnologías digitales en la producción y la I4.0 se refiere al hecho de que, en esta última, los sistemas y las máquinas se desempeñan de manera articulada y coordinada con una integración horizontal y vertical (Kagermann *et al.*, 2013) que no se circumscribe únicamente a una instalación productiva, ya que se vincula a las diferentes empresas, departamentos y áreas, enlazando y sumando sus capacidades para impulsar una mejora en la producción, distribución y consumo. Por lo que, la generación, compartición y análisis de datos, la conexión entre los sistemas ciberfísicos, la automatización, la simulación, la realidad aumentada y los nuevos modelos productivos basados en la impresión 3D deben considerarse de manera simultánea en toda la cadena de valor.

Aun cuando no forma parte de las tecnologías que se relacionan directamente con los procesos de producción, debido a su naturaleza que incorpora como elemento central a las tecnologías digitales para la generación, intercambio, análisis y uso de la información, es fundamental considerar las cuestiones asociadas a la ciberseguridad para evitar pérdidas o fugas de información, así como ataques a la cadena de valor (OECD, 2016). Debe establecerse, no solo como aquella que se refiere a los entornos técnicos donde interactúan las computadoras, los objetos conectados y las máquinas sino como una estrategia integral de gestión de riesgos que considera todas las partes y actores que intervienen en la producción.

## La incorporación de las empresas a la Industria 4.0

La diversidad y el número de trabajos que han aparecido en los últimos años sobre la I4.0 muestra la relevancia que tiene para los países y las empresas su desarrollo e implementación. Los estudios bibliométricos recientes dan muestra de la diversidad de los temas, como se presenta en Piccarozzi, Aquilani y Gatti (2018), donde a través de una revisión de las principales bases de datos académicas se establecen un conjunto de temáticas principales entre las que se encuentran los métodos de producción, modelos de negocios, estrategias, impactos y consecuencias del fenómeno y, en menor medida, elementos asociados a la gestión de recursos humanos, pymes y cadenas de valor. En el caso de las organizaciones internacionales y los gobiernos supranacionales, nacionales y locales, estos han generado una serie de documentos orientados a la formulación de programas y políticas públicas de apoyo a la implementación de las tecnologías digitales para la producción (Kagermann *et al.*, 2016; Comisión Económica para América Latina y el Caribe [Cepal], 2016; Manufacturing Technology Centre [MTC], 2016; OECD, 2017). En cuanto a la implementación, estos trabajos establecen que es un proceso complejo que surge del uso de las diferentes tecnologías, donde las grandes empresas, que lideran la transformación internacional, han desarrollado procesos integrales y planificados con hitos e indicadores, así como rutas de acción claramente trazadas (Evans y Annunziata, 2012).

En algunos de ellos se establecen el conjunto de condiciones que inciden en la implementación de la I4.0, considerando elementos técnicos, económicos, humanos, de conocimientos y administrativos, tanto internos como externos (Vrchota, Volek y Novotná, 2019), en otros se distinguen las cuestiones relacionadas con las características de las firmas y sus capacidades para impulsar el uso de estas tecnologías (Hamada, 2019). En un tercer caso se orientan a cuestiones específicas como la sustentabilidad de los cambios (Muller, Kiel y Voigt, 2018; Praise y Atari, 2017). También se presentan estudios sobre sectores específicos y pymes, y su transición hacia este nuevo modelo (Shin, 2017). Por último, se encuentran aquellos que evalúan las políticas nacionales o regionales para que las pymes se incorporen a los nuevos arreglos productivos basados en sistemas ciberfísicos (Garzoni *et al.*, 2019).

A diferencia de las grandes empresas, que cuentan con recursos y capacidades para la adopción de estas tecnologías, las pymes presentan importantes limitaciones en ambos sentidos; por lo que resulta complejo realizar cambios debido a la naturaleza propia de sus condiciones (García, 2019), lo que pone en riesgo su viabilidad a futuro. Por lo que, en los últimos años, se han desarrollado estudios para establecer las barreras y facilitadores para la adopción de la I4.0. De ellos se desprende que es fundamental contar con una estrategia de incorporación a la I4.0 que establezca claramente el proceso de escalamiento tecnológico, que considere también la formación de capacidades internas (Stentof *et al.*, 2019) como elemento básico para transitar por estos cambios internos y externos.

En este mismo sentido, otros trabajos establecen que, debido a la naturaleza colaborativa de la I4.0, las pymes requieren de una estrategia que considere la manera en que las empresas se articulan dentro de la cadena de valor, así como en su entorno (Muller *et al.*, 2017; Pelletier y Cloutier, 2019), por lo que es necesaria una visión sistémica que incorpore la complejidad de las vinculaciones, ya que se precisa de una sincronicidad de los cambios de los diferentes actores para que la transformación de la empresa se corresponda con las demandas y los procesos de las firmas con las que interactúa.

Debido a la novedad de la I4.0, aún son pocos los estudios enfocados en las condiciones propias de las pymes y las modificaciones que conlleva la incorporación de la tecnología y el cambio de los procesos, pero en los últimos años han surgido trabajos que abordan este fenómeno a nivel nacional o regional (Masood y Sonntag, 2020; Vrchota *et al.*, 2019; Motta *et al.*, 2019). Considerando la relevancia de este tipo de empresas en la economía es de esperar que estudios de esta naturaleza sean cada vez más numerosos en el futuro.

Al igual que en el entorno internacional, en México se han realizado diversos estudios en este sentido, especialmente en sectores como el automotriz, aeroespacial y metalmecánico, que muestran las condiciones de dichas industrias para incorporarse a los procesos que se derivan de este fenómeno. Estos trabajos presentan el análisis sectorial de grandes empresas que lideran a nivel nacional los procesos de transformación asociados a la I4.0 (Carrillo, 2020; Martínez, Álvarez y García, 2020; Salinas y Gutiérrez, 2020) mostrando los elementos, retos

y factores que influyeron en alguna medida en la implementación de las tecnologías digitales.

En el caso particular de las pymes nacionales y el estudio de su incorporación a la I4.0 se presentan algunos trabajos que abordan esta temática, en parte, por la escasa información con la que se cuenta. Estos presentan, desde una perspectiva teórica, los elementos que inciden en estas empresas para incorporarse en estos nuevos modelos de producción (Martínez *et al.*, 2020). En otros no se abordan de manera directa, pero sí como parte de las cadenas de valor y en la formulación de políticas y programas para impulsar su desarrollo (Casalet, 2018).

De los estudios anteriormente mencionados se desprende que, debido a la profundidad y extensión de los cambios que se asocian a la I4.0, se requiere de una gran cantidad de recursos económicos, humanos y de tiempo; además de los conocimientos y capacidades necesarios para llevar a cabo esta transformación, por lo que, es fundamental profundizar en el entendimiento de las condiciones en que estas se encuentran, así como los elementos que limitan y favorecen esta adopción, con el fin de generar estrategias para apoyar a las pymes en su incorporación a los nuevos procesos productivos, así como en las nuevas cadenas globales de valor que requieren de un uso intensivo de las tecnologías digitales y la articulación para la generación de valor.

## Metodologías y modelos para la implementación de la I4.0

Apuntar hacia los cambios requeridos por la I4.0 precisa de una planeación respecto a los procesos para incorporar estas tecnologías en la producción con el fin de realizar una transición de manera factible. Es así que se han propuesto algunas metodologías y rutas de transformación hacia su implementación en las empresas (Gajšek, 2019); así como establecer los niveles de madurez para contar con una guía para transitar en la transformación de los establecimientos industriales (Koska *et al.*, 2017). Debido a la novedad del tema, su complejidad, la transversalidad de su aplicación en los diferentes sectores de la economía y los cambios continuos, no se presenta un único modelo para transitar por estos cambios. A continuación, en la tabla 1, se presentan los principales tipos en relación con su estrategia.

**Tabla 1. Metodologías para la implementación de la I4.0**

Objetivo	Estrategia
Basada en el cambio integral de la organización	<p>Establecer una hoja de ruta para que las empresas transiten hacia la I4.0 y se transformen en organizaciones ágiles que aprenden</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Visibilidad</li> <li>• Transparencia</li> <li>• Capacidad predictiva</li> <li>• Adaptabilidad</li> </ul> <p>Se consideran dos preetapas que se agrupan como la digitalización de la empresa y cuatro etapas incrementales para avanzar en la I4.0:</p>
Centrada en la auto evaluación y dirección del proceso de transformación	<p>Establecer un modelo para avanzar en la madurez de la I4.0, con centro en la logística.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelo de negocios</li> <li>• Sistemas informáticos</li> <li>• Gestión de procesos</li> <li>• Gestión de calidad</li> <li>• Planificación de la producción</li> <li>• Control de la producción</li> <li>• Logística y distribución</li> <li>• Comunicación hombre-máquina</li> </ul> <p>Se desarrolla para facilitar la autoevaluación en cada aspecto de la organización:</p>
Fundamentada en la colaboración entre empresas	<p>Desarrolla un modelo para la implementación de la I4.0 basado en la cadena de valor</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Visualización de la relevancia I4.0</li> <li>• Habilitar la hoja de ruta de la I4.0 con una visión sistémica</li> <li>• Desarrollo de proyectos de la I4.0 de manera colaborativa como parte de las cadenas de valor</li> </ul>

Fuente: elaboración propia con base en Schuh *et al.* (2017); Pelletier y Cloutier (2019); Ganzarain y Errasti (2016); Sternad, Lerher y Gajšek (2018); Muller *et al.*, (2017).

A partir de la clasificación presentada se observa que aun cuando el objetivo, en todos los casos, es avanzar en la implementación de la I4.0, las formas propuestas difieren considerablemente. Algunas de ellas parten de una perspectiva individual basada en capacidades que permitan a las empresas establecer nuevas funcionalidades de acuerdo con la incorporación de tecnología y la adquisición del conocimiento asociado (Schuh *et al.*, 2017). En otros casos se establece que las organizaciones realizan una diversidad de actividades, las cuales deben de transitar de manera conjunta hacia la I4.0 para evitar tensiones entre ellas (Sternad *et al.*, 2018). En el tercer tipo se presenta a la firma como parte de una cadena de valor que transita de manera conjunta hacia un nuevo modelo de producción, que genera oportunidades de negocio basadas en las nuevas posibilidades derivadas de la tecnología digital y las articulaciones emergentes que surgen de ellas (Ganzarain y Errasti, 2016).

De todas las metodologías solo la última se desarrolló con las pymes como objeto de su aplicación, aun cuando su visión se orienta a las condiciones que surgen de la coordinación de actividades con otras empresas y de la generación de oportunidades de nuevos negocios y mercados. Las otras dos se orientan a todas las firmas

en general, estableciendo elementos basados en experiencias presentadas en diferentes ramas de la economía, considerando a la empresa como un sistema coordinado.

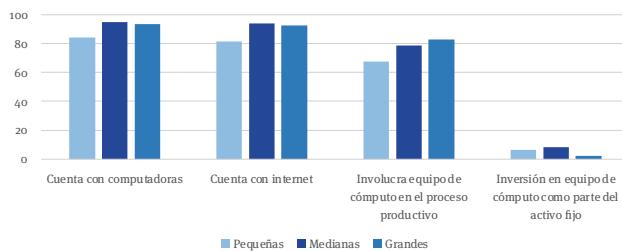
En este trabajo presentamos una propuesta de transición centrada en las tecnologías asociadas a la I4.0 a partir de su complejidad, ya que, debido a las limitaciones propias de las pymes nacionales, se requiere contar con un punto de partida para avanzar hacia la transformación gradual que disminuya el riesgo de una transición fallida, debido a la complejidad y cantidad de modificaciones propuesta por las anteriores metodologías y modelos. Por lo que, a continuación se exponen y analizan las condiciones generales en que se encuentran y desenvuelven las empresas localizadas en México, a partir de la información que se desprende de las bases de datos nacionales, así como de aquellas elaboradas por los distintos organismos internacionales que abordan algunos o varios de los elementos que componen estas tecnologías o que se relacionan de manera directa con estas.

## CONDICIONES DE LAS PYMES NACIONALES PARA INCORPORARSE A LA INDUSTRIA 4.0

Un elemento común a las metodologías de implementación presentadas en la tabla 1 se encuentra en el punto de partida para la transición a la I4.0, que se establece a partir de las condiciones de digitalización de las empresas, por lo que, en este trabajo se consideran, al igual que estos documentos (Schuh *et al.*, 2017; Pelletier y Cloutier, 2019; Ganzarain y Errasti, 2016; Sternad *et al.*, 2018; Muller *et al.*, 2017), las condiciones actuales de las pymes con relación a las TIC. En el caso mexicano la información disponible es muy escasa, por lo que en varios casos se utilizarán algunos indicadores *proxy*, cuando sea posible, para analizar el escenario de las empresas en relación con la incorporación de las tecnologías anteriormente presentadas.

Por lo tanto, con base en las rutas de transición hacia la I4.0, el primer punto a analizar es la incorporación de las computadoras en las actividades asociadas a la producción y la conexión a internet de estas, en la gráfica siguiente (figura 2) se presentan ambos datos de acuerdo con el tamaño de la empresa.

**Figura 2. Condiciones de digitalización de las empresas en México**



Fuente: elaboración propia con base en Inegi (2020).

De acuerdo con los datos obtenidos en el último censo económico, los niveles de digitalización de las empresas establecidas en México, determinados por los dos indicadores considerados como antecedentes para la implementación de las tecnologías asociadas a la I4.0, presentan comportamientos diferenciados de acuerdo con el tamaño de la empresa. En el caso de las pequeñas empresas (menos de 51 trabajadores), más de 80 % de ellas cuenta con computadora y conexión a internet; y en las medianas (51 a 250 trabajadores) ambos indicadores se incrementan hasta 94 %, cifra muy similar en las

grandes empresas (251 y más trabajadores).

Se destaca que, las empresas que cuentan con computadoras y aquellas con acceso a internet presentan comportamientos similares, mostrando que la incorporación de equipo de cómputo se encuentra acompañado en la mayoría de los casos de su uso para acceder a la red. Se observa que las pequeñas empresas presentan unas condiciones básicas muy similares a las medianas y las grandes, por lo que, *a priori*, se cuenta con un número relevante que cumple con los requisitos iniciales de acuerdo con la literatura (Schuh *et al.*, 2017). Esto es un comportamiento comparable con los estudios que abordan los factores de incorporación de las TIC en las pymes (Hamada, 2019).

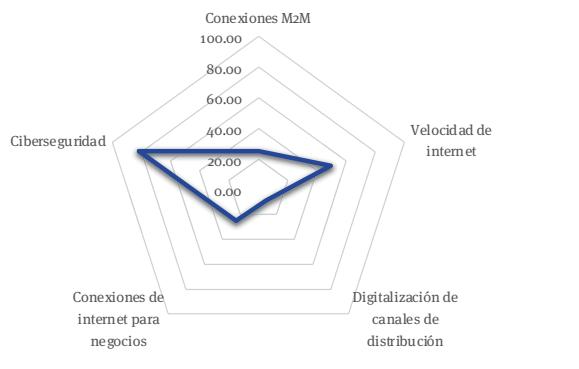
Aun cuando las empresas cuentan con equipo de cómputo, en estudios anteriores (Buenrostro, 2015) se ha mostrado que contar con el equipo no refleja su incorporación en los procesos de las empresas y en la generación de valor agregado. De ahí que resulta fundamental considerar el uso de la tecnología, como se muestra en los datos de la gráfica donde los niveles de utilización en las actividades productivas son menores que el número de equipos, que en el caso de las pequeñas alcanza cotas menores a 70 % del total. En relación con el gasto en este rubro, comparado con el total del activo fijo, este representa en todos los casos una parte muy pequeña, por lo que es posible que se requiera de montos de inversión importantes para contar con las posibilidades de incorporarse a las cadenas de valor que surjan de la implementación de la I4.0.

La conectividad permite el intercambio de información, es una condición necesaria pero no suficiente para que las diferentes tecnologías trabajen de manera articulada, además se requiere de servicios, software, infraestructura, protocolos de comunicación, así como de los niveles de seguridad adecuados para establecer niveles de confiabilidad que permitan establecer la verosimilitud de la información, desde la generación a través de los objetos conectados hasta su análisis y la toma de decisiones. Por lo tanto, es necesario considerar un conjunto de indicadores que permita contar con un panorama más amplio para establecer las condiciones en que se encuentran las empresas nacionales.

Debido a la novedad y a la complejidad asociada a la I4.0, que involucra tanto elementos tecnológicos como económicos y sociales, en el caso mexicano no se cuen-

ta con información específica respecto a los niveles de incorporación tecnológica, por lo cual, para este trabajo se consideró la utilización de variables indirectas que se desprenden de bases de datos de organismos y empresas internacionales para analizar las condiciones en que se encuentran las pymes nacionales, las cuales se presentan en la figura 3.

**Figura 3. Condiciones de las pymes nacionales para incorporarse a la industria 4.0**



Fuente: elaboración propia con base en Katz, Jung y Callorda, 2020; Cisco, 2021; Ookla, 2021.

De acuerdo con la exposición sobre las tecnologías asociadas a la I4.0, esta se basa en el IoT como base de los sistemas ciberfísicos y sus capacidades de generar, intercambiar y analizar información de manera independiente. Para que los objetos se consideren como conectados se requiere de tres características básicas (Miorandi *et al.*, 2012; Morabito, 2014): la primera, que cuenten con sensores capaces de recoger información del entorno; la segunda, que tengan la facultad de conectarse con otros de este u otro tipo y, finalmente, que puedan enviar y recibir información y actuar en consecuencia, todo esto de forma autónoma. Para ello, cada uno debe contar con una identidad digital y una conexión considerada como “máquina a máquina” (M2M).

Para México, del total de conexiones de dispositivos conectados a internet (computadoras, teléfonos, smart TV, etcétera), tanto móviles como fijos, se estima que, en el 2018 25 % de ellos corresponden a M2M (Cisco, 2021). Aquí se incluyen no solo aquellos asociados directamente al IoT sino también los vinculados a la domótica y las ciudades inteligentes. A nivel global, este indicador se encuentra en 33 %, por lo que nos encontramos con una brecha relevante, más si se consideran las proyecciones hacia 2023 que establecen un aumento de la brecha, con

un 28 % para el país y un 50 % en el entorno internacional. Este indicador resulta notable ya que estos objetos son una fuente de datos para el big data, así como un insumo para la IA utilizada por los robots autónomos.

Un segundo indicador es la velocidad del internet, ya que, el aumento de las conexiones a la red y el crecimiento de los sensores y actuadores demanda la capacidad de transmitir grandes cantidades de información entre las diferentes partes de los sistemas ciberfísicos, así como el aprovechamiento de la flexibilidad que otorga el uso del cómputo en la nube a través del acceso a capacidad de cómputo bajo demanda en tiempo real. Por lo que se requiere no solo de alta capacidad en las conexiones sino también de baja latencia y estabilidad en los enlaces para aprovechar estas tecnologías.

En el 2021, para México, se reportó un promedio de velocidad de internet de 54.88 mbps en las conexiones fijas comparado con el global que fue de 110 mbps (Ookla, 2021), que lo colocan en el lugar 80 en este rubro, por debajo de países con un desarrollo similar como Brasil que reporta una media de 113 mbps y lejos de sus principales socios comerciales, EE. UU. Y Canadá, que presentan 203.81 y 183.81 mbps, respectivamente.

Por otro lado, uno de los sectores de la I4.0 que está teniendo mayores cambios es el de la logística (Calatayud y Katz, 2019), por lo que contar con canales de comercialización automatizados y vinculados a las cadenas de distribución permite aumentar la eficiencia del tiempo y los recursos, tanto en la obtención de insumos para la producción, como en el acceso a mercados en cualquier parte del mundo, por lo que, aun cuando no es una tecnología como tal, permite articular a los actores y a las diferentes partes del proceso de generación de valor agregado.

Una indicación de las limitaciones para incorporar a las tecnologías digitales dentro de la generación de valor agregado de las pymes se encuentra en el reducido número de estas que cuentan con canales de venta a través de la red, donde, en el 2018, solo 8.68 % de las firmas reporta contar con esta herramienta. En este mismo sentido, 13.47 % realiza compras de insumos por internet (Katz *et al.*, 2020). Esta información muestra el reducido papel que tiene esta tecnología en la articulación de los procesos de producción y distribución en las empresas nacionales.

Debido a que la I4.0 es un sistema donde las articu-

laciones se realizan a través de las TIC, resulta fundamental considerar las conexiones de internet dedicadas al sector de negocios. De acuerdo con Cisco (2021), del total de estas, solo 25 % se encuentran destinadas a este sector y 75 % restante a los consumidores. En este punto, el comportamiento es similar al que se observa a nivel global, por lo cual no se observa una limitación para el desarrollo de los nuevos procesos productivos basados en las tecnologías digitales.

Por último, en este entorno hiperconectado donde las articulaciones se presentan intra e inter empresa formando un entramado en donde las anomalías no son individuales, sino que se propagan por medio de los canales de vinculación hacia todo el sistema, un elemento transversal en la formación de estos sistemas es la seguridad asociada a las TIC, que comprende los diferentes aspectos de la generación, manejo, análisis y uso de los datos, así como cualquier información relevante para la empresa como los secretos industriales, códigos, software, algoritmos, etcétera.

En este entorno, la ciberseguridad es entendida no solo como la parte asociada a las máquinas; se extiende hacia los elementos de gestión y organizacionales asociada hacia el concepto de riesgo, el cual no puede eliminarse completamente, pero sí disminuirse a partir de acciones integrales que consideren los aspectos técnicos, humanos, legales y sociales. En este sentido, México, de acuerdo con la OECD (2020b), presenta un desarrollo de 81.68 en una escala de 100, donde este representa las mejores prácticas a nivel internacional en cinco grandes rubros: *a)* elementos legales; *b)* elementos técnicos; *c)* elementos organizacionales; *d)* capacidades de desarrollo, y *e)* medidas de cooperación entre actores. A nivel internacional se encuentra en la posición 64, muy alejado de países como Brasil (96.6) o España (98.52), por lo que presenta una gran área de oportunidad para mejorar en todas las secciones que conforman el índice.

Como resultado de las condiciones en que se encuentran las pymes nacionales, se establece que, en el ámbito tecnológico se requiere de la atención en áreas básicas relacionadas con el uso de las TIC para superar las limitaciones que presentan de cara a la I4.0 y su articulación en las cadenas globales de producción. A partir de estos elementos es que, a continuación, se propone un proceso de incorporación de las tecnologías que responda a las condiciones de estas empresas.

## PROPUESTA DE ADOPCIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA IMPULSAR LA INCORPORACIÓN DE LAS PYMES MEXICANAS A LA I4.0

De acuerdo con las categorías analizadas, se pueden distinguir una serie de elementos que establecen las condiciones básicas en que se encuentran las pymes nacionales para realizar la transformación que requiere la I4.0 y su articulación con diferentes tecnologías digitales para su funcionamiento de acuerdo con las demandas de este modelo productivo emergente.

Para que las pymes cuenten con los elementos mínimos para incorporar las diferentes tecnologías de manera que puedan integrar a estas de manera efectiva en la estructura de la firma y cumplir con los nuevos requerimientos de las cadenas de producción se requiere de estrategias que permitan mejorar de manera paulatina las condiciones en que se encuentran estas, así como los cambios en las organizaciones para que estas aporten a la generación de valor de manera efectiva y no se conviertan en un gasto sin reflejo en el producto final.

Por lo que, es fundamental establecer un proceso de adopción de tecnologías para que las pymes nacionales cuenten con las condiciones básicas para integrarse a la I4.0. A continuación se presenta una propuesta derivada del análisis de las condiciones de las empresas, estableciendo los aspectos que deben ser atendidos para impulsar la incorporación de las pymes en este nuevo paradigma de producción, distribución y consumo de acuerdo con las condiciones presentes en el país (figura 4).

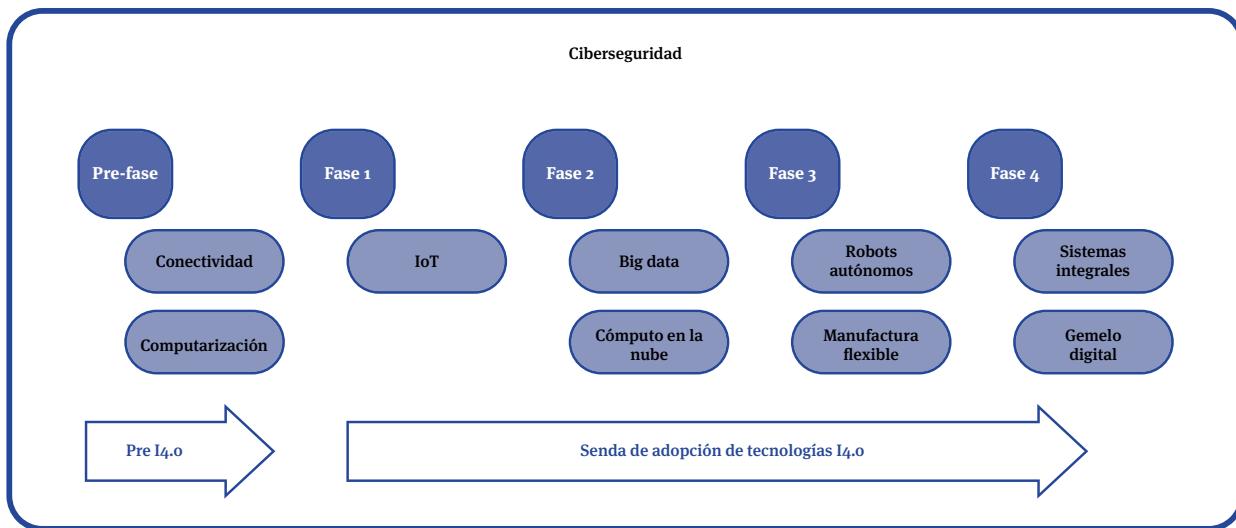
Para la elaboración de la propuesta se consideraron los estudios de caso a nivel internacional y nacional (Vrchota, 2019; Hamada, 2019; Muller *et al.*, 2017, Carrillo, 2020; Martínez *et al.*, 2020), así como las metodologías de implementación de la I4.0 (tabla 1) y la complejidad, características y condiciones de cada una de las tecnologías involucradas, mismas que se presentaron en el primer apartado de este trabajo.

Para establecer la complejidad de las tecnologías asociadas a la I4.0 se consideraron los requerimientos de cada una, de tal manera que, para la incorporación de cada una de ellas es necesario contar con aquellas que posibilitan su uso. Por lo cual, la propuesta reconoce la necesidad de adoptar las tecnologías que requieren una menor cantidad de elementos, para en fases posterio-

res avanzar en el proceso. Asimismo, para iniciar con el proceso de adopción se establece la necesidad de una

prefase que facilita a las pymes su incorporación en los nuevos modelos productivos basados en el uso de las TIC.

**Figura 4. Proceso de incorporación tecnológica para la I4.0**



Fuente: elaboración propia.

A diferencia de las metodologías propuestas anteriormente (Schuh *et al.*, 2017; Garzoni *et al.*, 2019; Muller *et al.*, 2017) y presentadas en la tabla 1, el proceso propuesto se enfoca únicamente en la cuestión tecnológica, ya que se encuentra dirigido particularmente a las pymes, considerando las limitaciones de recursos y capacidades, así como las condiciones de digitalización de estas empresas y el grado de desarrollo de las TIC en el entorno nacional. Esto con el fin de ser una guía para la generación de estrategias de incorporación a la I4.0, la cual es considerada como el eje básico para la transformación de las empresas (Muller *et al.*, 2017; Pelletier y Cloutier, 2019; Stentof *et al.*, 2019), para disminuir el riesgo asociado a la transición de procesos productivos análogos a digitales.

Con estas consideraciones se establecen cuatro fases determinadas de acuerdo con las características y requerimientos de las tecnologías asociadas a la I4.0. Además, como parte de las condiciones de las pymes nacionales se inicia una prefase que incluye a la digitalización de las organizaciones como punto de partida que aborda los elementos mínimos a partir de los cuales es posible iniciar con el proceso en sí. Por otro lado, desde el inicio de la incorporación de las tecnologías digitales en las empresas se requiere considerar la seguridad de la

información como parte de la gestión del riesgo, ya que se basa en la generación y uso de la información, por lo que se convierte en un asunto estratégico que, cuando se administra de manera eficiente, proporciona ventajas competitivas considerándose como parte integral del uso de las TIC en un entorno hiperconectado (OECD, 2016) donde el involucramiento de las diferentes áreas de la organización asume como propia la administración y disminución del riesgo.

Teniendo en consideración estos elementos, así como las características de las tecnologías asociadas (BCG, s.f.) se presentan las cuatro fases propuestas para la I4.0, así como una de prerequisitos centrada en la digitalización de las organizaciones, dentro de un entorno que incorpora a la ciberseguridad en todo el proceso. Cada una de ellas está compuesta por diferentes tecnologías que presentan una importante articulación entre ellas, así como con las que se encuentran en etapas anteriores, con límites permeables y no excluyentes, ya que, en algunos casos se requieren de algunos elementos de distintas fases para hacer operativa a otra.

A continuación se realiza una explicación de cada etapa, considerando las articulaciones que se establecen entre las tecnologías, así como su aportación hacia el objetivo de transitar hacia los procesos asociados a

la I4.0, a partir de su interoperabilidad para generar cadenas de valor formadas por procesos modulares, flexibles, eficientes, sostenibles y adaptables (Koska *et al.*, 2017) con poca o nula intervención humana, tal como se desprende de la definición presentada anteriormente, iniciando con la prefase de digitalización, debido a que se considera como parte integral de la propuesta.

### Prefase: digitalización

Aun cuando las metodologías desarrolladas consideran como origen la concientización de las firmas en relación con las ventajas y oportunidades de incorporarse a las nuevas cadenas de valor, en este caso, al centrarnos en los elementos tecnológicos, el punto de inicio se encuentra en el avance de las tecnologías digitales en los diferentes procesos productivos, no solamente al interior de las pymes, también aquellas conectadas con los servicios asociados, tales como la logística, el empaque y la gestión ante las agencias gubernamentales. Para ello se requiere considerar dos elementos, el primero es la digitalización de las máquinas, que no se refiere a la sustitución del equipamiento presente, sino a la incorporación de elementos de control y medición en aquellas que no cuenten con estos dispositivos, en particular aquellas de ciclos largos, sin considerar aún una integración entre ellas. Esto permite contar con un seguimiento de desempeño, así como la recopilación de información para disponer de datos para mejorar las técnicas de producción.

El otro se refiere al uso de programas específicos para la gestión de la empresa. Donde, de acuerdo con los datos del Inegi (2020), un porcentaje mayor a 80 % de ellas cuenta con computadoras, es posible implementar soluciones de software especializado orientado a mejorar las capacidades de administración, control y seguimiento de las diferentes áreas. De las cuales en el mercado existe una gran cantidad, desde aquellas propietarias hasta las de software de código abierto, con costo o gratuitas, con mayor o menor complejidad y con capacidades de integración entre sí.

El impulso a la digitalización favorece el entorno para la I4.0, ya que establece las ventajas de las tecnologías digitales para las diferentes actividades de la empresa, genera nuevas capacidades en la empresa y los trabajadores, modifica y hace más eficientes los procesos, lo

que se plasma en una mejora en el desempeño general, destacando la relevancia que tiene el uso de las TIC en las pymes. Además, impulsa, a través del uso de software especializado, el acercamiento a estándares de gestión y de calidad que se requieren en las cadenas globales de valor (Buenrostro, 2015), sin la necesidad de grandes inversiones, ya que hace uso de equipos con que ya cuentan las pymes.

### Primera fase: generación de información

Cuando las empresas han logrado establecer la digitalización de sus actividades, cuentan con equipos con sensores y capacidad de conexión, con una gestión con indicadores y seguimiento a través de software especializado, con información para el análisis del comportamiento de manera individual de las actividades y de las capacidades para su operación. El siguiente aspecto, de acuerdo con las tecnologías habilitadoras, es la incorporación del IoT. A diferencia de los sensores considerados en la etapa anterior, estos incluyen una identidad digital, así como las capacidades de intercambio de información de manera autónoma y la posibilidad de actuar sobre su entorno.

En este momento se establece la interconexión entre las distintas partes de la empresa para registrar en tiempo real los procesos. Asimismo, se definen las estrategias de conexión a partir de la elección de los protocolos, estándares y tecnologías de intercomunicación M2M, que determinan el tipo de información que se intercambia, su distancia y velocidad, en relación con las necesidades de la organización.

Al ser la primera fase para la transición a la I4.0 es importante considerar que las tecnologías utilizadas sean escalables, abiertas, flexibles, interconectables y modificables por los usuarios. De otra manera se corre el riesgo de un *lock-in* tecnológico que limite las posibilidades de la organización para articularse con otros actores de la cadena de valor, con el consiguiente aumento en el uso de recursos en el futuro; por lo que la elección debe ser resultado de una planeación que incluya no solo las condiciones internas de la empresa, también aquellas que se derivan del entorno y sus vinculaciones.

## Segunda fase: integración y análisis de información en la organización

La segunda fase se refiere al uso de la información proveniente de los IoT a través del intercambio de datos entre los diferentes elementos digitales, impulsando su acopio y manejo, así como el seguimiento de los procesos que son la base de los análisis para realizar cambios tendientes a la mejora de la eficiencia, aumentar la producción y el valor agregado y contar con un mayor control del conjunto de actividades internas. Para la gestión se requiere de tecnología para almacenar, analizar y articular los distintos objetos conectados. En esta situación se hace necesario contar con servicios de cómputo en la nube para hacer frente a la cantidad de datos que se genera, así como con la posibilidad de crecer de acuerdo con las necesidades de las pymes, sin los montos que implica su adquisición.

El uso del cómputo en la nube favorece la gestión y seguimiento de los intercambios al interior de la organización y entre los actores que forman parte de la cadena de valor, impulsando la integración y la toma de decisiones de manera conjunta con todos los actores que intervienen en el proceso, lo que es uno de los fundamentos de la I4.0, a diferencia de los modelos anteriores, donde las decisiones se realizan de manera independiente.

Para usar los datos generados, distribuidos y almacenados, de manera que originen respuestas y soluciones para mejorar las condiciones de las organizaciones, se requiere de técnicas de análisis capaces de incorporar toda la información disponible, de ahí que surge la necesidad del empleo del big data. A diferencia de las técnicas estadísticas, que se aplican a datos estructurados, en este acercamiento se posibilita contar con elementos heterogéneos provenientes de diferentes fuentes que se generan y analizan en tiempo real impulsando la generación de soluciones que de otra manera permanecerían ocultas por la imposibilidad de analizarlos.

Para el uso del big data es importante considerar que, por sí mismo este no genera las soluciones que pretende la organización, se requiere de la participación de los expertos de dominio que establezcan y delimiten las problemáticas sobre las que se aplicaran estas técnicas de análisis para obtener resultados que incidan en los procesos internos y en aquellos que competen al conjunto de la cadena de valor, así como a las demandas del mercado.

## Tercera fase: automatización y flexibilidad

El uso de las herramientas de cómputo en la nube, así como técnicas de big data permiten el desarrollo de nuevos algoritmos y simulaciones, posibilitando el desarrollo de dos tecnologías asociadas a la I4.0. La primera de ellas es la manufactura flexible que incluye no solo la impresión en 3D, sino que implica una serie de adecuaciones en los procesos productivos, de tal manera que estos puedan reconfigurarse en breves períodos de tiempo de acuerdo con los requerimientos emergentes que surgen de cambios en los productos, los mercados, las preferencias, los insumos, en la cadena de valor, entre otros.

La posibilidad de adecuación hacia una producción flexible implica el control de las actividades que forman parte de los procesos, considerando las articulaciones internas y externas que se establecen entre las diferentes áreas y empresas, ya que se requiere de la coordinación para que los cambios y adecuaciones presenten los resultados esperados y no generen desajustes que interrumpan o afecten la cadena de valor.

El segundo aspecto en esta fase es la incorporación de robots autónomos, que, como se expuso anteriormente, cuentan con la capacidad de realizar cambios sin la intervención humana, a partir de elementos como la inteligencia artificial considerada no solo como la respuesta a las posibles incidencias y cambios previstos, sino como aquella que es capaz de generar modificaciones en su comportamiento de acuerdo con condiciones emergentes como resultado de algoritmos de aprendizaje continuo. La articulación de estas tecnologías establece la flexibilidad para adaptarse a los requerimientos en un intervalo limitado de tiempo.

## Cuarta fase: simulación e integración

En esta última fase se consideran aquellas tecnologías que integran a las anteriores tanto al interior de las organizaciones como en la cadena de valor y establecen la integración a la I4.0. La aplicación de los anteriores elementos expuestos en cada fase permite contar con capacidades de recolección y análisis de información que, en conjunto con los datos del sistema y las métricas y algoritmos, posibilita la generación de modelos digitales de la producción que refleje el conjunto de actividades de la cadena de valor, como un análogo del mundo físico,

lo que se ha dado en llamar el gemelo digital.

La ventaja de contar con esta tecnología es que permite diseñar, probar y experimentar con posibles modificaciones a los procesos de manera rápida, sin comprometer a la cadena de valor y con un bajo costo, permitiendo acelerar la introducción de cambios en la producción, una disminución de los costos y la modificación de los procesos con interrupciones menores, ya que todo ello se realiza en el mundo digital antes de ser llevado al físico.

Asimismo, la incorporación de las tecnologías establecidas en las anteriores fases posibilita la integración horizontal y vertical de los sistemas, las máquinas y los procesos para que actúen de manera coordinada y articulada al interior y exterior de la organización, de tal manera que toda la cadena de valor genera y comparte información que se analiza en la nube a través de las técnicas de big data para la toma de decisiones, que realiza modificaciones de la producción de manera autónoma haciendo uso de la inteligencia artificial de los robots autónomos y de la flexibilidad del mismo procedimiento.

La integración permite contar con un gemelo digital de toda la cadena de valor, para diseñar y poner a prueba cambios que involucren a los diferentes actores de tal manera que pueda responder a los desafíos que plantea la competencia global, así como los cambios en los requerimientos y normativas nacionales generando productos globales con adaptaciones locales.

Por último, tal como se establece en la figura 4, cada tecnología debe incorporar procesos de ciberseguridad y gestión de riesgos para minimizar los peligros que surgen de la generación y uso de grandes cantidades de información relevante para el funcionamiento de la cadena de valor. Se consideran no solo los elementos técnicos, también aquellos que involucran a las personas y áreas de la organización que intervienen en alguna de las tecnologías y los procesos.

### Perspectivas para la incorporación de las tecnologías para la I4.0

La incorporación de las empresas a la I4.0 abre una nueva etapa de oportunidades que se derivan de una mayor automatización e integración de las cadenas de valor (Calatayud y Katz, 2019), así como la disminución de los costos y tiempos de desarrollo de productos que impulsa

el acceso a nuevos mercados globales personalizados y a un uso más eficiente y sustentable de la energía y la materia prima (Ejsmont, Gladysz y Kluczek, 2020). Pero estos cambios requieren de una transformación de los procesos intra e interempresariales que involucran elementos tecnológicos, económicos, sociales y organizacionales. Para las pymes, que representan la mayor parte de las firmas a nivel mundial, este es un reto debido a las capacidades y recursos limitados, así como a las restricciones operativas que no les permiten desarrollar una estrategia de transición hacia estos modelos productivos emergentes.

Para apoyar a las pymes en el proceso de transición se han generado un conjunto de metodologías de implementación de la I4.0 que incluyen estrategias basadas en un enfoque integral de transformación de las empresas (Ganzarain y Errasti, 2016; Muller *et al.*, 2017; Schuh *et al.*, 2017; Sternad *et al.*, 2018; Pelletier y Cloutier, 2019). Este enfoque resulta complicado para aquellas firmas de países en desarrollo que cuentan con capacidades y recursos más limitados que sus pares de naciones desarrolladas, por lo que, se hace necesario contar con una propuesta basada en las condiciones nacionales del entorno productivo.

El proceso aquí presentado parte de las metodologías internacionales propuestas, adicionando las condiciones del entorno y de las pymes nacionales para desarrollar un proceso propio basado únicamente en los elementos tecnológicos, para apoyar a las empresas en la formulación de su estrategia de transición hacia la I4.0 como un primer paso para la incorporación posterior de los demás elementos que intervienen en la transformación hacia un entorno digital.

Es fundamental considerar que la I4.0 requiere de una transformación sistémica de las empresas, sus articulaciones y el entorno en que se desenvuelven. Pero el abordaje de un cambio de esta extensión puede resultar abrumador para una pyme, y plantear una elevada incertidumbre derivada de la gran cantidad de factores asociados, por lo que, propuestas como la actual facilitan un acercamiento más accesible para la formulación de la estrategia de trasformación de las empresas nacionales.

## CONCLUSIONES

La transición hacia la I4.0 es un proceso complejo que requiere de una planeación que permita modificar los procesos de las empresas para lograr incorporarse en este nuevo paradigma de producción. Esto es particularmente relevante para las pymes que se encuentran sujetas a las limitaciones propias de su naturaleza y que requieren del cumplimiento de los requerimientos de un mercado cambiante como parte de una cadena de valor. Por lo que resulta fundamental considerar una estrategia que eficiente los recursos con que cuentan para lograr una transición efectiva.

A partir de las condiciones de las empresas mexicanas, en este trabajo se propone una estrategia de implementación de las tecnologías en cuatro grandes fases de acuerdo con su grado de complejidad y las posibilidades de uso. Se considera una prefase de digitalización como elemento de partida para incorporarlas en las diferentes actividades de las empresas y a partir de ella escalar la aplicación que concluya con la integración de los sistemas, dando lugar a una articulación al interior y al exterior de las pymes.

A diferencia de trabajos anteriores que se concentran en los cambios organizacionales, la propuesta de este documento se orienta a los elementos tecnológicos que componen la I4.0, sin dejar de lado la relevancia de la articulación de ambos elementos y que, además, considere los elementos exógenos tales como las regulaciones legales, las normativas técnicas, las condiciones macroeconómicas y las políticas públicas que inciden en la industria.

Dentro de las limitaciones del presente trabajo se encuentra que la propuesta está limitada al entorno nacional. Además, al ser un ejercicio realizado con fuentes secundarias, se requiere de su comprobación en estudios de caso para determinar la funcionalidad de esta y sus posibles adecuaciones.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Centro de Investigación e Innovación en Tecnologías de la Información y Comunicación el apoyo para la realización de esta investigación. Agradezco a los revisores anónimos por sus valiosos comentarios que ayudaron a mejorar el presente trabajo.

## REFERENCIAS

- Albrieu, R., Basco, A., López, C., Azevedo, B., Peirano, F., Rapetti, M. y Vienni, G. (2019). *Travesía 4.0: hacia la transformación industrial argentina*. <http://dx.doi.org/10.18235/0001731>
- Blasco, A., Beliz, G., Coatz, D. y Garnero, P. (2018). *Industria 4.0: fabricando el futuro*. <http://dx.doi.org/10.18235/0001229>
- Bonomi, A. (2018). *Le tecnologie di Industria 4.0 e le PMI/Technologies of Industry 4.0 and SMEs*. Recuperado de <https://ideas.repec.org/p/csc/ircrwp/201804.html>
- Boston Consulting Group [BCG]. (s.f.). *Embracing Industry 4.0 and Rediscovering Growth*. Recuperado de <https://www.bcg.com/en-mx/capabilities/operations/embracing-industry-4.0-rediscovering-growth.aspx>
- Buenrostro, E. (2015). Uso y apropiación de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) en las pymes de Aguascalientes. *Entreciencias: diálogos en la sociedad del conocimiento*, 3(6), 27-40. <http://dx.doi.org/10.21933/J.EDSC.2015.06.099>
- Buenrostro, E. (2019). Agenda de políticas públicas y convergencia del conocimiento. Dialogo y sinergias entre la comunidad científica y empresarial para la industria 4.0. En A. Oropeza(Coord.), Desarrollo industrial 2050. Hacia una industria del futuro, UNAM-IDIC, 193-214
- Casalet, M. (2018). *La digitalización industrial: un camino hacia la gobernanza colaborativa. Estudios de casos*. Recuperado de [http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44266/1/S1800941\\_es.pdf](http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44266/1/S1800941_es.pdf)
- Casalet, M. (2020). El futuro incierto de la digitalización en México: ¿podremos despegar?. *Economía Teoría y Práctica*. <http://dx.doi.org/10.24275/ETY-PUAM/NE/E052020/Casalet>
- Carrillo, J. (2020). Reflexiones sobre la industria automotriz, las tecnologías exponenciales y sus desafíos. En A. Martínez, M. Álvarez y A. García (Coords.), *Industria 4.0 en México. Elementos diagnósticos y puesta en práctica en sectores y empresas* (pp. 117-132). México: UNAM - Plaza y Valdés.
- Castillo, M. (2017). *El estado de la manufactura avanzada: competencia entre las plataformas de la Internet industrial*. Santiago de Chile: Cepal.
- Calatayud, A. y Katz, R. (2019). *Cadena de suministro 4.0. Mejores prácticas internacionales y hoja de ruta para América Latina*. Santiago de Chile: BID.
- Cisco. (2021). *Anual Internet Report*. Recuperado de <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe [Cepal]. (2016). *La nueva revolución digital: de la Internet del consumo a la Internet de la producción*. Santiago de Chile: Cepal.
- Ejsmont, K., Gladysz, B. y Kluczek, A. (2020). Impact of Industry 4.0 on Sustainability – Bibliometric Literature Review, *Sustainability*, 12, 1-29. DOI: 10.3390/su12145650
- Evans, P. y M. Annunziata. (2012). *Industrial Internet: Pushing the boundaries of mind and the machines*. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/271524319\\_Industrial\\_Internet\\_Pushing\\_the\\_boundaries\\_of\\_minds\\_and\\_machines](https://www.researchgate.net/publication/271524319_Industrial_Internet_Pushing_the_boundaries_of_minds_and_machines)
- Gajšek, B. (2019). Approach for the systematic transition of the company into Industry 4.0. *19th International scientific conference Business logistics in Modern Management*. Recuperado de <http://www.efos.unios.hr/repec/osi/bulimm/PDF/BusinessLogisticsinModernManagement19/blimm1904.pdf>
- Ganzarain, J. y Errasti, N. (2016). Three stage maturity model in SMEs toward industry 4.0. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 9(5), 1119-1128. <http://dx.doi.org/10.3926/jiem.2073>
- García, A. (2019). Los retos de las Pymes en el contexto de la Industria 4.0: una revisión teórica. En A. Martínez, M. Álvarez y A. García (Coords.), *Industria 4.0 en México. Elementos diagnósticos y puesta en práctica en sectores y empresas* (pp. 55-76). México: UNAM - Plaza y Valdés.
- Garzoni, A., De Turi, I., Secundo, G. y Del Vecchio, P. (2019). Fostering digital transformation of SMEs: a four levels approach. *Management Decision*, 58(8), 1543-1562. <https://doi.org/10.1108/MD-07-2019-0939>
- Hamada, T. (2019). Determinants of Decision-

- Makers' Attitudes toward Industry 4.0 Adaptation. *Social Sciences*, 8(140), 1-18. DOI: 10.3390/socsci8050140
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi]. (2020). *Censos económicos 2019*. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/programas/ce/2019/#Tabulados>
- Kagermann, H., Wahlster, W. y Helbig, J. (2013). *Recommendations for Implementing the Strategic Initiative Industrie 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group*. Recuperado de <https://www.din.de/blob/76902/e8cac883f42bf28536e7e-8165993f1fd/recommendations-for-implementing-industry-4-0-data.pdf>
- Kagermann, H., Anderl, R., Gausemeier, J., Schuh, G. y Wahlster, W. (2016). *Industrie 4.0 in a Global Context: Strategies for Cooperating with International Partners*. Recuperado de [https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2016/11/acatech\\_eng\\_STUDIE\\_Industrie40\\_global\\_Web.pdf](https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2016/11/acatech_eng_STUDIE_Industrie40_global_Web.pdf)
- Katz, R., Jung, J. y Callorda, F. (2020). *El estado de la digitalización en América Latina frente a la pandemia del COVID-19*. Recuperado de [https://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1540/El\\_estado\\_de\\_la\\_digitalizacion\\_de\\_America\\_Latina\\_frente\\_a\\_la\\_pandemia\\_del\\_COVID-19.pdf](https://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1540/El_estado_de_la_digitalizacion_de_America_Latina_frente_a_la_pandemia_del_COVID-19.pdf)
- Kolberg, D. y Zühlke, D. (2015). Lean Automation Enabled by Industry 4.0 Technologies. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 1870-1875. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.359
- Koska, A., Goksu, N., Erdem, M. y Fettahlioğlu, H. (2017). Measuring the Maturity of a Factory for Industry 4.0. *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*, 7(7), 52-60. DOI: 10.6007/IJARBSS/v7-i7/3077
- Kovacs, O. (2019). Big IFS in productivity-Enhancing Industry 4.0. *Social Sciences*, 8(37), 1-17. <https://doi.org/10.3390/socsci8020037>
- Manufacturing Technology Centre (MTC) (2016). From Industry 4.0 to Digitising Manufacturing. And End User Perspective. Conference Report, MTC. Recuperado de [www.the-mtc.org/industry4-0](http://www.the-mtc.org/industry4-0)
- Martínez, A., Álvarez, M. y García, A. (2020). Introducción. En A. Martínez, M. Álvarez y A. García (Coords.), *Industria 4.0 en México. Elementos diagnósticos y puesta en práctica en sectores y empresas* (pp. 19-30). México: UNAM - Plaza y Valdés.
- Masood, T. y Sonntag, P. (2020). Industry 4.0: Adoption challenges and benefits for SMEs. *Computers in Industry*, 121, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.comind.2020.103261>
- Miorandi, D., S. Sicari, F. De Pellegrini y I. Chlamtac. (2012). *Internet of things: Vision, applications and research challenges*. Ad Hoc Networks, 10(7), 1497-1516. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2012.02.016>
- Morabito, V. (2014). *Trends and Challenges in Digital Business innovation*. London: Springer.
- Motta, J., Morero, H. y Ascúa, R. (2019). *Industria 4.0 en mipymes manufactureras de la Argentina*. Recuperado de [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/45033/1/S1900952\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/45033/1/S1900952_es.pdf)
- Muller, J., Kiel, D. y Voigt, K. (2018). What Drives the Implementation of Industry 4.0? The Role of Opportunities and Challenges in the Context of Sustainability. *Sustainability*, 10(247), 1-24. <https://doi.org/10.3390/su10010247>
- Muller, J., Maier, L., Veile, J. y Voigt, K. (2017). Cooperation strategies among SMEs for implementing industry 4.0. *Proceeding of the Hamburg International Conference of Logistics*, 23, 301-318. <http://dx.doi.org/10.15480/882.1462>
- Ookla. (2021). *Improving the Speedtest Global Index with Data on Median Speeds*. Recuperado de <https://www.speedtest.net/insights/blog/global-index-median-announcement-2021/>
- Organization for Economic Co-operation and Development [OECD]. (2014). *Cloud computing: The concept, Impacts and the Role of Government policy*. <https://doi.org/10.1787/5jxf4lcc7f5-en>
- Organization for Economic Co-operation and Development [OECD]. (2016). *Managing Digital Security and Privacy Risk. 2016 ministerial meeting on the Digital Economy*. Recuperado de [http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=DSTI/ICCP/REG\(2016\)1/FINAL&docLanguage=En](http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=DSTI/ICCP/REG(2016)1/FINAL&docLanguage=En)
- Organization for Economic Co-operation and Development [OECD]. (2017). *The next production revolution. Implications for governments and business*. <https://doi.org/10.1787/9789264271036-en>
- Organization for Economic Co-operation and Development [OECD]. (2020a). *Going Digital Toolkit*. Re-

- cuperado de <https://goingdigital.oecd.org/countries/mex>
- Organization for Economic Co-operation and Development [OECD]. (2020b). Perspectivas económicas de América Latina 2020, OECD. Recuperado de <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/f2fdced2-es.pdf?expires=1645037456&id=id&amp;accname=guest&checksum=CDD081CC8F5AAC0B00F2345B544F06E>
- Pelletier, C. y Cloutier, L. (2019). Conceptualising digital transformation in SMEs: and ecosystemic perspective. *Journal of Small Business and Enterprise Development*, 26(6-7), 855-876. <https://doi.org/10.1108/JSBED-05-2019-0144>
- Piccarozzi, M., Aquilani, B. y Gatti, C. (2018). Industry 4.0 in Management Studies: A Systematic Literature Review, *Sustainability*, 10(10), 1-24. <https://doi.org/10.3390/su10103821>
- Prause, G. y Atari, S. (2017). On sustainable production networks for industry 4.0. *The International Journal Entrepreneurship and Sustainability Issues*, 4(4), 421-430. DOI:10.9770/jesi.2017.4.4(2)
- Salinas, R. y Gutiérrez, A. (2020). Balances y perspectivas del sector aeroespacial en Querétaro ¿abanderando la industria 4.0? En A. Martínez, M. Álvarez y A. García (Coords.), *Industria 4.0 en México. Elementos diagnósticos y puesta en práctica en sectores y empresas* (pp. 153-172). México: UNAM - Plaza y Valdés.
- Stentof, J., Wickstrom, K., Philipsen, K. y Haug, A. (2020). Drivers and Barriers for Industry 4.0 Readiness and Practice: A SME Perspective with Empirical Evidence. *Production Planning and Control*, 32(5), 1-18. DOI:10.1080/09537287.2020.1768318
- Sternad, M., Lerher, T. y Gajšek, B. (2018). Maturity Levels for Logistics 4.0 Based On Nrw'S Industry 4.0 Maturity Model. *Business Logistics in Modern Management*, 18, 695-708.
- Shin, D. (2017). An exploratory study of innovation strategies of the internet of things SME in South Korea. *Asia Pacific Journal of Innovation and Entrepreneurship*, 12(2), 171-189. DOI: 10.1108/APJIE-08-2017-025
- Schuh, G., Anderl, R., Gausemeier, J., Ten Hompel, M. y Wahlster, W. (Eds.) (2017). *Industrie 4.0 Maturity Index. Managing the Digital Transformation of Companies*. Recuperado de <https://en.acatech.de/publication/industrie-4-0-maturity-index-managing-the-digital-transformation-of-companies/>
- Topleva, S. (2018). Industry 4.0: Transforming Economy Through Value Added. *Asian journal of Economics Modeling*, 6(1), 37-46. <https://doi.org/10.18488/journal.8.2018.61.37.46>
- Vrchota, J., Volek, T. y Novotná, M. (2019). Factors Introducing Industry 4.0 to SMEs. *Social Sciences*, 8(130), 1-10. DOI:10.3390/socsci8050130
- Weber, E. (2016). *Industry 4.0 - Job-producer or employment-destroyer?* Recuperado de [https://doku.iab.de/aktuell/2016/aktueller\\_bericht\\_1602.pdf](https://doku.iab.de/aktuell/2016/aktueller_bericht_1602.pdf)

## NOTAS DE AUTOR

<sup>a</sup> Doctor en Ciencias Sociales con mención en Economía de la innovación por la UAM-Xochimilco. Investigador Titular A en el Centro de Investigación e Innovación en Tecnologías de la Información y Comunicación Infotec. Sus líneas de investigación son: el uso de las TIC para la innovación, industria 4.0, transferencia universidad-empresa, gobierno digital y convergencia de conocimiento. Miembro del SNI nivel Candidato, correo hector.buenrostro@infotec.mx

ORCID: 0000-0003-0527-8864

### Últimas publicaciones:

- Buenrostro, E. (2019). Agenda de políticas públicas y convergencia del conocimiento. Dialogo y sinergias entre la comunidad científica y empresarial para la industria 4.0. En A. Oropeza (Coord.), *Desarrollo Industrial 2050. Hacia una industria del futuro* (pp.193-214). CDMX: UNAM, IDIC, IIJ.
- Buenrostro, E. y Eguiarte, M. (2019). La incorporación de las TIC en las empresas. Factores de la brecha digital en las mipymes de Aguascalientes. *Economía: teoría y práctica*, 27(50), 101-124.
- Buenrostro, E. (2018). La importancia de la TIC para la convergencia tecnológica. En R. Oliver (Coord.), *Formas organizativas e institucionales para la convergencia de conocimiento* (pp. 85-96). CDMX: Conacyt, Red Convergencia.