



CIECTI

Centro Interdisciplinario
de Estudios en Ciencia,
Tecnología e Innovación

INDUSTRIA 4.0: ¿INTENSIFICACIÓN DEL PARADIGMA TIC O NUEVO PARADIGMA TECNOORGANIZACIONAL?

Cristian Brixner, Paula Isaak, Silvina Mochi, Maximiliano Ozono y Gabriel Yoguel

DT
17

INDUSTRIA 4.0: ¿INTENSIFICACIÓN DEL PARADIGMA TIC O NUEVO PARADIGMA TECNOORGANIZACIONAL?

DOCUMENTO DE TRABAJO N° 17

Cristian Brixner, Paula Isaak, Silvina Mochi,
Maximiliano Ozono y Gabriel Yoguel

CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE ESTUDIOS EN CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN





CIECTI

Centro Interdisciplinario
de Estudios en Ciencia,
Tecnología e Innovación

Industria 4.0 : ¿intensificación del paradigma TIC o nuevo paradigma tecnoorganizacional? / Cristian Brixner ... [et al.]. - 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : CIECTI, 2019.
Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-987-4193-36-0

1. Sistemas de Información. 2. Nuevas Tecnologías. 3. Desarrollo Industrial. I. Brixner, Cristian.
CDD 338.47

La investigación que dio base a este estudio finalizó en junio de 2019.

© 2019 CIECTI

Queda hecho el depósito que marca la ley 11.723.

Se autoriza la reproducción total o parcial de esta obra, para fines educativos u otros fines no comerciales, siempre que se cite la fuente.

Godoy Cruz 2390 - PB (C1425FQD), CABA
(54-11) 4899-5500, int. 5684

www.ciecti.org.ar / info@ciecti.org.ar

Seguinos en  @ciecti

Buscanos en  /ciecti

AUTORIDADES

Presidente

Gustavo Lugones

Directora general

Ruth Ladenheim

EQUIPO EDITORIAL

Coordinación editorial

Fernando Porta

Apoyo a la coordinación

Celeste De Marco

Equipo de investigación

Cristian Brixner, Paula Isaak, Silvina Mochi, Maximiliano Ozono y Gabriel Yoguel

Edición

Mara Sessa

Diseño editorial

Lea Ágreda

SIGLAS

CGV	cadenas globales de valor
FDM	fundido por deposición de material
FEM	Foro Económico Mundial
I+D	investigación y desarrollo
IA	inteligencia artificial
IdC	internet de las cosas
PD	países desarrollados
PED	países en desarrollo
SCF	sistemas ciberfísicos
ST	sistemas tecnológicos
TIC	tecnologías de la información y la comunicación

ÍNDICE

Resumen	9
Resumo	10
Abstract	11
Introducción	13
Marco teórico	16
Revoluciones, paradigmas y trayectorias tecnológicas	17
Las transiciones entre paradigmas: los mecanismos de selección	22
Capacidades, conexiones y <i>path dependence</i>	24
La trayectoria de los sistemas tecnológicos que configuran la industria 4.0	26
Los sistemas tecnológicos que componen la industria 4.0	28
Ambigüedades en la conceptualización de la industria 4.0 y de sus componentes	36
El rol del trabajo en la industria 4.0	38
Discusión	42
La naturaleza del actual paradigma	42
Rupturas y continuidades de las trayectorias tecnológicas en el actual paradigma	43
La relevancia de las capacidades, interconexiones y <i>path dependence</i>	45
La difusión de TIC en la estructura productiva: algunas experiencias latinoamericanas	46
Rol de actores	49
Algunas evidencias sobre el punto de partida para la convergencia hacia la industria 4.0	53
Conclusiones	57
Bibliografía	63

RESUMEN

El objetivo de este documento es establecer un diálogo entre la reciente literatura sobre la industria 4.0 (I4.0) y la de paradigmas tecnoeconómicos. En esa dirección nos preguntamos si la I4.0 constituye un nuevo paradigma tecnoorganizacional, tal como plantea parte de la literatura reciente sobre el tema, o si, por el contrario, representa –hasta el momento– una intensificación de los rasgos salientes del paradigma TIC, tal como se sostiene desde la literatura de los paradigmas tecnoeconómicos. Adicionalmente, se plantean algunos interrogantes sobre las repercusiones de la I4.0 en países en desarrollo y sobre el alcance de las capacidades nacionales para aprovechar e identificar ventanas de oportunidad que permitan incluir dichas tecnologías en las respectivas matrices productivas. A este respecto, la revisión de la experiencia latinoamericana reciente despierta fuertes inquietudes respecto de la I4.0 como una nueva fuente de heterogeneidad intra e internacional, vinculada a las severas dificultades que tienen estos países para apropiarse de las ventajas de esta tecnología en materia de productividad y cuasi rentas. Esto se deriva de los débiles senderos de acumulación de capacidades tecnológicas, organizacionales y de conectividad entre las instituciones y los actores.

Palabras clave

industria 4.0
paradigmas tecnológicos
sistemas de innovación
cambio estructural
revolución tecnoorganizacional

RESUMO

Palavras-chave

*indústria 4.0
paradigmas tecnológicos
sistemas de inovação
mudança estrutural
revolução tecno-organizacional*

O objetivo deste documento é estabelecer um diálogo entre a literatura recente da indústria 4.0 (I4.0) e a dos paradigmas técnico-econômicos. Nessa direção, nos perguntamos se I4.0 constitui um novo paradigma tecno-organizacional, como parte da literatura recente sobre o assunto ou se, ao contrário, ela representa até o momento uma intensificação das características salientes do paradigma das TIC, como é suportado a partir da literatura de paradigmas técnico-econômicos. Além disso, surgem algumas perguntas sobre o impacto da I4.0 nos países em desenvolvimento e no escopo das capacidades nacionais para aproveitar e identificar janelas de oportunidade que permitam que essas tecnologias sejam incluídas nas respectivas matrizes produtivas. Nesse sentido, a revisão da recente experiência latino-americana suscita fortes preocupações em relação ao I4.0 como uma nova fonte de heterogeneidade intra e internacional, vinculada às graves dificuldades que esses países têm em apropriar-se das vantagens dessa tecnologia em termos de produtividade e quase-rendas. Isso deriva dos caminhos fracos de acumulação de capacidades tecnológicas, organizacionais e de conectividade entre instituições e atores. Isto decorre do débil acúmulo de capacidades tecnológicas, organizacionais e de conectividade entre as instituições e os atores.

ABSTRACT

The objective of this article is to establish a dialogue between the recent industry 4.0 (I4.0) literature and evolutionary studies about techno-economic paradigms. In that direction, we wonder whether I4.0 constitutes a new techno-organizational paradigm, as it is assumed by the recent literature on the subject, or if it represents—until the moment—an intensification of key features of the information and communication technology paradigm, following the second group of studies. Additionally, some questions are raised about the implications of I4.0 for developing countries. Particularly, we think over the possibilities of these countries to identify and take advantage of new windows of opportunity, opened by the development and diffusion of these technologies. Hence, the review of recent Latin American experience raises strong concerns regarding I4.0 as a new source of intra- and international heterogeneity, linked to the severe difficulties these countries have in appropriating these technologies in the form of productivity gains and quasi-rents. To some extent, this is derived from weak technological, organizational, and connectivity capabilities paths of accumulation between institutions and actors.

Keywords

4.0 industry
technological paradigms
innovation systems
structural change
techno-organizational revolution

Introducción

Desde comienzos del nuevo siglo se viene produciendo un fenómeno de relocalización de la producción de bienes y servicios en cadenas globales de valor (CGV), que fue dando lugar a una nueva división del trabajo global en el marco de la búsqueda de ventajas competitivas dinámicas y aprovechamiento de los reducidos costos de producción en el Sudeste Asiático. Esto ha originado la necesidad de profundizar y replantear las prácticas instaladas desde mediados de la década de 1970, relativas a la relocalización de las actividades económicas, la organización de la producción en redes y cadenas de valor, así como a la necesidad de generar cambios significativos en las estrategias productivas e innovativas de las empresas.

En ese marco, en los últimos años comenzó a surgir una amplia literatura orientada a la organización industrial y a diversas disciplinas ingenieriles y de negocios que plantea el surgimiento de una nueva revolución industrial, que actualmente se conoce como industria 4.0 (en adelante I4.0). Desde sus comienzos, la literatura alemana introduce este concepto como un discurso de política industrial y tecnológica que apunta a institucionalizar los sistemas de innovación (Reischauer, 2018).

La emergencia de estas tecnologías como estrategia de desarrollo industrial se deriva tanto de la significativa caída en el precio de los sensores, los microcontroladores y las mini-computadoras con elevada potencia de cálculo, como los avances que se fueron dando en la digitalización y la conectividad mediante el uso intensivo de internet (National Research Council, 1998; Kagermann *et al.*, 2013; Brettel *et al.*, 2014; Baldassari y Roux, 2017; Basco *et al.*, 2018; Casalet, 2018; Klingenberg y Do Vale Antunes, 2017; Li, 2018; Reischauer, 2018; Strange y Zucchella, 2017; Lee *et al.*, 2018; Szalavetz, 2019).

Como consecuencia, ha venido proliferando una literatura de carácter pragmático que entiende este fenómeno como la emergencia de la “cuarta revolución industrial”, que refleja la importancia asignada a los aspectos productivos, las innovaciones organizacionales, comerciales y de logística, las innovaciones en los productos y procesos, entre otras, así como las ventajas en términos de costos y mejoras en la conectividad y rentabilidad de

las empresas (Kagermann *et al.*, 2013; Lasi *et al.*, 2014a; Oliván Cortés, 2016; Klingenberg y Do Vale Antunes, 2017).

Sin embargo, otros trabajos aportan una visión más crítica y plantean que la novedad de I4.0 radica en el alcance y la conectividad de los sistemas tecnológicos (ST) que lo configuran, de los cuales muchos ya existían desde hace tres o cuatro décadas (Pérez, 2009a; Kim y Laskowski, 2018; Lopes de Sousa Jabbour *et al.*, 2018; Rivera Ríos *et al.*, 2018). Esto explica por qué la mayor parte de los artículos sobre I4.0 no consideran la relevancia de las capacidades, conexiones y el desarrollo de procesos de innovación, desde Schumpeter, Veblen, Penrose, entre otros, y por el conjunto de la literatura evolucionista-neoschumpeteriana que comienza con Nelson, Winter y Dosi a comienzos de los años ochenta.

En ese contexto, el objetivo de este documento de trabajo es establecer un diálogo entre la I4.0 y la literatura de paradigmas tecnológicos, capacidades y conexiones. En esa dirección, nuestro interés se centra en discutir si I4.0 constituye una nueva revolución industrial, tal como plantea la mayor parte de la literatura, o si, por el contrario, representa—hasta el momento—una intensificación de los rasgos salientes del paradigma TIC (tecnologías de la información y la comunicación), que emerge como quinta revolución tecnológica en los años setenta (Dosi, 1982; Lastres y Ferraz, 1999; Pérez, 2008 y 2009a; Casalet, 2018; Lopes de Sousa Jabbour *et al.*, 2018, Rivera Ríos *et al.*, 2018; etc.). Al respecto, y para desentrañar en qué medida se trata de la intensificación de conocimientos previos o de la emergencia de nuevos ST, discutiremos qué aspectos de I4.0 resultan actualmente disruptivos. De esta manera, se apunta a indagar tanto sobre las trayectorias tecnológicas como sobre las capacidades de las empresas y de los países para afrontar estos desafíos. En efecto, el documento discute el auge de la I4.0, en diálogo con el marco teórico de la literatura evolucionista referida a paradigmas y trayectorias tecnológicas. En relación con el objetivo central, nuestra principal conclusión es que actualmente nos encontramos en una fase de profundización del paradigma vigente iniciado a principios de la década de 1970. Es decir, estamos frente a una nueva trayectoria, cuyo rasgo diferencial es el funcionamiento sistémico de los ST que integran I4.0.

En el abordaje de estas cuestiones surge también un conjunto de interrogantes sobre las repercusiones que pueden tener estas nuevas tendencias en países en desarrollo (PED),

especialmente en la Argentina. En esa dirección interesa indagar sobre el carácter sistémico de la implementación de I4.0 en los países de mayor desarrollo, así como en las limitaciones que se derivan en los PED de las bajas capacidades, competencias e interacciones de las organizaciones (empresas e instituciones). Partiendo de la idea de que I4.0 constituye un fenómeno de naturaleza *path dependence*,¹ se torna necesario discutir acerca de las capacidades nacionales y su aprovechamiento para identificar posibles ventanas de oportunidades y los requisitos para afrontar los avances en dichas tecnologías. En este sentido, se vuelve inminente repensar las estrategias tecnológicas y productivas para evitar la expansión de las brechas existentes.

Para indagar acerca de este conjunto de cuestiones planteamos tres grupos de preguntas:

- › Las vinculadas al surgimiento de I4.0: ¿cuáles son las necesidades económicas y tecnológicas que viene a satisfacer la I4.0? ¿Qué ST dan lugar a una mayor eficiencia productiva (economías de escala y economías de alcance en forma simultánea), una disminución de costos y un aumento de la productividad?
- › Las vinculadas a discutir si la I4.0 puede ser considerada un nuevo paradigma: ¿cuál es el factor/insumo clave en I4.0? ¿Los ST utilizados para brindar soluciones son radicalmente nuevos o ya se manifestaban hace varias décadas? ¿Cuáles trayectorias tecnológicas son una continuidad y cuáles constituyen rupturas entre I4.0 y las tecnologías de décadas anteriores? ¿La I4.0 puede constituir un nuevo paradigma a pesar de que los ST que la definen ya existían desde hace más de veinte años?
- › Sobre la discusión de la I4.0 en los PED: ¿cuáles son las implicancias de la I4.0 para los problemas y restricciones de los PED? ¿En qué medida la I4.0 constituye una condición necesaria para generar variedad relacionada y no relacionada,² externalidades de red, *feedbacks* positivos que den lugar al desarrollo de procesos de cambio estructural, que posibilite una sustancial disminución de la brecha de productividad? ¿Qué limitaciones impone una estructura productiva con escasa complejidad y limitados procesos innovativos para la generación sistémica de los componentes principales de I4.0? ¿Qué oportunidades podrían aprovecharse considerando las capacidades tecnológicas nacionales?

¹ Este concepto alude a la importancia que tienen la historia y la acumulación de aprendizajes en el desarrollo de las capacidades de las organizaciones.

² La variedad relacionada alude a la introducción de nuevos productos que tienen diferencias solo incrementales con los existentes previamente; por el contrario, la variedad no relacionada alude a la introducción de nuevos productos significativamente diferentes de los existentes y que dan cuenta de cambios radicales en el perfil de especialización.

La primera sección presenta en forma estilizada los rasgos centrales de lo que la literatura evolucionista denomina paradigma tecnoorganizacional. En especial, se presentan los principales rasgos de la quinta revolución industrial que se inicia a mediados de los años setenta con el *bit* como factor clave y que se complejiza en las últimas décadas con la incorporación de internet y el concepto de “nube”, como elemento integrador de desarrollos tales como el Big Data y la inteligencia artificial (IA). En tal sentido, se discuten tres cuestiones centrales: la idea de trayectorias tecnológicas dentro del paradigma; los factores y mecanismos de selección de las tecnologías clave en un paradigma y en una trayectoria; y el rol de las capacidades, las conexiones y el *path dependence* en el desarrollo de ventajas competitivas dinámicas. La segunda sección presenta los diferentes ST que se combinan en I4.0 y la relevancia del *path dependence* de construcción de capacidades para su aprovechamiento sistémico. Asimismo, se discuten las ambigüedades en la conceptualización de los ST y el impacto de I4.0 sobre la organización del trabajo. En la tercera sección aportamos elementos que permiten discutir el carácter paradigmático o no de I4.0 y sus implicancias para los PED. En esa dirección, discutimos la naturaleza del actual paradigma y las rupturas y continuidades de las trayectorias tecnológicas, la relevancia de las capacidades, interconexiones y *path dependence*, la difusión de TIC en la estructura productiva de los países latinoamericanos, el rol de los actores, las ventanas de oportunidad para los PED y algunas evidencias sobre el punto de partida para la convergencia hacia I4.0. Finalmente, en la cuarta sección presentamos las conclusiones y nuevas preguntas que surgen del estudio.

Marco teórico

En esta sección se expone el marco teórico del documento de trabajo y se discute la relevancia de la teoría de los paradigmas y las trayectorias tecnológicas para abordar el debate sobre el desarrollo de la I4.0. En segundo lugar se plantean las trayectorias de los paradigmas y los mecanismos de selección. En tercer lugar se resalta la relevancia de las capacidades, conexiones y *path dependence* como condición necesaria para la construcción tecnológica.

Revoluciones, paradigmas y trayectorias tecnológicas

La relación entre desarrollo, cambio tecnológico e innovación ha sido una temática muy estudiada a lo largo de la historia del pensamiento económico (Smith, 1776; Schumpeter, 1934, 1939 y 1942; Dosi, 1982; Freeman, 1991, 1995 y 1997; Utterback, 1994; Tadeu Lima, 1995; Reinert, 2002 y 2007; etc.). En particular, el enfoque evolucionista, centrado en una visión histórica e interdisciplinaria, profundiza en el rol de la tecnología y de los procesos de innovación, y pone énfasis en la interacción entre las dimensiones productiva, económica, organizacional, social e institucional (Dosi, 1982; Freeman y Soete, 1997; Freeman y Pérez, 1988; Freeman, 1996; Hodgson, 1998; Malerba, 2002 y 2005; entre otros).

La idea de paradigma tecnoorganizacional fue planteada por diversos autores (Dosi, 1982; Freeman y Soete, 1997; Pérez, 2008 y 2009a; entre otros). En especial, Dosi se refiere a los acuerdos tácitos que los agentes alcanzan en torno a una dirección válida de búsqueda de avances tecnoorganizacionales y una mejora radical de la tecnología. Desde esa perspectiva, un paradigma puede ser considerado una lógica colectiva compartida donde convergen el potencial tecnológico, los costos relativos, la aceptación del mercado y fundamentalmente las cuestiones organizacionales e institucionales. Es decir, su influencia se extiende desde el ámbito empresarial hasta las instituciones y la sociedad, de modo que, a medida que avanza su adopción, se convierte en el sentido común compartido para la toma de decisiones en gestión, ingeniería, tecnología, finanzas, comercio y consumo. Esta nueva lógica y su capacidad para aumentar la eficacia y la eficiencia del sistema productivo también determinan las formas organizacionales, las expectativas y los comportamientos institucionales y sociales (Pérez, 2009b). Así como en el paradigma kuhniano de la ciencia hay un patrón de investigación denominado “ciencia normal”, en cada paradigma dominante hay progreso técnico centrado en innovaciones incrementales.

A su vez, la idea de paradigma tecnológico alude al conjunto de reglas o principios que guían, en un período determinado, las decisiones productivas, tecnológicas, organizacionales y de inversión de las empresas e instituciones (Dosi, 1982; Lastres y Ferraz, 1999; Pérez, 2018, 2008 y 2009a; Rivera Ríos *et al.*, 2018). Su difusión depende en gran medida de factores económicos, institucionales y sociales y de los elementos que caracterizan lo que se denomina el factor clave del paradigma: las posibilidades de aplicación generalizadas,

la demanda creciente y la significativa disminución del costo unitario a lo largo del tiempo. El paradigma lleva implícito la recombinación de ST actuales y otros preexistentes. Por lo tanto, el desarrollo de nuevos productos y procesos –las innovaciones– no es un fenómeno aleatorio, sino que requiere esfuerzos deliberados de búsqueda que hacen las organizaciones en el marco de la banda de opciones posibles del paradigma. Tomando en cuenta este conjunto de consideraciones, la frontera tecnológica de un paradigma específico puede definirse como el mayor nivel alcanzado en un sendero tecnológico respecto de las dimensiones económicas, institucionales, sociales, tecnológicas y organizacionales relevantes vigentes.

Cimoli y Dosi (1994) señalan que el concepto de trayectoria tecnológica se basa en la idea de que, más allá de los estímulos del mercado, cada cuerpo específico de conocimiento da forma y restringe el ritmo y la dirección del cambio tecnoorganizacional, pese a la influencia de la modificación de precios relativos sobre la emergencia de proyectos. Estos cambios de precios relativos afectan el sentido de la imitación y la búsqueda de innovaciones por parte de agentes. La historia basada en paradigmas refleja que, aunque cambien los precios relativos, la dirección de la búsqueda de innovaciones y las trayectorias resultantes quedarían limitadas a la base de conocimientos y la presencia de ST específicos. A largo plazo, y a diferencia de lo que sostiene el *mainstream*,³ los cambios regulares en las técnicas de producción dependen poco de la dinámica de los precios relativos. Existen evidencias empíricas basadas en estudios de caso que resaltan que las pautas de cambio técnico difícilmente pueden interpretarse como respuestas directas a modificaciones en los precios relativos y en las condiciones de la demanda. Es decir, una firma puede cambiar su trayectoria, pero siempre dentro de la banda establecida por el paradigma vigente.

En este contexto, Dosi (1982) fue uno de los primeros en elaborar una nueva teoría del cambio tecnológico y en definir la tecnología como un conjunto de conocimientos teóricos y aplicados, funcionales dentro de un paradigma específico y que identifican el rango de problemas que se pueden resolver. Se trata de actividades que entrañan formas tácitas de conocimiento contenido en los procedimientos individuales y organizacionales (Cimoli y Dosi, 1994). El conocimiento incluye “categorías cognoscitivas, códigos de

³ En los modelos neoclásicos convencionales, los cambios en la relación salario/beneficio modifican la adopción de técnicas y hacen mover a la economía hacia el uso de técnicas más intensivas en trabajo cuando esa relación disminuye o a técnicas más capital intensivas cuando aumenta. Sin embargo, ese cambio suave en las fronteras de precios de los factores requiere que cada frontera sea lineal, lo que a su vez requiere que la relación de trabajo y medios de producción sea similar en todas las ramas, lo que es incompatible con una economía capitalista.

interpretación de la información, habilidades tácitas y heurísticas de resolución de problemas y de búsqueda irreductibles a algoritmos” (Dosi, 1995).

Desde esta perspectiva analítica se considera que el conocimiento tecnológico está mucho menos articulado que el conocimiento científico, ya que gran parte de aquel está implícito en las experiencias, los hábitos y las rutinas. El enfoque evolucionista destaca el carácter tácito de las tecnologías, lo que involucra el dominio de habilidades alcanzadas a través de procesos de aprendizaje activos. Por lo tanto, se resalta el rasgo acumulativo y específico, inherente a los agentes involucrados, que hacen difícil la escritura de instrucciones precisas para el uso de una determinada tecnología (Dosi, 1988). En este sentido, las empresas apuntan a conservar la estructura de rutinas de la organización e introducen cambios y deliberan solo cuando aparecen problemas que no se pueden resolver en el marco del paradigma (Nelson y Winter, 1982). Cuando el paradigma y los problemas que resuelven están estabilizados —es decir, cuando las heurísticas constituyen estándares tecnológicos y productivos—, la deliberación y codificación continua constituyen un costo. Por lo tanto, los actores actúan como una comunidad epistémica en la que el conocimiento, que parece tácito para un observador externo, es codificable pero no codificado, en el sentido atribuido por Cowan *et al.* (2000).

En esta línea, Freeman y Soete (1997) conceptualizan los nuevos ST como un conjunto de innovaciones interrelacionadas tanto en productos como en procesos, de carácter técnico u organizacional, que impactan en diversas ramas de la economía. Por su parte, Pérez (2009b) señala que los nuevos ST no solo modifican el espacio de negocios, sino también el contexto institucional y organizacional e incluso la cultura en la cual tienen lugar los procesos de desarrollo. Nuevas reglas y regulaciones suelen ser necesarias, así como la formación de recursos humanos especializados, normas y otros intermediarios institucionales. Estos cambios, a su vez, tienen un fuerte efecto de retroalimentación sobre las tecnologías, moldeándolas y guiando la dirección que toman dentro del rango de soluciones técnicas posibles (Pérez, 2008 y 2009a).

Distintas combinaciones de ST pueden generar diferentes trayectorias. Estas constituyen un *cluster* de posibles direcciones técnicas, cuyos límites externos de variación —su banda— delimitan las posibilidades de cambio tecnológico factible. Es decir, la trayectoria

4 Entre estas puede ocupar un rol central la caída de la tasa de variación de la productividad y de ganancia.

5 Las evidencias sobre la disminución del ritmo de crecimiento de la productividad son muy claras en las últimas décadas. Por ejemplo, en Estados Unidos la tasa de crecimiento de la productividad del trabajo fue de solo 1,6% anual entre 2007 y 2014, significativamente menor a la registrada entre 2000 y 2007 (2,6% anual) y muy por debajo de la registrada durante la década de 1990 (4,1%). La situación es peor aún en el agregado de países desarrollados: negativa entre 2000 y 2014 y con un crecimiento anual de solo el 1,7% entre la década de 1990 y los años 2000 (Rivera Ríos *et al.*, 2018). Esta reducida *performance* es muy inferior a la registrada durante el fordismo.

6 La difusión de cada revolución y de su paradigma técnico-económico-organizacional, junto a su asimilación en la economía y la sociedad, y su impacto en la productividad, constituyen sucesivas grandes oleadas de desarrollo (Pérez, 2009a y 2009b). La quinta y última revolución tecnológica se conoce como la era de la informática, las telecomunicaciones, con el microprocesador y el *bit* como insumo determinante. Sin embargo, la nueva conceptualización del factor clave que emerge de los ST de I4.0 representa un paso ulterior, si se compara la conceptualización de la relevancia del *bit* en los años setenta y en la actualidad.

7 La quinta revolución tecnológica se originó en el abaratamiento de la

tecnológica es entendida como un patrón de la actividad “normal” de resolución de problemas productivos, organizacionales y estratégicos⁴ que se manifiestan en un paradigma tecnológico específico (Nelson y Winter, 1982). Además, las trayectorias pueden ser más generales o más circunscriptas y, por tanto, es posible su complementariedad (Dosi, 1982).

Por otra parte, se resalta la importancia que tienen las innovaciones incrementales como instancias previas para cada innovación radical. Si bien estas son determinantes en las nuevas inversiones y el crecimiento económico, la expansión del paradigma depende de la innovación incremental, y son preponderantes la mejora de productos y procesos y los cambios organizacionales e institucionales para generar tanto aumentos de la productividad⁵ como una extensión del mercado en el sentido smithiano. Cuanto mayor es la expansión, las innovaciones en procesos impulsan la mayor parte de las inversiones que dan lugar a la generación de economías de escala (Pérez, 2009b). Es decir, la búsqueda de nuevos productos y procesos no se dan en forma aleatoria sino en el marco de los límites (la banda) que impone el paradigma. Por lo tanto, se manifiesta como una recombinación de sistemas actuales con otros que existían previamente.

Basado en dicho marco conceptual, Pérez (2009b) define una revolución tecnológica como un “conjunto interrelacionado de saltos tecnológicos radicales que emergen en el paradigma y que conforman una gran constelación de tecnologías interdependientes”, es decir, “un *cluster* de *clusters* o un sistema de sistemas”.⁶ Dos características básicas que permiten diferenciar una revolución tecnológica de una colección aleatoria de ST son resaltadas por Pérez (2009a): la fuerte interconexión e interdependencia de los sistemas y la capacidad de transformar profundamente el resto de la economía.

El cambio es traccionado en diferentes niveles por las industrias centrales de cada revolución, las que, según el rol que desempeñan en la difusión, pueden ser clasificadas en cuatro clases diferentes (Pérez, 2009b): las ramas motrices, productoras de los insumos clave de cada revolución de uso casi universal; las ramas vectoras, usuarias más visibles y activas del insumo clave; las inducidas; y las infraestructuras tecnológicas de cada revolución, que expanden las fronteras del mercado para todas las industrias⁷ (Pérez, 2009b).

La capacidad de transformar otras industrias y actividades depende de la influencia de su paradigma técnico-económico asociado, es decir, de la adopción de mejores prácticas para adoptar las nuevas tecnologías en las nuevas industrias. Mientras que los nuevos sectores se expanden para convertirse en los motores del crecimiento durante un largo período, el paradigma tecnoorganizacional constituye una guía para la reorganización y el aumento generalizado de la productividad en industrias preexistentes.

Esta idea de paradigma tecnoorganizacional no es contradictoria con la perspectiva evolucionista que enfatiza la heterogeneidad de los senderos evolutivos de las organizaciones,⁸ en particular en los PED, en los cuales pueden coexistir formas de producción y de organización que corresponden a más de un paradigma.

En cada fase de un paradigma tecnoorganizacional se presentan ventanas de oportunidades para los PED, que se abren temporalmente. Las posibilidades de “subirse a la ola” del paradigma vigente depende de la presencia de umbrales mínimos de capacidades y conexiones preexistentes (Pérez y Soete, 1988). Por lo tanto, es imprescindible que los países cuenten con capacidades científico-tecnológicas, un umbral mínimo de inversiones físicas, una masa crítica de mano de obra calificada y experiencia, y ventajas de localización.

En esta línea, Pérez y Soete (1988) y Pérez (2009a) destacan que la apertura de ventanas de oportunidades puede aprovecharse al inicio del paradigma tecnológico, lo cual exige haber desarrollado una base de conocimiento que permita la generación de innovaciones radicales. El segundo momento en el que surgen oportunidades es en la etapa de las industrias maduras, en las cuales las técnicas de producción y los productos están estandarizados, por lo cual no se requiere demasiada inversión en investigación y desarrollo (I+D) ni personal con experiencia en nuevas tecnologías. Las desventajas de entrar en esta fase de madurez es la magnitud del gasto que las firmas deben afrontar para la adquisición de maquinarias y equipos. En ambos estadios, se requiere contar con una infraestructura adecuada y una matriz institucional que impulse el desarrollo de proyectos tecnológico-productivos –mediante instrumentos como la reducción de impuestos, subsidios y barreras de protección, entre otros.

microelectrónica, el desarrollo de las computadoras, software, TIC y nuevos materiales –como las ramas motrices–, y la consolidación de la comunicación digital –como la infraestructura amplificadora de las capacidades del resto de la economía y la sociedad (cable, fibra óptica, satélite, internet, redes electrónicas de fuentes múltiples y transporte físico de alta velocidad).

⁸ Siguiendo la idea de los institucionalistas evolucionistas como Hodgson, el concepto de organizaciones alude tanto a empresas como a instituciones.

Las transiciones entre paradigmas: los mecanismos de selección

El paradigma tecnológico cambia cuando aparecen problemas que no se pueden resolver. En esos casos se requieren de nuevas rutinas, heurísticas y herramientas, y se vuelve necesario “reiniciar” las actividades relacionadas con la resolución de problemas (Dosi, 1982).

En ese contexto, algunas organizaciones juegan un rol clave en la creación de nuevas herramientas que permiten renovar las rutinas y heurísticas. La emergencia de un nuevo paradigma es precedida por la acumulación y articulación de conocimientos científicos y tecnológicos que pueden ser potencialmente transformados en innovaciones radicales.

En línea con Dosi, este proceso de generación y apropiación de conocimiento se produce en una fase oligopólica de la competencia capitalista. Esta etapa está liderada por empresas grandes transnacionales que, con el objetivo de disminuir los costos asociados de I+D, financian *ventures* en trayectorias caracterizadas por una elevada incertidumbre en la que compiten diversos *start-ups* que, en general, son absorbidas por grandes empresas. En particular, los actores predominantes (laboratorios de I+D de grandes empresas, laboratorios públicos, consorcios de empresas de menor porte con elevado nivel tecnológico), combinados con los desarrollos de *start-ups* exitosos, ejercen un mayor control sobre las trayectorias posibles dentro del paradigma vigente, así como en la aparición de nuevos paradigmas.

La experiencia del desarrollo del paradigma centrado en la información y comunicación muestra que en la fase de mayor riesgo aparecen nuevos emprendedores, que compiten con otros pares, en tanto que en la siguiente etapa las empresas multinacionales tienen altas probabilidades de absorber a los ganadores. Se trata de una forma de competencia denominada “mano evanescente”, en la que la jerarquía de la mano visible chandleriana y schumpeteriana caracterizada por un mecanismo de integración vertical es reemplazada por la producción modular y la fragmentación del proceso productivo organizada sobre la base de una organización jerárquica en red (Langlois, 2003).

Como plantea Pérez (2008), los nuevos paradigmas emergen solamente gracias a la influencia de los factores económicos y tecnológicos, sino también por factores institucionales y sociales que buscan dar respuestas a nuevos problemas, tales como la necesidad

de mayor coordinación, la búsqueda de mayor rentabilidad y el mayor control en el uso de la información.

Los procesos de selección se basan en la búsqueda de las alternativas tecnológicas que ponen foco en mejoras de la tasa de beneficios y disminución de costos, derivado de nuevas rutinas organizacionales, productivas y tecnológicas. Algunas teorías sobre paradigmas y trayectorias tecnológicas plantean que el entorno económico y social afecta el desarrollo tecnológico en dos formas: seleccionando la dirección de la mutación –el paradigma tecnológico– y vía una selección *ex post* entre “alternativas schumpeterianas”.

Las fuerzas económicas, institucionales y sociales operan como un aparato de selección, que a la vez es *path dependence*. En este sentido, entran en juego diversas variables, como los intereses económicos de las organizaciones, la historia previa de generación de tecnología y los intereses específicos de las instituciones públicas. Estos factores pueden operar como fuerzas de focalización sobre direcciones definidas del desarrollo tecnológico. Incluso los actores públicos suelen tener un rol importante en la determinación de trayectorias tecnológicas (por ejemplo, electrónica, planes militares, la química aplicada a productos sintéticos en Alemania, etc.) (Dosi, 1982). Los efectos de esta participación/focalización institucional hacia el surgimiento de nuevas tecnologías ponen en la lupa la idea de mecanismos de selección del mercado como única vía para la definición de las diversas trayectorias tecnológicas. En línea con lo que planteaba Dosi, tanto en sus trabajos sobre trayectorias de los años ochenta como en los artículos más recientes (Bottazzi *et al.*, 2010), los procesos de selección no quedan restringidos al mercado, sino que pueden existir formas de selección previamente realizadas por las empresas y por otras instituciones. Aun con una fuerte focalización institucional, pueden existir diferentes posibilidades tecnológicas, con procesos inciertos de búsqueda, en diferentes organizaciones, o agentes “apostando” a diversas soluciones tecnológicas.

Podemos plantear entonces que en el mismo proceso de selección del mercado conviven estas instancias de selección de las interfaces y de las organizaciones. De modo que el progreso asociado a un aumento de la productividad y de las rentas schumpeterianas está vinculado con el *path dependence* de las tecnologías, los sectores, las organizaciones, las regiones y los países.

Capacidades, conexiones y *path dependence*

El enfoque evolucionista pone relevancia en el análisis del sendero evolutivo de construcción de capacidades tecnológicas y aprendizajes por parte de las organizaciones. En este sentido, resaltan tanto la relevancia de la generación de habilidades para el uso del conocimiento de las tecnologías existentes en la producción, inversión y generación de innovaciones, lo cual permite la operacionalización productiva, el desarrollo de nuevas instalaciones, proyectos y diseños, así como la generación de mejoras o nuevos productos, procesos o servicios (Westphal *et al.*, 1985; Dahlman *et al.*, 1987). Otros autores resaltan la importancia de la construcción de capacidades de absorción (Cohen y Levinthal, 1990) y dinámicas (Teece, 2004), así como la adaptación al entorno (Westphal *et al.*, 1985; Kim, 1997; Teece *et al.*, 1997).

Basado en dicha concepción, Kim (1997) pone relevancia en el ambiente político-económico y considera los cambios en el entorno. En esta dirección, Teece *et al.* (1997) se refieren a “capacidades dinámicas” ante la necesidad de contar con flexibilidad para innovar y habilidades para adecuarse a los cambios del contexto global. A su vez, Cohen y Levinthal (1990) se centran en las “capacidades de absorción” y resaltan no solo las competencias para innovar sino también para identificar, captar, asimilar y explotar el conocimiento del entorno.

En particular, Katz (1984) destaca el carácter gradual y secuencial en la incorporación de habilidades que, a nivel de la firma, implica una secuencia evolutiva que pasa por áreas de menor riesgo a otras de mayor complejidad y de largo plazo. Posteriormente, Bell y Albu (1999) enfatizan el carácter secuencial en la obtención de habilidades, pasando desde las actividades de producción de rutinas a las reparaciones y el mantenimiento, la ingeniería inversa y, finalmente, el desarrollo.

Por lo tanto, las capacidades tanto de absorción como dinámicas se van construyendo en las organizaciones a lo largo de su *path dependence*. En la dirección propuesta por Nelson y Winter (1982), la construcción del sendero se asocia a la generación de rutinas y subrutinas que constituyen la memoria organizacional, la que provee las heurísticas que la empresa utiliza para solucionar o descubrir problemas. Desde esta perspectiva, los procesos

de innovación orientados a obtener cuasi rentas en el proceso de competencia son interpretados como cambios en las rutinas ante la emergencia de problemas que las rutinas vigentes no pueden resolver. En ese sentido, a través del proceso de competencia las firmas se ven enfrentadas a la resolución de problemas que llevan a la construcción de nuevas rutinas y por lo tanto dan lugar al proceso de innovación.

Desde una perspectiva sistémica, este enfoque resalta también las capacidades de vinculación —más allá de las relaciones de compra-venta— que ponen en juego los actores con el objetivo de mejorar sus capacidades dinámicas. En especial Teece (1992) se refiere a las capacidades de conectividad de las organizaciones en un determinado espacio multidimensional, las cuales se configuran sobre la base de los actores involucrados y los objetivos del vínculo. Estos nexos no solo dependen de las capacidades de absorción, tecnológicas y organizacionales de las firmas, sino también de su posicionamiento en las redes y de las habilidades para responder y adaptarse a los cambios externos. Así, cuanto mayores son las capacidades de absorción de los sistemas productivos, mayor es la apertura y densidad en sus relaciones con otros sistemas. En efecto, las capacidades de absorción y conectividad se retroalimentan y refuerzan mutuamente —positiva o negativamente—, y sus *feedbacks* condicionan los procesos de aprendizaje y de innovación en las organizaciones (Erbes *et al.*, 2010; Robert y Yoguel, 2010; entre otros). La literatura sobre capacidades ha avanzado en el análisis meso, lo que da cuenta de que el tema adquiere relevancia en los estudios sobre *clusters*, sistemas locales y tramas productivas. Entre ellos, los trabajos de Bell y Albu (1999), Guiliani y Bell (2005) y Giuliani y Arza (2009) plantean que las capacidades de absorción de las firmas explican la capacidad de vinculación. Desde otra perspectiva, Katz (1984) y Dutrénit (2004) hacen hincapié en las competencias internas y la relación con el ambiente externo, considerando la influencia de otros factores y aspectos del nivel meso y macro. Otros estudios identifican relaciones bidireccionales entre capacidades y conectividad, que pueden dar lugar a procesos de retroalimentación que se manifiestan en resultados de innovación en el nivel meso. Es decir, las capacidades individuales de absorción son una condición necesaria pero no suficiente para generar procesos de innovación, ya que también son determinantes las dimensiones meso (Erbes *et al.*, 2010; Mochi, 2017). En esa línea, Metcalfe (2010) destaca no solo la creatividad humana y las competencias

internas en las firmas, sino fundamentalmente el rol del marco institucional en la emergencia de novedades e innovaciones. Se trata de procesos de coevolución entre ambas dimensiones que generan heterogeneidad de conductas y posibles resultados.

Por otra parte, algunos autores resaltan las capacidades de gestión del conocimiento (Leonard-Barton, 1992; Dutrénit, 2004), puntualmente las relacionadas a aspectos organizacionales basados en la interrelación e interdependencia de conocimientos. Así, una dimensión relevante que destaca la literatura evolucionista de capacidades y conexiones es la forma que adopta el proceso de trabajo al interior de la organización o de las redes a las que las firmas pertenecen (Novick, 2000; Jensen *et al.*, 2005). En esa dirección, Erbes *et al.* (2011) diferencian tres formas de organización del trabajo que condicionan el desarrollo de capacidades y conexiones: formativa, intermedia y simple. La primera constituye una condición necesaria para el desarrollo de capacidades e interacciones, caracterizada por una organización del trabajo en células con rotación planificada, polivalencia enriquecida y autonomía de los trabajadores en la toma de decisiones. En una posición intermedia, destaca la presencia de células para tareas elementales, rotación no planificada, polivalencia funcional y una limitada intervención de los trabajadores en la toma de decisiones. Por último, las formas de organización simples se caracterizan por el trabajo individual, sin rotación y sin autonomía de los trabajadores.

La trayectoria de los sistemas tecnológicos que configuran la industria 4.0

La mayor parte de la literatura sobre I4.0 resalta las transformaciones productivas que, especialmente en la industria manufacturera y los servicios, se vienen generando en las últimas décadas en los países desarrollados (PD). Dichos cambios están asociados a la necesidad de: atender demandas personalizadas y de ciclo corto en la mayor parte de los mercados de bienes y servicios (Langlois, 2003); generar economías de escala y de alcance en forma simultánea (Dosi y Nelson, 1994; Teece *et al.*, 1997; Coriat, 2000);⁹ lograr una

⁹ Esta cuestión de escala y *scope* ya tenía, a principios de los años setenta, amplio debate en la literatura sobre producción flexible y *lean production*.

circulación y un control de la información y del conocimiento en las cadenas de proveedores, clientes y firmas que funcionan en forma modular¹⁰ (Langlois, 2003; Bretel *et al.*, 2014); y poder organizar la cadena productiva en redes globales que permitan aumentos significativos de productividad y de cuasi rentas.

En este marco, la I4.0 puede definirse a partir de un conjunto de ST conformados por dispositivos y componentes cuya distinción es su uso integral y su carácter sistémico, en especial en los PD (Lasi *et al.*, 2014a y 2014b; Lee *et al.*, 2015).¹¹ Entre las tecnologías más relevantes se destacan: IA (*machine learning*, *deep learning*, entre otros); internet de las cosas (Ic), fabricación digital; *cloud-computing*; *Big Data analytics*; robots autónomos; realidad virtual y aumentada; y comunicación inalámbrica y de banda ancha (5G, 4G LTE). Sin embargo, el rasgo predominante de I4.0 son los sistemas ciberfísicos (SCF) (Lee, 2008; Baheti y Gil, 2011; Monostori, 2014; Lee *et al.*, 2015). Estos se definen como tecnologías informáticas, electrónicas y de comunicaciones incorporadas en todo tipo de dispositivos físicos, que permiten dotarlos de inteligencia y dan lugar a la interconexión e interacción *online* de diferentes elementos. Los SCF permiten la integración entre sistemas físicos y virtuales, de tal forma que todo lo que suceda en un sistema pueda afectar a otros y viceversa (Klingenberg y Do Vale Antunes, 2017). El paulatino desarrollo de sensores y dispositivos interconectados a internet en ámbitos industriales ha dado lugar a un importante volumen de datos procesables mediante el uso de técnicas avanzadas de minería de datos, basadas en el incremento del poder de cómputo, pero también mediante algoritmos que permiten sistematizar la información de forma eficiente. En este sentido, los SCF representan un avance en relación con el desarrollo separado de los distintos elementos de la I4.0, ya que integran las mejoras en materia de conectividad de la red (ancho de banda), los sistemas embebidos con mayor capacidad de procesamiento y velocidad, y las tecnologías basadas en IA. A nivel de la manufactura, esta integración permite tener procesos autónomos basados en algoritmos que “aprenden” y “deciden” sobre la base de una retroalimentación constante, que a su vez opera sobre los *outputs* de los sistemas físicos.

De esta manera, la I4.0 representa la integración horizontal y vertical a lo largo de las cadenas de valor, que permite la conexión entre dispositivos, máquinas y personas, dando

¹⁰ Subsistemas flexibles con máxima relación interna de los componentes y débil vinculación entre módulos y comunicación de los productos con su entorno.

¹¹ Lo que en la literatura europea reciente se denomina I4.0 guarda grandes paralelismos con lo que en Estados Unidos ya se llamaba desde la década de 1990 “manufactura avanzada” (Muro *et al.*, 2015; Castillo, 2017; Casalet, 2018). Actualmente, el término I4.0 se utiliza de manera generalizada, y también se refiere a este concepto con términos como “fábrica inteligente” o “internet industrial” (Del Val Román, 2016).

lugar a una interrelación y conectividad más eficiente entre la producción, la gestión y las restantes actividades de las diferentes etapas productivas.¹²

A continuación se presenta una síntesis de los ST más relevantes que componen la I4.0, sus ambigüedades conceptuales y los efectos que tienen sobre la organización del trabajo.

Los sistemas tecnológicos que componen la industria 4.0

En el marco de la I4.0 y de manufactura avanzada se identifica un conjunto de ST, cuyos componentes (software, hardware, robots autónomos, entre otros) surgieron en el seno de paradigmas recientes. En particular, el paradigma TIC dio origen a muchas de las tecnologías que en la I4.0 lograron alcanzar una mayor integración y sistematización. Incluso, muchos de los ST se solapan y presentan intersecciones en sus funciones.

A modo de revisión de los conceptos, IDC refiere a la interconexión digital de objetos físicos con las redes de internet, lo cual permite recibir y transmitir datos en tiempo real (Dew, 2003; Gershenfeld *et al.*, 2004). Según un informe de la consultora Deloitte,¹³ los componentes de IDC pueden agruparse en cuatro niveles: dispositivos, entendidos como sensores, chips o módulos de comunicación, capaces de generar una gran cantidad de datos de los que se nutrirá la solución IDC; redes de comunicaciones, que constituyen el medio que proporciona la conectividad dentro del entorno IDC –WAN, LPWAN, celulares (2G, 3G, LTE, LTE-A), satelitales, etc.–; plataformas de software y analíticas, que representan la capa de integración entre dispositivos, redes y aplicaciones; y aplicaciones y procedimientos producto del procesamiento de los datos a través de las plataformas.

El origen de estas tecnologías se remonta a la década de 1990, y desde ese momento fueron popularizándose una serie de definiciones en torno al término. En este sentido, la conexión entre objetos y dispositivos se remite a conceptos como la domótica y el control de procesos industriales mediante, por ejemplo, la telemetría basada en radiofrecuencia y las tecnologías de monitoreo y control y Ethernet industrial (Ramos *et al.*, 2001; Escudero, 2002). La aparición de internet, y en particular de la World Wide Web, dio lugar desde principios de los años noventa a los primeros dispositivos conectados a dichas redes mediante el uso de sensores (Suresh *et al.*, 2014).¹⁴ Estos últimos son instrumentos de

¹² Se agradecen los valiosos aportes de Lidia Seratti al contenido de esta sección.

¹³ Disponible en <<https://cet.la/estudios/cet-la/iot-sector-empresarial-america-latina/>>.

¹⁴ Los sensores no variaron mucho en los últimos treinta años. El cambio significativo se centra en el desarrollo de dispositivos que integraron sensores y procesamientos integrados y que se comunican empleando protocolos con centros de procesamiento de datos.

medición que registran datos (por ejemplo, temperatura, velocidad, aceleración, humedad), que luego son procesados mediante otro dispositivo programable en el marco de un sistema específico,¹⁵ que puede aplicarse al monitoreo remoto vía web. Los sensores fueron cobrando relevancia paulatinamente y su terminología se formalizó en 1999, a partir de los desarrollos de la tecnología RFID en el Auto-ID Centre del Massachusetts Institute of Technology (Dew, 2003; Ashton, 2009).

Posteriormente, el desarrollo de la web 2.0 y de la infraestructura de internet basada en la nube permitió la implementación masiva de dispositivos que integraban la medición, el procesamiento y la conectividad, junto con la disposición de plataformas web especializadas. Esto se complementa con el avance de las tecnologías inalámbricas, tales como WiFi, Bluetooth, ZigBee y LoRaWan. Paralelamente, el uso de protocolos de comunicación más flexibles permitió mejorar la velocidad de los sistemas, en tanto que la adopción de servidores bajo la arquitectura *cloud computing* ha posibilitado la obtención de grandes volúmenes de datos a partir del registro de sensores (Gubbi *et al.*, 2013).

En síntesis, a diferencia del monitoreo y control, o la identificación de objetos desarrollados en décadas previas, IdC supone actualmente la interconexión entre dispositivos que pueden intercambiar información, controlarse unos a otros o integrarse dentro de un sistema más amplio para obtener grandes volúmenes de datos (Da Xu *et al.*, 2014). Por lo tanto, IdC requiere una adecuada infraestructura, principalmente el desarrollo de redes cableadas e inalámbricas y centros de procesamiento de datos y servidores, de modo de lograr mayor conectividad y velocidad de procesamiento.

Por otra parte, el concepto de inteligencia artificial –también denominada inteligencia automática o computacional– se refiere a la inteligencia incorporada y exhibida por sistemas que implica la simulación de procesos de inteligencia humana o la imitación de las funciones cognitivas por parte de los sistemas informáticos (Fetzer, 1990; MINCYT, 2018).¹⁶ Dichos procesos incluyen: el aprendizaje a partir de la adquisición de información y reglas para el uso de la información; el razonamiento que da como resultado conclusiones aproximadas o definitivas; y la autocorrección basada en material suministrado por el aprendizaje autónomo. Algunas de las implementaciones básicas utilizadas actualmente en el sistema productivo son las redes neuronales, *machine learning*, *deep learning* y sistemas

¹⁵ En un sistema automatizado, al no haber una persona que utilice la información de los sensores, debe existir un mecanismo que tome decisiones con las lecturas generadas por los sensores. Por ejemplo, un sistema puede tener como *input* la medición de un sensor de temperatura, cuya información es procesada con una lógica y, si es mayor a un valor, puede tener como *output* el accionamiento de un motor, un ventilador, etc. El dispositivo que controla y toma las decisiones puede ser lo que se conoce en industria como un PLC (*Programmable Logic Controller*), un microcontrolador, una computadora, etcétera.

¹⁶ Formalmente, el término ha venido usándose desde los años cincuenta (McCarthy *et al.*, 1955; Turing, 1956) para referirse al acto de desarrollar máquinas inteligentes, especialmente programas de computadora que imitan ciertos procesos de razonamiento humano y resolución de problemas.

basados en lógica difusa. A nivel industrial, los usos de la IA se encuentran de forma implícita dentro del resto de los ST que la componen (Monostori, 2014). Es el caso de todos aquellos sistemas basados en simulaciones que se nutren de datos reales y permiten generar predicciones mediante el uso de algoritmos.

Otro de los conceptos a destacar es el de gemelo digital, que se refiere a la posibilidad de replicar virtualmente un proceso o un objeto físico, es decir, generar un doble virtual. Se trata de una simulación cuyo comportamiento está basado en variables obtenidas del objeto físico en tiempo real. De acuerdo con el proyecto MAYA perteneciente al programa Horizon 2020 de la Unión Europea, un gemelo digital es la representación de un sistema de producción que puede ofrecer diversas simulaciones caracterizadas por la sincronización entre el sistema virtual y el real, mediante datos sensados¹⁷ a partir de dispositivos inteligentes, modelos matemáticos y elaboración en tiempo real. El objetivo detrás de esta tecnología es realizar diagnósticos o pronósticos sin necesidad de incurrir en la operación directa sobre el sistema físico, con la posibilidad de simular modificaciones o prever cambios, de modo de optimizar el comportamiento de sistemas productivos. Este concepto tiene sus orígenes en las empresas aeroespaciales (Glaessgen y Stargel, 2012; Tuegel, 2012; Negri *et al.*, 2017) y luego se difundió parcialmente en el ámbito de la manufactura. Además, desde la década de 1990 se identifican antecedentes en la investigación médica (Renaudin *et al.*, 1994). En efecto, el concepto de gemelo digital supondría una evolución del término “fábrica digital”.

En una dirección similar, el concepto de fabricación digital ha cobrado relevancia a partir de la difusión de las tecnologías de prototipado rápido y manufactura aditiva, particularmente la expansión de la impresión 3D—en adelante I3D— a partir del fundido por deposición de material (FDM). La fabricación digital se basa en los desarrollos de máquinas herramienta, automáticas y programables, cuyas aplicaciones en la industria se remontan a la década de 1950 (Pease, 1952). Entre estas puede mencionarse las máquinas operadas mediante control numérico por computadora, las de tipo sustractivo o aditivo. Además de estos equipos, la fabricación digital implica también las interfaces de control (*computer aided manufacture*) y el diseño asistido por computadora (*computer aided design*). En relación con el prototipado rápido, las primeras referencias y los usos de técnicas de manufactura aditiva datan de la década de 1980 (Kodama, 1981a y 1981b).

¹⁷ El sensado tiene como objetivo tomar los datos provenientes de sensores y convertirlos en objetos que puedan ser procesados.

La tecnología de I3D en procesos industriales —más allá del prototipado rápido— viene desarrollándose desde hace más de una década y plantea una serie de obstáculos en relación con el costo de las diferentes tecnologías de manufactura aditiva. Tal como sugieren Campbell *et al.* (2011), la I3D ha sido utilizada en pequeñas series y para producir piezas finales en industrias tales como la de componentes automotrices de alta exigencia, industria aeroespacial, construcción y en diversas áreas asociadas a la medicina —por ejemplo, la ortodoncia—, sin embargo, aún no se encuentra en condiciones para ser utilizada para la producción en masa.

A pesar de estos avances, la I3D orientada a la industria se diferencia drásticamente de la I3D orientada a *hobbistas* y al público en general (recuadro 1). Tanto las firmas que fabrican y comercializan estas máquinas como las que las emplean en la manufactura representan todavía una pequeña proporción del mercado.

Recuadro 1

Manufactura aditiva masiva vs. manufactura aditiva para la industria

A menudo, el discurso en torno a la impresión 3D se asocia a conceptos como la democratización de la producción y la personalización masiva (Davis, 1989). Asimismo, la figura del “prosumidor” (Kotler, 1989) suponía la participación atomizada de individuos en las grandes cadenas de valor. No obstante, la manufactura aditiva orientada a la industria difiere totalmente de aquella orientada al público masivo. Al respecto, pocas son las firmas que ofrecen tecnología de I3D estrictamente orientada a usuarios de frontera, como la aeronáutica, la tecnología aeroespacial y la automotriz. Firmas como Stratasys, 3D Systems e incluso HP destacan por ser las principales fabricantes de impresoras 3D industriales, muchas de ellas capaces de fabricar objetos no solo hechos de polímeros plásticos sino también en metal. En contraparte, existe un número cada vez mayor de firmas y emprendedores que ofrecen impresoras 3D para el mercado masivo, de menor complejidad, robustez y precisión relativa. El surgimiento de “granjas” de I3D con equipos industriales y no industriales es el exponente más cercano a la integración de esta tecnología fuera de las industrias mencionadas. En particular, la tecnología FDM se ha popularizado mucho más que otras tecnologías que ofrecen mayor calidad y precisión, como el sinterizado láser selectivo, Polyjet y la estereolitografía, en gran medida debido al alto costo de estas últimas y a su menor difusión relativa. La velocidad de trabajo de las distintas técnicas de manufactura aditiva —que puede incluso ser de días para algunas piezas— en comparación con otras tecnologías de fabricación digital, sigue siendo baja. Además, las calificaciones requeridas para operar dichas máquinas de forma eficiente también suponen un desafío a considerar para su integración.

18 HUD es la sigla correspondiente al término *head up display*, un tipo de tecnología que permite visualizar datos mediante una interfaz gráfica en una pantalla a modo de visor o casco sin necesidad de desviar la vista hacia un tablero. El uso del término también ha cobrado relevancia en el desarrollo de los videojuegos, con un uso similar.

19 En el marco de las criptomonedas, la tecnología *blockchain* se utiliza para validar las actividades de minado, proceso que ocurre de forma virtual en internet. Este proceso implica la resolución de cálculos matemáticos complejos y aleatorios, lo que requiere un hardware destinado a tal fin. Cada vez que se resuelve el cálculo atribuido a un bloque, se obtiene una fracción de una criptomoneda por parte de un participante de la red de minado. La tecnología *blockchain* permite a todos los participantes del proceso notificarse del descubrimiento de dicha unidad de criptomoneda, y evitar así el “descubrimiento repetido” o su falsificación. Si bien en sus inicios el minado era una actividad descentralizada, actualmente la minería de criptomonedas tiende a centralizarse en “granjas” por cuestiones de rentabilidad. Por otra parte, el minado ha contribuido a incrementar la demanda de ciertos componentes de hardware asociados a la potencia de cálculo, en especial microprocesadores y servidores.

Por su parte, el concepto de realidad virtual alude a la interacción y la visualización de entornos y representaciones abstractas en tiempo real a partir de dispositivos, tales como *headsets* o sensores que permiten interactuar con el mundo virtual (Wright, 1987). Si bien los primeros desarrollos en hardware se ubican en la década de 1960, fue a partir de la aparición de las computadoras personales en la década de 1980 que comienzan a pensarse aplicaciones experimentales. Su uso en diversas industrias (construcción, automotriz, diseño militar, educación, investigación en medicina) se remonta a los años noventa y permitió reducir tiempos y costos (Loeffler, 1993; Sherrard y Narayanan, 1994).

En tanto, el concepto de realidad aumentada supone la representación de objetos tridimensionales en el mundo real, visibles solo a partir de un dispositivo. A diferencia de la realidad virtual, el usuario no interactúa con un entorno virtual, sino que los elementos virtuales se “adhieren” al mundo real. Existen referencias al uso de la realidad aumentada en procesos de manufactura manual desde principios de los años noventa (Caudell y Mizell, 1992); mientras que la existencia de dispositivos con visualización HUD¹⁸ se remite a décadas previas, específicamente en el ámbito de la aeronavegación militar. Según una encuesta realizada por Azuma (1997), la temática ya cobraba relevancia a mediados de los años noventa en áreas como la medicina, reparación y manufactura, programación de robots industriales y aeronaves militares. Además se destaca que la realidad aumentada se ha utilizado desde los años noventa en productos tales como consolas de videojuegos con *motion tracking*, teléfonos y otros entretenimientos. En los últimos años se ha asistido a una revalorización de estas tecnologías aplicadas a la industria, tras su éxito en mercados de consumo masivo.

Otro de los ST surgidos recientemente permite validar estructuras de datos de forma descentralizada, distribuida y cifrada, conocidas como “cadena de bloques” o *blockchain* (Nakamoto, 2008). Estas cadenas han tenido un impacto significativo a nivel económico a partir de lo que se conoce como *criptomonedas*¹⁹—los casos más emblemáticos son Bitcoin y Ethereum—. Por otra parte, tienen aplicaciones directas sobre la trazabilidad en las cadenas de valor de diversos sectores (Abeyratne y Monfared, 2016; Tian, 2016; Kim y Laskowski, 2018). Esencialmente, la tecnología *blockchain* permite la realización de transacciones cuyo control

no está centralizado, sino en manos de quienes interactúan en esas transacciones, en una red autoorganizada. En otras palabras, la modificación de los datos por parte de un nodo se realiza de forma tal que el resto de los nodos—o usuarios—deben validar dicha modificación. De esta manera se construye un “historial público e irrefutable” de información, lo que otorgaría veracidad y legitimidad a la información compartida mediante este sistema.

Así, la mayor parte de los ST tienen sus orígenes en décadas pasadas. Como señala Scheer (2015), la disponibilidad de una tecnología no implica necesariamente un uso aplicado a la producción de bienes o servicios. Por ejemplo, algunos de los componentes de I4.0 han estado presentes desde hace más de treinta años, pero solo fueron integrados cuando disminuyó el costo del hardware y el software, y se alcanzó un alto grado de madurez en el desarrollo de estas tecnologías, muchas de las cuales surgen en el paradigma TIC o son derivadas de la evolución e interacción de ST preexistentes (Brynjolfsson y McAfee, 2014). Como se puede apreciar en el cuadro 1, en la mayoría de los ST presentados han prevalecido los avances en materia de hardware y software. No obstante, en otros casos (IA, realidad aumentada y realidad mixta) predomina el componente de software, mientras que en *cloud computing* prevalece el hardware. La última columna del cuadro presenta los trabajos embrionarios de cada sistema tecnológico y el año en que fueron difundidos por revistas tecnológicas y científicas.

En efecto, la I4.0 puede definirse como un sistema de tecnologías integradas por un conjunto de dispositivos que tienen como componentes relevantes el software, el hardware y el uso de internet.²⁰

Por lo tanto, a partir de la I4.0 se propone una mayor integración de las partes que conduce a un funcionamiento sistémico. Es decir, se avanza hacia una mayor intensificación del hardware, hacia el procesamiento de la información *online* en menor tiempo y hacia la automatización de la analítica. Si bien el concepto de I4.0 suele estar muy arraigado al desarrollo de las TIC, se encuentra ampliamente enmarcado en importantes avances en la industria electrónica y la infraestructura de las telecomunicaciones. El salto cuali y cuantitativo que emerge en I4.0 puede ser atribuido al significativo abaratamiento de dispositivos,²¹ al extraordinario aumento de la velocidad de procesamiento y de acumulación de datos en la nube, sumado a la fuerte caída en los precios del hardware, principalmente

²⁰ Según Castillo (2017), los sectores manufactureros en los que este conjunto de ST se están aplicando son los siguientes: autopartes y equipo automotriz; aeronáutica; equipos y componentes eléctricos; industria electrónica; máquinas y herramientas; maquinaria para construcción y minería; maquinaria, automatización y robótica; equipo de hardware e industria de semiconductores. Asimismo, los servicios involucrados son: software de aplicaciones, procesamiento de datos, software computacional, software gráfico y realidad virtual, telecomunicaciones móviles y servicios de telecomunicaciones.

²¹ Por ejemplo, el precio de los sensores se redujo significativamente desde mediados de los años 2000 (Brettel *et al.*, 2014; Ferraz, 2018).

Cuadro 1 Principales tecnologías de industria 4.0, componentes y dispositivos, presencia de hardware o software y grado de antigüedad

Tecnología	Componente / dispositivo	Hardware	Software	Año de surgimiento	Primeras referencias en manufactura, gestión y servicios
IdC	Sensores, redes, sistemas embebidos, codificadores y decodificadores, M2M, HMI, H2M	X	X	1999 (aparición del término), existen dispositivos desde principios de 1990	Dew (2003); Gershenfeld <i>et al.</i> (2004)
SCF	Sistemas de control en red, <i>middleware</i> , sistemas operativos	X	X	2008 (a nivel industrial)	Lintelman <i>et al.</i> (2008); Wang <i>et al.</i> (2008); Baheti y Gill (2011)
IA	Algoritmos, modelos matemáticos, software		X	El concepto—si bien con raíces más antiguas—surge en los años cincuenta	Turing (1950); McCarthy <i>et al.</i> (1955); Shubik (1960)
Realidad virtual	<i>Headsets</i> , dispositivos para capturar movimiento en el espacio tridimensional	X	X	Como concepto aparece en los años cuarenta; como tecnología basada en computadoras, en los años ochenta. Los primeros <i>headsets</i> surgen en los años sesenta (Harvard University, Utah University)	Sutherland (1965); Loeffler (1993); Sherrard y Narayanan (1994); Schofield <i>et al.</i> (1995)
Realidad aumentada	<i>Headsets</i> , dispositivos para ubicar objetos tridimensionales en un visor utilizando como referencia el espacio real		X	Surge muy en paralelo con el concepto de realidad virtual, pero el término lo acuña Boeing para aplicarlo a una herramienta para procesos de manufactura en los años noventa	Caudell y Mizell (1992); Azuma (1997); Van Krevelen y Poleman (2010)
Manufactura digital aditiva	Impresoras y diseño por software	X	X	1981	Kodama (1981a y 1981b)
Manufactura digital substractiva	Máquinas de control numérico (<i>routers</i> , cortadoras láser, tornos) y diseño de software	X	X	El control numérico surge en los años cincuenta y el control numérico por computadora, hacia finales de los años sesenta	Pease (1952)
Gemelo digital	Software de simulación (puede ser en tiempo real), bases de datos, instrumentos de recolección de datos basados en IdC	X	X	Década de 1990	Glaessgen y Stargel (2012)

Cuadro 1 Principales tecnologías de industria 4.0, componentes y dispositivos, presencia de hardware o software y grado de antigüedad [cont.]

Tecnología	Componente/ Dispositivo	Hardware	Software	Año de surgimiento	Primeras referencias en manufactura, gestión y servicios
Realidad mixta	Hardware de realidad aumentada y virtual combinados		X	1994	Fiorentino <i>et al.</i> (2002); Träskbäck y Haller (2004); Dunston y Wang (2005)
Cloud computing	Servidores	X		Aparece en los años sesenta como concepto, pero tuvo un desarrollo tardío recién en la primera década de 2000 (Amazon, Google)	Licklider (1963); Barry (2003); Buyya <i>et al.</i> (2008); Kshetri (2010); Low <i>et al.</i> (2011); Etro (2015)
Big data analytics	Bases de datos no relacionales, datos no estructurados	X	X	La minería y el análisis de datos por métodos no tradicionales comenzaron a popularizarse a mediados de la primera década de 2000 (no hay fecha exacta)	Diebold (2003); Ratner (2003)
Robots autónomos	Robots, computadoras, sistemas embebidos, algoritmos de IA	X	X	Década de 1970	Parks y Bell (1970)
Cadena de bloques [blockchain]	Bases de datos distribuidas y cifradas		X	2008	Nakamoto (2008)

Fuente: Elaboración propia.

por el desarrollo de infraestructura de conectividad. Por otro lado, la relevancia de los grandes volúmenes de datos (*Big Data analytics*) ha contribuido a la generación de información relevante para la dinámica comercial y productiva y de gestión de las firmas. A través de la digitalización y del uso y proliferación de componentes y dispositivos, es posible comunicar máquinas y humanos a lo largo del circuito productivo de cada empresa y de la cadena de valor a la que pertenecen. En este conjunto de tecnologías el sendero evolutivo de aprendizaje de los agentes ha sido significativo para un uso sistémico. Esto ocurre en especial en los PD, donde han alcanzado una mayor sistematicidad en su uso.

A pesar de que la mayoría de los ST, los trabajos y las recomendaciones de políticas se centran en la adopción de la I4.0 en términos de la industria manufacturera, el concepto

presenta un carácter transversal.²² La utilización de tecnologías como *blockchain* para asegurar la trazabilidad (Tian, 2016), la IA aplicada a modelos predictivos, los sistemas de navegación autónoma para tractores y cosechadoras y la utilización de dispositivos y sensores inalámbricos para el monitoreo y control de cultivos y ganado, entre otros, dan cuenta de la importancia que tienen estos ST, sobre todo cuando se piensa en la integración intersectorial y en el marco de CGV.

En efecto, tal como se identificó en esta sección, la mayoría de los ST que se le atribuyen a I4.0 existían hace varias décadas, pero se asiste a una redefinición y a un intento de integración a partir de la expansión de internet.

Ambigüedades en la conceptualización de la industria 4.0 y de sus componentes

Diversos autores sugieren que, si bien existen distintas tecnologías duras y blandas, el potencial explicativo del concepto de I4.0 presenta diversos matices y se utiliza en contextos variados con múltiples definiciones (Mattel *et al.*, 2014).²³ La frecuencia con que cada dimensión y componente son utilizados en la literatura es heterogénea, lo cual sugeriría que el carácter sistémico de los componentes de I4.0²⁴ aún no se encuentra plenamente desarrollado.

Por lo tanto, el concepto de I4.0 posee un grado importante de heterogeneidad en la literatura:

- › Algunos autores lo consideran como la combinación de tecnologías basadas en internet, “tecnologías orientadas al futuro”, aplicadas a la manufactura modular, infraestructura y energía, junto al establecimiento del término I4.0 *ex ante* para una revolución industrial planeada (Lasi *et al.*, 2014b).
- › Otros plantean que el componente “inteligente” aplicado a pequeñas fábricas, productos y servicios cobra relevancia gracias al surgimiento de internet industrial y de servicios (Stock y Seliger, 2016).
- › La hiperconectividad y los SCF son resaltados por Oliván Cortés (2016) como lo relevante de la I4.0.
- › Drath y Horch (2014) señalan una diferencia sutil entre el componente basado en internet de la I4.0.

²² Véase, por ejemplo, el análisis de la Comisión Europea sobre el uso de dispositivos IDC en el sector agropecuario en pos de una agricultura sustentable y de precisión: <https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/dem/monitor/sites/default/files/DTM_Agriculture%204.0%20idc%20v1.pdf>.

²³ A partir de un análisis bibliométrico que incluye más de 5.911 artículos de revistas de ingeniería y *management*, los autores identifican 548 artículos relevantes vinculados con la I4.0. Los autores consideran que muchos de los ST ya existían o eran utilizados desde hace varias décadas.

²⁴ Existen discrepancias tanto sobre el concepto de gemelo digital (Negri *et al.*, 2017) como en torno al de internet de las cosas (Ashton, 2009).

En el caso particular de los SCF, si bien casi todas las definiciones señalan que estas tecnologías permiten la integración entre el mundo virtual y el físico, las precisiones en torno a las implicancias de esta integración son variables. Para algunos autores, los SCF se aplican a la producción, otros lo asumen como sinónimo de I4.0 y en otros se interpreta que son directamente la aplicación del IDC. Estas diferencias se advierten en las trece definiciones del cuadro 2.

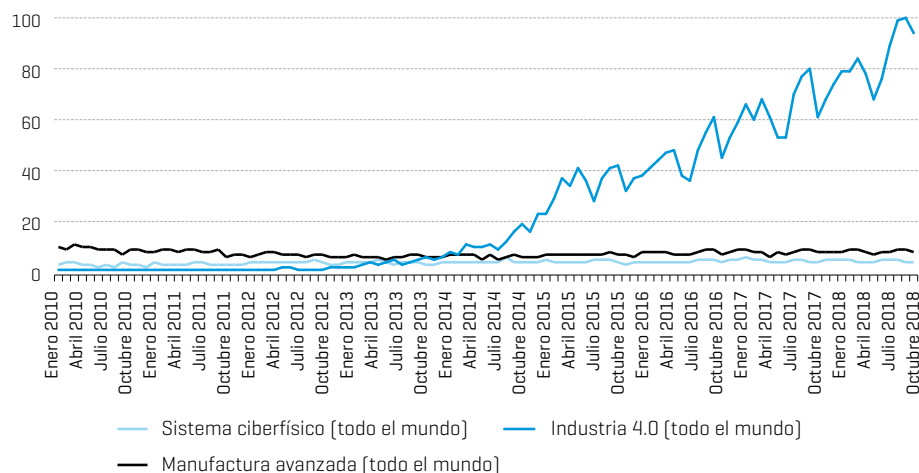
La amplitud de estas definiciones da cuenta del escaso consenso que actualmente existe sobre uno de los componentes más asociados a la novedad de la I4.0, y que se supone es clave para entender la integración entre sistemas.

Cuadro 2 Definiciones de los sistemas ciberfísicos

Autor	Definición
Lee [2008]	Son la integración de capacidad de cómputo sobre procesos físicos y los <i>feedbacks</i> que se generan a partir de estos.
Baheti y Gil [2011]	Son sistemas con capacidades computacionales y físicas que interactúan entre humanos.
Kagerman et al. [2013]	Se trata de sistemas vinculados a IDC y a servicios. Posibilitan la convergencia del mundo real y el virtual.
Zamifrescu [2013]	Sistemas no convencionales (integrales, locales, irreversibles, adaptativos, autónomos y altamente automatizados).
Drath y Horsch [2014]	Son una estructura de tres niveles: objetos físicos, modelos de datos de los objetos mencionados en una estructura de red y servicios basados en los datos disponibles.
Lasi et al. [2014b]	Sistemas que emergen como un todo físico y digital que no puede ser diferenciado.
Gorecky et al. [2014]	Estructura que tiene una dimensión virtual y otra física.
Rüßmann et al. [2015]	Sistemas interconectados que interactúan entre sí bajo protocolos de internet que permiten analizar datos para predecir fallas, autoconfigurarse y adaptarse a cambios.
Lee et al. [2015]	Tecnologías transformativas para gestionar sistemas interconectados entre activos físicos y capacidades computacionales.
Casalet [2018]	Se basan en los sistemas inteligentes, servicios móviles y computación ubicua, procesos de negocios basados en internet, redes sociales y comunidades (web 2.0).
Oliván Cortés [2016]	Es un concepto equivalente a IDC.
Stock y Seliger [2016]	Son un sistema que opera de forma autoorganizada y descentralizada dentro de los sistemas de manufactura.
Del Val Roman [2016]	Son productos inteligentes que disponen de electrónica, software embebido y conectividad.

Fuente: Elaboración propia.

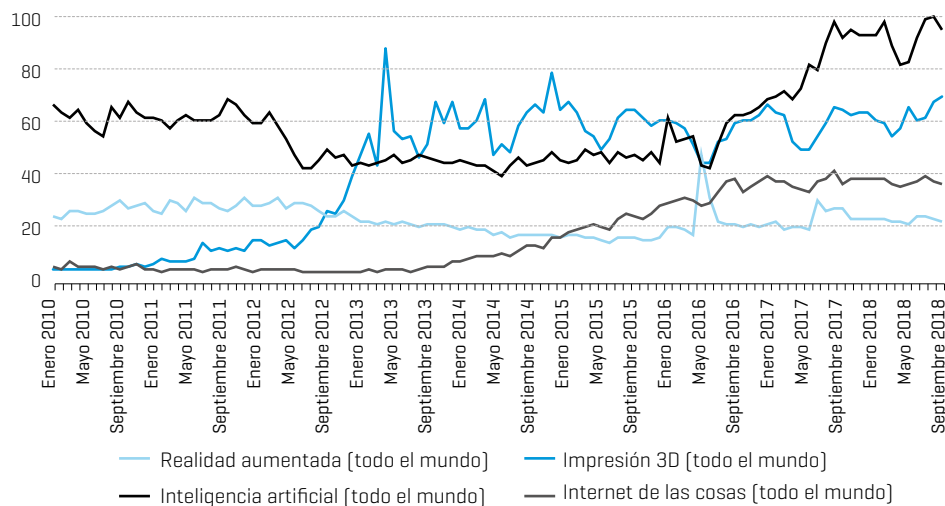
Gráfico 1 Evolución de las búsquedas sobre I4.0, manufactura avanzada y sistema ciberfísico en el motor de búsqueda de Google (2010-2018)



Fuente: Elaboración propia.

Otro elemento que refleja la ambigüedad del concepto se manifiesta en la relativamente reciente difusión de la I4.0, que ha sido planteada como una nueva revolución industrial hacia la mitad de la segunda década de 2000. Un análisis de las tendencias en el motor de búsqueda de Google (gráfico 1) revela que el concepto de I4.0 comienza a ser significativo a partir de 2014 y supera exponencialmente los resultados de búsqueda de manufactura avanzada y de SCF. Es necesario destacar que antes de 2013, la I4.0 constituía un término de búsqueda poco relevante comparado a los otros dos términos mencionados. Por otra parte, en el gráfico 2 se superponen los resultados de búsqueda de cuatro ST asociados a I4.0 para el período 2010-2018, los cuales demuestran cierto nivel de independencia como temática. Se observa que la IA, que predominaba en 2000, vuelve a tener una mayor proporción de menciones a partir de 2016. Por el contrario, si bien IDC se mantiene en cuarto lugar hasta 2015, pasa a ocupar el tercer lugar en 2018 a pesar de su crecimiento. Por su parte, el SCF como componente integrador de I4.0 no registra un aumento considerable, como puede apreciarse en el gráfico 1. A partir de este comportamiento, es posible inferir que I4.0 se populariza como concepto en un momento dado, y que otros términos

Gráfico 2 Evolución de las búsquedas de algunos sistemas tecnológicos de I4.0 en el motor de búsqueda de Google



Fuente: Elaboración propia.

utilizados para explicar la emergencia de la conectividad de ST existentes –tales como manufactura avanzada y SCF– permanecen constantes en el tiempo, más allá del crecimiento exponencial de I4.0. Por otra parte, la relevancia de los ST considerados en el gráfico 2 parece fluctuar independientemente de la popularización del término I4.0.

El rol del trabajo en la industria 4.0

La mayor parte de la literatura sobre I4.0 no analiza el vínculo entre el sistema técnico y social, tanto al interior de las firmas como de las redes productivas de las que forma parte. Tampoco es frecuente el análisis de la coevolución entre tecnologías físicas y sociales que dan lugar al desarrollo de capacidades de absorción, dinámicas y de conectividad de las organizaciones (Nelson y Sampat, 2001). Esto constituye un límite importante para poder entender el efecto sobre el empleo y la organización del trabajo a partir de la implementación de I4.0.

En ese sentido, el estudio de los SCF y su dinámica sistémica en términos de rendimiento dejan afuera las cuestiones de organización y división del trabajo, así como las sustanciales modificaciones que tienen lugar en el tipo de trabajo demandado. Si bien la interacción entre máquinas es relevante y cada vez más autónoma con una tendencia creciente hacia sistemas autoorganizados, el componente humano y su vinculación con los elementos del SCF son altamente cruciales (Gorecky *et al.*, 2014; Stock y Seliger, 2016). De este modo, el trabajo estaría definido en torno a tareas de control y monitoreo sobre el SCF, de forma directa o a través de interfaces, pero respetando el principio de autoorganización del sistema. Por lo tanto, las tareas del trabajador bajo I4.0 se orientarían a la resolución de problemas complejos, establecer la estrategia de producción y supervisar la autoorganización de los procesos, *in situ* o remotamente. Esto supondría que debido a la automatización en el sistema técnico, la toma de decisiones implica un nivel mayor de responsabilidad —ante la presencia de un sistema más integrado— así como una menor coordinación de acciones. Sin embargo, algunos ST de I4.0 avanzarían sobre tareas llevadas a cabo por humanos y no por máquinas, brindando herramientas que permitan incrementar la productividad, como en el caso de la realidad aumentada empleada en la manufactura.

Por su parte, Albrieu y Rapetti (2018) señalan diversos ejes de discusión sobre el empleo centrados en la relación entre automatización y nivel de empleo, las condiciones laborales de los trabajadores y las inequidades que se manifestarían en el mercado de trabajo. Estos autores plantean la discusión en torno al ahorro del trabajo, a la posible flexibilización laboral y a las diferencias en las capacidades y habilidades que se traducirían en un aumento de las brechas salariales y de productividad, que concentrarían el ingreso en un grupo de trabajadores con habilidades adecuadas a las demandas de la I4.0, en detrimento del resto. Según dichos autores, la I4.0 es considerada una tecnología de propósito general capaz de redefinir los esquemas capital-trabajo en un futuro cercano a través de cambios tecnológicos que permitan reemplazar el trabajo humano obsoleto o incrementar la productividad de aquellas labores humanas que sean aún requeridas. Los empleos generados a partir de la I4.0 tenderían a ubicarse en estructuras flexibles, independientes e intermitentes.

Desde una perspectiva diferente, Pfeiffer (2017) destaca que la organización del trabajo va a experimentar un cambio acelerado derivado de la difusión de las tecnologías digitales. La autora no se limita al análisis relativo al reemplazo de trabajadores por robots o la eliminación de tareas de monitoreo realizadas actualmente por seres humanos, sino que además plantea las complejidades que presentan los cambios radicales en los modelos de negocios, en las cadenas de valor, en la aparición de proveedores y servicios completamente nuevos, así como nuevos requisitos en tareas de producción, comercialización y logística.²⁵

Pfeiffer (2017) resalta que la I4.0 no implica simplemente automatizar rutinas de fabricación ya establecidas, sino también administrar y configurar los procesos de innovación, que son abiertos en sí mismos y difícilmente planificables en su totalidad. Además, enfatiza en las capacidades de los trabajadores para hacer frente a la incertidumbre y complejidad asociadas a los potenciales cambios. La I4.0 no se trata de la introducción de una nueva tecnología, agrupa una variedad de nuevas tecnologías y escenarios de aplicación, los cuales varían en términos de la madurez de la tecnología involucrada y los efectos sistémicos que implican. Por otra parte, las innovaciones tecnológicas en I4.0 no necesariamente se originan en los laboratorios de I+D de la industria de bienes de capital, sino que provienen generalmente de desarrollos realizados por empresas del sector TIC, que en algunos casos carecen de conocimientos específicos de las necesidades y especificidades de la producción y los procesos de otros sectores productivos. En paralelo, esto plantea un desafío importante a nivel gerencial para la toma de decisiones y a nivel de mandos medios e inferiores por la necesidad de aumentar las capacidades y conectividad con otros actores. En suma, a partir de la idea de organización del trabajo como un contexto de aprendizaje individual y colectivo (Novick, 1999), la I4.0 trae aparejada una nueva división del trabajo al interior de las firmas y de las cadenas productivas que no necesariamente tendría efectos lineales sobre la calidad y cantidad del empleo involucrado.

²⁵ Para más información acerca de la relación entre las nuevas tecnologías digitales y la dinámica de destrucción/creación de empleo, véase el documento de trabajo N° 15.1 del CIECTI, disponible en <www.ciecti.org.ar/wp-content/uploads/2019/01/DT15.1_v2.pdf>.

Discusión

En esta sección retomamos el marco teórico, las descripciones y ambigüedades de los ST que constituyen I4.0, y las preguntas que planteamos en la introducción. En esa dirección evaluamos y discutimos en qué medida la I4.0 puede ser considerada como un nuevo paradigma tecnológico. Al poner en diálogo el marco teórico con la evolución y el alcance de los ST que componen la I4.0, discutimos la relevancia de las capacidades de los actores, de la conectividad y de los *feedbacks* como condiciones necesarias para la adopción de dichas tecnologías. En este marco, se abordan la naturaleza del actual paradigma en términos de rupturas y continuidades de las trayectorias tecnológicas que lo determinan; la relevancia de las capacidades, interconexiones y del *path dependence*; el rol de los actores; las evidencias empíricas sobre la difusión de TIC en la estructura productiva de las economías latinoamericanas y las ventanas de oportunidad para PED.

La naturaleza del actual paradigma

El actual paradigma —denominado “quinta revolución industrial” por la literatura evolucionista— se sostiene en dos pilares fundamentales. Por un lado, la organización de las economías en redes y la producción customizada en masa dan lugar a una nueva división del trabajo a nivel local y global. Por otro lado, este paradigma se sustenta en el potencial que tienen las tecnologías que se desarrollaron a partir del microprocesador como insumo y el *bit* como factor clave.²⁶ Esto da lugar a la posibilidad de recolectar y procesar datos, customizar productos en masa y mejorar la conectividad de las economías en red, lo que se refleja en un mayor flujo de conocimientos entre las partes y en un mayor control de los procesos productivos y de la organización del trabajo por parte de los grandes jugadores. Asimismo, abre la posibilidad a una mayor eficiencia y a la emergencia de nuevas fuentes para la apropiación de rentas, condicionada por la generación y apropiación de conocimiento y por el poder de gobernanza de las redes de firmas.

En esta línea, la literatura discutida en la sección anterior pone de manifiesto que lo novedoso de I4.0 respecto a las anteriores fases del paradigma es la integración de todos

²⁶ Sin embargo, la relevancia no es la misma que hace treinta años, cuando el *bit* era importante por cuestiones asociadas a la potencia de cálculo y al uso de la informática en la automatización y resolución de problemas y en la toma de decisiones. Actualmente, lo que prevalece es la posibilidad de intercambiar *bits*, que se deriva del desarrollo de internet y el concepto de “nube”, y un avance significativo de los sistemas digitales autoorganizados, basados en la IA.

los ST y la conectividad entre los actores. Es decir, se avanza en la integración de los sistemas embebidos con la nube, lo cual logra un mayor procesamiento de la información *online* en menor tiempo, con un rol destacado de los SCF como matriz articuladora del resto de los ST.

El cambio que se produce en la I4.0 se centra en la combinación de ST que permiten coordinar los circuitos administrativos con los circuitos productivos, comerciales y logísticos, lo que facilita una mayor interconexión y coordinación vertical y horizontal en las organizaciones y de la gobernanza tanto en las CCV como en los sistemas de innovación. No obstante, dado que el factor/insumo clave del paradigma no parece haber cambiado desde la emergencia del paradigma TIC, se trataría de una fase de madurez en la digitalización y el análisis de la información de parte de los actores a través de objetos inteligentes e interconectados, y avances tecnológicos en las TIC.

Rupturas y continuidades de las trayectorias tecnológicas en el actual paradigma

Pérez (2009b) distingue dos aspectos que diferencian una revolución tecnológica de un conjunto de ST: la interconexión e interdependencia tecnológica, económica y organizacional de dichos sistemas, y su significativa transformación en la economía y la sociedad. En este marco, se introducen nuevos sectores e industrias que pasan a convertirse en los más dinámicos e influyentes en otros ámbitos productivos, aportando nuevas tecnologías de productos y procesos que dan lugar a una significativa reorganización y a un incremento generalizado de la productividad. Se identifica además un insumo clave barato y común a todos los sectores, así como la construcción de una nueva infraestructura.²⁷

Los insumos clave de la quinta revolución (microelectrónica de bajo costo, computadoras y software, telecomunicaciones, instrumentos de control) que identifica Pérez (2009b) no serían diferentes a los identificados en la I4.0. No obstante, en esta etapa de transición se suma el abaratamiento y una mayor difusión de insumos/factores clave, tales como los sensores, robots, *data centers*, plataformas, software como servicio y el aumento significativo de la capacidad y procesamiento de datos.

²⁷ La infraestructura no solo incluye las conexiones de internet (potencia, banda ancha) sino también el desarrollo de sistemas de geolocalización (GPS) que permiten la trazabilidad de la logística.

Por su parte, Peres Núñez y Hilbert (2009) identifican a la computación molecular y la computación cuántica como potenciales saltos no continuos en las trayectorias tecnológicas del paradigma vigente. Se trataría de innovaciones de sistemas novedosos sustentadas en la convergencia de trayectorias tecnológicas provenientes de otras disciplinas y de las TIC. En este sentido, el *qubit*²⁸—unidad básica de la computación cuántica que reemplaza al *bit*— implicaría un quiebre en el paradigma científico básico que se encuentra por detrás del paradigma tecnoorganizacional actual.²⁹ Sin embargo, dado el estado embrionario del *qubit*, queda aún abierta la pregunta acerca de si este podría convertirse en el nuevo factor clave y qué efectos produciría en términos de eficiencia en el procesamiento de la información resultante y en la interconexión de ST.

A partir de las categorías de Pérez (2009b), las ramas motrices en I4.0 serían software o hardware embebido integrados a productos y procesos en todos los sectores productivos; es decir, no aparecen diferencias significativas respecto de las ramas motrices del paradigma TIC representativo de la quinta revolución tecnológica. A su vez, las ramas vectoras son las computadoras, los programas (software) y los teléfonos móviles en la quinta revolución tecnológica. En I4.0 se alcanza la maduración de un conjunto de ST—ya definidos anteriormente—: IDC, IA, manufactura aditiva, robótica autónoma, Big Data, etc., con alta capacidad de difusión e integración al resto de los sectores productivos y la sociedad. Por último, las ramas inducidas en I4.0 serían el conjunto de objetos tangibles e intangibles que se usan en forma interconectada para la producción de bienes y servicios, como los servicios de logística y transporte que apuntan a lograr aumentos significativos en la productividad y en la tasa de beneficio.

De lo anterior se desprende que en esta nueva fase del paradigma TIC aparecen dificultades para encuadrar el fenómeno I4.0 en la categorización de ramas vectoras, motrices, inducidas e infraestructura. Esto se debe al rasgo característico de la I4.0 centrado en la integración de ST existentes. En tal sentido, no resulta fácil diferenciar los aspectos tangibles e intangibles de los ST, lo que dificulta la identificación de la clasificación previamente mencionada. A diferencia de anteriores revoluciones tecnoorganizacionales, en I4.0 no surge todavía un nuevo sector ni insumos claves tangibles. Por el contrario, se trata de la convergencia, la interconexión y la integración de ST existentes, lo cual le da el carácter intangible al nuevo fenómeno de I4.0.

²⁸ El *qubit* es un concepto que se define como una superposición de los valores cero y uno. En el momento en que un *qubit* se mide, será cero o uno. Sin embargo, antes de la medición el *qubit* puede tener un valor mitad cero y mitad uno, o cualquier combinación de estos dos posibles valores, por ejemplo el 65% uno y el 35% cero. En la computación tradicional el elemento básico de información es el *bit*, el cual puede tomar dos valores o estados: cero o uno, prendido o apagado, verdadero o falso.

²⁹ La computación cuántica, que aún está en una fase experimental, permitiría mayor capacidad de cálculo al emplear igual o menos energía y espacio físico.

La relevancia de las capacidades, interconexiones y *path dependence*

Como se discutió en el marco teórico, las capacidades, las interconexiones y el *path dependence* de las organizaciones son centrales para la implementación y el desarrollo de I4.0. En este marco, Katz (1984) y Dutrénit (2004) destacan el carácter gradual de dichos procesos, en especial en los PED. Por eso, lejos de la idea de adquisición pasiva de tecnologías, se plantea la importancia de incorporar y crear conocimientos considerando la secuencialidad. Otros estudios realizados en países latinoamericanos sostienen que la conectividad con otros agentes queda supeditado al nivel de desarrollo de las capacidades de absorción (Garrido y Padilla, 2008; Benavente y Contreras, 2008; Kupfer y Avellar, 2008; Arza y López, 2009; Erbes *et al.*, 2010). Algunos trabajos empíricos identifican los factores determinantes en este tipo de competencias: el nivel de calificación de los recursos humanos (Dutrénit *et al.*, 2010); las capacidades de I+D formales e informales; las capacidades tecnológicas, productivas, comerciales y organizacionales de las empresas (Erbes *et al.*, 2008; Lavarello *et al.*, 2009; Erbes *et al.*, 2010); y la confianza entre actores (Arza, 2010; De Fuentes y Dutrénit, 2012). En general, predominan las organizaciones con bajos niveles de capacidades dinámicas y de absorción que conducen a escasas vinculaciones, y por ende limitan la retroalimentación e integración a sistemas productivos y redes. En suma, las empresas con elevadas capacidades no constituyen una masa crítica que impulse y dé lugar a cambios en la macro complejidad (Robert y Yoguel, 2010).

Por otra parte, otro factor limitante para el desarrollo de capacidades de absorción y de conectividad se deriva de las particularidades de los sectores productivos predominantes y sus cadenas de valor, en un marco de heterogeneidad intra e intersectorial, que puede influir en los mecanismos de aprendizaje y vinculación (Pavitt, 1984; Malerba y Orsenigo, 2000; Malerba, 2002). En este sentido, se encuentran algunos estudios de casos de empresas que reflejan dicha diversidad en el nivel de capacidades tecnológicas, organizacionales y de conectividad en PED. Estos estudios se enfocan en la industria maquiladora de México referida a la electrónica/automotriz (Dutrénit y Vera-Cruz, 2005; Dutrénit *et al.*, 2006); en el sector forestal de Brasil (Figueiredo, 2010); el sector automotriz en subsidiarias de la Argentina y Brasil (Obaya, 2014), el sector de maquinaria agrícola de la Argentina

(Mochi, 2017) y el sector TIC (Yoguel *et al.*, 2004). Queda reflejado, además, que conviven firmas cuyos sistemas productivos se encuadran en el paradigma fordista junto con otras que han logrado avanzar al paradigma actual.

Por consiguiente, las evidencias empíricas de los trabajos mencionados revelan las limitaciones en las capacidades e interconexión de las organizaciones en los PED, las cuales representan un aspecto crítico para la incorporación y el desarrollo de los ST de I4.0.

La difusión de TIC en la estructura productiva: algunas experiencias latinoamericanas

En los últimos treinta años se fue acumulando una fuerte evidencia empírica que da cuenta de los factores que potencian o limitan el desarrollo de las TIC en la estructura productiva. Respecto de estas cuestiones, diversos estudios apuntan a discutir la relación entre difusión de TIC y productividad.

Sobre todo desde mediados de los años noventa ha aumentado la importancia asignada a la naturaleza microeconómica de la difusión de las TIC y se enfatiza que la heterogeneidad estructural y el *path dependence* de generación de capacidades son decisivos para explicar el grado de difusión y de complejidad de las herramientas TIC incorporadas (Cimoli y Correa, 2003; Yoguel *et al.*, 2004; Peirano y Suárez, 2006; entre otros). De esta manera, se considera que existe una retroalimentación entre el nivel de capacidades de las firmas y la difusión de las TIC, y que es necesario un umbral mínimo de capacidades tecnológicas y organizacionales para incorporar estas nuevas herramientas. A su vez, el proceso de difusión de TIC permite a las firmas reforzar la generación y circulación de los conocimientos necesarios para mejorar sus competencias (Yoguel *et al.*, 2004). Otros estudios identifican diversas fases y patrones de incorporación de TIC (Peirano y Suárez, 2006) que están muy asociadas al grado de desarrollo de las capacidades endógenas y de absorción de las firmas (capacitación, I+D, empleados calificados y profesionales TIC); al nivel de conectividad y del tamaño de las firmas (Avegerou, 2008; entre otros); a los factores de entorno y tipo de vinculaciones con otros actores; a la puesta en práctica de las rutinas de mejora continua; al avance de formas posfordistas de trabajo; a la implementación de procesos de capacitación sistémicas y al involucramiento activo de los

trabajadores en la totalidad de los procesos productivos, tecnológicos, comerciales y de gestión (Boscherini *et al.*, 2003). Especialmente, Peirano y Suárez (2006) enfatizan que la incorporación de TIC al interior de las empresas es el resultado de un proceso complejo que involucra distintas etapas evolutivas en las firmas.

Por lo tanto, es central la existencia de ciertos umbrales mínimos de infraestructura tecnológica necesarios para saltar a etapas más maduras y complejas. A su vez, superar y entrar en una nueva fase exige mayores esfuerzos y complementariedades en las capacidades y la organización de las firmas. En esta línea, el grado de penetración constituyen factores limitantes o potenciadores para el desarrollo de las “tecnologías físicas y sociales” (Nelson y Sampat, 2001). La diversidad de patrones de incorporación depende de la heterogeneidad estructural del tejido empresarial, fuertemente dependiente de las variables relacionadas con las capacidades de absorción de las firmas.

Asimismo, otros trabajos revelan que, si bien las tecnologías básicas (PC, internet) se encontraban muy difundidas en todos los segmentos de empresas, las aplicaciones con mayor nivel de complejidad (servidores, intranet, conexiones corporativas de alta velocidad, sistemas empresariales, sistemas de gestión corporativa) tenían una menor tasa de aplicación con fuertes diferencias conforme el tamaño de las firmas (Erbes *et al.*, 2006).

Complementariamente, otros estudios efectuados en la región muestran que, debido a la elevada heterogeneidad estructural de América Latina, la difusión de las tecnologías digitales no ha tenido gran impacto en la productividad y en la inclusión social. Estos resultados son coherentes con los hallados por Castaldi y Dosi (2010), quienes afirman que si bien existe una difusión de las TIC a escala global, no necesariamente existe una globalización de las capacidades tecnológicas de las firmas y de los países. Por lo tanto, consideran que es de esperar una fuerte heterogeneidad de las capacidades de difusión que a veces tiene efectos negativos sobre la *performance* de las empresas. En consecuencia, las capacidades de difusión y el manejo de las nuevas tecnologías están distribuidas de manera desigual entre las firmas y los países, según el grado de desarrollo de las capacidades tecnológicas y organizacionales adquiridas, lo que pone de relieve tanto el aumento de la segmentación entre y dentro de los países, como la ausencia de un proceso de

convergencia en el uso de estas tecnologías. Es decir, la adopción de TIC sin cambios en las prácticas organizacionales e institucionales puede ser perjudicial para las empresas, sectores o países. Más aún, Dosi *et al.* (2010) plantean que cuando se incorporan las TIC sin cambios organizacionales o mejoras de las capacidades de los trabajadores, la productividad podría incluso disminuir. En consecuencia, la heterogeneidad y las asimetrías entre las firmas en el nivel micro condicionan la adopción de las TIC—en especial la I4.0—, lo que refleja diferencias persistentes en las unidades productivas.

Por su parte, Rivas y Stumpo (2013) afirman que la heterogeneidad estructural en América Latina se manifiesta en diferenciales de productividad, desiguales tasas de empleo registrado y la presencia de importantes brechas salariales. Esto también se explica por las diferencias en las capacidades acumuladas por las organizaciones. A la vez, otros factores limitantes para alcanzar cierto grado de complejidad en la difusión de TIC son las especificidades y limitaciones sectoriales de la estructura productiva de la región, que se manifiesta en la escasa presencia de las ramas intensivas en ingeniería (Katz y Stumpo, 2001; Cimoli *et al.*, 2010).

Diversas investigaciones realizadas en la Argentina en distintos períodos históricos ilustran tanto la relación entre capacidades y difusión de TIC, como las diversas fases de incorporación de estas tecnologías y la presencia de vínculos no lineales con la productividad del trabajo (Yoguel *et al.*, 2004; Novick y Rotondo, 2013). En particular, estos estudios ponen de manifiesto un mayor impacto de las TIC en el área administrativa que en las áreas de producción, la presencia de tecnologías relativamente simples y el escaso desarrollo de redes. Estos resultados también fueron confirmados a partir de una encuesta a mil empresas en firmas de comercio, industria y servicios, implementada posteriormente por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe, el Ministerio de Trabajo y la Unión Europea.³⁰ El débil impacto de las TIC sobre el área fabril, en especial en la industria, constituye una fuerte limitación para la implementación de los ST que constituyen I4.0. Estos trabajos volvieron a confirmar que el grado de difusión de las TIC en la estructura productiva y de servicios depende positivamente del grado de desarrollo alcanzado en las capacidades tecnológicas, productivas, organizacionales y comerciales de las organizaciones. En ese sentido, el *path dependence* de incorporación de TIC constituye un proceso

³⁰ Rotondo, Breard y Yoguel (2014) cuestionan la existencia de relaciones lineales entre la adopción de TIC, el desarrollo de procesos innovativos y las ganancias de productividad; no cualquier acervo de capacidades les permite a las firmas seleccionar e incorporar TIC de manera eficiente en relación con sus modelos de negocio.

desarticulado con limitaciones para generar procesos de aprendizaje. A su vez, trabajos realizados a partir del uso de la Encuesta Nacional Dinámica de Empleo e Innovación (ENDEI) (Moncaut *et al.*, 2018) encuentran resultados relativamente similares y profundizan acerca de los efectos de complementariedad y el impacto de la difusión de TIC sobre la productividad.

Por su parte, la disponibilidad de la oferta de software y servicios informáticos es aún limitada en América Latina. En ese marco, a pesar del fuerte crecimiento registrado en esas actividades en los últimos veinte años, la oferta tiene todavía un elevado contenido de *factory*³¹ y escaso peso de productos en el total de ventas del sector. Adicionalmente, la demanda está colocada en proveedores extranjeros que limitan los procesos de aprendizaje derivados de la coevolución entre demandantes y oferentes en la región.

Otra cuestión destacada para analizar las posibilidades y limitaciones de la difusión de las tecnologías TIC es la relevancia del ancho de banda. En esa dirección, Rivas y Stumpo (2014) sostienen que la relación entre ancho de banda y crecimiento tampoco es lineal. Así, una política de desarrollo de esta tecnología es efectiva cuando es complementada nuevamente con acciones que impulsen la creación de capacidades y de activos intangibles. Desde esta temática, este conjunto de falencias de los PED constituyen obstáculos adicionales para la difusión de I+D+I.

Rol de actores

Según Dosi (1982), los mecanismos de selección a partir de los cuales se define la dirección de nuevas tecnologías no se circunscriben solamente a las fuerzas del mercado, sino que pueden involucrar otros actores públicos y privados. En dicha instancia de selección, diferencia dos etapas: surgimiento y madurez. La primera, entendida como una fase de “ensayo y error” en la que intervienen organizaciones dispuestas a asumir riesgos para desarrollar y poner a prueba las tecnologías, en un marco de competencia donde conviven agentes existentes con otros nuevos. La segunda etapa alcanza la configuración oligopólica en producción, explotación y difusión comercial de las innovaciones.

³¹ Este término hace referencia a las modalidades de programación mediante las cuales los programadores codifican parte de programas sin crear la ingeniería de software y sin tener acceso al resultado final.

El fenómeno de I4.0 se desenvuelve en una fase oligopólica de la competencia capitalista. En tanto, los principales promotores de la adopción de ST son grandes empresas multinacionales, muchas de ellas líderes en el mercado de las TIC y de la electrónica (Google, Microsoft, IBM en software, General Electric en hardware, etc.), que trabajan mediante alianzas con empresas manufactureras (Siemens, Bosch, ABB, Philips, Honda, Mitsubishi, etc.) en virtud de una mayor integración vertical y horizontal de las cadenas que coordinan. Si bien emergen nuevos emprendedores, las firmas mencionadas realizan importantes inversiones en estos ST mediante *ventures capital*, o bien al absorber una parte de las *start-ups* ganadoras y las empresas emergentes. Es decir, la búsqueda de mayor captación de rentas impulsó a los grandes jugadores del sector TIC, junto con pares de otros sectores productivos y de servicios que gobiernan las CCV, a intensificar sus capacidades de integración, manejo de grandes bases de datos y generación de procesos de aprendizaje que se manifiestan en la apropiación de cuasi rentas schumpeterianas.

A partir del fenómeno I4.0, se considera que priman los factores de selección de mercado como vectores de cambios incrementales que involucran a organizaciones y sistemas de rutinas tanto preexistentes como nuevas. Este fenómeno es producto de la necesidad de mayor interconexión entre actores, basada en la búsqueda de una reducción de los costos, mayor explotación de la información y, por lo tanto, mayor rentabilidad. No obstante, al momento es posible pensar que solo los actores con mayores capacidades de captación y análisis de los datos logran apropiarse de los beneficios de los nuevos ST y, por ende, alcanzan mayor poder de gobernanza dentro de las CCV.

De todas maneras, se destaca que países como Alemania han impulsado intensamente el desarrollo de estas tecnologías desde la esfera pública, con una participación activa del gobierno a fin de posicionar al país en la I4.0, al considerarla una nueva revolución industrial. Esto no es ajeno al rol que han tenido los actores públicos en PD en otros momentos históricos —por ejemplo, el impulso en el sector electrónico en los países del Sudeste Asiático; la química aplicada a productos sintéticos en Alemania, entre otras (Dosi, 1982).

La literatura más crítica del fenómeno I4.0 (Reischauer, 2018) argumenta que constituye un discurso que define una visión futura de la industria manufacturera. En este sentido, proporciona un marco de referencia que permite un entendimiento compartido entre las

empresas, la política y la academia. La I4.0 sería la base para innovaciones en productos, nuevos servicios y procesos relacionados; es decir, representaría una fuerza impulsora de las innovaciones más que un resultado de estas.

Por su parte, Pfeiffer (2017) profundiza esta idea de que la I4.0 es un relato deliberadamente construido. En Alemania, la expectativa de que la I4.0 generará un crecimiento exponencial se encuentra estrechamente ligada a su matriz productiva, de alta intensidad tecnológica, en la que se destacan los principales fabricantes de máquinas, herramientas y motores de las “fábricas inteligentes”. La relativa alta participación en el producto bruto interno (PBI) industrial de estas ramas en Alemania permitió que dicha estrategia se permeara a nivel nacional, con potenciales efectos sobre su economía a raíz de las ventajas dinámicas que tendrían en las CCV. Esta autora considera clave el Foro Económico Mundial (FEM) de 2011, a partir del cual se creó el proyecto “Futuro de la Manufactura” y el Consejo Global de Manufactura Avanzada, que incluía a representantes corporativos de importantes empresas alemanas (Volkswagen, Bosch, Daimler y Siemens). Posteriormente se creó la Plataforma I4.0 en Alemania. Dichos eventos son identificados como el puntapié inicial para instalar la temática. A partir de entonces, políticos europeos y grandes consultoras internacionales asumieron la narrativa de I4.0 desde los ámbitos gubernamentales y corporativos apoyados por las estadísticas y la difusión del FEM.

Pfeiffer (2017) destaca que los argumentos del surgimiento de I4.0 se encuentran principalmente en las necesidades de grandes corporaciones económicas de establecer la agenda para un futuro régimen de producción global y no en el desarrollo de nuevos ST. Asimismo, describe que el objetivo de este nuevo discurso consiste en crear estructuras de producción y servicios en red estandarizadas a nivel mundial que permitan la colaboración flexible y autodirigida de capital fijo y variable, y colocar de este modo la gestión de todas las CCV en el centro de la discusión.

Ventanas de oportunidad para países en desarrollo

Retomando el concepto de ventanas de oportunidad mencionado en la introducción de este documento, Pérez (2001) considera que su aprovechamiento depende de los desarrollos y capacidades construidas previamente en los diferentes países. Esto requiere una

adecuada comprensión del paradigma tecnoorganizacional y de las fases de maduración en las que se encuentran sus tecnologías. De esta manera, se vuelve necesario contar con habilidades para establecer una estrategia que considere las visiones de las grandes empresas multinacionales que lideran las diversas fases tecnológicas y la evolución del paradigma. Asimismo, es importante conocer las políticas implementadas en los países avanzados y las limitaciones de las capacidades de los PED, lo que es clave para comprender y adaptarse a las transformaciones (fases) del paradigma.

La emergencia de un nuevo paradigma tecnoorganizacional tal como postula la literatura I4.0 estaría asociada a las primeras fases disruptivas que, en términos de Pérez (2001), podrían abrir nuevas ventanas de oportunidad como blancos móviles para los PED. Una mirada alternativa permitiría afirmar que aún nos encontramos dentro del paradigma tecnoorganizacional TIC, lo que implicaría que las ventanas de oportunidades serían reducidas para aquellos países con menores capacidades tecnológicas.

En esta línea, Pérez (2001) señala que en los paradigmas que se encuentran en una fase de innovaciones incrementales en el marco de tecnologías maduras o en proceso de maduración, las ventanas de oportunidad para PED son menores y requieren mayores esfuerzos y capacidades para abordarlas. No obstante, las posibilidades de generar cuasi rentas y de aumentar la productividad son menores. Si bien el momento ideal para entrar al paradigma es en la fase inicial de innovaciones radicales, Pérez y Soete (1988) y Pérez (2001) sugieren que durante los estadios posteriores también se pueden generar capacidades de aprendizaje y de infraestructura que podrían sentar las condiciones básicas para disminuir las brechas de productividad respecto de los PD.

A diferencia de gran parte de la literatura sobre I4.0, que entiende la incorporación de estas tecnologías en los PED como un proceso de implementación automática, este documento destaca los diferentes puntos de partida de los sistemas de innovación, el sendero evolutivo recorrido y los alcances de la difusión e interconexión de los ST que configuran I4.0.

Algunas evidencias sobre el punto de partida para la convergencia hacia la industria 4.0

Los PED, en especial en América Latina, tienen fuertes restricciones para una incorporación sistémica de I4.0 debido a las restricciones en sus capacidades productivas, tecnológicas y organizacionales. Esta situación se agrava porque sus estructuras productivas pueden ser afectadas, como indican Lee (2013) y Lee y Malerba (2017), por lo que denominan la trampa de ingresos medios: los salarios son demasiado elevados en términos de la especialización productiva alcanzada y las capacidades de los agentes son limitadas para poder complejizar el perfil de especialización productivo. Esta situación se manifiesta en países como México, Brasil y la Argentina, y también en algunos países del Sudeste Asiático.³²

El análisis del cuadro 3 permitiría identificar una tendencia hacia una transición tecnoproductiva impulsada fundamentalmente por las estrategias individuales de firmas transnacionales que gobiernan las CCV. Además, en los PED existe evidencia sobre políticas públicas centradas en I4.0, mientras que en la mayoría de los PED son muy recientes las iniciativas en dicha dirección.

En ese sentido, la implementación y el desarrollo de I4.0 es significativamente mayor en las empresas con elevadas capacidades y conexiones previas. Por el contrario, las empresas con limitaciones en sus capacidades y en el grado de conocimiento tecnológico, experiencia y *know-how*, solo podrían adoptar pasivamente estas tecnologías.

No obstante, surge el interrogante si la adopción de ST *per se* sería suficiente para que las empresas de PED aumenten su productividad y puedan apropiarse de cuasi rentas de innovación en el proceso de competencia. Esta restricción parecería operar debido a las limitaciones previas mencionadas y al lugar que las empresas de los PED ocupan en las CCV, dominadas por empresas multinacionales que ejercen su gobernanza (cuadros 3 y 4). En este marco, la interpretación, el aprovechamiento y el control de la información constituyen barreras a la entrada más elevadas. Por lo tanto, dada la naturaleza *path dependence* de la construcción de capacidades, el diseño de estrategias para la implementación de I4.0 amerita una discusión previa sobre restricciones, requisitos y posibilidades.

³² Dado que el desigual grado de uso de ST tendría efectos sobre la estructura de costos de las organizaciones, la literatura sugiere que esta reducción posible de costos podría beneficiar a algunos países del Sudeste Asiático que hoy se encuentran afectados por la trampa de ingresos medios (Lee, 2013).

Otro aspecto observado en los PED es la relevancia del perfil de especialización y las posibilidades de que la I4.0 disminuya las brechas de productividad entre países. En aquellas economías con mayor peso de los sectores industriales de alta tecnología, la brecha de productividad se ampliaría respecto de países con escaso peso de los sectores productivos intensivos en conocimiento. Sin embargo, en las economías latinoamericanas, la I4.0 podría cerrar brechas de productividad en sectores intensivos en recursos naturales con los PD, lo cual generaría ventajas competitivas estáticas por sobre las dinámicas.

Como se observa en el cuadro 3, las capacidades de los recursos humanos se vuelven clave para la transformación de las organizaciones. Por un lado, es central contar con una masa crítica de recursos humanos altamente calificados para la adaptación y generación de innovaciones de productos y procesos. Por otro lado, se requiere generar habilidades para el manejo de los nuevos ST aplicados a lo largo de la estructura productiva tanto a nivel de operarios como de mandos medios y superiores.

Es importante discutir en qué medida los PED pueden iniciar un camino de cambio estructural a partir de insertarse en el mercado como productor de algún tipo de ST, y así reducir la dependencia con los países proveedores de los ST que componen la I4.0. Esta alternativa podría incluir distintos gradientes, que van desde el desarrollo de tecnologías de menor complejidad relativa hasta los ST de frontera que requerirían un elevado desarrollo de capacidades científico-tecnológicas y organizacionales previas. No obstante, como se observa en los cuadros 3 y 4, las deficiencias de infraestructura vinculada al ancho de banda, al alcance y a la calidad de los servicios de internet constituyen un limitante para operar I4.0.

Estas cuestiones ponen de manifiesto las dificultades que tienen los PED para seguir un sendero de convergencia y *catch-up* (Cimoli *et al.*, 2010). Para lograr avanzar en estos procesos los PED requieren no solo una política industrial y tecnológica orientada a mejorar las capacidades y conexiones, sino fundamentalmente una rediscusión del perfil de especialización del que parten, que dé lugar a la generación de variedad no relacionada y a la combinación de eficiencia schumpeteriana y keynesiana.³³

³³ La primera dimensión alude a la relevancia de la tecnología y de la generación, circulación y apropiación de conocimiento en el proceso de competencia; la segunda dimensión refleja el nivel que alcanza la elasticidad ingreso de la demanda.

En resumen, las potencialidades de I4.0 para los PED no quedan restringidas a la adquisición de ST aplicados a procesos productivos; precisamente, se exige un cambio de tipo

Cuadro 3 Grado de penetración en algunos países de América Latina y del Sudeste Asiático

País	Grado de implementación I4.0	Sectores con capacidades para implementar I4.0	Sectores con capacidades para desarrollar sistemas tecnológicos de I4.0	Principales obstáculos para implementar I4.0	Evidencia empírica
Argentina	Bajo	Capital extranjero y grandes firmas locales (automotriz, de alimentos, maquinaria agrícola, químico, petroquímico)	Pymes locales con capacidad de desarrollar baja/media complejidad tecnológica	Escasez de personal especializado en tecnologías digitales	Barreras a la implementación de I4.0 de las firmas: falta de personal calificado (70%), incertidumbre sobre su utilidad (65%) y resistencia al cambio (64%)
Brasil	Bajo	Empresas multinacionales, grandes firmas locales (aeroespacial, automotriz, de alimentos, agropecuario, químico)	Firmas locales especializadas en servicios tecnológicos. <i>Start-ups</i> asociadas a sectores cercanos a la frontera tecnológica	Limitaciones en las capacidades y en mano de obra	Menos del 25% de las firmas utilizan tecnologías digitales avanzadas y menos del 2% adoptan tecnologías 4.0
Perú	No implementa	Pymes tecnológicas en sectores asociados a recursos naturales (bioeconomía, alimentos, turismo)	Sin datos	Fuertes limitaciones estructurales. Firmas tecnológicas inmaduras. Escasez de mano de obra calificada	El 99,5% del total de las firmas son mipymes y solo un reducido grupo de firmas realizan actividades tecnológicas
México	Bajo	Capital extranjero, grandes firmas locales y <i>clusters</i> regionales (automotriz, aeroespacial, biotecnología)	<i>Clusters</i> tecnológicos locales centrados en la innovación y el desarrollo de tecnologías asociadas a I4.0	Escasa mano de obra calificada con competencias en tecnologías digitales	Barreras a la implementación de I4.0 en las firmas: poca infraestructura (80%) e insuficiente práctica (53,3%)
Tailandia	Implementación incipiente	Capital extranjero y firmas locales asociadas a multinacionales (automotriz, aeroespacial, bioenergía, medicina)	Sin datos	Débiles conexiones entre pymes y las organizaciones del sistema nacional de innovación	Sin datos
Malasia	Implementación incipiente	Capital extranjero y firmas locales grandes asociadas a multinacionales	Oferta local insuficiente para dar soluciones a las firmas que implementan I4.0	En pymes, problemas de financiamiento, escasez de talentos y conocimiento para implementar I4.0	Menos del 20% de las firmas aplica tecnologías digitales y menos del 50% implementa procesos de automatización

Fuente: Elaboración propia con base en los trabajos de Casalet (2018), Ferraz (2018), Gutarra y Valente (2018), Lee *et al.* (2018), proyecto "Industria 2027" de la Confederación Nacional de la Industria Brasileña, plan estatal "Tailandia 4.0", plan "Malasia's National Policy on Industry 4.0" e "Industria 4.0" del Instituto para la Integración de América Latina y el Caribe del Banco Interamericano de Desarrollo (BID-INTAL).

Cuadro 4 Diversos indicadores de esfuerzos y capacidades de innovación e infraestructura en algunos países de América Latina

País	Exportación de alta y media tecnología / total exportaciones	Penetración internet / 100 hab.	Banda ancha fija / 100 hab.	Gasto I+D/PIB	Técnicos cada millón de hab.	Investigadores cada millón de hab.	Solicitudes de diseño industrial de personas residentes	Solicitudes de patentes de personas residentes
Argentina	9%	71%	18%	0,58	319	1.202	1.115	884
Brasil	13%	61%	14%	1,16	645	698	3.400	5.200
México	15%	64%	13%	0,55	132	241	1.651	1.310
Perú	4%	49%	7%	0,11	Sin datos	Sin datos	102	72
Tailandia	22%	52%	12%	0,62	243	874	3.759	1.098
Malasia	43%	80%	8,5%	1,29	130	2.261	701	1.109
Indonesia	6%	32%	2%	0,08	Sin datos	88	2.581	1.058
Filipinas	55%	55%	3%	0,13	28	189	1.043	327
Camboya	0%	34%	0,81%	0,11	60	30	9	0

Fuente: Elaboración propia con base en datos del Banco Mundial, 2018.

cultural, organizacional y de conducta de las organizaciones que no se limita exclusivamente a las cuestiones tecnológicas, además involucra aspectos de infraestructura, de gestión, de formación, organizacionales y sociales. El carácter sistémico e interactivo de las tecnologías I4.0 requiere entonces importantes esfuerzos para lograr una mayor sistematicidad en los PED, en los cuales se parte de bajos umbrales en las capacidades de conectividad, en el grado de difusión de las primeras fases del paradigma TIC y en las dificultades de coordinación e interconexión.

Conclusiones

A lo largo del presente trabajo se ha analizado el fenómeno de la I4.0 en torno a la literatura evolucionista de paradigmas tecnológicos, capacidades y conectividad. Del estudio se desprende una serie de conclusiones preliminares.

En primer lugar, el conjunto de dimensiones y elementos de las revoluciones tecnoorganizacionales que han venido sucediendo a lo largo de la historia fueron recién definidos como tales *ex post*. Sin embargo, en la literatura sobre I4.0, el discurso apela a definiciones tales como “nueva revolución industrial”, “revolución en la manufactura” y “cuarta revolución industrial”. En ese sentido, se observa una escasa relación analítica con la larga tradición de la literatura evolucionista neoschumpeteriana referida a la emergencia y dinámica de paradigmas tecnoorganizacionales.

En segundo lugar, el documento pone de manifiesto que buena parte de los ST discutidos estaban ya presentes hace varias décadas. Es decir, conviven viejos y nuevos ST y versiones optimizadas o adaptadas que no necesariamente implicarían saltos tecnológicos ni rutinas disruptivas. Incluso, algunos de ellos no fueron concebidos inicialmente para usos industriales. Asimismo, la escasa discusión acerca de las definiciones de los ST determinantes (SCF, IDC, IA, entre otros) explica la ambigüedad terminológica presente en la literatura.

En tercer lugar, de acuerdo al marco teórico sobre paradigmas tecnoorganizacionales presentado al inicio del documento, se observa un elevado protagonismo de los actores que venían ejerciendo el liderazgo en las etapas embrionarias de los ST de I4.0, así como la vigencia del factor/insumo clave del paradigma TIC, de la infraestructura y de las ramas vectoras, motrices e inducidas predominantes. Por lo tanto, los problemas asociados a una búsqueda de mayor productividad y rentabilidad pueden resolverse en gran medida mediante mejoras sustanciales en la interconexión de los ST existentes, tal como sugieren las transformaciones que se pueden identificar en la conceptualización del factor clave que hemos realizado en este documento. No obstante, se reconoce la transición hacia nuevos modelos de negocios, cambios organizacionales

y nuevas formas institucionales y regulatorias, que tienen lugar a partir de la integración de las TIC a todos los sectores productivos.

En cuarto lugar, la literatura sobre I4.0 enfatiza la adopción de los ST sin considerar previamente el *path dependence* de construcción de capacidades productivas, tecnológicas y organizacionales, la conectividad de las organizaciones y las retroalimentaciones generadas entre ellas, la división del trabajo y las formas en que este se organiza a nivel microeconómico. Esto es particularmente relevante en los PED por la existencia de fuertes limitaciones en las capacidades tecnológicas, en la conectividad y desarrollo previo de redes y en la existencia de servicios básicos e infraestructura. Para los países rezagados en la construcción de capacidades, su integración podría ser marginal y, por lo tanto, impactaría en mayor medida en la demanda que en la producción y el desarrollo de estos ST. En ese marco, Casalet (2018) sostiene que la I4.0 no solo requiere de una infraestructura adecuada sino también de un sistema institucional coherente, lo cual implica la implementación de políticas públicas de largo plazo que apunten al desarrollo de capacidades y a la interacción entre organizaciones. Este conjunto de dimensiones (capacidades, conectividad e infraestructura) limitan las posibilidades de una implementación sistémica de la I4.0 en los PED. Sin embargo, a pesar de que en los PD el grado de penetración de la I4.0 se supone que es mayor, también existen restricciones para la difusión y adopción generalizada de la I4.0 como indican los casos de Corea del Sur (Kim y Laskowski, 2018) y Alemania (Müller, 2014; Sommer, 2015) y en países de menor desarrollo relativo del Sudeste Asiático (Lee, 2013; Lee *et al.*, 2018). De esta manera, la literatura de paradigmas tecnoorganizacionales sugeriría que los problemas para la penetración de la I4.0 en los PED también se replican en los PD.

En quinto lugar, en relación con el proceso de trabajo, la literatura sobre I4.0 hace escasa referencia a las metodologías de gestión y organización de la producción a nivel de la firma y de las cadenas de valor. En ese sentido, estos desarrollos van en una dirección contraria a las recomendaciones de Nelson y Sampat (2001), que enfatizan la relevancia que tienen las tecnologías sociales para una incorporación adecuada de tecnologías físicas y virtuales orientadas a la producción de bienes y servicios. Por lo tanto, un adecuado funcionamiento de I4.0 requiere que ambos tipos de tecnología coevolucionen al interior de

las organizaciones. Por otra parte, la literatura tampoco discute en qué medida la implementación de I4.0 tiene algún efecto sobre la convergencia de productividades (*catch-up*) y la generación de procesos de cambio estructural en los PED. Dichos procesos requieren, para ser exitosos, no solo una política industrial y tecnológica orientada a mejorar las capacidades y conexiones que tienen las diversas organizaciones que configuran un sistema productivo y de innovación, sino fundamentalmente una rediscusión del perfil de especialización productiva del que parten. En tal sentido, estos países presentan fuertes restricciones para dar lugar a la eficiencia schumpeteriana y keynesiana (Saviotti y Pyka, 2004), la variedad relacionada y no relacionada de la estructura productiva, la inclusión social y a una disminución de la brecha de productividad que los PED presentan con los PD (Barletta y Yoguel, 2017); es decir, dar lugar al cambio estructural. A la vez, las limitaciones de los países de América Latina para desarrollar I4.0 se encuentran en lo que la literatura llama trampa de países de ingresos medios (Lee, 2013; Lee y Malerba, 2017): los salarios medios no se corresponden con el perfil de especialización predominante que no requiere procesos de eficiencia schumpeteriana, y las capacidades son menores a las necesarias para poder comenzar un cambio en el perfil de especialización que dé lugar a la eficiencia keynesiana.

A partir de las discusiones expuestas, es posible pensar que la adopción de I4.0 requiere el diseño de acciones estratégicas de políticas públicas. Por ello, deberían diferenciarse tanto las trayectorias que tienen o pueden tener los oferentes nacionales de ST como los perfiles de demanda asociados. A partir de esta base, se plantea la necesidad de analizar y definir los posibles caminos a adoptar en América Latina. Por el lado de la oferta, es importante relevar las empresas que potencialmente podrían insertarse en el mercado, ya sea interno o externo; e identificar las ventanas de oportunidad para la creación de nuevas empresas productoras de parte de los ST que configuran I4.0. Por el lado de la demanda, es necesario identificar las empresas con competencias para implementar I4.0 y generar las condiciones para que aquellas que aún se encuentran rezagadas adopten estos ST.

Por lo tanto, como han hecho diversos PD, el Estado debería jugar un rol destacado en el desarrollo y la búsqueda de mecanismos e instrumentos adecuados para apalancar e impulsar el desarrollo, adaptación y uso de estas nuevas tecnologías. Se trata de un

proceso gradual y de largo plazo que requiere recursos y coordinación de políticas, así como el trabajo conjunto y el consenso entre organismos públicos, instituciones de CTI y el sector privado.

En este marco de política pública, la comunicación y los aspectos discursivos relativos a la manera de implementar o incorporar I4.0 se tornan relevantes y un desafío para el Estado y el sector privado. En esta dirección, es importante que las organizaciones entiendan qué es I4.0, qué beneficios y oportunidades representa y qué amenazas implica no adaptarse al cambio. Frente a la falta de conocimiento y la ambigüedad conceptual, muchas firmas desconocen o no pueden precisar si están trabajando en I4.0 o cuáles serían las potencialidades para insertarse como oferentes o como usuarios. En este sentido, los ST de I4.0 tienen diferentes grados de complejidad y, por ende, es esencial que se identifique lo que es posible resolver internamente y qué es necesario importar. Tomar conocimiento de este conjunto de cuestiones permitiría a los agentes tener más claridad para pensar en las vías de implementación de los cambios y el nivel de inversión requeridos.

Las posibles alternativas de intervención podrían orientarse a fomentar el desarrollo local de oferta de ST, tales como IDC, I3D y TIC aplicadas a procesos productivos locales, e impulsar el desarrollo de capacidades productivas, tecnológicas y organizacionales en los posibles demandantes de I4.0. Dichas alternativas requieren el diseño de una política industrial y tecnológica específica y la necesidad de desarrollar redes que partan de la idea de que la incorporación de I4.0 en la estructura productiva debe seguir una lógica de esfuerzos de innovación desincorporados.³⁴

A partir de las discusiones planteadas en este documento de trabajo, podríamos sostener que, hasta el momento, la I4.0 representaría una fase de profundización del paradigma vigente que viene condicionando los procesos de acumulación desde principios de los años setenta (Pérez, 2009b). A partir de esta perspectiva se iniciaría una nueva trayectoria, cuyo rasgo diferencial sería el funcionamiento sistémico de los componentes que integran la I4.0.

³⁴ Se trata de esfuerzos de innovación asociados a gastos de I+D formal e informal.

Los nuevos interrogantes que se plantean entonces son los siguientes:

- › Organización del trabajo:
 - ¿Qué tipo de empresas cuentan con capacidades de gestión para operacionalizar la incorporación de ST de I4.0 y para aprovechar la gran masa de información que se procesa en forma continua para identificar o solucionar problemas?
 - ¿En qué medida un uso no sistémico de las tecnologías que configuran la I4.0 las constituyen como meros instrumentos de control y de disminución de costos vía automatización?
 - ¿En qué medida la incorporación de estas tecnologías requiere como condición una mayor desregulación de los mercados de trabajo? ¿Estas tecnologías vienen asociadas a formas específicas de organizar el mercado de trabajo o son compatibles con diferentes modalidades (fordistas, posfordistas)?
 - ¿En qué medida una difusión global de estas tecnologías tendrá un efecto en las brechas salariales y en la calidad del empleo con efectos limitantes sobre la demanda?
- › Perfil de especialización, proceso de *catch-up* y cambio estructural:
 - Dadas las limitaciones en capacidades y el tipo de difusión de las TIC en América Latina —particularmente en la Argentina—, ¿qué dimensiones debería tener un relevamiento para investigar las posibilidades de inserción de las empresas nacionales como desarrolladoras de los ST de I4.0?
 - ¿Qué estrategias deberían adoptar los PED para evitar la incorporación de I4.0 limitada al uso de plataformas digitales focalizadas en cuestiones de relativa simplicidad—y sobre todo como esfuerzos de innovación incorporados³⁵ en sectores tales como logística, transporte de carga y de personas, y la distribución de bienes y servicios?
 - ¿En qué medida la difusión de I4.0 implicaría un incremento de las brechas tecnológicas, productivas y organizacionales entre regiones, países, sectores y empresas?
- › Generación de condiciones para la emergencia de oferta de I4.0 nacional/regional:
 - ¿Qué acciones de política serían requeridas para canalizar una oferta de ST a partir de las experiencias?
 - ¿Cómo identificar segmentos de demanda de ST?
 - ¿En qué medida se pueden desarrollar todos los ST? ¿Qué nivel de complejidad e integración al interior de cada sistema puede desarrollarse local o regionalmente?

³⁵ Estos gastos aluden a la incorporación de bienes de capital utilizados en los procesos de innovación en los que el conocimiento está embebido.

BIBLIOGRAFÍA

- ABEYRATNE, S. Y MONFARED, R. (2016). "Blockchain ready manufacturing supply chain using distributed ledger", *International Journal of Research in Engineering and Technology*, vol. 5, N° 9, pp. 1-10.
- ALBRIEU, R. Y RAPETTI, M. (2018). "¿Robots en las pampas? Futuros alternativos para el mercado de trabajo argentino en la Cuarta Revolución Industrial", Documento de Políticas Públicas, Recomendación N° 210, Buenos Aires, CIPPEC.
- ARZA, V. (2010). "Channels, benefits and risks of public-private interactions for knowledge transfer: conceptual framework inspired by Latin America", *Science and Public Policy*, vol. 37, N° 7, pp. 473-484.
- Y LÓPEZ, A. (2009). "Firms' Linkages with Public Research Organizations in Argentina: Drivers and Effects of Interacting from a Firm Perspective", Documento de Trabajo N° 38, Buenos Aires, CENIT, pp. 1-38.
- ASHTON, K. (2009). "That 'Internet of Things' thing", *RFID Journal*, vol. 22, N° 7, pp. 97-114.
- AVEGEROU, C. (2008). "Information systems in developing countries: a critical research review", *Journal of Information Technology*, vol. 23, N° 3, pp. 133-146.
- AZUMA, R. (1997). "A survey of augmented reality", *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 6, N° 4, pp. 355-385.
- BAHETI, R. Y GILL, H. (2011). "Cyber-physical systems", *The Impact of Control Technology*, vol. 12, N° 1, pp. 161-166.
- BAK, D. (2003). "Rapid prototyping or rapid production? 3D printing processes move industry towards the latter", *Assembly Automation*, vol. 23, N° 4, pp. 340-345.
- BALDASSARI, P. Y ROUX J. D. (2017). "Industry 4.0: preparing for the future of work", *People & Strategy*, vol. 40, N° 3, verano.
- BARLETTA, F. Y YOGUEL, G. (2017). "¿De qué hablamos cuando hablamos de cambio estructural?", en Abeles, M., Cimoli, M. y Lavarello, P., *Manufactura y cambio estructural: aportes para pensar la política industrial en la Argentina*. Santiago de Chile: CEPAL, pp. 27-54.
- BARRY, D. (2003). *Web services, service-oriented architectures, and cloud computing*. Amsterdam: Elsevier.

- BASCO, A., BELIZ, G., COATZ, D. Y GARNERO, P. (2018). *industria 4.0: fabricando el futuro*. BID-INTAL-UIA.
- BELL, M. Y ALBU, M. (1999). "Knowledge systems and technological dynamism in industrial clusters in developing countries", *World Development*, vol. 27, N° 9, pp. 1715-1734.
- BENAVENTE, J. Y CONTRERAS, D. (2008). "Cooperation Partners in Manufacture Sector, Evidence from the Fourth Chilean Innovation Survey", trabajo presentado en la 12° Conferencia Internacional de la Sociedad Joseph A. Schumpeter, Río de Janeiro, 2-5 de julio.
- BERSON, A. Y SMITH, S. (1997). *Data warehousing, data mining, and OLAP*. Nueva York: McGraw-Hill.
- BIANCHI, C., GRAS, N. Y SUTZ, J. (2008). "Make, buy and cooperate in innovation: evidence from Uruguayan manufacturing surveys and other innovation studies", trabajo presentado en la 12° Conferencia Internacional de la Sociedad Joseph A. Schumpeter, Río de Janeiro, 2-5 de julio.
- BOSCHERINI, F., NOVICK, M. Y YOGUEL, G. (2003). *Nuevas tecnologías de información y comunicación. Los límites en la economía del conocimiento*. Buenos Aires/Madrid: Miño y Dávila.
- BOTTAZZI, G., DOSI, G., JACOBY, N., SECCHI, A. Y TAMAGNI, F. (2010). "Corporate performances and market selection: some comparative evidence", *Industrial and Corporate Change*, vol. 19, N° 6, pp. 1953-1996.
- BREARD, G. Y YOGUEL, G. (2013). "Patrones de incorporación de TIC en el tejido empresarial argentino: factores determinantes", en Novick, M. y Rotondo, S. (comps.) (2013), *El desafío de las TIC en Argentina. Crear capacidades para la generación de empleo*. Santiago de Chile: CEPAL/Unión Europea/Ministerio de Trabajo.
- BRETTEL, M., FRIEDERICHSEN, N., KELLER, M. Y ROSENBERG, M. (2014). "How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An Industry 4.0 Perspective", *International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering*, vol. 8, N° 1, pp. 37-44.
- BRYNJOLFSSON, E. Y MCAFEE, A. (2014). *The second machine age: Work, progress, and prosperity in a time of brilliant technologies*. Nueva York: w w Norton & Co.
- BUYA, R., YEO, C. Y VENUGOPAL, S. (2008). "Market-oriented cloud computing: Vision, hype, and reality for delivering it services as computing utilities", HPCC '08 Proceedings of the 2008 10th IEEE International Conference on High Performance Computing and Communications, pp. 5-13.
- CAMPBELL, T., WILLIAMS, C., IVANOVA, O. Y GARRETT, B. (2011). "Could 3D printing change the world. Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing", Washington, Atlantic Council.

- CASALET, M. (2018). "La digitalización industrial: un camino hacia la gobernanza colaborativa", Estudios de casos, Documentos de Proyectos (LC/Ts.2018/95), Santiago de Chile, CEPAL.
- CASTALDI, C. Y DOSI, G. (2010). *Technical change and economic growth: some lessons from secular patterns and some conjectures on the current impact of ICT*. Cheltenham: Edward Elgar, pp. 43-73.
- CASTILLO, M. (2017). "El estado de la manufactura avanzada: competencia entre las plataformas de la Internet industrial", *Serie Desarrollo Productivo*, N° 217, CEPAL.
- CAUDELL, T. Y MIZELL, D. (1992). "Augmented reality: An application of heads-up display technology to manual manufacturing processes", Proceedings of the Twenty-Fifth Hawaii International Conference on System Sciences, Kauai, HI, pp. 659-669.
- CIMOLI, M. Y CORREA, N. (2003). "Nuevas tecnologías y viejos problemas. ¿Pueden las TICs reducir la brecha tecnológica y la heterogeneidad estructural", en Boscherini, F., Novick, M. y Yoguel, G. (comps.), *Nuevas tecnologías de información y comunicación. Los límites de la economía del conocimiento*. Buenos Aires: Miño y Dávila/Universidad Nacional de General Sarmiento.
- CIMOLI, M. Y DOSI, G. (1994). "De los paradigmas tecnológicos a los sistemas nacionales de producción e innovación", *Comercio Exterior*, vol. 44, N° 8, pp. 669-682.
- CIMOLI, M., PORCILE, G. Y ROVIRA, S. (2010). "Structural Change and the BOP-Constraint: Why Did Latin America Fail to Converge?", *Cambridge Journal of Economics*, vol. 34, N° 2, pp. 389-411.
- COHEN, W. Y LEVINTHAL, D. (1990). "Absorptive Capacity: A New Perspective on Learning and Innovation", *Administrative Science Quarterly*, vol. 35, N° 1, número especial: Technology, Organizations, and Innovation, pp. 128-152.
- CORIAT, B. (2000). *El taller y el robot. Ensayos sobre el fordismo y la producción en masa en la era de la electrónica*. México/Madrid: Siglo XXI Editores.
- COWAN, R., DAVID, P. Y FORAY, D. (2000). "The Explicit Economics of Knowledge Codification and Tacitness", *Industrial and Corporate Change*, vol. 9, N° 2, junio.
- DA XU, L., HE, W. Y LI, S. (2014). "Internet of Things in Industries: A Survey", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, N° 4, pp. 2233-2243.
- DAHLMAN, C., ROSS-LARSEN, B. Y WESTPHAL, L. E. (1987). "Managing Technological Development. Lessons from Newly Industrializing Countries", *World Development*, vol. 15, N° 6, pp. 759-775.
- DAVIS, F. D. (1989). "Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology", *MIS Quarterly*, vol. 13, N° 3, septiembre, pp. 319-340.

- DEL VAL ROMÁN, J. (2016). "Industria 4.0: la transformación digital de la industria", Facultad de Ingeniería de la Universidad de Deusto, Conferencia de Directores y Decanos de Ingeniería Informática.
- DE FUENTES, C. Y DUTRÉNIT, G. (2012). "Best channels of academia-industry interaction for long-term benefit", *Research Policy*, vol. 41, N° 9, pp. 1666-1682.
- DE SOUSA JABBOUR, A., JABBOUR, C., FOROPON, C. Y GODINHO FILHO, M. (2018). "When titans meet- Can industry 4.0 revolutionise the environmentally-sustainable manufacturing wave? The role of critical success factors", *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 132, pp. 18-25.
- DEW, N. (2003). "Lipsticks and razorblades: How the auto ID center used pre-commitments to build the internet of things", SSRN. Disponible en <<https://ssrn.com/abstract=964507>>.
- DIEBOLD, F. (2003). "Big data dynamic factor models for macroeconomic measurement and forecasting", en Dewatripont, M., Hansen, L. P. y Turnovsky, S. (eds.), *Advances in Economics and Econometrics: Theory and Applications, Eighth World Congress of the Econometric Society*, Cambridge University Press, pp. 115-122.
- DOSI, G. (1982). "Technical Paradigms and Technological Trajectories: A Suggested Interpretation of the Determinants of Technical Change", *Research Policy*, vol. 2, N° 3, pp. 147-162.
- (1988). "The nature of the innovative process. *Technical change and economic theory*", en Dosi, G., Freeman, C., Nelson, R., Silverberg, G. y Soete, L. (eds.), *Technical Change and Economic Theory*. Londres: Pinter, pp. 221-238.
- (1995). "Hierarchies, markets and power: some foundational issues on the nature of contemporary economic organizations", *Industrial and Corporate Change*, vol. 4, N° 1, pp. 1-19.
- Y NELSON, R. R. (1994). "An introduction to evolutionary theories in economics", *Journal of Evolutionary Economics*, vol. 4, N° 3, pp. 153-172.
- DOSI, G., LECHEVALIER, S. Y SECCHI, A. (2010). "Introduction: Interfirm heterogeneity—nature, sources and consequences for industrial dynamics", *Industrial and Corporate Change*, vol. 19, N° 6, pp. 1867-1890.
- (2013). "The evolution of technologies: an assessment of the state-of-the-art", *Eurasian Business Review*, vol. 3, N° 1, pp. 3-46.
- DRATH, R. Y HORCH, A. (2014). "Industrie 4.0: Hit or hype? [industry forum]", *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 8, N° 2, pp. 56-58.

- DUNSTON, P. Y WANG, X. (2005). "Mixed reality-based visualization interfaces for architecture, engineering, and construction industry", *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 131, N° 12, pp. 1301-1309.
- DUTRÉNIT, G. (2004). "Building Technological Capabilities in Latecomer Firms: Review Essay", *Science, Technology and Society*, vol. 9, N° 2, pp. 209-241.
- Y VERA-CRUZ, A. O. (2005). "Acumulación de capacidades tecnológicas en la industria maquiladora", *Comercio Exterior*, vol. 55, N° 7, pp. 574-585.
- , ARIAS, A., SAMPEDRO, J. L. Y URIÓSTEGUI, A. (2006). *Acumulación de capacidades tecnológicas en subsidiarias de Empresas globales en México: el caso de la industria maquiladora de exportación*. México: Universidad Autónoma Metropolitana/Miguel Ángel Porrúa.
- ERBES, A., ROBERT, V. Y YOGUEL, G. (2010). "Capacities, innovation and feedbacks in production networks in Argentina", *Economic of Innovation and New Technologies*, vol 19, N° 8.
- , BORELLO, J. Y LEBEDINSKY, V. (2006). "Regímenes tecnológico, de conocimiento y competencia en diferentes formas organizacionales: la dinámica entre difusión y apropiación", *Desarrollo Económico. Revista de Ciencias Sociales*, vol. 46, N° 181, abril-junio, Buenos Aires, IDES, pp. 33-61.
- ERBES, A., ROITTER, S. Y DELFINI, M. (2011). "Organización del trabajo e innovación: Un estudio comparativo entre ramas productivas argentinas", *Economía: Teoría y Práctica*, vol. 34, pp. 101-132.
- ERBES, A., TACSIR, E. Y YOGUEL, G. (2008). "Endogenous competences and linkages development", trabajo presentado en la IV Conferencia Globelics, Ciudad de México, 22-24 de septiembre.
- ESCUADERO, G. (2002). "Monitoreo de procesos industriales por internet", Centro de Investigación y Desarrollo en Telecomunicaciones, Electrónica e Informática, Argentina.
- ETRO, F. (2015). "The economics of cloud computing", en *Cloud Technology: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*, IGI Global, pp. 2135-2148.
- FERRAZ, J. (2018). "Medios de difusión de tecnologías digitales en la industria. Lecciones para Argentina y Brasil", en Basco, A., Beliz, G., Coatz, D. y Garnero, P. (2018). *Industria 4.0: fabricando el futuro*, CEPAL-BID-UIA.
- FETZER, J. (1990). *Artificial Intelligence: Its Scope and Limits*. Dordrecht: Springer, "What is Artificial Intelligence?", pp. 3-27.
- FIGUEIREDO, P. N. (2010). "Discontinuous innovation capability accumulation in latecomer natural resource-processing firms", *Technological Forecasting & Social Change*, vol. 77, pp. 1090-1108.

- FIORENTINO, M., DE AMICIS, R., MONNO, G. Y STORK, A. (2002). "Spacedesign: A Mixed Reality Workspace for Aesthetic Industrial Design", en Proceedings of the 1st International Symposium on Mixed and Augmented Reality, *IEEE Computer Society*. Disponible en <<https://pdfs.semanticscholar.org/e5a9/bof5db5d39116ce64872f3fe6929931b7b1a.pdf>>.
- FREEMAN, C. (1991). "Networks of innovators: A synthesis of research issues", *Research Policy*, vol. 20, pp. 499-514.
- (1995). "The 'National System of Innovation' in historical perspective", *Cambridge Journal of Economics*, vol. 19, pp. 5-24.
- (1996). "The greening of technology and models of innovation", *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 53, N° 1, pp. 27-39.
- Y PÉREZ, C. (1988). "Structural crises of adjustment: business cycles", en Dosi, G., Freeman, C., y Nelson, R., Silverberg, G. y Soete, L. (eds.), *Technical Change and Economic Theory*. Londres: Pinter.
- FREEMAN, C. Y SOETE, L. (1997). *The economics of industrial innovation*, 3ª ed. Londres: Pinter.
- GARRIDO NOGUERA, C. Y PADILLA-PÉREZ, R. (2008). "Cooperation and innovation in the Mexican manufacturing industry", trabajo presentado en la 12ª Conferencia Internacional de la Sociedad Joseph A. Schumpeter, Río de Janeiro, 2-5 de julio.
- GERSHENFELD, N., KRIKORIAN, R. Y COHEN, D. (2004). "The internet of things", *Scientific American*, vol. 291, N° 4, pp. 76-81.
- GLAESSGEN, E. Y STARGEL, D. (2012). "The digital twin paradigm for future NASA and us Air Force vehicles", en 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA, p. 1818.
- GIULIANI, E. Y ARZA, V. (2009). "What drives the formation of 'valuable' university-industry linkages?: Insights from the wine industry", *Research Policy*, vol. 38, N° 6, pp. 906-921.
- GIULIANI E. Y BELL, M. (2005). "The micro-determinants of meso-level learning and innovation: evidence from a Chilean wine cluster", *Research Policy*, vol. 34, N° 1, pp. 47-68.
- GORECKY, D., SCHMITT, M., LOSKYLL, M. Y ZÜHLKE, D. (2014). "Human-machine-interaction in the industry 4.0 era", 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN), pp. 289-294.

- GUBBI, J., BUYYA, R., MARUSIC, S. Y PALANISWAMI, M. (2013). "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions", *Future Generation Computer Systems*, vol. 29, N° 7, pp. 1645-1660.
- GUTARRA, R. Y VALENTE, A. (2018). "Las mipymes tecnológicas peruanas al 2030. Estrategias para su inserción a la industria 4.0", *Nova Scientia*, vol. 10, N° 20.
- HODGSON, G. (1998). "The approach of institutional economics", *Journal of Economic Literature*, vol. 36, N° 1, pp. 166-192.
- JENSEN, M., JOHNSON, B., LORENZ, E. Y LUNDVALL, B.-Å. (2005). "Forms of knowledge, modes of innovation and innovation systems", Globelics Conference, Beijing, septiembre.
- KAGERMANN, H., HELBIG, J., HELLINGER, A. Y WAHLSTER, W. (2013). "Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0, Securing the future of German manufacturing industry", final report of the Industrie 4.0, Berlín, Forschungsunion.
- KATAISHI, R. Y BARLETTA, F. (2013). "Difusión de las TIC en el tejido productivo argentino: una revisión de la evidencia disponible", en Novick, M. y Rotondo, S. (comps.) (2013). *El desafío de las TIC en Argentina. Crear capacidades para la generación de empleo*. Santiago de Chile: CEPAL/Unión Europea/Ministerio de Trabajo.
- KATZ, J. (1984). "Domestic Technological Innovations and Dynamic Comparative Advantage: Further Reflexions on a Comparative Case-Study Program", *Journal of Development Studies*, vol. 16, pp. 13-38.
- (2016). "Sistemas de innovación y lo macro y micro de crecer en base a recursos naturales", en Erbes, A. y Suárez, D. (eds.), *Repensando el desarrollo latinoamericano. Una discusión desde los sistemas de innovación*. Buenos Aires: Ediciones UNGS.
- Y STUMPO, G. (2001). "Regímenes competitivos sectoriales, productividad y competitividad internacional", Documentos de Proyectos, Estudios e Investigaciones de la CEPAL. Disponible en <www.cepal.org/es/publicaciones/34834-regimenes-competitivos-sectoriales-productividad-competitividad-internacional>.
- KIM, L. (1997). *From Imitation to Innovation. The Dynamics of Korea's Technological Learning*. Boston: Harvard Business School Press.
- KIM, H. Y LASKOWSKI, M. (2018). "Toward an Ontology-Driven Blockchain Design for Supply Chain Provenance", *Intelligent Systems in Accounting, Finance and Management*, vol. 25, N° 1, pp. 18-27.

- KLINGENBERG, C. Y DO VALE ANTUNES JR, J. A. (2017). "Industry 4.0: What Makes it Revolution", *Inspiring Operations Management*, vol. 1, N° 5, Edinburgh.
- KODAMA, H. (1981a). "A Scheme for Three-Dimensional Display by Automatic Fabrication of Three-Dimensional Model", *IEICE Transactions on Electronics*, vol. J64-C, N° 4, edición japonesa, pp. 237-241.
- (1981b). "Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer", *Review of Scientific Instruments*, vol. 52, N° 11, pp. 1770-1773.
- KOTLER, P. (1989). "From mass marketing to mass customization", *Planning Review*, vol. 17, N° 5, pp. 10-47.
- KSHETRI, N. (2010). "Cloud computing in developing economies", *IEEE Computer*, vol. 43, N° 10, octubre, pp. 47-55.
- KUPFER, D. Y AVELLAR, A. (2008). "Appropriability gap and lack of cooperation: Evidences from the Brazilian Innovation Survey", trabajo presentado en la 12° Conferencia Internacional de la Sociedad Joseph A. Schumpeter, Río de Janeiro, 2-5 de julio.
- LANGLOIS, R. (2003). "The Vanishing Hand: The Changing Dynamics of Industrial Capitalism", *Industrial and Corporate Change*, vol. 12, N° 2, pp. 351-385.
- LASI, H., FETTKE, P. Y KEMPER, H. (2014a). "Industry 4.0, Application-Pull and Technology-Push as Driving Forces for the Fourth Industrial Revolution", *Business & Information Systems Engineering*, vol. 6, N° 4, pp. 239-242.
- , FETTKE, P., KEMPER, H-G., FELD, T. Y HOFFMANN, M. (2014b). "Industry 4.0", *Business & Information Systems Engineering*, vol. 6, N° 4, pp. 239-242.
- LASTRES, H. M. Y FERRAZ, J. C. (1999). "Economia da Informação, do Conhecimento e do Aprendizado", en Lastres, H. y Albagli, S. (orgs.), *Informação e globalização na era do conhecimento*. Río de Janeiro: Editora Campus.
- LAVARELLO, P., SILVA FAILDE, D. Y LANGARD, F. (2009). "La industria de maquinaria agrícola argentina: inserción heterogénea en tramas locales y redes globales", trabajo presentado en el 1° Congreso Anual de AEDA, Buenos Aires.
- LEE, E. (2008). "Cyber physical systems: Design challenges", trabajo presentado en el 11th IEEE Symposium on Object Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC), pp. 363-369.

- LEE, J., BAGHERI, B. Y KAO, H. (2015). "A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems", *Manufacturing Letters*, vol. 3, enero, pp.18-23.
- LEE, K. (2013). "Schumpeterian Analysis of Economic Catch-Up: Knowledge, Path-creation, and the Middle-income Trap", Cambridge University Press.
- Y MALERBA, F. (2017). "Catch-up cycles and changes in industrial leadership: Windows of opportunity and responses of firms and countries in the evolution of sectoral systems", *Research Policy*, vol. 46, N° 2, pp.338-351.
- LEE, K., WONG, C. Y., INTARAKUMNERD, P. Y LIMAPORNVANICH, C. (2018). "Is the Fourth Industrial Revolution a Window of Opportunity for Upgrading or Reinforcing the Middle-Income Trap", *work in progress*.
- LEONARD-BARTON, D. (1992). "Core Capabilities and Core Rigidities: A Paradox in Managing New Product Development", *Strategic Management Journal*, vol. 13, número especial: Strategy Process: Managing Corporate Self-Renewal, pp. 111-125.
- (1995). "A Dual Methodology for Cases Studies", en Huber, G. y Van de Ven, A. H. (eds.), *Longitudinal Field Research Methods*. California: Sage Publications, pp. 38-64.
- LI, L. (2018). "China's manufacturing locus in 2025: With a comparison of 'Made-in-China 2025' and 'Industry 4.0'", *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 135, pp. 66-74.
- LICKLIDER, J. C. R. (1963). "Memorandum for Members and Affiliates of the Intergalactic Computer Network", ARPA, 23 de abril.
- LINTELMAN, S., SAMPIGETHAYA, K., LI, M., POOVENDRAN, R. Y ROBINSON, R. (2008). "High assurance aerospace CPS and implications for automotive industry", National Workshop on High Confidence Automotive Cyber-Physical Systems.
- LOEFFLER, C. E. (1993). "Distributed Virtual Reality: Applications for Education, Entertainment and Industry", *Teletronikk*, vol. 89, pp. 83-93.
- LOPES DE SOUSA JABBOUR, A. B., CHIAPPETTA JABBOUR, C. H. Y GODINHO FILHO, M. (2018). "When titans meet – Can industry 4.0 revolutionise the environmentally-sustainable manufacturing wave? The role of critical success factors", *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 132, julio, pp.18-25.
- LOW, C., CHEN, Y. Y WU, M. (2011). "Understanding the determinants of *cloud computing* adoption", *Industrial Management & Data Systems*, vol. 111, N° 7, pp.1006-1023.

- MALERBA, F. (2002). "Sectoral systems of innovation and production", *Research Policy*, vol. 31, N° 2, pp. 247-264.
- (2005). "Sectoral Systems: How and Why Innovation Differs across Sectors", en Fagerberg, J., Mowery, D. C. y Nelson, R. R. (eds.), *The Oxford Handbook of Innovation*, cap. 14, pp. 380-406.
- Y ORSENIGO, L. (2000). "Knowledge, Innovative Activities and Industrial Evolution", *Industrial and Corporate Change*, vol. 9, N° 2, pp. 289-313.
- MAJUMDAR, M. C., MAJUMDAR, D., SACKETT, J. I. Y AMERICAN NUCLEAR SOCIETY (1988). *Artificial Intelligence and Other Innovative Computer Applications in the Nuclear Industry*. Nueva York: Plenum Press.
- MALERBA, F. (2002). "Sectoral systems of innovation and production", *Research Policy*, vol. 31, N° 2, pp. 247-264.
- MATHEWS, J. A. (2002). "An evolutionary theory of the economy as a whole: Reflections on Schumpeter's 'lost' seventh chapter to The Theory of Economic Development", *Industry and Innovation*, vol. 9, N°s 1-2, marzo, pp. 93-145.
- MCCARTHY, J., MINSKY, M., ROCHESTER, N. Y SHANNON, C. (1955). "Proposal for the 1956 Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence", Dartmouth College, Hanover.
- METCALFE, J. S. (2010). "Dancing in the dark: la disputa sobre el concepto de competencia", *Desarrollo Económico. Revista de Ciencias Sociales*, vol. 50, N° 197, abril-junio, Buenos Aires, ides, pp. 59-79.
- MINCYT (2018). "Glosario de industria 4.0", Proyecto Antena Tecnológica, MINCYT.
- MOCHI, S. (2017). "Evolución de las capacidades tecnológicas, los vínculos territoriales y las políticas de innovación. El caso de empresas argentinas de maquinaria agrícola", tesis doctoral, Madrid, Universidad Autónoma de Madrid, Universidad Complutense y Universidad Politécnica de Madrid.
- MOLINA, M., ROTONDO, S. Y YOGUEL, G. (2013). "El impacto de las TIC en la productividad del trabajo: algunos indicios para las pyme del sector manufacturero argentino", en Novick, M. y Rotondo, S. (comps.) (2013). *El desafío de las TIC en Argentina. Crear capacidades para la generación de empleo*. Santiago de Chile: CEPAL/Unión Europea/Ministerio de Trabajo.
- MONCAUT, N., ROBERT, V. Y YOGUEL, G. (2017). "Modalidades de inserción en cadenas globales de valor. Tres casos de estudio en pymes argentinas del sector de software y servicios informáticos", *Pymes, Innovación y Desarrollo*, vol. 5, N° 3, pp. 3-22.

- MONOSTORI, L. (2014). "Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges", *Procedia CIRP*, vol. 17, pp. 9-13.
- MURO, M., ROTHWELL, J., ANDES, S., FIKRI, K. Y KULKARNI, S. (2015). "Americas's advanced industries", Washington, The Brookings Institution.
- NAKAMOTO, S. (2008). "Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System".
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1998). "Managing Speed: Review of Current Practice for Setting and Enforcing Speed Limits", Transportation Research Board Special Report 254, Committee for Guidance on Setting and Enforcing Speed Limits.
- NEGRI, E., FUMAGALLI, L. Y MACCHI, M. (2017). "A Review of the Roles of Digital Twin in SCF-based Production Systems", *Procedia Manufacturing*, vol. 11, pp. 939-948.
- NELSON, R. Y SAMPAT, B. (2001). "Las instituciones como factor que regula el desempeño económico", *Revista de Economía Institucional*, vol. 3, N° 5, pp. 17-51.
- NELSON, R. Y WINTER, S. (1982). *An Evolutionary Theory of Economic Change*. Cambridge: Harvard University Press.
- NOVICK, M. (1999). "La organización del trabajo en América Latina", en De la Garza, E. (comp.), *Sociología del Trabajo en América Latina*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Y GALLART, A. (1997). *Competitividad, redes productivas y competencias laborales*. Montevideo: Cinterfor/OIT/RET.
- NOVICK, M., BREARD, G. Y ROTONDO, S. (2013). "ICT Adoption, Capabilities Development and Innovation Processes in Argentina: An Employment Approach", *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development*, vol. 5, N° 1, pp. 519-529.
- NOVICK, M. Y ROTONDO, S. (COMPS.) (2013). *El desafío de las TIC en Argentina. Crear capacidades para la generación de empleo*. Santiago de Chile: CEPAL/Unión Europea/Ministerio de Trabajo.
- Y YOGUEL, G. (2013). "Cambio estructural, conductas tecnológicas y empleo. El tránsito hacia un estudio más complejo de las TIC en la Argentina", en Novick, M. y Rotondo, S. (comps.) (2013), *El desafío de las TIC en Argentina. Crear capacidades para la generación de empleo*. Santiago de Chile: cepal/Unión Europea/Ministerio de Trabajo.
- NOVICK, M., YOGUEL, G., CATALANO, A. Y ALBORNOZ, F. (2001). "New configurations in the Argentine automobile industry: the tension between production and business strategies", *Gerpisa, Neuvième rencontre internationale: les reconfigurations de l'industrie automobile: alliances, cession, fusion acquisition, partenariats, scission*, París, junio.

- OBAYA, M. (2014). "Technological trajectories in peripheral integration processes. The case of multinational companies in the MERCOSUR automotive space", tesis doctoral, Monash University Faculty of Arts.
- , ROBERT, V., LERENA, O. Y YOGUEL, G. (2019). "Dynamic capabilities in the software and information services industry. A case-study analysis in Argentina from a business model perspective", *Innovation and Development*, pp. 1-28.
- OLIVÁN CORTÉS, R. (2016). "La Cuarta Revolución Industrial, un relato desde el materialismo cultural", *Revista de Estudios Urbanos y Ciencias Sociales*, vol. 6, N° 2, pp. 101-111.
- PARKS, J. Y BELL, D. (1970). "Industrial robots and machine intelligence", *Physics Bulletin*, vol. 21, N° 12, p. 549.
- PAVITT, K. (1984). "Sectoral patterns of technical change: towards a taxonomy and a theory", *Research Policy*, vol. 13, N° 6, pp. 343-373.
- PEASE, W. (1952). "An automatic machine tool", *Scientific American*, vol. 187, N° 3, pp. 101-115.
- PEIRANO, F. Y SUÁREZ, D. (2005). "Las TICs mejoran el desempeño de las PYMES. ¿Somos capaces de explicar cómo lo hacen?", Documento de Trabajo N° 23, Centro REDES.
- (2006). "TICS y empresas: propuestas conceptuales para la generación de indicadores para la sociedad de la información", *Journal of Information Systems and Technology Management*, vol. 3, N° 2, pp. 123-142.
- PÉREZ, C. (2001). "Cambio tecnológico y oportunidades de desarrollo como blanco móvil", *Revista de la CEPAL*, vol. 75, pp. 115-136.
- (2008). "Dinámica de la innovación y oportunidades de crecimiento", Conferencia Magistral, Congreso Sistemas de Innovación para la Competitividad.
- (2009a). "The double bubble at the turn of the century: technological roots and structural implications", *Cambridge Journal of Economics*, vol. 33, N° 4, pp. 779-805.
- (2009b). "Technological revolutions and techno-economic paradigms", Working Paper N° 20, Technology Governance and Economic Dynamics.
- (2018). "Las raíces tecnológicas y las consecuencias estructurales de la 'doble burbuja' en el cambio de siglo", *Cuadernos del Cendes*, año 35, N° 98, pp. 1-37.

- Y SOETE, L. (1988). "Catching Up in Technology: Entry Barriers and Windows of Opportunity", en Dosi, G., Freeman, C., Nelson, R. y Soete, L. (eds.), *Technical Change and Economic Theory*. Londres: Francis Pinter.
- PERES NÚÑEZ, W. Y HILBERT, M. R. (EDS.) (2009). *La sociedad de la información en América Latina y el Caribe: desarrollo de las tecnologías y tecnologías para el desarrollo*, N° 98, Libros de la CEPAL.
- PFEIFFER, S. (2017). "The Vision of 'Industrie 4.0' in the Making – a Case of Future Told, Tamed, and Traded", *NanoEthics*, vol. 11, N° 1, enero, pp. 107-121. Disponible en <<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11569-016-0280-3>>.
- RAMOS, C., HERRERO, J., MARTÍNEZ, M. Y BLASCO, X. (2001). "Internet en el desarrollo de prácticas no presenciales con procesos industriales", EIWISA.
- RATNER, B. (2003). *Statistical Modeling and Analysis for Database Marketing: Effective Techniques for Mining Big Data*. Chapman & Hall/CRC.
- REINERT, E. S. (2002). "Schumpeter in the context of two canons of economic thought", *Industry and Innovation*, vol. 9, N°s 1-2, pp. 23-39.
- (2007). *How Rich Countries Got Rich and Why Poor Countries Stay Poor*. Londres: Constable & Company Limited.
- REISCHAUER, G. (2018). "Industry 4.0 as policy-driven discourse to institutionalize systemic innovation in manufacturing", *Academy of Management Proceedings*, vol. 2018, N° 1, agosto.
- RENAUDIN, C., BARBIER, B., RORIZ, R., REVEL, D. Y AMIEL, M. (1994). "Coronary arteries: new design for three-dimensional arterial phantoms", *Radiology*, vol. 190, N° 2, pp. 579-582.
- RIVAS, D. Y STUMPO, G. (2013). "Las TIC en el tejido productivo de América Latina", en Novick, M. y Rotondo, S. (comps.) (2013), *El desafío de las TIC en Argentina. Crear capacidades para la generación de empleo*. Santiago de Chile: CEPAL/Unión Europea/Ministerio de Trabajo.
- RIVERA RÍOS, M. A., LUJANO LÓPEZ, J. B. Y GARCÍA VEIGA, J. (2018). "The fifth global Kondratiev: low economic performance, instability and monopolization in the digital age", *Marketing and Management of Innovations*, N° 2, pp. 270-291. Disponible en <<http://doi.org/10.21272/mmi.2018.2-22>>.
- ROBERT, V. Y YOGUEL, G. (2010). "La dinámica compleja de la innovación y el desarrollo económico", *Desarrollo Económico*, vol. 50, N° 199, octubre-diciembre, Buenos Aires, IDES, pp. 423-453.

- ROTONDO, S., BREAD, G. Y YOGUEL, G. (2013). "Uso y difusión de las TIC en el tejido empresarial argentino: resultados de una encuesta en los sectores de la industria, el comercio y los servicios", en Novick y Rotondo (eds.), *El desafío de las TIC en Argentina. Crear capacidades para la generación de empleo*. Santiago de Chile: CEPAL/Unión Europea/Ministerio de Trabajo.
- RÜßMANN, M., LORENZ, M., GERBERT, P., WALDNER, M., JUSTUS, J., ENGEL, P. Y HARNISCH, M. (2015). "Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries", Boston Consulting Group 9.
- SAVIOTTI, P. Y PYKA, A. (2004). "Economic development by the creation of new sectors", *Journal of Evolutionary Economics*, vol. 14, pp. 1-35.
- SCHEER, A. (2015). "Industry 4.0: from vision to implementation", Whitepaper N° 9, septiembre, Scheer/AWSI.
- SCHOFIELD, D., DENBY, B. Y McCLARNON, D. (1995). "Computer graphics and virtual reality in the mining industry", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, vol. 4, N° 32, p. 167A.
- SCHUMPETER, J. A. (1934). *Teoría del desarrollo económico*. México: Fondo de Cultura Económica.
- (1939). *Business Cycles: A Theoretical, Historical, and Statistical Analysis of the Capitalist Process*. Nueva York/Londres: McGraw-Hill.
- (1942). *Capitalism, Socialism and Democracy*. Nueva York: Harper and Row.
- (1947). "The Creative Response in Economic History", *The Journal of Economic History*, vol. 7, N° 2. Disponible en <<https://doi.org/10.1017/S0022050700054279>>.
- SHERRARD, D. Y NARAYANAN, M. (1994). "The aid of virtual reality in the industry", Proceedings of WESCON, IEEE, pp. 374-377.
- SHUBIK, M. (1960). "Simulation of the Industry and the Firm", *The American Economic Review*, vol. 50, N° 5, pp. 908-919.
- SMITH, A. (1983) [1776]. *Investigación sobre la Naturaleza y Causa de la Riqueza de las Naciones*. España: Hyspamérica.
- SÖDERBERG, J. (2013). "Automating amateurs in the 3D printing community: Connecting the dots between 'deskilling' and 'user-friendliness'", *Work Organisation, Labour and Globalisation*, vol. 7, N° 1, pp. 124-139.

- SOMMER, L. (2015). "Industrial revolution - industry 4.0: Are German manufacturing SMEs the first victims of this revolution?", *Journal of Industrial Engineering and Management*, vol. 8, N° 5, pp. 1512-1532.
- STANLEY, M. (1989). "From 'future perfect': Mass customizing", *Planning Review*, vol. 17, N° 2, pp. 16-21.
- STEIN, J. (2017). "The political imaginaries of 3D printing: Prompting *mainstream* awareness of design and making", *Design and Culture*, vol. 9, N° 1, pp. 3-27.
- STOCK, T. Y SELIGER, G. (2016). "Opportunities of sustainable manufacturing in industry 4.0", *Procedia CIRP*, vol. 40, pp. 536-541.
- STRANGE, R. Y ZUCHELLA, A. (2017). "Industry 4.0, global value chains and international business", *Multinational Business Review*, vol. 25, N° 3, pp. 174-184. Disponible en <<https://doi.org/10.1108/MBR-05-2017-0028>>.
- SURESH, P., DANIEL, J. V., PARTHASARATHY, V. Y ASWATHY, R. (2014). "A state of the art review on the Internet of Things (IoT) history, technology and fields of deployment", International Conference on Science Engineering and Management Research (ICSEMR), Chennai, 27-29 de noviembre, pp. 1-8.
- SUTHERLAND, I. E. (1965). "The ultimate display. Multimedia: From Wagner to virtual reality", *Proceedings of the IFIP Congress*, pp. 506-508.
- SZALAVETZ, A. (2019), "Industry 4.0 and capability development in manufacturing subsidiaries", *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 145, agosto, pp. 384-395. Disponible en <<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.06.027>>.
- TADEU LIMA, G. (1995). "Development, technological change and innovation, Schumpeter and neo-Schumpeterians", *Texto para Discussão*, N° 51, diciembre, FGV EAESP.
- TAYLOR, G. P. (1938). "An automatic block-setting crane", *Meccano Magazine*, vol. 23, N° 3, p. 172.
- TEECE, D. J. (1992). "Competition, cooperation, and innovation: Organizational arrangements for regimes of rapid technological progress", *Journal of Economic Behavior & Organization*, vol. 18, N° 1, pp. 1-25.
- (2004). "Knowledge and competence as strategic assets", *Handbook on Knowledge Management*, vol. 1, Berlín/Heidelberg, Springer, pp. 129-152.
- , PISANO, G. Y SHUEN, A. (1997). "Dynamic capabilities and strategic management", *Strategic Management Journal*, vol. 18, N° 7, pp. 509-533.

- TIAN, F. (2016). "An agri-food supply chain traceability system for China based on RFID & blockchain technology", 13th International Conference on IEEE Service Systems and Service Management (ICSSSM), Kunming, China, 24-26 de junio, pp. 1-6.
- TRÄSKBÄCK, M. Y HALLER, M. (2004). "Mixed reality training application for an oil refinery: user requirements", ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual Reality Continuum and its Applications in Industry, pp. 324-327.
- TRIPPI, R. Y TURBAN, E. (1992). *Neural Networks in Finance and Investing: Using Artificial Intelligence to Improve Real World Performance*. Nueva York: McGraw-Hill.
- TUEGEL, E. (2012). "The airframe digital twin: some challenges to realization", 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA, p. 1812.
- TURING, A. (1956). *Can a machine think?*, *The World of Mathematics*, vol. 4. Nueva York: Simon and Schuster.
- UTTERBACK, J. (1994). *Mastering the Dynamics of Innovation: How Companies Can Seize Opportunities in the Face of Technological Change*. Boston: Harvard Business School Press.
- VAN KREVELEN, D. Y POELMAN, R. (2010). "A survey of augmented reality technologies, applications and limitations", *International Journal of Virtual Reality*, vol. 9, N° 2, p. 1.
- WANG, T., YU, J., SIEGEL, D. Y LEE, J. (2008). "A similarity-based prognostics approach for remaining useful life estimation of engineered systems", International Conference on Prognostics and Health Management (PHM), IEEE, pp. 1-6.
- WESTPHAL, L., KIM, L. Y DAHLMAN, C. (1985). "Reflections on the Republic of Korea's Acquisition of Technological Capability", en Rosenberg, N. y Frischtak, C. (eds.), *International Technology*. Nueva York: Praeger Publishers, pp. 167-221.
- WINSTON, P. H. Y PRENDERGAST, K. A. (1984). *The AI business: commercial uses of artificial intelligence*. Cambridge: MIT Press.
- WRIGHT, R. (1987). "Virtual reality", *The Sciences*, vol. 27, N° 6, pp. 8-10.
- YOGUEL, G., NOVICK, M., BORELLO, J., ROITTER, S. Y MILESI, D. (2004). "Información y conocimiento: la difusión de las TIC en la industria manufacturera", *Revista de la CEPAL*, N° 82, pp. 139-156.
- ZAMFIRESCU, C., PIRVU, B., SCHLICK, J. Y ZUEHLKE, D. (2013). "Preliminary insides for an anthropocentric cyber-physical reference architecture of the smart factory", *Studies in Informatics and Control*, vol. 22, N° 3, pp. 269-278.



CIECTI 2019

DT 17

CRISTIAN BRIXNER es licenciado en Economía Política por la Universidad Nacional de General Sarmiento (UNGS). Es maestrando en la Maestría en Desarrollo Económico por la Universidad Nacional de San Martín. Su área de investigación se circunscribe a los tópicos de la economía de la innovación. Actualmente es parte del cuerpo de investigadores-docentes de la Universidad Nacional de Tierra del Fuego como profesor asistente en las materias de Comercio Internacional, Econometría y Matemática para Economistas.

PAULA ISAAK es licenciada en Economía por la Universidad Nacional de Buenos Aires (UBA), con una Maestría en Economía Política por la Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales. Se desempeña profesionalmente en el ámbito público y en organismos internacionales. Posee amplia experiencia en el ámbito de Políticas de Ciencia, Tecnología e Innovación, con fuerte orientación analítica y experticia en la generación y el análisis de información.

SILVINA MOCHI es doctora en Economía y Gestión de la Innovación (Universidad Autónoma de Madrid), magíster en Política y Gestión en Ciencia y Tecnología (UBA) y licenciada en Economía (UBA). Actualmente trabaja en la Dirección Nacional de Estudios (Subsecretaría de Estudios y Prospectiva-MECCYT); es docente de grado y posgrado de la UBA y Universidad Nacional Arturo Jauretche. Fue coordinadora académica de la Maestría en Política y Gestión en Ciencia y Tecnología (UBA) y asesora técnica en la Subsecretaría de Políticas en CTI de MINCYT. Ha trabajado en la coordinación de líneas de financiamiento para proyectos de *clusters* en el Fondo Tecnológico Argentino (FONTAR-ANPCYT) y como consultora-facilitadora en Unidad para el Cambio Rural (PROSAP-SAGYP).

MAXIMILIANO OZONO es licenciado en Economía Industrial por la UNGS y maestrando en Ciencia, Tecnología y Sociedad por la Universidad Nacional de Quilmes. Se desempeña como investigador-docente en el Instituto de Industria de la UNGS en el área de Administración. Sus temas de investigación son aprendizaje organizacional y comunidades de práctica físicas y virtuales en nuevas tecnologías, gestión del desarrollo tecnológico, entre los más relevantes.

GABRIEL YOGUEL es docente-investigador titular de la UNGS y coordinador del Área de Economía del Conocimiento de esa universidad. Forma parte del CIECTI y posee una muy importante trayectoria en investigación en temáticas de economía de la innovación y sistemas complejos. En ese campo es autor de numerosas publicaciones en revistas nacionales e internacionales y de varios libros.

