



Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Instituto de Ciencias Sociales y Administración

Departamento de Ciencias Administrativas

Doctorado en Ciencias Administrativas

**“La adopción de la Industria 4.0 en Ciudad Juárez
y su impacto sobre las empresas de manufactura y
sus trabajadores”**

Tesis para obtener el grado de
Doctor en Ciencias Administrativas

Mtro. Eduardo Arriola Ruiz

“Becado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología”

Bajo la Dirección del
Dr. Ricardo Melgoza Ramos
la Codirección de la
Dra. Blanca Lidia Márquez Miramontes
y la Codirección del
Dr. Jorge Héctor Carrillo Viveros

Ciudad Juárez Chihuahua, junio de 2022

Agradecimientos

Agradezco a mi director académico, el Dr. Ricardo Melgoza Ramos por sus invaluables consejos y asesoramiento durante la elaboración de esta investigación, así como por sus importantes contribuciones en mi formación académica. A mi director externo, el Dr. Jorge Héctor Carrillo Viveros por su constante apoyo y ayuda durante la planeación y redacción del presente documento. A mi codirectora, la Dra. Blanca Lidia Marquez Miramontes por sus importantes observaciones. A mis lectores, el Dr. Francisco Bribiescas Silva y el Dr. Emmanuel García Uribe por sus acertados comentarios y sugerencias a lo largo de este complicado proceso.

A la Dra. Laura Elizabeth Cervantes Benavides, coordinadora del programa de Doctorado en Ciencias Administrativas por sus atenciones y participación en las actividades del doctorado. A la Dra. Aurora Irma Máynez Guaderrama por su ayuda en el diseño del modelo de ecuaciones estructurales, así como sus valiosas sugerencias y comentarios.

Quisiera agradecer a mis compañeros de clase por el apoyo moral, la necesaria distracción, el compañerismo y solidaridad que tuvieron conmigo y entre sí a lo largo de estos tres años. Al departamento del Doctorado en Ciencias Administrativas por su disponibilidad y constante soporte durante los procesos administrativos que se llevaron a cabo durante la elaboración de esta obra.

Agradezco a CONACYT por el apoyo económico que me brindó durante mis estudios de posgrado, así como a la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez por el apoyo de la beca institucional.

Por último quisiera agradecer a mi madre Mónica, a mi padre Mario y a mi hermano Luis por su constante e incondicional apoyo.

La adopción de la Industria 4.0 en Ciudad Juárez y su impacto sobre las empresas de manufactura y sus trabajadores

Eduardo Arriola Ruiz

Resumen

Objetivos: este estudio analiza la situación actual en Ciudad Juárez sobre conocimiento e implementación de tecnologías de la Industria 4.0 y examina la relación que tiene el nivel de conocimiento e implementación de tecnologías de la I4.0 con la eficiencia productiva de las empresas y el bienestar de los trabajadores.

Diseño metodológico: se aplicó un instrumento de medición a 192 trabajadores cualificados de las empresas maquiladoras de Ciudad Juárez, Chihuahua. Se analiza y compara la opinión de estos sobre su conocimiento de 18 tecnologías vinculadas con la I4.0 y su nivel de implementación en las empresas donde laboran. Después, a través de un Modelo de Ecuaciones Estructurales (PLS-SEM) se evaluaron las relaciones entre las variables estudiadas.

Resultados: en general, las empresas maquiladoras de Ciudad Juárez y sus trabajadores, tienen bajos niveles de implementación y conocimiento de la I4.0. Asimismo, el nivel de implementación de la I4.0 está relacionado positivamente con: (1) el nivel de conocimiento de la I4.0, (2) el nivel de eficiencia productiva de las empresas y (3) el nivel salarial y de prestaciones de los trabajadores. El nivel de conocimiento de la I4.0 está relacionado de forma positiva con el nivel de sobrecarga laboral. El nivel de salarios y prestaciones de los trabajadores, así como el nivel de sobrecarga laboral que experimentan están relacionado positivamente con la eficiencia productiva de las empresas.

Limitaciones de la investigación: El cuestionario se administró a través de correo electrónico y redes sociales durante la pandemia de COVID-19. La decisión de los trabajadores de participar o no en la encuesta puede significar limitaciones relacionadas con el sesgo de selección y, en consecuencia, de validez interna. El instrumento de medición utilizado estima la percepción de los trabajadores acerca de las seis variables utilizadas para el análisis. Es por ello, que las respuestas obtenidas constituyen la opinión de los encuestados.

Hallazgos: a pesar de que Ciudad Juárez se encuentra en primera fila en la adopción de la I4.0, los trabajadores de sus maquiladoras aún están lejos de poseer las cualificaciones necesarias para dominar por completo todos los aspectos que componen a la I4.0. Además, las empresas presentan importantes retrasos en la implementación de la I4.0. Por otro lado, se encontró que los trabajadores con alto nivel de conocimiento de la I4.0 tienden a tener un nivel alto de salarios, un nivel alto de sobrecarga laboral y tienden a trabajar en grandes empresas con niveles relativamente altos de implementación de tecnologías de la I4.0. Por otro lado, se identificó que las empresas de Ciudad Juárez son capaces beneficiarse de la reducción de costos y los aumentos en la productividad derivados de la implementación de las tecnologías de la I4.0, así como de la sobreexplotación de los empleados cualificados que son capaces de dominar dichas tecnologías.

Palabras clave Industria 4.0, implementación, conocimiento, maquila, Ciudad Juárez.

Índice general

1. Introducción	14
1.1. Distribución capitular	18
2. Análisis estructural y conceptual de los elementos de la Industria	
4.0	20
2.1. Industria 4.0: Una definición	21
2.2. La evolución de la definición de I4.0	22
2.2.1. Conectividad y Sistemas Ciber-Físicos (2014)	23
2.2.2. La fábrica inteligente (2015)	23
2.2.3. La integración tecnológica (2016)	25
2.2.4. La personalización de la producción (2017)	27
2.2.5. La digitalización de la producción (2018)	27
2.2.6. Nuevo paradigma industrial (2019)	29
2.2.7. Sistemas productivos autónomos (2020)	30
2.2.8. Enfoque holístico de la I4.0 (2021)	31
2.3. Pilares de la Industria 4.0	32
2.3.1. La interconectividad	33
2.3.2. La digitalización	34

2.3.3.	Las tecnologías de la información (TIC)	34
2.3.4.	La simulación	35
2.3.5.	La automatización	36
2.3.6.	Sustentabilidad	36
2.3.7.	La Autonomía	37
2.3.8.	Personalización	37
2.3.9.	Logística	38
2.3.10.	Consideraciones adicionales	38
2.4.	Tecnologías de la Industria 4.0	41
2.4.1.	Sistemas Ciber-Físicos	41
2.4.2.	Internet de las Cosas	41
2.4.3.	Computación en la nube	42
2.4.4.	Análisis masivo de datos (Big Data)	42
2.4.5.	Inteligencia artificial (IA)	43
2.4.6.	Gemelo digital	44
2.4.7.	Impresión habilitada	44
2.4.8.	Integración Horizontal y vertical	45
2.4.9.	Ciberseguridad	45
2.4.10.	Robots	46
2.4.11.	Aprendizaje de máquina (Machine Learning)	47
2.4.12.	Tecnologías de virtualización	48
2.4.13.	Otras técnicas relacionadas con la I4.0	50

3. La Industria 4.0 y sus efectos sobre el trabajo humano y sus empresas **52**

3.1.	Las revoluciones industriales	53
------	-------------------------------	----

3.1.1.	Primera revolución industrial	53
3.1.2.	Segunda revolución industrial	54
3.1.3.	Tercera revolución industrial	55
3.1.4.	Cuarta revolución industrial	56
3.2.	Perspectivas de la I4.0 y su impacto sobre las empresas y sus trabajadores	58
3.2.1.	Aspectos positivos de la Industria 4.0	59
3.2.2.	Aspectos negativos de la I4.0	63
3.3.	Perfil de los trabajadores del futuro	75
3.4.	Desafíos de la Industria 4.0	77
3.5.	La Industria 4.0 en México	79
4.	Medición de la Industria 4.0	83
4.1.	Medición de la Industria 4.0	84
4.1.1.	Índices de preparación	84
4.1.2.	Modelos de Madurez	85
4.1.3.	Consideraciones acerca del nivel de conocimiento de la Industria 4.0	88
4.1.4.	Consideraciones acerca del nivel de implementación de la Industria 4.0	90
4.2.	Medición de la Industria 4.0 en México	91
5.	Metodología	98
5.1.	Objetivos de investigación	99
5.1.1.	Objetivos generales	99
5.1.2.	Objetivos específicos	99
5.1.3.	Preguntas de investigación	100

5.1.4. Hipótesis de investigación	100
5.2. Diseño metodológico	107
6. Resultados	116
6.1. Estimación del nivel de conocimiento, implementación de tecnologías asociadas con la Industria 4.0	117
6.2. Modelo de ecuaciones estructurales (PLS-SEM)	119
6.2.1. Modelo de medición	120
6.2.2. Modelo estructural	123
7. Conclusiones	129
7.1. Principales hallazgos	130
7.2. Conclusiones generales	130
7.3. Conclusiones acerca de la implementación de la Industria 4.0 y el bienestar de los trabajadores	132
7.4. Conclusiones acerca de la implementación de la I4.0 y la eficiencia productiva de la empresa	136
7.5. Limitaciones de la investigación	138
Bibliografía	138
A. Estadísticos descriptivos del instrumento de medición	154
B. Efectos percibidos de la implementación de la Industria 4.0 en las maquiladoras	158
C. Percepción del salario y las prestaciones recibidas	162
D. Carga laboral percibida	165

E. Correlaciones entre las variables del instrumento de medición	168
F. Estadísticos descriptivos acerca del conocimiento e implementación de la I4.0	172
F.1. Nivel de implementación de la I4.0 por área de la empresa	172
F.2. Nivel de conocimiento, implementación e intención de implementación de la Industria 4.0 por trabajador encuestado	173
F.3. Nivel de conocimiento, implementación e intención de implementación de la I4.0 por sector industrial	175
F.4. Nivel de conocimiento de la I4.0 por tecnología	177
F.5. Nivel de implementación de la I4.0 por tecnología	179
F.6. Nivel de conocimiento e implementación de la I4.0 por tecnología	181
F.7. Nivel de conocimiento de la I4.0 por sector industrial	181
F.8. Nivel de implementación de la I4.0 por sector industrial	183
F.9. Nivel de conocimiento de la I4.0 por tecnología y sector	185
F.10. Nivel de implementación de la I4.0 por tecnología y sector	188
G. Clasificación de tecnologías de acuerdo a los niveles de complejidad para el usuario y novedad industrial	191

Índice de figuras

3.1. Polarización laboral: cambios en los porcentajes de horas trabajadas en el periodo 1993-2010 para ocupaciones de alta, mediana y baja remuneración.	72
6.1. Modelo contrastado	124
A.1. Población por sexo	154
A.2. Población por grupos quinquenales	155
A.3. Población por puesto	156
A.4. Número de empleados ocupados por planta maquiladora	157
D.1. Carga laboral por ítem	166
F.1. Gráficas radiales del conocimiento, implementación e intención de implementación de la industria 4.0 por sector maquilador	177
F.2. Nivel de conocimiento e implementación de la I4.0 por tecnología	181
F.3. Nivel de conocimiento de la I4.0 en las empresas	183
F.4. Nivel de implementación de la I4.0 en las empresas	185
F.5. Gráficas radiales del conocimiento de la industria 4.0 por tecnología y sector	187

F.6. Gráficas radiales de la implementación de la industria 4.0 por tecnología y sector	189
---	-----

Índice de tablas

2.1. Tecnologías y características encontradas a través del análisis de las definiciones de I4.0.	22
4.1. Principales índices de preparación (Readiness Indexes).	85
4.2. Modelos de Madurez	87
4.3. Clasificación de plantas maquiladoras de acuerdo con su tipo, generación, características y proporción del total de la muestra	94
5.1. Variables, número de ítems, escalas y fuentes de los ítems	108
5.2. Estadísticos descriptivos.	110
5.3. Estadísticos descriptivos del modelo de medición	111
6.1. Pruebas de hipótesis con respecto a los niveles de conocimiento e implementación de tecnologías de la I4.0.	118
6.2. Relaciones planteadas y signos esperados	120
6.3. Cargas factoriales y valores t	121
6.4. Indicadores de validez convergente del modelo de medición	122
6.5. Criterios de validez discriminante	123
6.6. Pruebas de hipótesis correlacionales con respecto a las relaciones estructurales del modelo PLS	125

6.7. Efectos mediados estadísticamente significativos	126
B.1. Percepción de los efectos que tiene la implementación de las tecnologías 4.0 en las maquiladoras	159
B.2. Percepción de los efectos que tiene la implementación de las tecnologías 4.0 en las maquiladoras por dimensión	159
B.3. Mediana de la percepción de los efectos que tiene la implementación de las tecnologías 4.0 en las maquiladoras por puesto	160
B.4. Reclasificación de los puestos reportados en la encuesta	161
C.1. Media de la percepción de los salarios y las prestaciones recibidas. . .	162
C.2. Mediana de la percepción de los salarios recibidos según el puesto del trabajador.	163
C.3. Mediana de la percepción de las prestaciones recibidas según el puesto del trabajador	164
D.1. Carga laboral por ítem	165
D.2. Carga laboral por sexo	167
D.3. Carga laboral por puesto	167
E.1. Correlaciones de Pearson del promedio de las variables de la encuesta	169
F.1. Implementación de la I4.0 por área	173
F.2. Conocimiento, implementación e intención de implementación de Industria 4.0 por trabajador encuestado	174
F.3. Promedio del conocimiento, implementación e intención de implementación de la Industria 4.0 por sector industrial	175
F.4. Mediana del conocimiento de tecnologías de la I4.0 por tecnología . .	178

F.5. Mediana de la implementación de tecnologías de la I4.0 por tecnología	180
F.6. Nivel de conocimiento de la I4.0 en las empresas	182
F.7. Nivel de implementación de la I4.0 en las empresas	184
F.8. Promedio de conocimiento por tecnología y por sector	186
F.9. Promedio de implementación por tecnología y por sector	188
G.1. Clasificación de tecnologías de acuerdo al tipo de tecnología, el nivel de complejidad para el usuario y el nivel de novedad industrial	192

Capítulo 1

Introducción

Chihuahua es un estado caracterizado por una extensa tradición industrial de más de 50 años, sus empresas producen cerca del 12 % del total de las exportaciones manufacturadas del país y la mayor parte de la producción de la entidad es realizada por las empresas maquiladoras de Ciudad Juárez, mismas que exportan mensualmente productos por un valor de más de 23 mil millones de dólares, representando cerca del 80 % de la producción del estado. En noviembre de 2021 operaban en la ciudad 322 empresas maquiladoras que empleaban a 327,253 trabajadores (Index Juárez, 2022). La industria de manufactura se ha caracterizado por la temprana adopción de tecnologías que le permiten obtener mejoras en términos de productividad y reducción de costos. En el presente, la tendencia de la industria radica en la transición del modelo productivo convencional a la Industria 4.0 (I4.0), también conocida como la *Cuarta Revolución Industrial*.

Este nuevo paradigma industrial consiste en la integración de sistemas cibernéticos y sistemas físicos, denominados Sistemas Ciber-Físicos (CPS, por sus siglas en inglés) en los procesos de manufactura (Arvind y Bourne, 2016), utiliza pero no se limita a tecnologías de robotización, digitalización, simulación, inteligencia artificial y recolección y análisis de datos; opera de forma auto-organizada y descentralizada, pero es habilitada por la conexión de todos los miembros de la cadena productiva gracias a las tecnologías de la información (Kinzel, 2017). Permite que las fábricas realicen los procesos productivos de forma inteligente generando economías de escala, habilita la producción flexible y mejora la eficiencia de los recursos (Wang y Wang, 2016), además, hace posible lograr niveles superiores de productividad a la vez que reduce los costos productivos (Martín, 2016; Sommer, 2015).

En contraste, es considerado por varios autores (Autor y Dorn, 2013; Benešová y Tupa, 2017; Bensusán Areous, Eichhorst, y Rodríguez, 2017; Carreón y Ramos, 2012; Cho y Kim, 2018; Eichhorst, 2017; Frey y Osborne, 2017; Pernías-Peco, 2017; Raj-

nai y Kocsis, 2017; Rodríguez, 2017; Ushakova, 2018) que el arribo de la I4.0 puede agudizar las dinámicas de sustitución laboral provocadas por la implementación de tecnologías capaces de sustituir la mano de obra humana por máquinas y robots competentes en la ejecución de las tareas más simples y repetitivas del proceso productivo. Adicionalmente, los avances en materia de digitalización, Inteligencia Artificial (AI, por sus siglas en inglés) y Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) permiten que las computadoras puedan desempeñar actividades administrativas y de logística al interior de las empresas (Ford, 2015; Frey y Osborne, 2017). En el presente contexto, autores como Bensusán Areous (2017), Bensusán Areous *et al.* (2017) y Frey y Osborne (2017) destacan que el desarrollo de estas tecnologías amenaza con la sustitución y/o deslocalización de labores de oficina que hasta años recientes eran consideradas difíciles de digitalizar.

Por otro lado, se considera que la I4.0 genera nuevos puestos de trabajo bien remunerados alrededor de las tecnologías que se relacionan con ella (Rajnai y Kocsis, 2017). También se ha señalado que, gracias a la reducción de las actividades intensivas en mano de obra, se abren las puertas a una mayor participación en el mercado laboral por parte de las mujeres (Raso-Delgue, 2018) y los adultos mayores (Magdalena y Ernst, 2016). Además, el *efecto democratizador* de las tecnologías permite que cualquier persona pueda acceder fácilmente a servicios de los que antes estaban excluidos los más pobres.

Mucho se ha escrito con relación al impacto que tiene la implementación de la I4.0 sobre el entorno laboral, sin embargo, la discusión en torno a este tema continúa abierta. Es en este sentido, que la presente investigación se enfoca en estudiar la implementación de la I4.0 y su impacto sobre las empresas maquiladoras y sus empleados en Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

Conviene señalar que a la fecha no se han publicado investigaciones de esta naturaleza para la región, y los estudios realizados para el caso mexicano son escasos. Es por ello, que los resultados derivados de este estudio configuran un primer acercamiento regional a la situación actual de entendimiento y uso de tecnologías asociadas a la I4.0. Asimismo, representan una aportación al avance del conocimiento sobre la I4.0 y su relación con las empresas y los trabajadores.

La investigación se realizó tomando como base el instrumento de medición elaborado por AXIS (2019), se toman en cuenta las variables de: (1) nivel de conocimiento de tecnologías asociadas con la I4.0, (2) nivel de implementación de tecnologías asociadas con la I4.0, (3) nivel de intención de implementación de tecnologías asociadas con la I4.0 y, (4) nivel de eficiencia productiva de las empresas. Adicionalmente, se añadieron ítems que estiman las variables de (5) percepción de la sobrecarga laboral de los trabajadores y, (6) la percepción del nivel salarial y de prestaciones de los trabajadores. Adicionalmente se modificó la escala de medición del instrumento para utilizar una escala Likert con cinco puntos de asignación de respuesta.

La encuesta se administró en línea a través de un cuestionario distribuido vía correo electrónico y través de redes sociales durante el período de la pandemia de COVID-19. La muestra de estudio está compuesta por 192 trabajadores cualificados –principalmente ingenieros y técnicos– pertenecientes a ocho sectores productivos.

Primero se estimaron los niveles de conocimiento e implementación de tecnologías de la I4.0. Después, se formuló un modelo de ecuaciones estructurales con mínimos cuadrados parciales (PLS-SEM) utilizando el paquete estadístico SmartPLS 3 con el propósito de evaluar las relaciones existentes entre el conocimiento e implementación de la I4.0 con la eficiencia productiva de la empresa y el bienestar de los trabajadores.

1.1. Distribución capitular

En el capítulo 2 se presenta el análisis estructural y conceptual del término Industria 4.0. A través de una exhaustiva revisión de literatura se logró identificar y clasificar los diferentes elementos que componen el modelo productivo I4.0. En este sentido, primero, se construyó una definición general compilando los elementos principales de 45 definiciones encontradas en la literatura. Después le sigue un apartado que identifica, clasifica y analiza cronológicamente la evolución del término. Le sigue una sección que discute los pilares de la I4.0. Finalmente se presentan las principales tecnologías relacionadas con la I4.0

El capítulo 3 presenta una semblanza referente a los impactos que tiene la implementación de la I4.0 sobre las empresas y sus trabajadores. De manera introductoria se realiza una breve reseña de las revoluciones industriales y sus repercusiones sobre las empresas y la sociedad. Le sigue un apartado que discute las perspectivas de la I4.0, así como los impactos, tanto positivos como negativos que se derivan de la implementación de esta. Después, se presenta una sección que busca precisar las características que tienen los trabajadores de la I4.0. Más adelante se discuten los desafíos fundamentales de la I4.0. Por último, se presenta un esbozo de la situación actual en México con respecto a las principales iniciativas en pro de la adopción de la I4.0.

En el capítulo 4 se discuten los principales estudios que se han llevado a cabo con respecto a la medición de la I4.0. Asimismo, presenta una compilación de los principales Índices de preparación (RI, Readiness Indexes) y Modelos de Madurez (MM). Le siguen dos apartados que presentan algunas consideraciones con respecto a la importancia del nivel de conocimiento de la I4.0 que poseen los trabajadores y el nivel de implementación de tecnologías de I4.0 que tienen las empresas. Finalmente

se presentan los principales esfuerzos para medir la preparación para la I4.0 que se han realizado en México y en la región.

El capítulo 5 contiene los aspectos metodológicos de la investigación. En este se plantean los objetivos, preguntas e hipótesis de la investigación. Adicionalmente se presentan los detalles del diseño metodológico del estudio y los estadísticos descriptivos de la muestra obtenida y del instrumento de medición.

El capítulo 6 presenta los resultados de la investigación. Primero se presenta la estimación del nivel de conocimiento de tecnologías de la I4.0 y el nivel de implementación de tecnologías de la I4.0. Le sigue el análisis del modelo de ecuaciones estructurales (PLS-SEM). Por último, se presentan las pruebas de hipótesis con respecto a las relaciones planteadas en el modelo PLS.

En el capítulo 7 se discuten los hallazgos del estudio. Primero se examinan los resultados y conclusiones principales. Después se presentan las conclusiones acerca de la implementación de la I4.0 y el bienestar de los trabajadores. Le siguen las conclusiones acerca de la implementación de la I4.0 y la eficiencia productiva de la empresa. Finalmente se presentan las limitaciones del estudio.

Capítulo 2

Análisis estructural y conceptual de los elementos de la Industria 4.0

2.1. Industria 4.0: Una definición

El término Industria 4.0 (I4.0) fue presentado por primera vez en 2011 durante la feria de Hannover Messe en Alemania (Aguilar, 2017). El concepto se acuñó por un grupo de especialistas convocado por el gobierno alemán con el propósito de esbozar un proyecto de mejora en materia de productividad para la industria de manufactura que desembocaría en la visión del modelo de la *fabrica inteligente*. De esta forma, la I4.0 se volvió el estandarte del *Plan de Acción Estratégico 2020 de Alta tecnología* del Gobierno Alemán (Saquicela, 2020).

De acuerdo con Bensusán Areous (2017) el hecho de que el programa I4.0 haya sido elaborado a través de un profundo análisis realizado bajo la coordinación de la Academia Nacional de Ciencias e Ingeniería, así como su robustez conceptual hacen que éste se haya adoptado como referente a nivel mundial. Además, en 2012 se presentaron una serie de recomendaciones para su implementación y se conformaron equipos de trabajo que realizaron labores en proyecciones de 10 a 15 años. Así, en abril de 2013, se comenzaron a ejecutar las directrices centrales del modelo I4.0.

Con el propósito de presentar la evolución del término, sus ramas tecnológicas y las tecnologías que lo conforman, primero se presenta la tabla 2.1, donde se resume la información encontrada a través del análisis de las definiciones de I4.0, le sigue una semblanza de las transformaciones que ha tenido la definición de Industria 4.0 a través de los últimos 8 años, después se muestran las nueve ramas tecnológicas fundamentales que se identificaron a través de la revisión de literatura. Por último, se encuentra un apartado donde se enlistan y se definen las principales tecnologías y técnicas relacionadas con la implementación de la I4.0 en las empresas.

2.2. La evolución de la definición de I4.0

Después de haber realizado un extenso análisis bibliográfico que comprende el período 2014 – 2021 con respecto a las diferentes definiciones del término Industria 4.0 se logró identificar y clasificar los elementos principales que conforman las diferentes iteraciones de la definición. La tabla 2.1 presenta los resultados de la recopilación de 45 definiciones que incluyen 8 ramas tecnológicas, 14 tecnologías y 33 características.

Tabla 2.1: Tecnologías y características encontradas a través del análisis de las definiciones de I4.0.

Año y autores	Área tecnológica	Tecnología	Características
Kim y Park (2014), Yen et al. (2014)	Interconectividad	Redes, internet, sistemas ciber-físicos (CPS).	Conecta la cadena de valor, crea valor agregado, crea nuevos modelos de negocios.
Schelechtendal et al. (2015), Saldivar et al. (2015), Adeyeri, Mpofu y Olukorede (2015), Veza, Mladineo y Peko (2015), Chen y Xing (2015)	Simulación.	Impresión 3D, internet de las cosas (IoT), sistemas embebidos, integración horizontal y vertical, inteligencia artificial.	Genera innovación, reduce costos, permite la toma de decisiones en tiempo-real, habilita la manufactura descentralizada, configura un nuevo paradigma productivo.
Khan y Turowski (2016), Del Val Román (2016), Zhang, Peek, Pikas y Lee (2016), Krull (2016), Arvind y Bourne (2016), Sipsas et al. (2016), Cheng, Liu, Qiang y Liu (2016), Sanders, Elangeswaran y Wulfsberg (2016), Schumancher, Erol y Sihm (2016), Thames y Schaefer (2016), Wang y Wang (2016).	TIC, autonomía.	Internet de los servicios (IoS), sensores, gemelo digital.	Permite la manufactura flexible, mejora la calidad, habilita al toma de decisiones autónoma, mejora el rendimiento y la eficiencia, permite producción personalizada, se adapta, se auto-configura, auto-monitorea y auto-regula.
Aguilar (2017), Illés et al. (2017), Ang et al. (2017), Li et al. (2017), Diberoglu (2017), Liu y Xu (2017)	Digitalización, automatización.		Es capaz de satisfacer las necesidades únicas de los clientes.
Li (2018), De Sousa Jabbour (2018), Naji (2018), Naya (2018), Spremolla (2018), Galvis y Palacio (2018)	Robótica, personalización, logística	Computación en la nube (cloud computing).	Habilita la manufactura digital.
Basantes-Montero (2019), Sony y Naik (2019), Frank, Dalenogare y Ayala (2019)		Análisis de grandes datos (big data).	Mejora la productividad, habilita la manufactura ágil.
Saquisela (2020), Bai et al. (2020)	Sustentabilidad	Cadena de bloques (Blockchain).	Permite la toma de decisiones descentralizada, genera innovación y crecimiento, mejora la competitividad y la sustentabilidad.
Guo et al. (2021), Zheng et al. (2021), Ciano et al. (2021), Nara et al. (2021), Bag, Gupta y Kumar (2021)			Permite la manufactura modular, permite escalabilidad de la producción, mejora seguridad y los tiempos de entrega, permite la recolección y análisis autónomo de datos.

Fuente: elaboración propia.

La tabla 2.1 presenta las áreas tecnológicas, tecnologías y características de la I4.0 de acuerdo con el año de aparición en las definiciones revisadas. Es destacable que las definiciones más recientes incluyen cada vez más elementos, sin embargo, esto no se percibe en la tabla para evitar la redundancia de la información.

A continuación, se presenta una semblanza acerca de la evolución de la definición de I4.0 a través del período 2014–2021, donde se busca destacar los aportes y adiciones que se han presentado a través de las diferentes iteraciones de la definición de I4.0.

2.2.1. Conectividad y Sistemas Ciber-Físicos (2014)

En este año Kim y Park (2014) destacan que el concepto de I4.0 incluye todos los aspectos de las fábricas, conecta el ecosistema productivo al internet. Enlaza objetos y servicios dentro y fuera de la fábrica a través de redes de comunicación con la finalidad de crear valor agregado y nuevos modelos de negocios.

Por su parte, Yen *et al.* (2014), expresan que la I4.0 se basa principalmente en los llamados Sistemas Ciber-Físicos (CPS por sus siglas en inglés), esto con el propósito de lograr la *producción inteligente*, la *producción verde* y la *producción urbana*. De acuerdo con los autores, la implementación de los CPS en los procesos de fabricación y los de esfuerzos de logística llevarán consigo mejoras en los tiempos de entrega.

2.2.2. La fábrica inteligente (2015)

En este año, se definió el concepto de I4.0 como el entorno en el cual todos los participantes –componentes de los procesos de fabricación– se encuentran interconectados entre sí (Schlechtendahl, Keinert, Kretschmer, Lechler, y Verl, 2015). Por su parte, Adeyeri, Mpofu, y Olukorede (2015) definen el concepto como aquella tecnología que es impulsada por sistemas de internet, CPS, manufactura habilitada,

innovación de servicios y metas económicas.

En cambio, Veza, Mladineo, y Peko (2015) expresan que la introducción del Internet de las cosas (IoT) en los entornos de manufactura comenzaba a configurar una cuarta revolución industrial. Para los autores, este nuevo tipo de industria está basado en el modelo de *la fábrica inteligente* (Smart Factory). A su vez, los sistemas de manufactura embebidos se integran verticalmente con redes de procesos de negocios dentro de las empresas y se conectan horizontalmente con las dispersas cadenas de valor que pueden ser gestionadas en tiempo-real. En este contexto, Chen y Xing (2015) destacan que la I4.0 se caracteriza por la integración digital y horizontal de extremo a extremo a través de toda la cadena de valor y la integración vertical por medio de redes de los sistemas de producción.

Por su parte, Saldivar *et al.* (2015) argumentaban que los conceptos *Industria 4.0*, *Fábrica inteligente*, e *I4.0* describen la misma evolución tecnológica desde los procesos de manufactura con procesadores embebidos a los emergentes CPS, conectando de forma inteligente la demanda a la producción, oferta y servicios a través de la Internet. Asimismo, la inteligencia descentralizada, el *networking* de objetos y la gestión independiente de procesos interactúan con el mundo virtual y el mundo real. En pocas palabras, I4.0 representa un cambio en el paradigma de la producción centralizada a la descentralizada, una reversión de la lógica de los procesos de producción vigentes a la fecha.

Autores como Khan y Turowski (2016) y Scheuermann, Verclas, y Bruegge (2015) definen la I4.0 como una revolución habilitada por la implementación de tecnología avanzada como las tecnologías de la información en los procesos productivos con el propósito de ofrecer valor agregado y nuevos servicios a los clientes y a la organización misma. Asimismo, otorga mejoras en la flexibilidad y calidad de los sistemas de producción para satisfacer rápidamente las demandas características de los nuevos e

innovadores modelos de negocios y servicios. Además, la I4.0 involucra la integración técnica de CPS en la manufactura y logística, a la vez que implementa el IoT y el internet de los servicios (IoS) en los procesos productivos.

Al mismo tiempo, Rüßmann *et al.* (2015) define el término industria 4.0 como aquella que transforma las relaciones de manufactura tradicionales de células optimizadas y aisladas a flujos de producción y datos completamente integrados a través de la totalidad de las cadenas de valor. Aunado a esto, el autor expone que varios de los avances tecnológicos que conforman los nueve pilares¹ que guían la cuarta revolución industrial se encuentran en utilización actualmente en las cadenas de producción permitiendo mejores eficiencias y modificando las relaciones tradicionales entre proveedores, productores y consumidores, así como también las relaciones hombre-máquina.

2.2.3. La integración tecnológica (2016)

En este año, Del Val Román (2016) definía el término I4.0 como la tendencia tecnológica que configura el modelo de organización que se apoya de las tecnologías de la información (TIC), busca el control de la cadena de valor, los métodos y sistemas de producción a través del ciclo de vida del producto. En este sentido, Zhang, Peek, Pikas, y Lee (2016) expresaban que la I4.0 se basa en la aplicación exitosa de las TIC, la tecnología embebida, y tecnologías poderosas de internet. Los autores expresan que la I4.0 es el uso integrado de CPS, interconectando los recursos, las personas y la información para crear un internet de las cosas y servicios, después aplicando esta modalidad de servicio a un campo industrial promoviendo la manufactura inteligente

¹Las 9 tecnologías que guían el avance tecnológico de la I4.0 son: (1) robots autónomos, (2) simulación, (3) integración horizontal y vertical, (4) el internet de las cosas, (5) ciberseguridad, (6) computación en la nube, (7) manufactura aditiva, (8) realidad aumentada y, (9) análisis de grandes datos (Rüßmann *et al.*, 2015).

y desarrollo de redes de manufactura.

Otros autores como Wang y Wang (2016), Arvind y Bourne (2016) y Thames y Schaefer (2016) relacionan a la I4.0 con la visión de la cuarta revolución industrial, a su vez, destacan el papel importante que juegan tecnologías como la Internet, los CPS, sensores, etc. Asimismo, destacan los beneficios que son asociadas con la adopción de la I4.0 como las mejoras en la eficiencia de los recursos, la toma de decisiones automática, incrementos sobre el rendimiento de los sistemas y la autonomía de los procesos productivos.

Por otra parte, Sanders, Elangeswaran, y Wulfsberg (2016) y L. Li (2018) destacaban que en el contexto de la I4.0 la fábrica se vuelve inteligente y habilita la personalización en masa a través de aplicaciones de información y sistemas de comunicación en manufactura haciendo uso de CPS.

En relación con las tecnologías utilizadas por la I4.0, se destaca la utilización de CPS, realidad virtual, IoT, IoS y sistemas embebidos que habilitan la integración de objetos físicos, actores humanos, máquinas inteligentes, líneas de producción y procesos a través de las fronteras organizacionales para formar una nueva clase de cadena de valor inteligente y conectada (Cheng, Liu, Qiang, y Liu, 2016; Schumacher, Erol, y Sihm, 2016; Sipsas, Alexopoulos, Xanthakis, y Chryssolouris, 2016).

En el presente contexto, Krull (2016) estipula que la I4.0 trae consigo un cambio estructural en la industria de manufactura del sector secundario y que estos cambios abarcan todas las partes y procesos de la economía, desde el sector primario, a través del sector secundario, hasta el sector terciario. Así, la I4.0 permite la generación de nuevas oportunidades de negocios y oportunidades de participación en el mercado laboral.

2.2.4. La personalización de la producción (2017)

En este año, Illés, Tamás, Dobos, y Skapinyecz (2017) y Liu y Xu (2017) destacan que uno de los objetivos de la I4.0 es la satisfacción de necesidades únicas de los clientes con los costos específicos de la producción en masa. La producción personalizada que permite la I4.0 va desde la idea, la orden, el desarrollo, la producción y la entrega al consumidor final a través del reciclaje y otros servicios relacionados.

Por otra parte, surgen nuevas iteraciones de la definición de I4.0 que tratan los conceptos previamente mencionados por otros autores, pero conjugan sus elementos de forma única. Por ejemplo, Dilberoglu, Gharehpapagh, Yaman, y Dolen (2017) argumentan que la cuarta revolución industrial, también conocida como I4.0, es el reciente movimiento de tecnología inteligente de automatización. En esta nueva era, las habilidades de fabricación en el contexto de la integración de nuevas tecnologías de la información juegan un rol importante en la competencia económica.

Otros enfoques en relación con el término son propuestos. Ang, Goh, Saldivar, y Li (2017), estipulan que la I4.0 busca la integración de CPS para el diseño y manufactura inteligentes; tiene el potencial de transformar como las plantas serán diseñadas, construidas e incluso operadas en el futuro Ang *et al.* (2017). Por su parte, D. Li, Tang, Wang, y Liu (2017), expresan que la I4.0 utiliza IoT y CPS a la vez que permite la comunicación entre humanos, máquinas y productos a través de grandes redes y se convertirá en crítica ventaja competitiva para los mercados.

2.2.5. La digitalización de la producción (2018)

En este año autores como Galvis y Palacio (2018) y Naji (2018) destacan el papel de la digitalización de los procesos productivos en un entorno de I4.0. En este sentido, se considera que la I4.0 consiste en la digitalización de todos los procesos

productivos a través de la interacción de los diferentes procesos de producción y las máquinas. Además, la convergencia del IoT, la inteligencia artificial, la impresión 3D y la robótica permiten la digitalización del trabajo y habilitan el nuevo paradigma productivo.

En otro orden de ideas, de Sousa Jabbour, Jabbour, Foropon, y Godinho Filho (2018) exponen que la I4.0 se orienta hacia las tecnologías digitales y virtuales, se centra en servicios, es guiada por el intercambio en tiempo-real de datos y la manufactura flexible, habilitando de esta forma la producción personalizada. La I4.0 puede entenderse a través de sus componentes principales: CPS, IoT, manufactura en la nube (Cloud Manufacturing) y manufactura aditiva. En este contexto, Spre-molla (2018) destaca que la I4.0 se caracteriza por la fusión del mundo real de las instalaciones productivas con el mundo virtual del internet. Tal que, la fábrica de la I4.0 configura un centro de producción industrial integrado por unidades productivas flexibles, automatizadas e interconectadas.

Por otro lado, y con relación al paraguas de tecnologías que abarca la I4.0, P. Zheng *et al.* (2018) expresan que la tecnología subyacente de la I4.0 está representada por CPS, que permiten que los sistemas de producción sean modulares e intercambiables, por lo tanto, capaces de fabricar en masa productos altamente personalizados. De hecho, cuando los CPS se comunican a través del IoT, conectan infraestructura, objetos físicos, actores humanos, máquinas y procesos a través de las fronteras de generacionales, permitiendo la fusión entre el mundo físico y el virtual, utilizando sensores, actuadores y poder computacional para transmitir datos en tiempo-real para los procesos descentralizados de toma de decisiones. Por otro lado, otras tecnologías habilitan la I4.0 entre las que se encuentran la impresión 3D, sistemas de manufactura inteligentes, procesamiento de datos y algoritmos con la meta de mejorar la escalabilidad, seguridad y eficiencia. A su vez, las tecnologías de

la nube pueden ayudar a implementar la manufactura en la nube (cloud manufacturing) reduciendo costos e incrementando la escalabilidad mediante el apalancamiento de recursos virtuales (P. Zheng *et al.*, 2018).

2.2.6. Nuevo paradigma industrial (2019)

En este año Frank, Dalenogare, y Ayala (2019) destacan que la cuarta revolución industrial, es uno de los temas más populares tanto en el campo profesional como en el académico. Se centra en la manufactura inteligente, también considera la integración de la fábrica con el ciclo de vida del producto, así como las actividades de la cadena de suministros y cambia la forma en la que las personas trabajan; se basa en la adopción de tecnologías digitales para recopilar datos en tiempo-real y analizarlos, provee información útil a los sistemas de manufactura y es habilitada por los CPS que integran tecnologías como el IoT, los servicios de la nube y el análisis de grandes datos.

Al mismo tiempo, Sony y Naik (2019) afirman que la transformación de las organizaciones a su forma digital es comúnmente conocida como I4.0. Esta transforma completamente la forma en la que las organizaciones operan, desde la manufactura hasta todas las demás actividades que toman lugar dentro y fuera de la industria. Adicionalmente, el ambiente económico y las necesidades de los clientes también son alteradas con la nueva ola de digitalización integrada en la organización. Una de sus principales características es la producción a través de CPS, la cual se basa en la integración de datos y conocimiento heterogéneos. El principal rol de los CPS es lograr los ágiles y dinámicos requerimientos de la producción, también apuntan a mejorar la eficiencia de la organización en su conjunto.

De acuerdo con Basantes Montero (2019) y Sony y Naik (2019), la I4.0 incorpora

muchas tecnologías, entre las que se incluyen IoT, IoS, manufactura basada en la nube, análisis de grandes datos, identificación por radiofrecuencia (RFID), planificación de recursos empresariales (ERP) y desarrollo de productos sociales. Además, la I4.0 permite la generación de productos y servicios nuevos o actualizados a la vez que reduce los costos y aumenta productividad de las empresas.

2.2.7. Sistemas productivos autónomos (2020)

En este año Saquicela (2020) destaca que los pilares de la I4.0, se caracterizan por utilizar software, electrónica y conectividad; tecnologías que habilitan nuevas características, funciones y habilidades. En relación con los sistemas productivos inteligentes, los autores exponen que “el software les permite autogestionarse y tomar decisiones descentralizadas. Equipados con sensores captan información sobre su entorno y sobre su propio uso y estado, datos que pueden proporcionar a quien lo fabricó o gestiona su servicio” (pp. 1348-1349).

Por otro lado, surgen nuevas definiciones de I4.0 que reiteran lo ya mencionado por otros autores. Un ejemplo de esto es la definición de Bai, Dallasega, Orzes, y Sarkis (2020), quienes afirman que la I4.0 está transformando los modelos de manufactura de las firmas. Estas tecnologías pueden soportar flexibilidad en la producción, eficiencia y productividad a través de comunicación emergente variada, y tecnologías de la información de inteligencia. Las tecnologías de la I4.0 incluyen pero no se limitan a manufactura habilitada, inteligencia artificial, Big Data y analítica, blockchain, computación en la nube, IoT industrial y simulación. Estas tecnologías de I4.0 pueden potencialmente proveer tremenda innovación y crecimiento en competitividad, asimismo, mejoran la sustentabilidad de los sistemas industriales actuales.

2.2.8. Enfoque holístico de la I4.0 (2021)

En este año varios autores ofrecen nuevas definiciones de I4.0, las cuales incluyen elementos de todas sus dimensiones que van desde la conexión de los agentes de los sistemas productivos, hasta la autonomía de las fábricas. Una de estas definiciones se encuentra en el trabajo de Guo *et al.* (2021), quienes exponen que la I4.0 connota una nueva revolución industrial con la convergencia entre los espacios físicos y los digitales, los cuales son provocados por la confluencia de tecnologías disruptivas, como el IoT, CPS, computación en la nube, Big Data, gemelo digital e inteligencia artificial, etc. Con el soporte de estas tecnologías emergentes, los recursos tradicionales de manufactura se han convertido en objetos inteligentes con capacidades de identificación, intercomunicación y detección. Por lo tanto, las operaciones de producción dinámica pueden ser organizadas y gestionadas de forma integrada, optimizada y sincronizada, utilizando la información en tiempo-real. La hiper-conexión, digitalización y habilidad de compartir información en el contexto de la I4.0 tienen el potencial de revolucionar, o al menos cambiar la forma en la que la producción opera y, por lo tanto, cómo las operaciones deben llevarse a cabo.

En el presente contexto, Ciano, Dallasega, Orzes, y Rossi (2021) definen la I4.0 como la utilización de productos y procesos inteligentes, que habilitan la recolección y análisis autónomo de datos, así como también la interacción entre productos, procesos, proveedores y clientes a través de la Internet. Varios estudios demuestran que las tecnologías de la I4.0 mejoran significativamente el rendimiento industrial, en especial, la flexibilidad, productividad, tiempo de entrega, costos y calidad. Además, la I4.0 atrae empresas en búsqueda de la producción personalizada al mismo costo que la producción en masa. Asimismo, la integración de máquinas inteligentes y componentes en la red digital son la base de la I4.0, y crean los llamados CPS que

permiten la producción modular y cambiante (Ciano *et al.*, 2021).

En otro orden de ideas, Cardoso, Parra-Michel, Ceja-Bravo, Olivares, y Bautista (2021) identifican cinco características clave de la I4.0: (1) mejora la efectividad operativa y reduce costos; (2) mejora la calidad de los productos y satisface las necesidades de los clientes; (3) dota a la empresa de mayor flexibilidad, permitiendo hacer adecuaciones a la producción en tiempo-real; (4) integra la cadena de valor en un solo sistema que permite que todas sus partes trabajen en sinergia y; (5) mejora el manejo de la información a través de la recolección y análisis de datos para la toma de decisiones estratégicas.

2.3. Pilares de la Industria 4.0

Existen numerosos estudios que se enfocan en la definición y clasificación de las diferentes tecnologías, características, técnicas, y demás aspectos de la I4.0. Entre las diferentes categorizaciones encontradas en la literatura, destacan aquellos componentes, técnicas, ramas tecnológicas y tecnologías individuales, consideradas como *pilares de la I4.0*, en virtud de su papel fundamental en el avance hacia la exitosa implementación del nuevo paradigma productivo.

A continuación, se presentan los principales aspectos considerados como pilares del modelo I4.0 encontrados en la literatura revisada. El orden de aparición es descendente y corresponde a la importancia de estas en torno a la frecuencia con la que aparecen en investigaciones relativas a la I4.0. Posteriormente, se incluyen las consideraciones de tres autores (Del Val Román, 2016; Naya, 2018; Sachon, 2018) quienes identifican y clasifican algunas técnicas y características que difieren de lo estipulado por el grueso de los autores de este rubro.

2.3.1. La interconectividad

La I4.0 habilita la interconectividad de todos los aspectos del proceso productivo, siendo esta una de sus características más destacables. De acuerdo con la literatura pertinente, la I4.0 permite la conexión entre humanos y máquinas, así como entre objetos, procesos, productos, líneas de producción y toda la infraestructura productiva de las firmas (D. Li *et al.*, 2017; Schumacher *et al.*, 2016; T. Zheng, Ardolino, Bacchetti, y Perona, 2021). Además, autores como Ciano *et al.* (2021) estipulan que la I4.0 conecta productos, procesos, clientes y proveedores. Por su parte Zhang *et al.* (2016) expresan que la I4.0 permite la conexión entre recursos, personas e información. En cambio, Sipsas *et al.* (2016) destacan que la I4.0 habilita la conectividad entre objetos, sensores, dispositivos y activos de la empresa.

Tomando en cuenta lo anterior, podemos afirmar que la implementación de tecnologías I4.0 permite la conexión entre todos los actores del proceso productivo que incluye, pero no se limita a productos, clientes, proveedores, humanos, máquinas, recursos, procesos, activos de la empresa, líneas de producción e infraestructura a través de objetos y dispositivos dotados de sensores capaces de recibir y compartir información.

La producción conectada inherente a la I4.0 es habilitada gracias a la construcción de Sistemas Ciber-Físicos (CPS) y sistemas de integración que se implementan en todos los sistemas del proceso productivo. En relación con los sistemas de integración, Saquicela (2020) los define como aquellos compuestos por sistemas dotados de capacidades físicas y de cómputo embebidas; interactúan con máquinas y humanos a través de diferentes medios; permiten el acceso a datos y servicios alojados en la web; gestionan y monitorean los procesos físicos y crean conexiones entre el mundo virtual y el real Saquicela (2020).

2.3.2. La digitalización

La digitalización es una rama tecnológica que aparece con frecuencia en las definiciones de I4.0, se refiere a la transición de los procesos de manufactura y los sistemas industriales a través de la convergencia entre los sistemas digitales y las máquinas (Aguilar, 2017; Galvis y Palacio, 2018). Se caracteriza por la convergencia entre los espacios físicos y los espacios digitales habilitada por la adopción tecnológica (Guo *et al.*, 2021).

En este sentido, de Sousa Jabbour *et al.* (2018) y Sony y Naik (2019) argumentan que conforme las empresas de manufactura continúen implementando tecnologías propias de la I4.0, se acercarán cada vez más a su forma digital. Por su parte, Naji (2018) destaca que si bien, existen esfuerzos de digitalización del trabajo físico por medio de la robótica y la manufactura aditiva, la I4.0 comienza también a digitalizar el *trabajo intelectual humano* gracias a la utilización de tecnologías tales como el Internet de las cosas (IoT) y la inteligencia artificial (IA). En este sentido, Naya (2018) destaca que tecnologías como la Internet y los CPS se vuelven vitales en el empleo de máquinas virtuales capaces de controlar objetos físicos, habilitando la comunicación en tiempo-real de las diferentes estaciones de trabajo.

2.3.3. Las tecnologías de la información (TIC)

Este término es utilizado para referirse a cualquier tecnología de cómputo. De acuerdo con Almenara (1998) son consideradas TIC las tecnologías que giran en torno a tres medios básicos: (1) la informática, (2) las telecomunicaciones y, (3) la microelectrónica. Es destacable que estas tecnologías no operan de forma aislada, sino que se encuentran interconectadas e interactúan entre ellas, lo que habilita la generación de nuevas técnicas comunicativas.

Se considera que las TIC tienen un papel preponderante en la habilitación de los procesos de la I4.0. En este tenor, Del Val Román (2016) estipula que el modelo industrial de producción de la I4.0 se apoya en las TIC, tal que, sin estas tecnologías, la conexión de las partes del proceso productivo, el procesamiento y la distribución de datos no sería posible.

En congruencia con este argumento, autores como Khan y Turowski (2016), Zhang *et al.* (2016), Dilberoglu *et al.* (2017), y Bai *et al.* (2020) estipulan que la aplicación de las TIC habilita las capacidades de fabricación inteligente característica de la I4.0.

2.3.4. La simulación

El término simulación se refiere a la creación de modelos virtuales que incluyen todos los aspectos de los procesos de manufactura (Naya, 2018). Estas tecnologías permiten que la información recabada en tiempo-real, sea utilizada en un entorno virtual que incluye productos, maquinaria, humanos y robots. Permite que los trabajadores evalúen y optimicen de forma virtual la configuración a utilizarse en el siguiente producto antes de aplicar los cambios físicamente. De esta forma se reducen los costos de producción y los tiempos muertos a la vez que se mejora la calidad de la producción (Saquicela, 2020).

De acuerdo con de Sousa Jabbour *et al.* (2018), Spremolla (2018) y Bai *et al.* (2020) el modelo industrial de I4.0 se perfila hacia la virtualización de todos los procesos productivos al interior de las firmas. Por su parte, Saldivar *et al.* (2015) expresan que la virtualización de los procesos productivos ayuda a la integración de la demanda, la producción, la oferta y los servicios a través del internet.

2.3.5. La automatización

Es evidente que la automatización de los procesos productivos toma gran importancia en el contexto de la fábrica inteligente, en este contexto, se considera que la adopción de la I4.0 está acompañada de extensos procesos tecnológicos enfocados en la automatización de todos los procesos productivos de las empresas (Dilberoglu *et al.*, 2017).

Otros autores han puntualizado que la automatización de la totalidad de las unidades de manufactura representan una de las características primordiales del modelo de producción I4.0 (L. Li, 2018; Spremolla, 2018).

2.3.6. Sustentabilidad

Los sistemas de producción tradicionales se caracterizan por tener serios efectos negativos sobre el medio ambiente, tales como la enorme cantidad de recursos que requieren, el calentamiento global, y la degradación y contaminación ambiental. Además, la sociedad se enfrenta a problemas como pobreza e inequidad, mientras que la justicia y la paz continúan siendo grandes retos (Bai *et al.*, 2020).

Ante el gran potencial para la generación de nuevos avances tecnológicos que ha generado la I4.0, es necesario que las empresas comiencen a basar sus operaciones en la utilización y el desarrollo de tecnologías sostenibles. Sin embargo, desarrollar la sustentabilidad de las operaciones no es sencillo para las empresas Nara *et al.* (2021). En este sentido, Bag, Gupta, y Kumar (2021) destacan que la mayoría de las compañías no han logrado establecer metas de desarrollo sustentable debido al fracaso de la *remanufactura* sustentable, reciclaje y operaciones de reutilización. Estos fracasos se deben a su falta de flexibilidad, visibilidad y poca resiliencia. Sin embargo, los autores reconocen que las tecnologías de la I4.0 pueden ser utilizadas efectivamente.

te para asistir en las transformaciones digitales de las organizaciones con el fin de lograr sus metas de desarrollo sustentable. En este contexto, Bai *et al.* (2020) expresan que lograr un puñado de requerimientos de sustentabilidad estratégicos, tales como la reducción de emisiones de carbono, ayudarán a alcanzar niveles superiores de productividad.

2.3.7. La Autonomía

El término autonomía se refiere a la habilidad que tienen los agentes del sistema productivo de operar sin la necesidad de la intervención humana. Entre las tecnologías dotadas de autonomía que utiliza la I4.0 se encuentran los robots autónomos y colaborativos, sin embargo, la I4.0 también habilita la autonomía en recolección y análisis de datos a través de procesos inteligentes (Ciano *et al.*, 2021).

En relación con esto, Thames y Schaefer (2016) expresan que la I4.0 también utiliza sistemas de manufactura inteligentes capaces de autoconfiguración, automonitoreo y auto-reparación. Así, la fábrica inteligente se encuentra dotada de sistemas productivos autónomos que no requieren la participación de operadores para su continuo y correcto funcionamiento.

2.3.8. Personalización

La personalización de la producción es reconocida por varios autores (Ang *et al.*, 2017; Dilberoglu *et al.*, 2017; Illés *et al.*, 2017; D. Li *et al.*, 2017; Liu y Xu, 2017), entre otros, como una de las principales características de la I4.0. En este tenor, Naya (2018) Destaca la importancia de “la comunicación entre las distintas etapas de la producción, junto con la monitorización del stock de materias primas y productos semi-elaborados” (pp. 5–6) en la dotación de gran flexibilidad y adaptabilidad a los

procesos productivos, permitiendo que las empresas puedan adaptarse a situaciones fortuitas, a la vez que contribuyen a la mejora y expansión de la producción.

2.3.9. Logística

Ante los crecientes niveles de autonomía e interconexión de todos los aspectos del proceso productivo, los requerimientos en materia de logística que requiere la I4.0 también han aumentado, sin embargo, “el sistema de la [I4.0] es capaz de generar un flujo regular de información la cual puede ser intercambiada rápidamente, tanto internamente como externamente” (Naya, 2018, p. 6). Estos avances permiten que las empresas se adapten a situaciones cambiantes, tanto a nivel interno, como a nivel industria. Es gracias al desarrollo logístico, que las empresas pueden mejorar los tiempos de respuesta, la productividad y la reducción de costos (Naya, 2018).

2.3.10. Consideraciones adicionales

Esta sección presenta algunas consideraciones que difieren del entendimiento general con respecto a las tecnologías, técnicas y / o características clasificadas como pilares de la I4.0 por el grueso de la literatura pertinente.

Sachon (2018) destaca cinco pilares de la I4.0: (1) *La generación y captura de datos* constituye un aspecto fundamental de la I4.0. Se apoya de otras tecnologías como sensores, radiofrecuencia, internet y, permite que todos los elementos de la cadena de valor se conecten y compartan información. Sachon también destaca que el (2) *Análisis de datos* juega un papel de vital importancia en el avance de la I4.0. Cuando se logra la completa conexión y digitalización del proceso productivo, es posible obtener, optimizar y analizar el flujo de datos con la finalidad de mejorar los procesos y la toma de decisiones estratégicas. Asimismo, la (3) *Integración hombre-máquina* es

primordial en el diseño de los nuevos sistemas de producción. De acuerdo con el autor, la interfaz entre humanos y máquinas es una de las más complejas en virtud de los retos que propone. La toma de decisiones implica que la información recabada pueda ser presentada de forma intuitiva y en el contexto adecuado. Utiliza tecnologías como gafas de realidad aumentada y realidad virtual para visualizar simulaciones o realizar modelado en 3D, también permite que los trabajadores realicen actividades valiosas sin importar el lugar donde se encuentre el trabajador. La (4) *Producción flexible* es considerada una de las características más importantes de la I4.0. Los avances tecnológicos en materia de impresión 3D, automatización y robótica habilitan la producción flexible, permitiendo que las empresas respondan de manera oportuna a los cambios en la demanda, mejorando de esta forma la eficiencia de los procesos y generando nuevos modelos de negocio. Finalmente, Sachon destaca el papel de la (5) *Propiedad intelectual* como pieza clave en la implementación de modelos de negocios basados en plataformas de la I4.0. Con la llegada de tecnologías como la impresión aditiva, y la disposición de los diseños en la Internet, cualquier persona o empresa puede descargar los diseños y comenzar la producción de piezas y productos. Vulnerabilidades de esta índole deben ser atendidas por derechos de autor y patentes vinculadas a diseños y procesos propios de las empresas que los emplean.

Por otra parte, Del Val Román (2016) señala cuatro aspectos como las piedras angulares del modelo productivo de la I4.0: (1) *Soluciones inteligentes*, se basan en la implementación de tecnologías como CPS, IoT y Big Data. Se caracterizan por permitir la comunicación máquina a máquina (M2M) y la interacción humano-máquina. Son capaces de autogestionarse y de tomar decisiones de forma descentralizada. Las máquinas inteligentes se vuelven invisibles a los trabajadores, ya que sólo requieren atención cuando precisan mantenimiento. Mejoran la experiencia del usuario, profundizan la interacción con los clientes, propician innovadores servicios digitales y

generan nuevos modelos de negocio. (2) *Innovación inteligente*, se genera a través de soluciones informáticas como comunidades virtuales y herramientas colaborativas. Las innovaciones a lo largo del ciclo de vida del producto ayudan a la generación y análisis de datos, toma de decisiones, optimizaciones de los procesos productivos y mejoras de la experiencia del cliente. (3) Las *Cadenas de suministro inteligentes*, nacen a raíz de la creciente complejidad de las redes de suministro modernas y son una pieza central en la estrategia de la I4.0. Obedecen a la digitalización de los flujos y redes de comunicación y logística entre empresas; utilizan tecnologías de RFID y, a través de las TIC llevan a cabo las operaciones de logística. Permiten la automatización y dotan de transparencia a los procesos de la cadena de suministro, a la vez que incrementan la seguridad y reducen los costos. (4) *La fábrica inteligente* se integra por unidades de producción inteligentes dotadas de CPS. La fábrica se transforma en una red de actores que toman decisiones optimizadas. La producción se gestiona conforme a los requerimientos y capacidad del sistema, y cada unidad de producción es capaz de diseñar su programa de producción. La descentralización de la producción permite la fabricación de productos individuales sin costos adicionales y asegura la entrega dentro de los plazos señalados. Además, el análisis masivo de datos habilita alcanzar nuevos niveles de productividad, seguridad y calidad en la producción.

Finalmente, entre lo marcado por Naya (2018), destaca la *Eficiencia en energía y materias primas* como un pilar de la I4.0 poco atendido en la literatura. De acuerdo con el autor, el ahorro de energía y la gestión de recursos, tanto naturales como humanos, son aspectos de gran importancia para el nuevo paradigma productivo, que desembocan en las mejoras de eficiencia y reducción de costos que caracterizan a la cuarta revolución industrial.

2.4. Tecnologías de la Industria 4.0

En esta sección se presentan las definiciones de las tecnologías asociadas con la I4.0 que se lograron encontrar a través de la revisión de literatura y su posterior análisis. El orden de aparición de las tecnologías aquí catalogadas obedece a su importancia en relación con la frecuencia con la que son mencionadas como parte integral del abanico tecnológico que abarca la I4.0 en los estudios revisados.

2.4.1. Sistemas Ciber-Físicos

Este término se refiere a la transformación donde sensores, máquinas, espacios de trabajo y sistemas de IT se conectan a través de la cadena de valor más allá de la empresa individual. Estos sistemas conectados, también conocidos como CPS por sus siglas en inglés (Cyber-Physical Systems), pueden interactuar entre sí utilizando protocolos de internet y analizar datos con el propósito de predecir fallas, autoconfigurarse y adaptarse a los cambios. (Rüßmann *et al.*, 2015).

2.4.2. Internet de las Cosas

Por sus siglas en Inglés (IoT, Internet of Things), se refiere a dispositivos electrónicos, sistemas y plataformas conectados a otros a través de la Internet (AXIS, 2019). Estos dispositivos se encuentran organizados verticalmente en una pirámide de automatización, dentro de la cual los sensores y dispositivos de campo cuentan con inteligencia limitada. En un esquema de IoT, más dispositivos son dotados de computación embebida e integrados a la red a través de tecnologías estandarizadas. Esto permitirá que los dispositivos se comuniquen e interactúen entre sí, así como también con controladores centrales según sea necesario, además descentralizará el análisis y la toma de decisiones, habilitando de esta forma reacciones y respuestas en tiempo-real

(Rüßmann *et al.*, 2015).

El IoT permite el análisis autónomo de grandes cantidades de información a través de la *sensorización* de la producción. Permite la conexión entre dispositivos de computación, máquinas, objetos y sistemas digitales (Saquicela, 2020, p. 1349).

2.4.3. Computación en la nube

La computación en la nube también conocida como *Cloud Computing* permite la virtualización del almacenamiento y análisis de datos a través de servidores remotos (AXIS, 2019). Actualmente las firmas utilizan software basado en la nube para algunas aplicaciones empresariales y de análisis. Con la implementación de la Industria 4.0, más procesos inherentes a la producción requerirán un incremento en la capacidad de compartir datos a través de diferentes sitios e incluso fuera de los límites de la firma. Al mismo tiempo, el rendimiento de las tecnologías de la nube mejorará, logrando tiempos de respuesta prácticamente instantáneos. Como resultado, la información y funcionalidad de las máquinas será enviada a la nube, haciendo posible la expansión de los servicios para producción basados en la información y los datos (Rüßmann *et al.*, 2015).

De acuerdo con Saquicela (2020), los grandes recursos de cómputo que ofrece la nube permiten la obtención de información y el análisis de esta en tiempo-real y en cualquier parte del mundo. Actualmente, las aplicaciones son ejecutadas de forma remota, habilitando aplicaciones industriales con altos requerimientos informáticos.

2.4.4. Análisis masivo de datos (Big Data)

También conocida como Análisis de Grandes Datos, se refiere a la recolección y evaluación de datos de diferentes fuentes, por ejemplo, equipos y sistemas utilizados

en los procesos productivos, así como también sistemas de gestión de clientes y gestión empresarial. De acuerdo con el autor, esta tecnología se convertirá en el estándar en la toma de decisiones en tiempo-real (Rüßmann *et al.*, 2015).

De acuerdo con AXIS (2019), Big Data se refiere a la recolección, procesamiento y análisis masivo de información digital proveniente de varias fuentes que puede ser utilizada en la optimización de la toma de decisiones en tiempo-real.

Por su parte, Saquicela (2020) expresa que Big Data agrupa todas las técnicas de análisis de grandes volúmenes de datos, excluyendo las herramientas clásicas. Emplea algoritmos avanzados y permite alcanzar estándares superiores de calidad de producto, y procesos. De acuerdo con el autor, Big Data es una de las tecnologías de I4.0 con la demanda más alta a nivel corporativo.

2.4.5. Inteligencia artificial (IA)

Se refiere al aplicación de diversas ciencias computacionales para lograr que las máquinas desarrollen aprendizaje a través de la experimentación con el propósito de llevar a cabo procesos y tareas de forma similar a un humano (AXIS, 2019). Autores como Frey y Osborne (2017) y Ford (2015) han expresado que estas tecnologías son vitales en los procesos de digitalización y computarización del trabajo.

De acuerdo con Amador Hidalgo (1996), la IA se enfoca en el estudio de procesos cognitivos, busca lograr el desarrollo sistematizado de las diversas actividades del intelecto con la intención de obtener un conocimiento más profundo y preciso del mismo. Algunas de las aplicaciones de la IA incluyen métodos de deducción, generación de lenguaje natural, comprensión, síntesis de planificación, sentido común y simulaciones.

Por su parte, Saquicela (2020) afirma que la IA toma como base el desarrollo

de algoritmos que habilitan a las computadoras el procesamiento de datos a gran velocidad, logrando el aprendizaje autónomo. Los algoritmos se alimentan de datos y se perfeccionan constantemente, esto provoca que las máquinas logren capacidades cognitivas características de los humanos como la toma de decisiones, planificación, comprensión, lenguaje y visión.

2.4.6. Gemelo digital

Se refiere a la representación de forma virtual de un activo, producto o proceso que es capaz de retroalimentarse con la información del elemento real, habilita el estudio de su comportamiento o variación sin hacer alteraciones al sistema original (AXIS, 2019).

2.4.7. Impresión habilitada

También conocida como impresión 3D o impresión aditiva, se refiere al proceso de fabricación de productos mediante la acumulación de materiales, comúnmente capa por capa hasta formar la pieza o artículo completo (AXIS, 2019). Esta tecnología se caracteriza por no utilizar moldes, en cambio, toma como referencia un modelo digital Rüßmann *et al.* (2015). Ayuda a descentralizar las etapas de diseño y desarrollo de productos e introduce un mayor componente de servicios y software a las manufacturas (Saquicela, 2020).

Actualmente las empresas han comenzado a utilizar impresión habilitada en la creación de prototipos y producción de componentes únicos. En la I4.0, los métodos aditivos de manufactura son utilizados ampliamente para producir pequeños lotes de productos altamente personalizados que tienen ventajas tales como diseños complejos y livianos. La manufactura aditiva de alto rendimiento reducirá los costos de

transporte y las cantidades en existencia de materias primas (Rüßmann *et al.*, 2015).

2.4.8. Integración Horizontal y vertical

Dentro de las empresas actuales la mayoría de los sistemas de IT no se encuentran completamente integrados; firmas, proveedores y consumidores raramente se encuentran estrechamente conectados. De forma similar, los departamentos de diseño, producción y servicio raramente se encuentran enlazados. La Industria 4.0 permite que las compañías, sus departamentos, funciones y capacidades se vuelvan mucho más cohesivas en medida que las redes de integración de datos a lo largo de las firmas evolucionen en cadenas de valor realmente automatizadas (Rüßmann *et al.*, 2015).

Por otro lado, en la investigación de AXIS (2019) se expone que la integración vertical y horizontal de software se refiere a la “lógica de compartir e integrar información a lo largo de la cadena productiva y de proveeduría, dentro de la misma compañía y entre compañías, utilizando estándares de transferencia de información” (p.21).

2.4.9. Ciberseguridad

Con el incremento en la conectividad que trae consigo la I4.0, la necesidad de proteger de las amenazas digitales a sistemas críticos para la industria y la producción de manufactura se incrementa dramáticamente. En consecuencia, la gestión segura de comunicaciones, identidad, sistemas de acceso a máquinas y usuarios se vuelven esenciales (Rüßmann *et al.*, 2015).

Blockchain

Son bases de datos compartidas, abiertas y descentralizadas que habilitan la realización de transacciones seguras a través de una *cadena de bloques* que contiene la información de todas las transacciones realizadas (AXIS, 2019). Hace posible la generación de nuevos modelos de negocios con base en el valor de las cosas, además tiene aplicaciones novedosas con relación a la administración pública y la generación de modelos de financiación de obras (Saquicela, 2020). Por su parte, Aguilar (2017) expone que blockchain es una tecnología de transferencia de información que sirve de soporte a las criptomonedas.

2.4.10. Robots

El término robot se utiliza para referirse a las máquinas dotadas de inteligencia que realizan las tareas que pertenecen al dominio humano. En un contexto de constante avance tecnológico y continua automatización de la producción, es que se considera vital la inclusión de los robots en la transición hacia la fábrica inteligente (Saquicela, 2020).

Los robots se caracterizan por poseer crecientes niveles de autonomía; cada vez se vuelven más flexibles y facilitan la cooperación hombre-máquina. Eventualmente –los robots– comenzarán a interactuar entre ellos y trabajarán de forma confiable y segura en conjunto con los humanos y serán capaces de aprender de estas interacciones. Estos robots costarán cada vez menos y tendrán un mayor rango de capacidades que los que se utilizan en los procesos de manufactura hoy en día (Rüßmann *et al.*, 2015).

Robots autónomos

Son mecanismos que implementan sistemas de control –ciber-físicos–, realizan tareas o procesos, además, tienen la habilidad de autorregularse de acuerdo al entorno percibido (AXIS, 2019).

Robots colaborativos

También conocidos como *cobots*, son una nueva generación de robots basados en la integración de la inteligencia artificial, Big Data y el internet de las cosas. Son capaces de colaborar en los procesos productivos con humanos y con robots, están diseñados para trabajar de forma segura con humanos en diferentes entornos como fábricas, hoteles, talleres, etc. Ayudan a los humanos a ser más productivos ya que reducen muchas de las tareas repetitivas que hacen los trabajadores en sus jornadas (Aguilar, 2017).

De acuerdo con AXIS (2019), los robots colaborativos son sistemas robóticos –ciber-físicos– habilitados para operar al interior de los sistemas productivos acompañando a humanos y/o robots.

Vehículos autoguiados

Son sistemas móviles no tripulados cuya función principal es el transporte de materias, materiales y productos de un sitio a otro (AXIS, 2019).

2.4.11. Aprendizaje de máquina (Machine Learning)

De acuerdo con Mitchell (1997) el aprendizaje de máquina es una de las áreas técnicas de más rápido crecimiento, yace en la intersección de la computación y la

estadística y, en el núcleo de la inteligencia artificial y la ciencia de recolección de datos.

El término se refiere a computadoras que mejoran de forma autónoma a través de la experiencia (Mitchell, 1997). Utiliza Algoritmos computacionales dotados de la habilidad de retroalimentarse a medida que va experimentando e iterando, y con ello optimiza su función (AXIS, 2019).

2.4.12. Tecnologías de virtualización

Realidad Aumentada

La realidad aumentada ofrece recursos visuales que ayudan en la toma de decisiones, así como la transferencia y manipulación de información entre profesionales que se encuentran en diferentes espacios físicos. Además, permite popular el entorno real con objetos digitales. Integra otras ramas como la simulación, la virtualización y el modelado digital, habilitando nuevas técnicas para el diseño de productos y la organización de los procesos. Asimismo, dota de rapidez y flexibilidad a la cadena productiva (Saquicela, 2020).

Por su parte, AXIS (2019) define la realidad aumentada como “dispositivos que complementan la visualización del entorno real, agregando datos o imágenes para hacerlo más navegable” (p. 20).

De acuerdo con Rüßmann *et al.* (2015), la adopción de esta tecnología aún es escasa, sin embargo, se espera que en el futuro las compañías hagan uso extensivo de esta tecnología con el fin de proveer a los trabajadores de información en tiempo-real, mejorar la toma de decisiones y los procedimientos laborales. Rüßmann *et al.* considera que una de las principales implementaciones será el entrenamiento virtual, ya que este será más costo efectivo que los métodos de entrenamiento convencionales.

Realidad Virtual

De acuerdo con Martínez *et al.* (2011) la realidad virtual es la interfaz hombre-máquina que permite que el usuario interactúe en una simulación gráfica tridimensional generada por computadora, además, facilita la interacción en tiempo-real desde una perspectiva centrada en el usuario.

Por su parte, AXIS (2019) la define como una experiencia inmersiva, propia de los entornos digitales que permite que los usuarios visualicen e interactúen con elementos digitales de apariencia real en un entorno 3D.

Simulación avanzada/modelado digital

Se refiere a la utilización de sistemas computacionales para el diseño y representación digital de entornos, objetos, procesos y sistemas para su análisis, validación, evaluación y/o mejora (AXIS, 2019).

Chaudhuri, Kalogerakis, Guibas, y Koltun (2011) destacan que la disponibilidad de herramientas fáciles de utilizar para la creación de contenido tridimensional detallado es un desafío actual para los desarrolladores de gráficos por computadora. Los autores también expresan que, gracias a la accesibilidad habilitada por el exhaustivo desarrollo de entornos digitales por parte de los desarrolladores de videojuegos y su disponibilidad a través de la Internet, ahora es posible que un grupo pequeño de diseñadores pueda crear con relativa facilidad entornos virtuales fotorrealistas.

Visión computacional (Computer Vision)

Se caracteriza por la implementación de algoritmos y aprendizaje de máquina para la identificación de grupos de píxeles y patrones que permite la identificación de imágenes e interpretarlas (AXIS, 2019).

Por su parte, Baumgart (1975) destaca que la visión computacional puede ser definida como *gráficos de computadora inversos*. En los gráficos de computadora, el mundo se representa con suficiente detalle, tal que los procesos por medio de los cuales se generan las imágenes pueden ser simulados *numéricamente* para generar imágenes digitales –sintéticas– del mundo. En la inversa, las computadoras reciben imágenes, comúnmente a través de una cámara y se analizan para desarrollar modelos detallados de las mismas.

2.4.13. Otras técnicas relacionadas con la I4.0

AXIS (2019) destaca la importancia de la implementación del *monitoreo de procesos en tiempo-real* y la *gestión inteligente de energía* en los entornos industriales que implementan o buscan implementar las tecnologías de la I4.0. Estas técnicas habilitan y/o potencian otros aspectos del espectro tecnológico de la I4.0 como el IoT y la operación autónoma de los procesos.

Monitoreo de procesos en tiempo-real

Es una técnica que busca obtener de forma automática datos acerca de los procesos productivos con el propósito de evaluar el estado actual de desempeño de uno o varios procesos para su posterior gestión (AXIS, 2019).

Censado y colección digital de datos

Habilita la implementación del IoT, consiste en la utilización de sistemas de sensores que miden, detectan y/o evalúan variables y atributos del entorno, los transforman en datos que son enviados para usarse en aplicaciones de control, predicción, diagnóstico y corrección de procesos (AXIS, 2019).

Gestión inteligente de energía

Se refiere a la implementación de sistemas inteligentes que buscan la administración optimizada y eficiente del consumo energético en todas las actividades del proceso productivo (AXIS, 2019).

Capítulo 3

La Industria 4.0 y sus efectos sobre el trabajo humano y sus empresas

3.1. Las revoluciones industriales

A lo largo de la historia, los avances tecnológicos han llevado a importantes transformaciones del paradigma laboral y en consecuencia de la sociedad en general, sin embargo, el futuro del trabajo y su relación con la tecnología aún es incierto. Existen en la literatura numerosos trabajos que exponen los beneficios que trae consigo la adopción de las nuevas tecnologías, que van desde la reducción de costos y el aumento de la productividad, hasta la generación de nuevos puestos de trabajo y mejoras en el cuidado del medio ambiente. Por otra parte, se encuentran investigaciones que se han enfocado en señalar los aspectos negativos desencadenados por la cuarta revolución industrial, destacando que la continua adopción tecnológica tendrá efectos negativos cada vez más severos sobre el bienestar de los trabajadores.

En el actual contexto, y con el propósito de arrojar luz sobre esta problemática, a continuación, se presenta una semblanza de las revoluciones industriales y las implicaciones que ha tenido el avance tecnológico sobre las empresas, sus trabajadores y la sociedad.

3.1.1. Primera revolución industrial

La primera revolución industrial comenzó en el Reino Unido en el año de 1784 y se caracterizó por la introducción de la máquina de vapor y la máquina de hilar en las fábricas (Liao, Deschamps, Loures, y Ramos, 2017; Rübmann *et al.*, 2015) iniciando de esta forma la era de la producción mecanizada (Pikas, Zhang, Peek, y Lee, 2016).

Entre las consecuencias de la primera revolución industrial se encuentra el “aumento en la productividad, crecimiento de las ciudades y mejoras en el comercio entre naciones” (Kronfle Catalán, 2018, p. 5). En relación con esto, (Daemmrich, 2017, p. 258) expone que “las personas comenzaron a mudarse de las áreas rurales

hacia los centros urbanos ya que el trabajo se encontraba concentrado en las fábricas. Los patrones de consumo también cambiaron ya que los bienes se comenzaron a producir no solo para las familias reales, sino también para una creciente clase social capitalista”. Por su parte, (L. Li, 2018, p. 67) estipula que “la producción mecanizada ayudó a la creación de millones de empleos en las ciudades”, mejorando de esta forma el bienestar de los trabajadores y, en consecuencia, de la sociedad.

3.1.2. Segunda revolución industrial

La segunda revolución industrial comenzó en el año de 1870 y se caracterizó por la implementación de la electricidad en los procesos productivos y la invención de la producción en serie (Kinzel, 2017; Liao *et al.*, 2017; Pikas *et al.*, 2016). Además, las ideas de Frederick W. Taylor través de los principios del *Scientific Management* provocaron transformaciones en el paradigma productivo permitiendo grandes incrementos de la productividad derivados de la reducción de la cualificación de los trabajadores, la división del trabajo y la producción en masa (Krull, 2016). En este sentido, y de acuerdo con lo expresado por L. Li (2018), los avances tecnológicos llevaron consigo “la producción masiva de productos estandarizados, [...] y la disponibilidad de trabajo especializado a bajo costo. Esta revolución también permitió el surgimiento de numerosos trabajos de manufactura bien pagados y en consecuencia se mejoró el estándar de vida de las personas” (p. 67).

En relación con los cambios en la industria y en la sociedad que se suscitaron gracias a la segunda revolución industrial, Daemmrich (2017) estipula que la producción en serie jugó un papel importante en el crecimiento exponencial de la producción de bienes liderada por Henry Ford, quien en el año de 1908 introdujo al mercado el primer automóvil manufacturado en serie, el Modelo T.

Además, Daemmrich destaca que, en este periodo, las crecientes demandas del mercado motivaron al gobierno estadounidense en la construcción de carreteras y todo tipo de infraestructura a través del país. En relación con el empleo, este comenzó a desplazarse hacia el sector manufacturero, tal que en 1916 un tercio de los trabajadores de Estados Unidos se encontraban en las fábricas. Adicionalmente, para el año de 1930 más del 70 por ciento de los hogares estadounidenses contaban con electricidad en sus hogares.

A pesar de los beneficios económicos y sociales derivados del avance tecnológico y la división del trabajo, “surgían también críticas debido a las consecuencias adversas [relacionadas principalmente con la sobreexplotación laboral] que tenían los cambios en la vida laboral de los trabajadores” (Krull, 2016, p. 9).

3.1.3. Tercera revolución industrial

La tercera revolución industrial también conocida como la era de la información comenzó en el año de 1969 con el surgimiento de aparatos electrónicos y la tecnología de la información, estas tecnologías ayudaron en la mejora y automatización de los procesos de manufactura. Asimismo, la aparición de las comunicaciones móviles y el comercio electrónico provocaron grandes cambios en el paradigma socio-económico en casi todos los países (Frey y Osborne, 2017; Krull, 2016; Liao *et al.*, 2017; Pikas *et al.*, 2016; Rüßmann *et al.*, 2015).

Por su parte, Bensusán Areous *et al.* (2017) destacan que la aparición de computadoras asequibles “industriales y personales, teléfonos móviles y la Internet permitieron el nacimiento de nuevas actividades e hicieron posibles y rentables actividades que antes eran imposibles” (pp. 35–36). En este tenor, autores como Kronfle Catalán (2018) argumentan que “la era digital ha permitido el nacimiento de nuevos

empleos y perfiles profesionales que antes no existían” (pp. 5–6), generando de esta forma puestos de trabajo bien remunerados que benefician principalmente a aquellos trabajadores capaces de dominar las nuevas tecnologías. En relación con esto, Frey y Osborne (2017) exponen que una parte de los empleos comenzaron a desplazarse hacia las oficinas, las ventas y el sector servicios.

En este sentido, L. Li (2018) estipula que “la tercera revolución industrial marcó el comienzo de la globalización” [, y a su vez,] benefició a más personas en el mundo que las anteriores revoluciones industriales. La riqueza se distribuyó entre las naciones industrializadas, economías emergentes y países en vías de desarrollo” (p. 67).

No obstante, la revolución de la información intensificó la brecha entre los trabajadores con pocas cualificaciones y aquellos con altos niveles de especialización. En este sentido, Frey y Osborne (2017) exponen que “la revolución computacional ayuda a explicar la creciente inequidad salarial que se ha dado durante las últimas décadas” (pp. 13-14). Los autores destacan que los trabajadores que utilizan computadoras obtienen salarios superiores a los que no las utilizan y que esta tecnología, a su vez ha provocado cambios en la estructura ocupacional del mercado laboral, ya que la digitalización del trabajo ha afectado de forma negativa los salarios de los trabajos rutinarios. Esto último representa una problemática que continua presente en las organizaciones.

3.1.4. Cuarta revolución industrial

Previo a la llegada del modelo productivo I4.0 se realizaron avances en materia de productividad y gestión de operaciones al interior de las empresas. Guo *et al.* (2021) argumentan que en la década de 1970 se comenzaron a implementar métodos como el *Sistema de Producción Toyota* (TPS por sus siglas en inglés) a la par con el sistema

de planificación *Kanban* y el principio *Just in Time* (JIT). Estos sistemas se asocian con los términos *producción esbelta* (Lean production philosophy), *manufactura flexible*, *manufactura adaptada* y *manufactura ágil*, que también fueron vistos como los paradigmas principales en sus tiempos. Los autores destacan que la filosofía de JIT se enfoca en el principio de sólo manufacturar los productos necesarios, en el tiempo necesario, en la cantidad necesaria y esto jugó un rol importante en la revolución de la producción y los sistemas de gestión de operaciones en la industria de manufactura moderna. Después de que las empresas se dieran cuenta de los beneficios que el sistema JIT tiene sobre la producción, muchas empresas de manufactura realizaron esfuerzos para implementar sistemas TPS/JIT, lo que habilitó el desarrollo de sistemas de manufactura avanzados, tales como el *Sistema de Planificación de Recursos Empresariales* (ERP por sus siglas en inglés), así como sistemas de *Planificación y Programación Avanzadas* (APS por sus siglas en inglés), y *Sistemas de Ejecución de Manufactura* (MES por sus siglas en inglés) para la gestión contemporánea de la producción y de las operaciones. Estos paradigmas productivos y sistemas avanzados de producción y gestión de operaciones son ampliamente valorados, sin embargo, son insuficientes en la era de la I4.0, donde la satisfacción de las necesidades únicas de los clientes, la capacidad de adaptarse a las constantes fluctuaciones de la demanda y los requerimientos de sustentabilidad, requieren que las empresas integren su cadena de valor y doten de autonomía su proceso productivo.

En el presente, el conjunto de tecnologías relacionadas con la inteligencia artificial, la digitalización, la manufactura inteligente y la Internet, son capaces de integrar la cadena de valor manufacturera con su contraparte virtual a través del ciber-espacio y la computación en la nube, guiando el avance tecnológico que configura el paradigma productivo de la I4.0, la cual es capaz de satisfacer las necesidades únicas de los clientes, adaptarse a la cambiante demanda que propone el mercado moderno y

generar ventajas competitivas para las empresas.

En este tenor, autores como Pikas *et al.* (2016) exponen que “la *I4.0* se basa en la aplicación exitosa de tecnologías de la información, comunicación, tecnología embebida y poderosas herramientas de Internet [...]; implica la utilización e integración de [CPS], información, bienes e individuos para crear un [IoT] y servicios para después aplicarlo en el ámbito industrial promoviendo de esta forma el desarrollo de redes de manufactura” (p. 98). A la par con la implementación de las nuevas tecnologías en las cadenas productivas, la *I4.0* trae consigo una serie de cambios que desembocan en una nueva forma de producir y consumir, dónde la capacidad de producción y la productividad de las firmas se ven mejoradas en gran medida (Bensusán Areous *et al.*, 2017).

3.2. Perspectivas de la *I4.0* y su impacto sobre las empresas y sus trabajadores

Podemos argumentar con cierta seguridad que existe un consenso acerca de la implementación de la *I4.0* y la completa transformación del entorno productivo que esta provoca. Tal que, es ampliamente considerado que el paradigma productivo de la *I4.0* no solo afecta las empresas y a sus trabajadores, sino también a la sociedad en general. En este sentido, autores como Frey y Osborne (2017) destacan que “la cuarta revolución industrial llevará a un cambio fundamental sobre el paradigma actual que va más allá del simple avance en la manufactura” (p. 67). Por su parte, autores como Gentner (2016) y Frank *et al.* (2019), expresan que la implementación de las tecnologías de la *I4.0* cambia la forma en la que las personas trabajan, y Sony y Naik (2019) argumentan que la *I4.0* transforma completamente la forma en la que las organizaciones operan, desde la manufactura hasta todas las demás actividades que

toman lugar dentro y fuera de la industria. Adicionalmente, el ambiente económico y las necesidades de los clientes también son alteradas con la nueva ola de digitalización integrada en la organización.

Es importante destacar que el paradigma productivo que propone la I4.0 si bien, trae consigo efectos positivos para las empresas y sus empleados, también introduce una serie de efectos negativos que afectan principalmente a los trabajadores que poseen bajos niveles de cualificación. Esta problemática ha sido tratada ampliamente en la literatura, donde autores como Ford (2015) destacan que existe una tendencia hacia el aumento en la productividad y la disminución de costos fruto del avance tecnológico, sin embargo, la sustitución laboral y el desempleo tecnológico están provocando una reducción paulatina sobre los salarios de los trabajadores que comenzó en la década de 1970. Asimismo, se considera que los incrementos en la inequidad salarial y en la distribución de la riqueza pueden ser explicados en parte por la automatización y digitalización del trabajo humano.

En el actual contexto y con el propósito de arrojar luz sobre esta problemática, se presenta en esta sección una semblanza de los efectos que tiene la adopción de tecnologías asociadas con la I4.0 sobre las empresas y sus trabajadores. A continuación, se muestran los aspectos positivos y negativos de la implementación de la I4.0 encontrados en la literatura revisada.

3.2.1. Aspectos positivos de la Industria 4.0

Podemos afirmar que a lo largo de la historia el avance tecnológico ha resultado en grandes beneficios para las empresas, los trabajadores y la sociedad en general. Estos beneficios se han caracterizado sobre todo por aumentos de la productividad de los factores y reducciones de los costos productivos. Hoy en día el modelo I4.0

supone una serie de beneficios¹ que van más allá de los incuestionables cambios incrementales derivados de la adopción y el cambio tecnológico.

Algunas de las características del modelo I4.0 que se conjugan para configurar la cuarta revolución industrial son destacadas por Saquicela (2020), quien, a través de un estudio en empresas de Argentina, logra identificar los siguientes puntos favorables:

- Las tecnologías de la I4.0 habilitan la producción flexible y la producción modular; utiliza equipos flexibles especializados e implementa tecnologías de automatización, posibilitando que las empresas sean capaces de reaccionar más ágilmente a las fluctuaciones de la demanda. Asimismo, permite ajustar sin demora los volúmenes de producción y la variedad de productos personalizados de acuerdo con las necesidades únicas de los clientes.
- La implementación de la I4.0 hace posible una considerable reducción de costos en prácticamente todos los sectores productivos. Saquicela encuentra en su estudio que para el caso de las empresas de Argentina “las tecnologías digitales podrían reducir los costos de producción de petróleo y gas entre un 10 % y un 20 %, pero las pruebas de la industria sugieren que se pueden lograr mejores resultados” (pp. 1346–1347). Además, el autor hace hincapié en la posibilidad de lograr reducir aún más estos márgenes a través de la exitosa implementación de herramientas digitales como el IoT y la AI.
- La implementación de tecnologías de digitalización permite que las empresas reduzcan el tiempo no productivo, así como el tiempo de finalización de los proyectos.

¹La sección 2.1 enlista a detalle las características y beneficios derivados de la implementación de la I4.0 encontrados en la literatura revisada.

- De acuerdo con Saquicela, en la actualidad, las empresas del sector secundario como las dedicadas al mantenimiento, las refinerías, la planificación, gestión de la producción y ejecución de la producción, experimentan los efectos positivos de la I4.0. Adicionalmente, la salud de los trabajadores, la seguridad en el entorno laboral y el medio ambiente también se ven beneficiados.

En el actual contexto, Raso-Delgue (2018) a través de una investigación enfocada en arrojar luz sobre la transformación del modelo tradicional del trabajo ocasionado por la implementación de tecnologías asociadas con la I4.0 en México, Chile y Brasil, logra identificar y enlistar algunos aspectos positivos de la adopción tecnológica, mismos que se muestran a continuación. Adicionalmente, identifica y enumera una serie de aspectos negativos que se describen más adelante.

- De acuerdo con el autor, los puestos laborales de la I4.0 requieren que los trabajadores se encuentren más y mejor preparados para controlar las nuevas tecnologías “y por lo tanto, pueden traducirse en la expresión *más cerebro y menos músculo*, favoreciendo así la incorporación de aquellos trabajadores que apuestan a un crecimiento –en profundidad y variedad– de sus saberes” (p. 14).
- Nuevos trabajos se generan alrededor de la industria del software: entre ellos la construcción de datos, el teletrabajo, el entretenimiento y la tecnología financiera (FinTech por sus siglas en inglés), entre otras.
- Otro aspecto que se destaca es la apertura a una mayor participación en el mercado laboral por parte de la mujer, esto es un resultado directo de la disminución de los requerimientos de esfuerzo físico y la creciente necesidad por competencias cognitivas en los procesos productivos.

- Raso-Delgue expresa que el nacimiento de nuevos sectores productivos como los de la AI, la robótica y la industria del software propicia el incremento de la variedad en la oferta de productos y servicios, que requieren habilidades novedosas.
- La implementación de nuevas tecnologías en el entorno productivo habilita que “los ciudadanos [puedan acceder] fácilmente y a todo nivel social a servicios, de los que antes estaban excluidos los sectores más pobres” (pp. 14–15). El autor hace hincapié en el importante papel que han tenido los teléfonos inteligentes en el *efecto democratizador* y participativo de muchas tecnologías modernas.
- Además, varias disciplinas se han beneficiado en gran medida por las nuevas posibilidades que ofrecen las tecnologías, la acumulación de datos y la robótica, como es el caso de la medicina y la docencia, entre otras.

En el presente contexto, se considera que la proporción de trabajadores adultos mayores se incrementará gracias al desplazamiento de las edades. Así, las oportunidades laborales para trabajadores de más edad serán cada vez mejores, tomando en cuenta la constante reducción de la demanda física del trabajo (Magdalena y Ernst, 2016).

Por otra parte, Rajnai y Kocsis (2017) realizan un estudio acerca de los efectos que tienen las tecnologías de digitalización sobre los mercados laborales. En el trabajo se destaca el papel de la digitalización en la generación de nuevos puestos de trabajo caracterizados por sus altos niveles salariales. Además, los autores estipulan que la digitalización de los procesos productivos facilita compartir información de manera prácticamente instantánea, permitiendo de esta forma una competencia global mucho más dinámica.

3.2.2. Aspectos negativos de la I4.0

Ha sido expresado por muchos autores, que a lo largo de las revoluciones industriales se ha visto una resistencia “al avance tecnológico por parte de los trabajadores, debido al miedo a perder los puestos de trabajo” (Ushakova, 2018, pp. 133–134). Desde el rechazo a la mecanización que se suscitó durante el ludismo a principios del siglo XIX, hasta los actuales presagios de la sustitución no solo del trabajo físico, sino también del intelectual, lo que pondría en riesgo los empleos de todos los trabajadores sin importar la industria a la que pertenezcan. Estos efectos han sido ampliamente estudiados en la literatura, sin embargo, la discusión acerca del impacto que tiene la I4.0 sobre el entorno laboral aún está abierta. Se sabe que las repercusiones de las tecnologías de la I4.0 van más allá de la sustitución laboral y abarcan todo el espectro del entorno productivo, desde el deterioro del medio ambiente hasta los altos niveles de estrés que al que son sometidos los trabajadores.

Es con esto en mente, que a continuación se presentan los principales aspectos negativos derivados de la adopción tecnológica encontrados en la literatura revisada. Esta sección contiene cuatro apartados; los primero tres tratan los efectos que tiene la adopción tecnológica sobre el entorno laboral y el cuarto apartado discute el impacto de la I4.0 sobre el bienestar de los trabajadores.

Rechazo a la mecanización y a la automatización

La idea de que las máquinas pueden sustituir el trabajo humano nace hace poco más de dos siglos y desde entonces ha sido retomada en repetidas ocasiones. A principios del siglo XIX David Ricardo al estudiar los procesos de mecanización de la época, logró identificar que las tecnologías que *ahorran mano de obra* reducen la demanda de trabajo y por lo tanto, llevan al desempleo por sustitución tecnológica Frey y Os-

borne (2017). Después, a principios del siglo XX Karl Marx realizó predicciones en donde se vislumbraba un futuro sombrío para la clase trabajadora, Marx pronosticó que la mecanización de los procesos productivos tendría efectos perversos sobre el proletariado y terminaría por condenarlos a salarios de subsistencia (González-Páramo, 2017). Asimismo, John Maynard Keynes en el año de 1930 acuñaba el término *desempleo tecnológico* para referirse al desplazamiento del trabajo humano por los procesos de mecanización (Frey y Osborne, 2017).

Este argumento permanece imperante y ha tomado fuerza en virtud de la creciente adopción de la I4.0 en los procesos de manufactura. Actualmente las organizaciones realizan esfuerzos para dotar de autonomía a todos los procesos productivos, utilizando tecnologías de automatización y robotización. En este tenor, autores como Benešová y Tupa (2017) y Ushakova (2018) consideran que estas tecnologías amenazan con un futuro sin empleo a un grado sin precedentes, donde no solo son los trabajos simples y repetitivos los que están en riesgo de desaparecer.

Reducción del empleo y la sustitución laboral

En este apartado se destacan los principales argumentos relativos al impacto que tiene la I4.0 sobre la reducción del empleo en las industrias modernas. En años recientes se han realizado importantes esfuerzos para avanzar el conocimiento científico en este tema. Varios autores han realizado estudios acerca de las dinámicas de sustitución laboral ante la llegada de la I4.0; encontrando en muchos casos que los avances tecnológicos tienen efectos negativos sobre los trabajadores con pocas cualificaciones.

El panorama más sombrío que se vislumbra en la literatura sugiere que el trabajo humano será reemplazado completamente por procesos tecnológicos capaces de realizar todas las actividades productivas. En este sentido, se considera que la ma-

yoría de las empresas que adopten el paradigma productivo de la I4.0 no sufrirán cambios significativos en su estructura, sin embargo, en términos de empleo humano, las firmas se enfrentarán a la extinción de los puestos físicamente demandantes ya que estos serán reemplazados por máquinas y los pocos empleados humanos restantes realizarán operaciones de mantenimiento y restauración de las instalaciones, mientras que los trabajadores desplazados por la tecnología tendrán que someterse a programas de reentrenamiento (Benešová y Tupa, 2017). En este contexto, autores como Frey y Osborne (2017) y Sumer (2018) exponen que el trabajo humano se volverá cada vez más redundante y eventualmente desaparecerá de la mayoría de las empresas.

En otro orden de ideas, Rodríguez (2017) se ha dado la tarea de investigar cuales son los principales sectores que sustituyen mano de obra humana por tecnología. El autor logra identificar 5 industrias que liderean la dinámica de sustitución laboral:

La industria manufacturera. Las empresas de este sector son las que más utilizan tecnologías para la automatización de las actividades rutinarias que suponen grandes esfuerzos físicos y en ocasiones son consideradas peligrosas.

Los servicios domésticos. El autor hace hincapié en el acelerado crecimiento que ha tenido el mercado de los robots de servicio y tareas domésticas, el cual ha crecido al 20 % anual.

Ventas. A pesar de que las labores de venta tienen altos requerimientos de inteligencia social y a menudo requieren el relacionamiento *cara a cara*, existen algunas ocupaciones en alto riesgo de sustitución tecnológica como es el caso de los cajeros en tiendas de conveniencia, las ventas por internet y las ventas por teléfono.

La construcción. Los recientes avances tecnológicos en este rubro habilitan la producción automatizada gracias a la utilización de productos prefabricados. Tal que, las edificaciones se diseñan y se producen anticipadamente por lo que la actividad

principal es el armado de la estructura a partir de proyectos previamente terminados. De acuerdo con el autor, la variabilidad de las tareas de construcción se reducirá sustancialmente.

Transporte, logística y administración. Los avances tecnológicos en estas categorías permiten vislumbrar los desplazamientos de trabajadores que se avecinan producto de la creciente implementación de máquinas y computadoras.

Por otro lado, y en el presente contexto, Pernías-Peco (2017) realiza un análisis acerca de las transformaciones del entorno laboral que trae consigo la I4.0, dónde logra identificar que los empleos que perderán más puestos de trabajo son: (1) oficinistas y administrativos, (2) manufactura y producción, (3) construcción y extracción, (4) arte, (5) diseño, (6) entretenimiento, (7) deportes, (8) media, (9) derecho e, (10) instalación y mantenimiento” (p. 61). En contraste, los empleos de cuidados y lactancia son los menos susceptibles a ser sustituidos por procesos tecnológicos (Rodríguez, 2017).

En relación con esta problemática, Frey y Osborne (2017) a través de un estudio que busca estimar la probabilidad de *computarización* de 702 ocupaciones en Estados Unidos, calculan que el 47% de los puestos de trabajo existentes serán reemplazados por máquinas y/o computadoras. Además, identifican que los trabajadores de transporte y logística, acompañados de los trabajos de oficina y administrativos, así como también aquellos propios de la producción se encuentran en alto riesgo de ser digitalizados y/o automatizados. Aunado a esto, una parte importante de los trabajos del sector servicios son altamente susceptibles a la computarización. En este contexto, Bensusán Areous *et al.* (2017) destacan que en años recientes se han llevado a cabo varios estudios que replican la metodología de Frey y Osborne en otros países y los resultados obtenidos son congruentes con los encontrados para Estados Unidos.

Es importante enfatizar que la sustitución laboral ocurre en todos los sectores

productivos, si bien, se han expuesto algunos casos para los sectores secundario y terciario, también es relevante presentar los efectos que tiene la adopción de tecnologías asociadas con la I4.0 sobre el sector primario. Autor y Dorn (2013) exponen que, durante el siglo pasado, se suscitó una importante disminución en el empleo del sector primario, por ejemplo, en los Estados Unidos pasó del 42 % al 2 % al fin del siglo. De acuerdo con el autor, la principal causa de esta reducción del empleo es la introducción de nuevas tecnologías. Tal que, el 44 % de las empresas que disminuyeron su platilla a partir de la crisis de 2008, lo hicieron automatizando tareas. Asimismo, los autores destacan que desde la década de los ochenta se puede observar una reducción en el empleo industrial mientras que el sector terciario ha experimentado una expansión.

Por su parte, Bensusán Areous *et al.* (2017) expresan que existe evidencia que sustenta el argumento de la sustitución laboral no solo de los empleos rutinarios y repetitivos que requieren poca preparación. De acuerdo con los autores, hoy en día, los trabajos administrativos, de logística y de manufactura industrial comienzan a digitalizarse a través de la implementación de computadoras, robots o plataformas. Las computadoras han avanzado en la automatización de las tareas no rutinarias caracterizadas por ser difíciles de digitalizar, y las innovaciones en materia de descomposición de las tareas hace que cada vez más partes de estas sean susceptibles de ser digitalizadas.

Otro de los aspectos relevantes de la sustitución laboral radica en la ausencia del factor humano en el diseño y planeación de los procesos tecnológicos inherentes a la I4.0. En relación con esto, Ushakova (2018) propone que la deshumanización de las relaciones laborales se acompaña de aumentos en la demanda de máquinas con la finalidad de satisfacer la demanda de trabajo. Por otra parte, Cho y Kim (2018) realizan una investigación acerca de la robotización en las empresas de manufactura

en Corea del Sur donde concluyen que la sustitución laboral debido a la robotización aún no es muy notable, sin embargo, encontraron evidencia que sugiere que el nivel de robotización aumenta conforme el empleo aumenta lo que indica la posibilidad de que el trabajo humano y la robotización se complementan el uno al otro. De acuerdo con los autores, el hecho de que el trabajo humano aumente o se reduzca dependerá del tipo de trabajo realizado o sector de manufactura estudiado.

Sumado a los efectos de la sustitución laboral, se considera que la relocalización de la producción de países desarrollados a países en vías de desarrollo habilitada por los avances tecnológicos en materia de comunicación y logística llevará al desempleo en masa ya que la tasa de sustitución de trabajo será mayor que la tasa de creación de nuevos puestos (Eichhorst, 2017; Frey y Osborne, 2017; Pernías-Peco, 2017). Evidencia de esta dinámica fue encontrada por Rajnai y Kocsis (2017) quienes destacan que la relocalización de la producción ha desembocado en la pérdida gradual de empleos en la Unión Europea. Tal que, aproximadamente 5 millones de empleos industriales han sido perdidos en Europa durante los últimos 15 años. Además, los países en vías de desarrollo han comenzado a trasladar los procesos manuales a otras regiones donde la mano de obra es aún más barata. En su lugar, las actividades y puestos de trabajo relacionados con el conocimiento y la información han ido en aumento Carreón y Ramos (2012). En el presente contexto, Eichhorst (2017) destaca que la tecnología “reemplazará a la mano de obra, sobre todo en países de altos ingresos, o se seguirán deslocalizando empleos a lugares con salarios más bajos” (p. 12). Por su parte, Bensusán Areous (2017) espera que la adopción de nuevas tecnologías en países en vías de desarrollo sea más lenta, sin embargo, reconoce que ya hay señales de la aceleración de la implementación de robots en los procesos productivos. Asimismo, la autora destaca que la relevancia de la mano de obra humana disminuiría en los países desarrollados, por lo que una parte de los empleos de manufactura podrían

regresar a los países desarrollados, sin embargo, los empleos que regresarán serán muchos menos de los que emigraron.

Por su parte, Cho y Kim (2018) identifican que la creciente utilización de robots industriales representa un problema puesto que la innovación industrial basada en robótica puede resultar en la pérdida masiva de empleos mientras que los niveles de producción seguirían en aumento. En el actual contexto, Sumer (2018) realiza un estudio de los efectos que tiene la I4.0 sobre el empleo en Turquía, donde encuentra evidencia que apunta a un futuro en el cual la sustitución laboral eventualmente resultará en el desempleo en masa.

En cambio, Eichhorst (2017) expresa que, a pesar de la creciente preocupación por la inminente desaparición del empleo humano derivado de la llegada de la cuarta revolución industrial, no existe evidencia que indique una reducción del trabajo formal a escala mundial, incluso en los países que gozan de altos niveles de penetración tecnológica. El autor también estipula que la hipótesis que propone un panorama de desempleo masivo como consecuencia del avance tecnológico y la automatización del proceso productivo aún no ha sido probada. Así, lo más probable es que desaparezcan solamente algunos trabajos mientras se generan nuevos puestos gracias al avance tecnológico.

Al revisar la literatura se puede encontrar evidencia que apunta en direcciones opuestas. No hay un consenso en torno al efecto que tiene la I4.0 y las nuevas tecnologías sobre el trabajo humano. Por un lado, hay investigaciones que apuntan a la pérdida masiva de empleos. Por ejemplo, Bensusán Areous (2017) pronostica que, en América Latina, para el año 2030 la destrucción de empleos en los sectores de construcción y manufactura provocará el desplazamiento de los trabajadores hacia el sector de los servicios, poniendo en riesgo más de 3 millones de empleos. Asimismo, Pernías-Peco (2017) puntualizaba que de acuerdo con el informe *The Future of Jobs:*

Employment, Skills and Workforce Strategy for the Fourth Industrial Revolution, del World Economic Forum (WEC), que analizó 15 economías de todo el mundo, se perderían más de un total de 7 millones de empleos sobre el período 2015-2020 debido a las fuerzas disruptivas que están incidiendo en el mercado de trabajo, mientras que solo se crearían unos 2 millones de empleos. Por otro lado, existen estudios que sugieren lo contrario. En 2020 el WEC modificó drásticamente sus perspectivas y ha proyectado que para el año de 2025 los procesos de automatización desplazarán 85 millones de empleos, no obstante, los avances tecnológicos generarán 97 millones de empleos, resultando en una ganancia neta de 12 millones de empleos (Kelly, 2020).

Polarización del mercado laboral

Recientemente se ha descubierto en la literatura la aparición de una dinámica de polarización entre los trabajos de baja y alta remuneración provocada por la desaparición de los trabajos de mediana remuneración ocasionada por la transformación de las empresas que supone la transición hacia la I4.0. En este contexto, autores como Frey y Osborne (2017) y Rajnai y Kocsis (2017) consideran que la revolución de las computadoras del siglo XX ha sido el detonante de la polarización laboral, que en el presente se caracteriza por la sustitución y el agotamiento del mercado laboral de empleos con ingresos medios. Por su parte, Rodríguez (2017) identifica que la tendencia actual del mercado estadounidense es la reducción de trabajos de ingresos medios resultado de los procesos de digitalización que permiten las tecnologías de la información. Rodríguez destaca que los trabajos más afectados son los de ventas, oficina y administrativos.

Además de la reducción de los trabajos de ingresos medios, se ha observado un aumento en los trabajos bien pagados con altos requerimientos cognitivos que

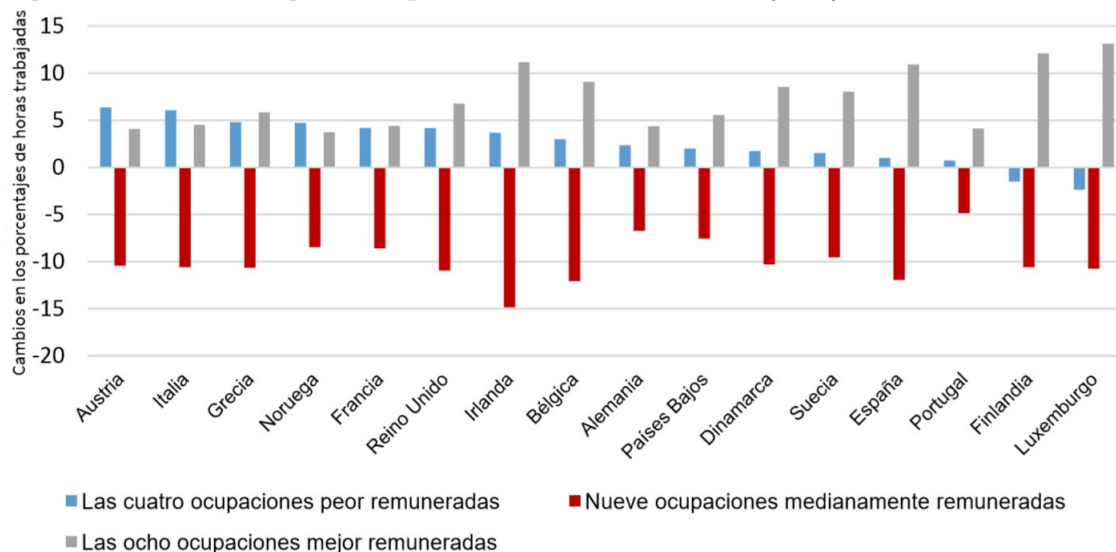
son difíciles de automatizar y/o digitalizar. Por su parte, algunos de los trabajos manuales de baja remuneración con características que dificultan su automatización también han aumentado mientras que los trabajos rutinarios de ingreso medio están desapareciendo y una proporción importante los trabajadores que son desplazados se comienzan a integrar a empleos de servicio de baja remuneración (Bensusán Areous, 2017; Frey y Osborne, 2017; Rajnai y Kocsis, 2017).

Eichhorst (2017) a través de un estudio realizado para los países miembros de la OCDE encuentra que la brecha en los mercados de trabajo en los países industrializados puede intensificarse a raíz del crecimiento de los empleos de alta cualificación que son muy bien remunerados. Mientras que los empleos para trabajadores de media cualificación presentan un estancamiento en términos de contratación y salarios provocado por el avance tecnológico y la competencia exterior. El autor también destaca que las ocupaciones esenciales del sector servicios, por su naturaleza interpersonal, proponen grandes retos para que puedan ser digitalizadas o deslocalizadas, lo que permite que aún puedan crecer, sin embargo, sus condiciones laborales serían menos atractivas y más deterioradas.

En su estudio, Eichhorst encuentra evidencia de estas dinámicas en 16 países de la OCDE. La figura 3.1 muestra los cambios en la cantidad de horas trabajadas de acuerdo a una categorización de ocupaciones que toma en cuenta su nivel de remuneración. Se observa que las ocupaciones peor remuneradas han visto aumentos en la cantidad de horas trabajadas en 14 de los países estudiados; asimismo, las ocupaciones mejor remuneradas registraron aumentos en la cantidad de horas trabajadas en todos los países estudiados. En cambio, las ocupaciones medianamente remuneradas experimentaron una disminución desproporcionada en la cantidad de horas trabajadas. Estos resultados son importantes, ya que constituyen evidencia de la existencia de polarización laboral, que de acuerdo con autores como Rajnai y Kocsis (2017)

representa un gran problema que debe ser atendido con inmediatez por las entidades gubernamentales.

Figura 3.1: Polarización laboral: cambios en los porcentajes de horas trabajadas en el periodo 1993-2010 para ocupaciones de alta, mediana y baja remuneración.



Fuente: (Eichhorst, 2017, p. 15).

En relación con la situación de polarización laboral en América latina, Ben-susán Areous (2017) identifica varios factores importantes como el empleo informal y temporal, así como también la situación desfavorable provocada por los bajos salarios. Aunado a esto, los procesos de globalización y la reorganización de las cadenas de suministro, juegan un papel importante en la precarización del mercado laboral latino. La autora también destaca que desde los años ochenta, se han identificado disminuciones en los niveles de bienestar, incrementos en los niveles de pobreza y desigualdad que han reprimido el crecimiento y desarrollo económico en la región.

En otro orden de ideas, Rajnai y Kocsis (2017) identifican que la implementación de las nuevas tecnologías provoca polarización en el mercado laboral al rededor del

mundo y agudizan las brechas entre los países en dimensiones que van más allá de la desaparición de los trabajos de mediana remuneración. Los autores destacan que en el presente se han generado brechas en relación con: (1) el surgimiento de países que han generado ventajas competitivas en las áreas tecnológicas, (2) regiones que adoptan las nuevas tecnologías más rápido, (3) organizaciones que han digitalizado sus operaciones versus empresas que no poseen el capital humano capacitado, (4) trabajadores con altos niveles de cualificación versus trabajadores con bajos niveles de cualificación, y (5) trabajadores que laboran en sectores emergentes. En este contexto, Carreón y Ramos (2012) exponen que hoy en día es posible distinguir una revolución *tecnocientífica* que tiene grandes repercusiones sobre el bienestar de las regiones. De acuerdo con los autores, la globalización de la economía permite que algunas regiones participen en los procesos de internacionalización y obtengan beneficios tales como mejoras sus tasas de crecimiento y niveles de desarrollo, mientras que las regiones que no participan en estos procesos se van quedando atrás. Asimismo, la riqueza generada a través de estos procesos genera un crecimiento desigual entre los países y propicia dinámicas excluyentes tanto económicas, como culturales y sociales.

Efectos de la I4.0 sobre los trabajadores

El avance tecnológico se ha caracterizado por hacer el trabajo humano más sencillo, las máquinas y los robots son capaces de realizar las tareas más simples y repetitivas del proceso productivo, y los avances en materia de digitalización permiten que muchas de las tareas administrativas y de logística se lleven a cabo de forma autónoma. Asimismo, la tecnología ha permitido la generación de nuevos puestos de trabajo mientras desplaza aquellos que son más susceptibles a ser automatizados. Sin embargo, el impacto de la implementación de la I4.0 va más allá de simple generación

de nuevos trabajos y la sustitución de la mano de obra.

En este sentido, Redinha (2017) realiza una investigación acerca de las implicaciones de las tecnologías digitales y el impacto que estas tienen sobre los trabajadores. Entre los resultados destaca que “la utilización de las nuevas TIC en el entorno laboral ha incrementado exponencialmente el riesgo de devastación de la esfera de reserva privada y personal del trabajador al ampliar su exposición al control del empleador” (p. 16). En este contexto, Raso-Delgue (2018) argumenta que la adopción de las nuevas TIC permite que la casa matriz pueda establecer redes de coordinación global de los procesos de producción sin importar la ubicación geográfica de sus filiales.

Por otro lado, y para el caso latinoamericano, Raso-Delgue realiza un estudio acerca de los efectos que tiene la tecnología sobre el empleo en México, Chile y Brasil. Entre los resultados resalta la identificación de los siguientes factores potencialmente perjudiciales para los trabajadores:

- Intensificación de la jornada laboral a través de ritmos rigurosos y rápidos durante prolongados horarios.
- Aumento en la variedad e imprevisibilidad de las actividades diarias.
- Aumento en la cantidad de responsabilidades del trabajador.
- Los nuevos trabajos requieren que los trabajadores sean capaces de resolver problemas de modo continuo.
- El constante flujo de información que proveen las TIC agiliza la cadena de mando lo que provoca un clima de presiones para obtener la limitada disponibilidad de los trabajadores.

- Los empleos de la I4.0 se caracterizan por la generación de altos niveles de estrés que actúan en detrimento de la salud psicofísica de los trabajadores.

En congruencia con esto, Magdalena y Ernst (2016) en su investigación acerca de los impactos de la I4.0 y el futuro del trabajo destacan que, ante la creciente adopción de tecnologías inherentes a la I4.0 se espera que la carga psicológica y de estrés provocados por la intensificación de las jornadas laborales vaya en aumento, por lo que es importante que las empresas pongan especial atención en mitigar los efectos sociales de la I4.0.

3.3. Perfil de los trabajadores del futuro

El modelo I4.0 propone importantes cambios en la forma en la que producimos, trabajamos y vivimos; desplaza las labores simples por procesos de automatización y digitalización, mientras que genera empleos que requieren altos niveles de preparación. En tanto que las actividades físicas se vuelven menos relevantes, el cambio de paradigma verá el surgimiento de nuevas profesiones fundamentales para la operación y gestión del sistema productivo, sobre todo en los campos de comunicación, planeación, ejecución y toma de decisiones, programación, control y corrección de errores (Frey y Osborne, 2017; Magdalena y Ernst, 2016). Tomando esto en cuenta, se considera que la educación de los futuros trabajadores tendrá que transformarse para preparar a los trabajadores de la nueva era (Benešová y Tupa, 2017). Así, los puestos de trabajo de la I4.0 requieren que el nivel cualificación del recurso humano se incremente (Hecklau, Galeitzke, Flachs, y Kohl, 2016; Kinzel, 2017).

La actual transformación de los procesos productivos implica que los perfiles de los trabajadores de la I4.0 cambiarán en todos los aspectos. En este sentido, Sachon (2018) expresa que la propagación de la web y el acceso a la información, darán lugar

a un nuevo tipo de trabajadores del conocimiento, quienes a su vez serán capaces de encontrar rápidamente soluciones a problemas complejos gracias a su experiencia y su competencia en el uso de la Internet.

Ante los cambios que se avecinan, Benešová y Tupa (2017) exponen que solo los individuos altamente cualificados y educados serán capaces de controlar las nuevas tecnologías por lo que es necesario que la industria colabore con las universidades. Por otro lado, autores como Magdalena y Ernst (2016) destacan que, a pesar de los altos niveles de automatización, los humanos continuarán jugando un papel primordial dentro de los procesos de la I4.0, tal que los procesos manuales –clásicos– se realizarán de forma adecuada gracias a las habilidades de las personas, tales como la inteligencia, creatividad, empatía o flexibilidad. En este sentido, Eichhorst (2017) destaca que, ante la situación de creciente penetración tecnológica, el panorama laboral será dominado principalmente por tareas que requieran capacidades humanas específicas difíciles de automatizar o digitalizar. En este tenor, Rodríguez (2017) expresa que, las personas realizarán cada vez más tareas creativas y las actividades de análisis y gestión de datos serán vitales para preservar la eficiencia del sistema. Además, el autor afirma que la producción intensiva en mano de obra irá disminuyendo mientras que las actividades que requieran conocimientos de software y programación tomarán cada vez más importancia.

Por su parte, Frey y Osborne (2017) afirman que, los trabajadores poco cualificados tendrán que desplazarse a puestos de trabajo no susceptibles a la computarización. Por ejemplo, actividades que requieran inteligencia social y creatividad. Además, los autores destacan que las ocupaciones que tienden a ser desplazadas por procesos de automatización y digitalización tienden a requerir bajos niveles de cualificación y a tener bajos niveles salariales. En consecuencia, para que los trabajadores puedan realizar el cambio de forma exitosa, es imprescindible que estos adquieran

habilidades interpersonales y creativas.

3.4. Desafíos de la Industria 4.0

Es evidente que no existe un consenso en relación con las consecuencias y las implicaciones laborales de la I4.0, sin embargo, lo que se aprecia en la literatura es una tendencia hacia el pesimismo. Pocos autores dedican su esfuerzo a estudiar las ventajas de los nuevos puestos laborales, mientras que la mayoría de los investigadores se enfocan en las implicaciones negativas como la destrucción de empleos y para el caso de los países en vías de desarrollo, la precarización e informalización del mercado laboral, las cuales juegan un papel primordial en el estudio de los desafíos de la nueva era tecnológica (Bensusán Areous, 2017). Si bien, la I4.0 es capaz de generar grandes beneficios para la sociedad, los desafíos que plantea la creciente brecha laboral y la desigualdad son difíciles de cuantificar, dado que las innovaciones tecnológicas y sus disrupciones impactan a la sociedad tanto de forma positiva como negativa (Saquicela, 2020).

Queda claro que la I4.0 impacta el mercado laboral e incrementa la demanda de trabajadores con altos niveles de preparación, sin embargo, no siempre resulta factible satisfacer la demanda de este tipo de trabajadores. En este tenor, Magdalena y Ernst (2016) destacan que –para el caso alemán– habrá un déficit de trabajadores capacitados gracias a la situación demográfica del país. Los autores también expresan que atraer y conservar trabajadores cualificados se ha convertido en una difícil tarea para las medianas empresas. Tomando en cuenta esto, es que se considera como uno de los principales desafíos a futuro la generación de oportunidades para que los trabajadores logren las cualificaciones necesarias para participar en procesos más complejos y asegurar la retención laboral en el entorno de la I4.0 (Hecklau *et al.*,

2016).

Por otro lado, Kinzel (2017) identifica que las personas encargadas de diseñar los nuevos sistemas de producción frecuentemente omiten la inclusión del factor humano en sus planes. Tienden a concentrarse de sobremanera en los sistemas, procesos, análisis y algoritmos, tal que pareciera que el motivante principal fuera el de la tecnología por el bien de esta, y el factor humano rara vez forma parte de las especificaciones de los sistemas de la I4.0. Adicionalmente, la intrascendencia del factor humano en el diseño de los procesos productivos ha impactado de forma negativa la moral de los trabajadores. Kinzel destaca que, hay muchos trabajadores que se están quedando fuera de los procesos o al menos sienten que no pertenecen a ellos. Esto podría llevar a futuras frustraciones y sentimientos de no pertenencia a la comunidad, lo que agudizaría las inestabilidades de las sociedades al rededor del mundo. Es por esto, que el autor hace hincapié en la importancia de las personas a través de todas las partes del sistema productivo, ya que “descuidar el factor humano en un sistema tan complejo como la I4.0 puede llevar al total fracaso del concepto” (p. 78).

Otro desafío que puntualizan Magdalena y Ernst (2016) radica en la continua reducción de las tareas más simples y repetitivas del proceso productivo. De acuerdo con los autores, es necesario que se establezcan programas de desarrollo para los trabajadores desplazados, de lo contrario esto podría llevar a problemas sociales relacionados con el desempleo en masa. Por su parte, Benešová y Tupa (2017) estipulan que la transición hacia estos métodos tan sofisticados de producción no será posible de forma inmediata debido a los altos costos de implementación y la falta de empleados con las cualificaciones necesarias, por lo que se espera que la transición hacia la I4.0 se lleve a cabo de forma paulatina.

En relación con esto, Bensusán Areous (2017) identifica que en el presente “muy pocos países tienen seguros de desempleo y, donde existen, estos apenas cubren a un

porcentaje muy [pequeño] de los trabajadores” (pp. 167–168). Ante esta problemática, se torna importante [sobre todo en los países en vías de desarrollo, donde existe la tendencia hacia la precarización del mercado laboral], levantar el interés de especialistas y organizaciones por identificar el impacto disruptivo que tiene la cuarta revolución industrial sobre el empleo. De igual manera, otros autores como Sumer (2018) señalan la importancia de la intervención de por parte de las entidades gubernamentales para la generación de proyectos que busquen analizar, diseñar y aplicar políticas con el propósito de sobrellevar los desafíos de la nueva era industrial.

3.5. La Industria 4.0 en México

En 2016, México realizó los primeros esfuerzos para incursionar en la adopción de sistemas de manufactura inteligente. La agencia federal ProMéxico, encargada de coordinar las estrategias destinadas a fortalecer la participación del país en la economía internacional, publicó el documento *Crafting the Future. A roadmap for Industry 4.0 in México* (Secretaría de Economía, 2021), que propone un plan de trabajo en el que se sugieren estrategias para la implantación del modelo I4.0 en la manufactura mexicana. El plan de acción incluía aspectos como IoT, CPS y manufactura inteligente (AXIS, 2019), sin embargo, al inicio de la administración de Andrés Manuel López Obrador en 2018, se decidió eliminar el decreto que construyó el fideicomiso público ProMéxico. Terminando así con la principal fuente promotora de IED y generación de exportaciones del país (Perret-Erhard, 2021). Debido a la desintegración de la agencia, es cuestionable que las estrategias de I4.0 propuestas sean retomadas por el gobierno actual (AXIS, 2019).

Otra iniciativa para promover el desarrollo del modelo I4.0 en la industria manufacturera del país fue el Programa para el Desarrollo de la Industria del Software y la

Innovación (PROSOFT), cuyo objetivo general fue fomentar la innovación económica a través de la creación y fortalecimiento de Centros de Innovación Industrial (CII) y de políticas públicas que promuevan el desarrollo de ecosistemas de innovación. El PROSOFT buscaba habilitar los ejes transversales de I4.0: IoT, IoS y logística a través de la adopción tecnológica, la generación y especialización de recursos humanos, así como la transmisión de conocimiento y el apoyo a iniciativas que beneficiaran la productividad del país (Secretaría de Economía, 2016a). Sin embargo, a partir de 2019, el gobierno actual dejó de asignar presupuesto al programa, por lo que dejó de operar a finales de 2020 (Centro de Estudios de las Finanzas Públicas, 2021).

El último programa en este rubro en ser desmantelado por la administración de López Obrador fue el Programa para la Productividad y Competitividad Industrial (PPCI), que era un plan del Gobierno Federal para promover el crecimiento de la productividad en los sectores estratégicos del país (Secretaría de Economía, 2016b). El PPCI tenía tres objetivos: (1) promover la modernización de los procesos productivos a través de maquinaria, equipo y apoyo a la manufactura inteligente -I4.0-, (2) permitir la integración interempresarial a través de programas de certificación y encuentros empresariales sectoriales, y (3) la creación de Centros de Transformación Industrial para potenciar el desarrollo de servicios y productos especializados Secretaría de Desarrollo Económico y Portuario (2020). El programa se mantuvo activo de 2016 a 2020 y durante ese periodo se otorgaron apoyos a empresas en la ejecución de proyectos industriales con el propósito de impulsar la integración de cadenas de valor, la creación de productos competitivos y la modernización de procesos productivos Secretaría de Economía (2016b). El presupuesto asignado al PPCI en 2021 fue de apenas 1.4 millones y en 2022 el programa desapareció del presupuesto de egresos de la Secretaría de Economía (Centro de Estudios de las Finanzas Públicas, 2021).

A pesar de la sistemática disolución de las iniciativas a favor del desarrollo y la

modernización productiva en México, irónicamente, el Programa Sectorial de Economía 2020-2024 del Gobierno Federal sigue teniendo como objetivos el fomento a la innovación y el desarrollo de la economía de los sectores productivos, así como el impulso a la generación y consolidación de las micro, pequeñas y medianas empresas (MIPYMES), sin embargo, es evidente que “desde la óptica presupuestal no es posible identificar los programas y recursos que permitan alcanzar dichos objetivos” (Centro de Estudios de las Finanzas Públicas, 2021, pp. 7). Además, se reconoce que el presupuesto del ramo 10 *Economía* es sumamente deficiente, especialmente en los programas de fomento a la productividad e innovación de las MIPYMES. Actualmente, el programa más importante del ramo 10 es el *Programa de Microcréditos para el Bienestar*, cuyo objetivo principal es “beneficiar a pequeños negocios o actividades productivas tradicionales, cuyo acceso a los servicios del sector financiero es limitado, para que inicie un negocio o consolide uno existente” (Centro de Estudios de las Finanzas Públicas, 2021, pp. 7). En este sentido, el paquete económico 2022 entregado por la Secretaría de Economía el 8 de septiembre de 2021, se centra en la ampliación de programas sociales, la reactivación de PEMEX y proyectos de infraestructura como el proyecto turístico Tren Maya, el aeropuerto internacional de Santa Lucía, la refinera de petróleo de Dos Bocas en el estado de Tabasco y un tren en el Istmo de Tehuantepec (Cota, 2021).

Es evidente que la actual administración ha abandonado los esfuerzos por modernizar los sectores productivos del país, dejando que la iniciativa privada tome por completo las riendas del avance en la transición al modelo I4.0. A pesar de ello, se espera que la industria manufacturera en México invierta 3,500 millones de dólares en tecnología en 2022, lo que representa el nivel de inversión que tenía en 2019, antes de la pandemia (Riquelme, 2021). Además, han surgido propuestas de empresas privadas como *Innovar por México* de la transnacional Microsoft, que pretende impulsar

la transformación digital de las MIPYMES en el país (Cluster Industrial, 2021). Otro ejemplo es el evento Industrial Transformation México (ITM) que se realiza anualmente durante el mes de octubre en la ciudad de León Guanajuato (ITM, 2022). El foro a gran escala aborda temas relacionados con la I4.0 y es considerado como sede de la feria Hannover Messe en México (AXIS, 2019). Adicionalmente, las iniciativas de los gobiernos estatales para la implementación de tecnologías I4.0, como es el caso de la iniciativa Nuevo León 4.0 (Córdova, 2017) y el Programa Estatal para el Desarrollo de la Tecnología y la Innovación (PEDETI) de Querétaro (Contreras, 2021), han cobrado una renovada importancia en el desarrollo regional del país.

Capítulo 4

Medición de la Industria 4.0

4.1. Medición de la Industria 4.0

En años recientes se han llevado a cabo diferentes esfuerzos con el propósito de estimar el nivel de implementación de tecnologías relacionadas con la I4.0 tanto en las empresas como en las regiones. Es destacable que la gran mayoría de estas investigaciones se han llevado a cabo en el continente europeo, mientras que los estudios para el caso de México y Latino América son escasos. A continuación, se presentan los principales modelos e índices que buscan estimar el nivel de preparación e implementación de I4.0 encontrados en la literatura.

La medición de la I4.0 se divide en Modelos de Madurez (MM por sus siglas en inglés, Maturity Models) e Índices de Preparación (RI por sus siglas en inglés, Readiness Indexes). Los MM se enfocan en medir el grado de utilización de tecnologías, estrategias y organización inherentes a la I4.0 al interior de las empresas, mientras que los RI se encargan de medir el grado de preparación de una región, comúnmente un país o un conjunto de países con respecto al nivel de preparación y acondicionamiento con respecto al modelo I4.0.

4.1.1. Índices de preparación

En torno a la medición del acondicionamiento de las regiones para la implementación de procesos y tecnologías de la I4.0, Atik y Ünlü (2019) elaboraron y aplicaron en 33 países europeos un RI llamado *Industry 4.0 Index* basado en la medición de tres características principales: (1) La digitalización de sistemas de producción e información; (2) la automatización de sistemas; y (3) el intercambio de datos automático. Asimismo, mide cuatro componentes de la I4.0: (1) Sistemas ciber-físicos; (2) el Internet de las Cosas; (3) el Internet de los Servicios y; (4) la Fábrica Inteligente. Los autores encontraron que los países que tenían los niveles más altos de implementa-

ción de I4.0 eran Dinamarca, Finlandia, Bélgica, Países Bajos y Alemania. Por otro lado, los países con los niveles más bajos de implementación de I4.0 fueron Turquía, Grecia, Bulgaria y Rumania.

En otro orden de ideas, Basl y Doucek (2019) llevaron a cabo una revisión de literatura a través de la cual identifican y enlistan los principales RI disponibles para la tendencia industrial denominada I4.0 en países principalmente europeos (ver tabla 4.1), encontrando los siguientes modelos: (1) RAMI 4.0, modelo de referencia arquitectónica para la I4.0; (2) NRI, Network Readiness Index; (3) GII, índice global de innovación, (4) GCI, índice global de competitividad, (5) la tabla de puntuación OECD y; (6) el índice de preparación para la I4.0 de Roland Berger. Además, los autores identifican y enlistan los principales MM que se describen más adelante.

Tabla 4.1: Principales índices de preparación (Readiness Indexes).

Abreviación	Nombre	Autoridad Evaluadora	Número de Indicadores Individuales	Número de Países Evaluados
NRI	Networked Readiness Index (Índice de Preparación de Redes)	Foro Económico Mundial (WEF)	51	139
GII	Global Innovation Index (Índice Global de Innovación)	Universidad de Cornell, INSEAD, WIPO	81	127
Tabla de puntuaciones de la OECD	Science, industry and technology Scoreboard (Tabla de Puntuaciones de Ciencia, Industria y Tecnología)	OECD	200	31
RBI	RB Industry 4.0 Readiness Index (Índice de preparación RB Industria 4.0)	Rolland Berger	El tamaño de la industria como proporción del PIB representa el segundo eje al lado del índice RB.	24

Fuente: (Basl y Doucek, 2019, p. 4).

4.1.2. Modelos de Madurez

En torno a la medición de la implementación de tecnologías relacionadas con la I4.0 al interior de las empresas, Gökalp, Şener, y Eren (2017) llevaron a cabo una

revisión de literatura sistemática donde identifican y enlistan los principales Modelos de Madurez en relación con la I4.0 existentes a la fecha de publicación del estudio. El estudio recopila siete instrumentos: (1) Modelo de Madurez de Conectividad Empresarial; (2) modelo IMPULS Preparación para la I4.0; (3) Modelo Estrategia de Empoderamiento y Estrategia de Implementación para la I4.0; (4) el Modelo de Autovaloración de Operaciones Industriales / I4.0; (5) el MM para la Preparación de la I4.0; (6) el MM para la Internet Industrial y; (7) el SIMMI 4.0, un MM para la clasificación de IT a través de la empresa y el panorama de software con enfoque en la I4.0.

En tanto, Schumacher *et al.* (2016) desarrollan el *MM para la preparación de la I4.0*, el cual propone 8 dimensiones de valoración: estrategia, liderazgo, clientes, productos, operaciones, cultura, personas, gobernanza y tecnología. De acuerdo con los autores, el instrumento es transparente y fácil de administrar. Utiliza una escala Likert con 5 puntos de asignación de respuesta para estimar el nivel de madurez de las organizaciones.

Otro instrumento es desarrollado por Koska, GÖKSU, Erdem, y FETTAHLIOĞLU (2017) quienes publican el *Modelo de Medición de Madurez para la I4.0* con el propósito de medir la aplicación de la I4.0 en las fábricas. Se apoya de un cuestionario con 9 preguntas de interés que buscan posicionar a la fábrica en uno de los 4 posibles estados de madurez industrial de acuerdo con la complejidad y novedad de sus procesos productivos.

Por su parte, Basl y Doucek (2019) a través de una revisión exhaustiva de literatura en relación con los modelos de madurez existentes (ver tabla 4.2), encuentran que la mayoría de ellos han sido publicados en el período 2014 a 2018 a través de un amplio espectro de lugares de trabajo, la gran mayoría de ellos a través de Europa.

Tabla 4.2: Modelos de Madurez

Modelo	Autoridad evaluadora	Año de publicación
RAMI 4.0 Reference Architectural Model Industrie 4.0 (Alemania)	BITCON VDI/VDE, ZVEI	2015
Industry 4.0 Component Model-derived from RAMI 4.0 and oriented on information technology (Alemania)	-	2015
IMPULS Industry 4.0 Readiness (Alemania)	VDMA y RWTH	-
SIMMI 4.0 System Integration Maturity Model Industry 4.0 (Alemania)	TU Dresden y TU Heilbronn	2016
M2DDM Maturity Model for Data Driven Manufacturing (Alemania)	Universidad de Stuttgart	2017
Digitalization Degree of Manufacturing Industry (Alemania)	Universidad de Erlangen-Nuremberg	2016
Industry 4.0 Maturity Model (Austria)	Fraunhofer Austriaco y la Universidad Austriaca de tecnología en Viena	2016 en Vienna
Reifegradmodell Industrie 4.0 (Austria)	Fachhochschule Oberösterreich en colaboración con Mechatronik-Clusters	2016
Roadmap Industry 4.0 (Austria)	Universidad de Caphenberg	2017
Digital Maturity Model (Suisa)	Universidad Suiza de San Gallen en colaboración con Crosswalk	2015
DREAMY The Digital Readiness Assessment Maturity Model (Italia)	Confindustria, Assoconsult y la Universidad del Politecnico de Milan	2017
Industry 4.0 Readiness Evaluation for Manufacturing Enterprises (Hungria)	Academia de Ciencias	2016

Industrie 4.0 MM Assessment model for Industry 4.0 (Turkia)	Universidad Ankara	2017
An Industry 4 readiness assessment tool (Reino Unido)	Universidad de Warwick	-
Stage maturity model in SME towards Industry 4.0 -	-	2016
Industry 4.0/ Digital Operation Self-Assessment -	Price Waterhouse Coopers	2016
APM Maturity Model Asset Performance Management Maturity Model -	Capgemini	2017
The Connected Enterprise Maturity Model Rockwell Automation	-	2014
Industrie 4.0 Maturity Mode -	Acatech Studie	2017
Firma4.cz (Republica Checa)	Ministro de Industria y Comercio	-
Pathfinder 4.0 -	-	-
The Singapore smart industry readiness index (Singapur)	Comité de desarrollo económico de Singapur	2018

Fuente: elaboración propia con base en (Basl y Doucek, 2019, pp. 4-5).

4.1.3. Consideraciones acerca del nivel de conocimiento de la Industria 4.0

Primero conviene destacar que a pesar de que la literatura disponible en relación con la I4.0 y su implementación al interior de las empresas es abundante, los estudios acerca del conocimiento requerido por los trabajadores para la exitosa im-

plementación de la I4.0 son escasos (Carrillo, Gomis, De los Santos, Covarrubias, y Matus, 2020). Investigaciones al respecto sugieren que el conocimiento que poseen los trabajadores en relación a la I4.0 y las tecnologías que la configuran es de gran valor, en virtud de su cercanía a la acción (Ynzuna-Cortés, Izar-Landeta, y Chacón, 2017), además, su utilidad es juzgada en torno a las decisiones a las que conduce, así, altos niveles de conocimiento permiten la toma de mejores decisiones, destacando la importancia del dominio de la I4.0 ante el panorama de una economía global cada vez más competitiva (Trujillo-Albarrán, Salgado-Gallegos, y Pérez-Merlos, 2020). Al mismo tiempo, la evolución de la industria convencional hacia la fábrica inteligente hace notar la importancia del conocimiento y dominio de las nuevas tecnologías, ya que en él se apoya el desempeño de las empresas, transforma la producción y contribuye en la diferenciación de los productos y los servicios (Trujillo-Albarrán *et al.*, 2020).

En el presente contexto, Sony y Naik (2019) realizan una revisión exhaustiva de literatura con el propósito de identificar aspectos de interés presentes en los procesos de evaluación del nivel de preparación para la I4.0 que tienen las empresas. Los autores encontraron que, para el caso de la Unión Europea, algunos de los directivos de grandes empresas tienen nulo o poco conocimiento del término I4.0. Adicionalmente, otros altos mandos de la industria tenían nociones de la I4.0, no obstante, desconocían los métodos y estrategias para implementarla en sus empresas.

Por su parte, Carrillo *et al.* (2020) señalan que los atrasos en la preparación de las empresas y los trabajadores con pocas cualificaciones representan hoy en día un desafío para que las organizaciones logren implementar con éxito las tecnologías de la I4.0. Asimismo, los autores destacan que las competencias individuales y sociales, así como los métodos utilizados en los procesos de implementación y desarrollo de la I4.0 son fundamentales para las empresas modernas.

4.1.4. Consideraciones acerca del nivel de implementación de la Industria 4.0

En torno a la implementación de las tecnologías relacionadas con la I4.0, Carrillo *et al.* (2020) expresan que, debido a su naturaleza multidimensional, la I4.0, se tiende a implementar de forma distinta en cada empresa. Además, consideran que la I4.0 se forja en la práctica, “es performativa, y para que exista se necesita una continua inversión de actores comprometidos con esta nueva realidad industrial” (p. 6).

Otros autores han argumentado que el diseño de la implementación de la I4.0 debe realizarse tomando en cuenta las condiciones de cada caso; el escenario productivo y organizacional, así como los objetivos estratégicos y recursos de las empresas (Martínez-Martínez, 2020). De acuerdo con Müller, Kiel, y Voigt (2018), el tamaño de la organización, así como su estructura productiva, son elementos que deben tomarse en cuenta para el diseño de estrategias de implementación de la I4.0. Esto representa grandes desafíos, en especial para aquellas empresas que no poseen los recursos financieros para implementar todos los aspectos de la I4.0. En este contexto, los autores expresan que “en muchos casos es necesario el reacondicionamiento de sistemas existentes de producción, sin embargo, debe evitarse la implementación de la I4.0 de forma aislada del resto del sistema productivo. De ser así, la coordinación y sincronización con el equipo de producción existente puede resultar en altos niveles de complejidad y costos, lo que puede significar un gran reto para las PYMES” (Müller *et al.*, 2018, p. 7, traducción propia).

En torno a los requerimientos necesarios para la implementación de las tecnologías asociadas con la I4.0, Martínez-Martínez (2020) destaca que es necesario que las empresas posean una infraestructura tecnológica específica y trabajadores con aptitudes multidisciplinarias y habilidades diversas. Además, Ynzuna-Cortés *et al.*

(2017) afirman que la implementación exitosa de la I4.0 depende principalmente del potencial de integración en red que puedan fomentar las empresas con el propósito de garantizar la conectividad y la creación de sistemas productivos flexibles, así como la integración de la cadena de valor, habilitando de esta forma, la operación de la nueva generación de manufactura.

En relación con los retos que enfrentan las empresas para la implementación de la I4.0, Gökalp *et al.* (2017) argumentan que, durante la etapa de desarrollo, es de vital importancia precisar de forma clara la estructura y métodos a utilizar en las directrices para la implementación de la I4.0. Por otro lado, Ynzuna-Cortés *et al.* (2017) señalan una serie de desafíos a tomar en cuenta durante las etapas de diseño y posterior implementación del modelo I4.0. Entre ellas destacan: las cuestiones de seguridad, el alto nivel de inversión en tecnología que requiere la transformación hacia la I4.0 y la obtención de las competencias asociadas con la gestión y análisis de datos. Además, la programación, simulación, mantenimiento, entre otros, también son considerados posibles obstáculos que pueden afectar los planes de implementación establecidos.

A la luz del papel fundamental que tiene el conocimiento tecnológico en relación con la exitosa implementación de la I4.0, y en virtud de la escasez de estudios en este rubro, se considera relevante e imperativo llevar a cabo estudios con la finalidad de ampliar el conocimiento en relación al conocimiento e implementación de la I4.0.

4.2. Medición de la Industria 4.0 en México

Seis años antes del nacimiento del modelo productivo I4.0 que marcaría la llegada de la cuarta revolución industrial, Carrillo y Gomis (2005) realizan el primer estudio regional enfocado en la medición cuantitativa y la clasificación de las maquiladoras

de acuerdo con su nivel de adopción tecnológica, grado de autonomía en la toma de decisiones y nivel de integración inter-empresa. El estudio se realizó en las localidades de Ciudad Juárez, Mexicali y Tijuana e incluyó a 298 empresas de las ramas de autopartes y electrónica. Entre los resultados obtenidos destaca la identificación de una nueva generación de empresas caracterizada por su alto nivel de implementación tecnológica y autonomía, estas fueron clasificadas como *empresas de cuarta generación*.

El estudio se basa en un detallado análisis, a través del cual los autores logran categorizar a las empresas de la región en tres generaciones. Las empresas de primera generación están compuestas por “plantas extranjeras de ensamble tradicional, desvinculadas productivamente de la industria nacional; con escaso nivel tecnológico, una gran dependencia de las decisiones de las matrices y de los clientes principales y, de manera central” (Carrillo y Gomis, 2005, p. 30), se basan el trabajo manual intensivo efectuado principalmente por mujeres, los puestos de trabajo son inflexibles y las actividades a realizar monótonas y repetitivas. Estas empresas logran ser competitivas en virtud de los bajos salarios relativos y la intensificación del trabajo.

Las empresas de segunda generación se caracterizan por tener un nivel mayor de diversidad en el origen de su capital y están orientadas a la manufactura. “Tienen un desarrollo incipiente de proveedores cercanos de insumos y servicios directos e indirectos, un mayor nivel tecnológico y automatización, un gradual, aunque tímido proceso de autonomía de las decisiones de las matrices” Carrillo y Hualde (1996) en (Carrillo y Gomis, 2005, p. 30), asimismo, de forma central, tienen un gran movimiento de racionalización de los procesos productivos y del trabajo. Además, los autores exponen que esta generación se distingue por la incorporación de más hombres en las plantas, así como también trabajadores con altos niveles de calificación, técnicos e ingenieros. El enfoque es en la mejora de la calidad, reducción de los

tiempos de entrega, las fuentes de retrabajo, retrasos, tiempos muertos e inventarios. Asimismo, estas empresas tienen la capacidad de reaccionar en el corto plazo ante las fluctuaciones de la demanda.

Las empresas de tercera generación se enfocan principalmente a la investigación y desarrollo, así como también en el diseño. Tienen una mayor presencia de corporativos transnacionales, pero, a su vez tienen un alto nivel de autonomía en la toma de decisiones y su nivel tecnológico tiende a ser mayor. Una de sus principales características es la integración vertical intrafirma e interfirma. En relación con esto, “los clusters se forman con centros técnicos, plantas de ensamble, proveedores de componentes, proveedores indirectos como talleres de maquinado o de inyección de plástico y proveedores de servicios” (Carrillo y Hualde, 2002; Dutrénit y Vera-Cruz, 2002a y 2003) en (Carrillo y Gomis, 2005, p. 31). Además, los autores destacan que una de sus actividades es el desarrollo de proyectos, y es en este tenor que se crean grupos de ingenieros y soporte técnico, sus ventajas competitivas radican en la reducción del tiempo de los proyectos, la reducción de los costos de operación y la rapidez de sus procesos de manufactura. Lo anterior es habilitado por su capacidad tecnológica y de ingeniería. Asimismo, los bajos salarios relativos de los trabajadores cualificados, la cercanía con las plantas de ensamble y manufactura y su constante comunicación juegan roles importantes en la generación de las ventajas comparativas y competitivas de estas empresas.

Adicionalmente, Carrillo y Gomis encuentran 6 tipos de empresas y las clasifican de acuerdo con sus niveles de tecnología, autonomía e integración (Ver la tabla 4.3).

Tabla 4.3: Clasificación de plantas maquiladoras de acuerdo con su tipo, generación, características y proporción del total de la muestra

Tipo	Generación	Características	Porcentaje de las plantas
1	Primera generación	Bajo nivel tecnológico, nivel medio de integración vertical, la mayoría de sus actividades son manuales, poca innovación, estándares bajos de calidad.	13.13 %
2	Primera generación en tránsito	Alto nivel tecnológico, alto nivel de autonomía.	5 %
3	Segunda generación	Alto nivel tecnológico, alto nivel de autonomía, bajo nivel de integración, su organización es simple y poco diversificada.	11 %
4	Segunda generación	Bajo nivel de autonomía, nivel tecnológico medio, alto nivel de integración.	16 %
5	Segunda generación en tránsito	Muy alto nivel tecnológico, nivel medio de autonomía, nivel de integración bajo.	26.9 %
6	Tercera generación	Altos niveles de tecnología, autonomía e integración.	27.6 %

Fuente: Elaboración propia con base en (Carrillo y Gomis, 2005, pp. 41–43)

Finalmente, los autores lograron identificar una cuarta generación de empresas emergentes caracterizadas por la realización de actividades basadas en las tecnologías de la información, tal como la producción de software especializado en *supply chain management*, flujos de información intrafirma y la generación de diversos algoritmos. Estas empresas suelen realizar las actividades de las casas matrices y uno de sus principales enfoques es la logística y la sincronía de la producción. Carrillo y Gomis señalan que estas empresas son capaces competir con las filiales transnacionales.

Entre las conclusiones del estudio, destaca que cerca un tercio de los establecimientos encuestados reportaron tener altos niveles de implementación tecnológica. Además, los autores consideran que la gran heterogeneidad de las actividades que realizan las plantas maquiladoras es uno de los factores determinantes de las diferentes configuraciones y niveles de implementación tecnológica, integración y autonomía de las empresas.

Recientemente AXIS (2019), llevó a cabo un estudio para el Estado de Baja California, con la finalidad de estimar el nivel de preparación para la I4.0 que tienen sus empresas. A partir de una muestra de 164 trabajadores cualificados pertenecientes a seis sectores de manufactura, se estimó el nivel de conocimiento e implementación acerca de 19 tecnologías relacionadas con la I4.0.

Entre los resultados que conviene destacar, se encontró que “el número de empresas realizando acciones para participar en este cambio tecnológico es aún reducido, y en parte esto se debe a que se cree que las nuevas tecnologías son demasiado sofisticadas para sus procesos de manufactura actuales, incluso cuando algunas de estas empresas pertenecen a sectores considerados de alta tecnología” (AXIS, 2019, p. 63). Además, los niveles de conocimiento e implementación de tecnologías de la I4.0 fueron bajos, sin embargo, las empresas mostraron interés por incursionar en procesos más tecnificados con el propósito de mejorar sus tiempos de respuesta, flexibilidad y productividad.

Finalmente, se identificaron retos y oportunidades en relación con la adopción de la I4.0 en la región. Los grandes retos para las empresas locales fueron: (1) elevar el nivel de conocimiento y dominio de las tecnologías que se consideran dentro del espectro de I4.0, (2) complementar la infraestructura de talleres y laboratorios de primer nivel para dar soporte a los procesos de desarrollo e implementación, (3) configurar una estrategia interinstitucional articulada, y (4) monitorear el progreso

tecnológico y acelerar el ritmo de asimilación del cambio tecnológico. Las áreas de oportunidad identificadas fueron: (1) crear una base de proveeduría de soporte para la I4.0, (2) enfoque en el impacto de indicadores para empresas ya establecidas, (3) colaboración binacional para el desarrollo centrado en I4.0 y, (4) atracción de nuevos proyectos de manufactura avanzada vía el ecosistema.

Un año después, Carrillo *et al.* (2020) analizaron nuevamente la situación acerca del conocimiento e implementación de tecnologías asociadas con la I4.0 de los trabajadores especializados de las maquiladoras de Baja California. Su estudio utilizó los resultados de la encuesta realizada por AXIS (2019) y entre los resultados más importantes, destaca que los trabajadores aún no poseen los conocimientos necesarios para controlar las tecnologías de la I4.0. Y en relación con el nivel de implementación de tecnologías de la I4.0 que tienen las empresas se encontró que este es bajo.

Asimismo, lograron identificar que las tecnologías más conocidas por los trabajadores y con mayores niveles de implementación en las empresas son aquellas con menor complejidad y menos novedosas, así como aquellas que son tangibles, poco complejas y más antiguas.

Por otro lado, encontraron que los trabajadores consideran que las empresas donde laboran han realizado esfuerzos adecuados para la futura adopción y utilización de las tecnologías de la I4.0. En este sentido, cerca del 60% de los trabajadores encuestados reporto tener interés en la implementación de las tecnologías relacionadas con la I4.0 en sus empresas.

Por último, los autores destacan que “las tecnologías I4.0 se están implementando tanto en empresas grandes como en pequeñas, lo que contrasta [...] con la visión generalizada de que las PYMES están muy atrasadas tecnológicamente frente a las grandes empresas multinacionales” (p. 18).

Actualmente no existen estudios que aborden la estimación del nivel de imple-

mentación de tecnologías de la I4.0 para el caso de Chihuahua, sin embargo, hay una iniciativa llevada a cabo por la organización Chihuahua Futura que busca evaluar las competencias en materia de I4.0 en la capital del estado. Entre sus objetivos se encuentra el desarrollo una herramienta que permita a las empresas realizar una evaluación de su situación actual e identificar áreas de oportunidad para el desarrollo de su estrategia tecnológica (Chihuahua Futura, 2022). Es importante señalar que aún no se han publicado avances ni resultados de la investigación propuesta por la organización.

Por otro lado, organizaciones como el Foro Económico Mundial (FEM) realizan de forma anual una estimación acerca del nivel de preparación que tienen los países en relación con la I4.0. En 2016 el FEM a través de su Informe Global de Tecnología de la Información, presentó los resultados de la aplicación del Network Readiness Index (NRI), mostrando las economías que encabezan el avance en relación con la I4.0, México se ubicaba en el puesto 76 de un total de 139 países, estando por debajo de seis países de América Latina (Jacquez-Hernández y Torre, 2018). Para el año 2021, México se encontraba en el puesto 59 de un total de 130 países y se posicionaba como el octavo país en el continente americano. Además, los indicadores en relación con tecnología, recurso humano e impacto se encontraban por arriba del promedio en el continente (NRI, 2021). A pesar del notable avance que ha tenido el país en relación con su preparación para la I4.0, se considera que México aún enfrenta grandes retos para que sus empresas logren una completa integración de la I4.0.

Capítulo 5

Metodología

5.1. Objetivos de investigación

Ante la gran importancia de la región en el panorama industrial y laboral del país, y tomando en cuenta que las empresas maquiladoras se distinguen por la incorporación de diferentes tecnologías de la I4.0 en sus operaciones, es que resulta necesaria la estimación del nivel de preparación para la I4.0 que tienen las empresas de la ciudad, así como la evaluación de los efectos que tiene la implementación de la I4.0 sobre las empresas y sus trabajadores. Tomando esto en cuenta, se plantean para el presente estudio los siguientes objetivos, preguntas e hipótesis de investigación.

5.1.1. Objetivos generales

- Estimar el nivel de implementación de tecnologías asociadas con la I4.0 en las maquiladoras de Ciudad Juárez.
- Estimar el nivel de conocimiento de tecnologías asociadas con la I4.0 que poseen los trabajadores de las maquiladoras de Ciudad Juárez.

5.1.2. Objetivos específicos

- Evaluar la relación que tienen el nivel de conocimiento y el nivel de implementación de tecnologías de la I4.0 con el nivel de bienestar de los trabajadores.
- Evaluar la relación entre el nivel de implementación de tecnologías de la I4.0 y la eficiencia productiva de las empresas.

Conviene destacar que la estimación del bienestar de los trabajadores se llevó a cabo a través de dos variables; el nivel de sobrecarga laboral percibido y el nivel de salarios y prestaciones percibido.

5.1.3. Preguntas de investigación

1. ¿Cuál es el nivel de conocimiento de tecnologías de la I4.0 que poseen los trabajadores de empresas maquiladoras en Ciudad Juárez?
2. ¿Cuál es el nivel de implementación de tecnologías de la I4.0 que poseen las empresas maquiladoras en Ciudad Juárez?
3. ¿El nivel de conocimiento y el nivel de implementación de tecnologías de la I4.0 inciden en el bienestar de los trabajadores de las empresas maquiladoras en Ciudad Juárez?
4. ¿El nivel de implementación de tecnologías de la I4.0 incide en la eficiencia productiva de las empresas maquiladoras en Ciudad Juárez?

5.1.4. Hipótesis de investigación

El nivel de conocimiento de tecnologías de la I4.0 en Ciudad Juárez

Con base en la literatura revisada (ver capítulo 4.1) y en congruencia con lo estipulado por otros autores en relación al retraso generalizado en relación al conocimiento de las tecnologías inherentes a la I4.0, incluso en países industrializados (Carrillo *et al.*, 2020; Sony y Naik, 2019; Trujillo-Albarrán *et al.*, 2020; Ynzuna-Cortés *et al.*, 2017), se propone que:

- H1: Los trabajadores de las empresas maquiladoras de Ciudad Juárez poseen un nivel bajo de conocimiento de tecnologías de la I4.0.

El nivel de implementación de tecnologías de la I4.0 en Ciudad Juárez

La transición hacia la fábrica inteligente ha demostrado ser un gran desafío, sobre todo para las empresas que no tienen los recursos necesarios para implementar por completo todos los elementos de la I4.0 (Müller *et al.*, 2018). Además la implementación de la I4.0 se realiza de forma diferente para cada empresa (Carrillo *et al.*, 2020), esto provoca que los requerimientos en materia de diseño, planeación y desarrollo de las pautas de implementación de la I4.0 sean diferentes y tengan que modificarse de acuerdo al contexto de la empresa en cuestión (Gökalp *et al.*, 2017; Martínez-Martínez, 2020; Müller *et al.*, 2018; Ynzuna-Cortés *et al.*, 2017). Adicionalmente, otros autores (Carrillo *et al.*, 2020) han encontrado que el nivel de implementación de tecnologías de la I4.0 es bajo para empresas similares en el estado de Baja California. Por ello se considera para el caso estudiado que:

- H2: Las empresas maquiladoras de Ciudad Juárez poseen un nivel bajo de implementación de tecnologías de la I4.0.

El nivel de conocimiento de la I4.0 y el bienestar de los trabajadores

Sabemos que incrementos en los niveles educativos y de cualificación de los trabajadores tienden a mejorar sus condiciones laborales, así, los trabajadores con altos niveles de conocimiento son capaces de obtener puestos de trabajo con altos niveles salariales y de prestaciones. En este sentido, autores como Frey y Osborne (2017) estipulan que el nivel educativo de los trabajadores juega un papel preponderante en la supervivencia de sus puestos de trabajo. Los autores consideran que el avance tecnológico amenaza con la desaparición de los trabajos más simples del proceso productivo mientras que conserva los que son difíciles de automatizar y genera nuevos empleos que requieren niveles altos de preparación y educación.

En el presente contexto, diferentes estudios (Bensusán Areous, 2017; Eichhorst, 2017; Frey y Osborne, 2017; Rajnai y Kocsis, 2017) han encontrado que los puestos de trabajos con altos requerimientos cognitivos y bien pagados han presentado aumentos, mientras que los trabajos manuales, repetitivos y de baja remuneración han estado desapareciendo. Por ello, para los trabajadores de las maquiladoras se propone que:

- H3: El nivel de conocimiento de tecnologías de la I4.0 influye positiva y significativamente en la percepción de salarios y prestaciones de los trabajadores.

En otro orden de ideas, se considera que los trabajadores que tienen altos niveles de conocimiento con respecto a las tecnologías de I4.0 tienden a tener niveles más bajos de sobrecarga laboral que aquellos trabajadores que tienen niveles inferiores de conocimiento de tecnologías de I4.0. En este sentido, Maczewska, Polak-Sopinska, y Wisniewski (2019) expresan que es importante tomar en cuenta la carga laboral física a la par con la carga psicológica. Así, trabajos monótonos, repetitivos y del tercer turno, son asociados con altas cargas laborales que incrementan no solo la carga psicológica, sino, también la sobrecarga física y a su vez, incrementa el riesgo de accidentes en el lugar de trabajo.

Por su parte, Raso-Delgue (2018) destaca que los trabajadores con altos niveles de conocimiento en relación con las de tecnologías de I4.0 tienen niveles inferiores de carga física y sus puestos de trabajo rara vez les requieren asistir en el tercer turno. Sin embargo, podrían presentarse niveles altos de carga psicológica ya que se enfrentan a la toma de decisiones, y a menudo su trabajo les requiere desempeñar un número creciente de actividades. Además, la I4.0 puede intensificar el ritmo de trabajo, generando estrés en los trabajadores. Por ello, para el caso estudiado, se considera que:

- H4: El nivel de conocimiento de la I4.0 influye negativa y significativamente sobre el nivel de sobrecarga laboral de los trabajadores.

La implementación de la Industria 4.0 y su impacto sobre la empresa y sus trabajadores

Se considera que la implementación de tecnologías relacionadas con la I4.0 provocan mejoras en el nivel de conocimiento de la I4.0, ya que las empresas que no utilizan estas tecnologías no tienen el interés de contratar trabajadores con este tipo de cualificaciones. Además, las empresas que si implementan tecnologías de la I4.0 en sus procesos productivos buscan contratar trabajadores con altos niveles de conocimiento que les permitan operar las máquinas y software propios de la manufactura inteligente. Adicionalmente, conviene señalar que las empresas que implementan tecnologías de I4.0 tienen el interés de capacitar a sus trabajadores en la operación y funcionamiento de estas tecnologías. En congruencia con esto, Dassisti, Giovannini, Merla, Chimienti, y Panetto (2018) argumenta que las empresas pequeñas tienden a tener niveles inferiores de adopción de la I4.0 y, en consecuencia, niveles inferiores de conocimiento de tecnologías de la I4.0 que las grandes empresas. Tal que, las PYMES se caracterizan por procesos pobremente formalizados, utilizan hardware independiente y/o heredado y sistemas de software obsoleto. Además, poseen pocos recursos económicos en contraste de las grandes compañías. Por lo tanto, es común que el personal de IT tenga serios rezagos en relación con su conocimiento tecnológico.

Por su parte, Salvadorinho y Teixeira (2021) hacen hincapié en la importancia de la transferencia de conocimiento entre trabajadores familiarizados con los procesos propios de la fábrica inteligente y los trabajadores recién contratados, sin embargo,

se reconoce que este proceso no siempre ocurre fácilmente. Existen factores que dificultan la transferencia de conocimiento, tal como el esfuerzo que tienen que realizar los trabajadores para expresar su conocimiento en palabras, la ausencia de procesos de estandarización y documentación del conocimiento, el poco tiempo que ocupan los trabajadores estudiando la documentación existente y, lo más importante, el hecho de que los trabajadores utilizan su conocimiento como garantía para permanecer relevantes e indispensables en la empresa. En torno al ambiente de la I4.0 los autores afirman que se observan carencias en la transferencia de conocimiento, en el control de las prácticas de manejo de datos, así como en el entendimiento de como las compañías deben integrar las tecnologías 4.0 con el propósito de mejorar su flujo de trabajo. Tomando en cuenta esto, se propone que:

- H5: El nivel de implementación de tecnologías de la I4.0 influye positiva y significativamente en el nivel de conocimiento de tecnologías relacionadas con la I4.0.

En otro orden de ideas, podemos aseverar con cierta seguridad que uno de los beneficios más notorios de la implementación de la I4.0 es el aumento de la eficiencia de los procesos productivos (Wang y Wang, 2016) derivada de la reducción de costos y la digitalización de la producción. En este sentido, autores como Saquicela (2020) y Ciano *et al.* (2021) expresan que la I4.0 a través de la producción flexible y modular, hace posible que las empresas reaccionen con más agilidad ante las rápidas fluctuaciones de la demanda. Asimismo, se considera que la utilización de tecnologías digitales lleva consigo reducciones en los costos de producción (Bai *et al.*, 2020). Otros autores como Adeyeri *et al.* (2015) han afirmado que la adopción de CPS reduce los costos de producción. Asimismo, tecnologías como la simulación pueden llevar a mejoras en el rendimiento de los procesos productivos. Es por ello, que se propone que:

- H6: El nivel de implementación de la I4.0 influye positiva y significativamente en el nivel de eficiencia productiva de las empresas.

Como se mencionó anteriormente, es considerado por varios autores (Bensusán Areous, 2017; Frey y Osborne, 2017; Rajnai y Kocsis, 2017) que la I4.0 genera nuevos puestos de trabajo bien remunerados que requieren altos niveles de preparación y conocimiento en torno a las nuevas tecnologías. Por lo que se considera que mayores niveles de implementación de la I4.0 llevarán a que las empresas aumenten en el número de posiciones laborales bien remunerados. Es por ello, que se plantea que:

- H7: El nivel de implementación de tecnologías de la I4.0 influye positiva y significativamente en el nivel percibido de salarios y prestaciones de los trabajadores.

El clásico argumento tecno-productivo supone que el avance tecnológico sustituye la mano de obra humana por máquinas y robots, disminuyendo la carga laboral provocada por los trabajos intensivos en mano de obra y repetitivos. En este tenor, Van Acker, Conradie, Vlerick, y Saldien (2019) exponen que el ambiente laboral de la I4.0 habilita el monitoreo de la carga laboral en tiempo-real, lo que podría ayudar a llevar a cabo las adecuaciones necesarias para reducir los niveles de carga laboral inducidos por la utilización de tecnología de punta como realidad aumentada o robots colaborativos. Es por ello, que se propone que:

- H8: El nivel de implementación de la I4.0 influye negativa y significativamente en el nivel de sobrecarga laboral de los trabajadores.

Los trabajadores y la eficiencia productiva de la empresa

Con respecto al nivel salarial, Malul, Rosenboim, y Shapira (2021) destacan que existe un argumento económico ampliamente aceptado en el cual se estipula que las

diferencias salariales al interior de las empresas son indispensables en virtud de que es gracias a ellas que se pueden lograr niveles superiores de eficiencia económica. Los autores señalan que la razón por la cual los trabajadores más productivos pueden demandar un nivel salarial más alto es porque son estos quienes permiten que las empresas incrementen sus ganancias. Es por ello, que, en relación con la remuneración de los trabajadores, se plantea que:

- H9: El nivel percibido de salarios y prestaciones de los trabajadores influye positiva y significativamente en el nivel de eficiencia productiva de las empresas.

En otro orden de ideas, Ali, Ali, y Adan (2013) estudian la relación entre la sobrecarga laboral y la productividad de los trabajadores de manufactura, encontrando una relación positiva entre estas variables. Así, aumentos en el nivel de carga laboral y en las horas de trabajo fueron asociadas con niveles superiores de productividad en el corto plazo. Conviene señalar que altas cargas laborales durante periodos prolongados pueden llevar a disminuciones de la productividad. Por ello, se propone para el caso estudiado que:

- H10: El nivel de sobrecarga laboral influye positiva y significativamente en el nivel de eficiencia productiva de las empresas.

El bienestar de los trabajadores

Los puestos de trabajo bien remunerados que genera la I4.0 requieren altos niveles de cualificación (Bensusán Areous *et al.*, 2017; Frey y Osborne, 2017; Rajnai y Kocsis, 2017) , sin embargo, también se caracterizan por tener altos niveles de sobrecarga laboral psicológica (Maczewska *et al.*, 2019). En este contexto, se considera que si bien, la cualificación de los trabajadores es un determinante del nivel salarial, también

lo es el nivel de sobrecarga laboral del puesto de trabajo. Por ello, se postula para los trabajadores de manufactura que:

- H11: El nivel de sobrecarga laboral influye positiva y significativamente en el nivel percibido de salarios y prestaciones de los trabajadores.

5.2. Diseño metodológico

El diseño de investigación es correlacional causal, empírico de naturaleza cuantitativo y de corte transversal. La muestra de estudio está compuesta por 192 trabajadores cualificados de las empresas maquiladoras de Ciudad Juárez, Chihuahua. El muestreo fue no probabilístico por conveniencia e incluye trabajadores con puestos de directores, gerentes, ingenieros, empleados administrativos, técnicos, entre otros. La encuesta se administró en línea a través de un cuestionario distribuido vía correo electrónico y través de redes sociales durante el período del 11 de agosto de 2020 al 3 de febrero de 2021. Conviene señalar que no fue posible administrar el instrumento de forma presencial debido a las restricciones de movilidad establecidas a raíz de la pandemia por COVID-19.

Se tomó como base el instrumento de medición elaborado por AXIS (2019) el cual incluye las variables de (1) nivel de conocimiento de tecnologías asociadas con la I4.0, (2) nivel de implementación de tecnologías asociadas con la Industria 4.0, (3) nivel de intención de implementación de tecnologías asociadas con la I4.0 y, (4) nivel de eficiencia productiva de las empresas. Adicionalmente, se añadieron ítems que estiman las variables de (5) percepción de la sobrecarga laboral de los trabajadores y, (6) la percepción del nivel salarial y de prestaciones de los trabajadores. Finalmente, se modificó la escala de medición del modelo para utilizar una escala Likert con cinco puntos de asignación de respuesta. La tabla 5.1 muestra las variables, número

de ítems, escalas utilizadas y fuentes de los ítems.

Tabla 5.1: Variables, número de ítems, escalas y fuentes de los ítems

VARIABLES	Ítems	Escala de medición	Fuente
Conocimiento de las tecnologías de la Industria 4.0	18	Desde 1 = desconozco totalmente, hasta 5 = soy experto en el tema.	AXIS (2019)
Implementación de las tecnologías de la Industria 4.0	18	Desde 1 = no se implementa, hasta 5 = se implementa totalmente.	AXIS (2019)
Intención de implementación de las tecnologías de la Industria 4.0	5	Desde 1 = totalmente en desacuerdo, hasta 5 = totalmente de acuerdo.	AXIS (2019)
Eficiencia productiva de la empresa	6	Desde 1 = totalmente en desacuerdo, hasta 5 = totalmente de acuerdo.	AXIS (2019)
Percepción del nivel de salarios y prestaciones	6	Desde 1 = Muy inferior a otras similares, hasta 5 = Muy superior a otras plantas similares.	Elaboración propia
Sobrecarga laboral percibida	7	Desde 1 = totalmente en desacuerdo, hasta 5 = totalmente de acuerdo.	Fournier, Tanner Jr, Chonko, y Manolis (2010) Rivera y Romero (2016)

Fuente: elaboración propia.

La variable de conocimiento de las tecnologías de la I4.0 mide el nivel de conocimiento de 18 tecnologías¹ asociadas con la I4.0 que tienen los trabajadores, la variable de implementación de las tecnologías de la I4.0 mide el nivel de implementación de 18 tecnologías asociadas con la I4.0 que tienen las plantas maquiladoras, la variable intención de implementación de las tecnologías de la I4.0 mide el nivel de la intención de implementación de tecnologías de la I4.0 de acuerdo a 5 afirmaciones acerca de la preparación tecnológica con la que cuenta la planta maquiladora, la variable eficiencia productiva de la empresa mide la magnitud del impacto que tiene la I4.0

¹La encuesta aplicada mide el nivel de conocimiento e implementación de las siguientes tecnologías de la I4.0: análisis de datos masivos (Big Data), robótica colaborativa, robótica autónoma, realidad virtual, realidad Aumentada, aprendizaje de máquina (machine learning), manufactura aditiva (impresión 3D), vehículos autoguiados, internet de las cosas (IoT), cómputo en la nube (cloud computing), visión computacional (reconocimiento de patrones), esquemas de ciberseguridad, simulación / modelado digital, censado y colección digital de datos, cadenas de bloques (blockchain), integración vertical y horizontal de software, gemelo digital, monitoreo de procesos en tiempo real, gestión inteligente de energía, inteligencia artificial (AXIS, 2019).

sobre la empresa en torno a la reducción de costos y aumentos en la productividad, la variable percepción del nivel de salarios y prestaciones mide la percepción que tienen los trabajadores de sus salarios y prestaciones en comparación con otras empresas similares, la variable sobrecarga laboral percibida estima la carga laboral percibida por los trabajadores de acuerdo a la cantidad de tiempo disponible, la cantidad de trabajo realizado, la cantidad de decisiones tomadas, el esfuerzo mental realizado y la severidad de las consecuencias de los errores cometidos.

El instrumento utiliza cuatro de las variables propuestas por AXIS (2019). Además, se compilieron ítems de los trabajos de Fournier *et al.* (2010) y Rivera y Romero (2016) para medir el nivel de sobrecarga laboral percibida por los trabajadores de la maquiladora.

Tabla 5.2: Estadísticos descriptivos.

Categoría		No. de trabajadores	Porcentaje
Sexo	Hombre	123	64.0
	Mujer	66	34.4
	No contestó	3	1.6
	Total	192	100
Edad	Menor de 19	11	5.7
	Entre 20 y 34	115	59.9
	Entre 35 y 54	53	27.6
	Más de 55	10	5.2
	No contestó	3	1.6
	Total	192	100
Puesto de trabajo	Directivo/gerencia	23	12.1
	Mandos medios	44	22.9
	Ingenieros/técnicos	83	43.2
	Otros	40	20.8
	No contestó	2	1.0
	Total	192	100
Sector industrial	Automotriz	81	42.2
	Productos Medicos (medical devices)	29	15.1
	Eléctrico/electrónico/computacional	30	15.6
	Servicios técnicos y tecnológicos	15	7.8
	Metalmecánica/aplicación de pintura	8	4.2
	Plásticos	10	5.2
	Otros	17	8.9
	No contestó	2	1.0
	Total	192	100.0

Fuente: elaboración propia.

La tabla 5.2 muestra las características de los trabajadores que participaron en la investigación. El 64.0% de los encuestados fueron hombres y el 34.4% mujeres. En torno a las edades, el 5.7% de los encuestados tenían menos de 19 años, el 59.9%

tenían entre 20 y 34 años, el 27.6% tenían entre 35 y 54 años y el 5.2% tenían más de 55 años. En cuanto a los puestos de trabajo reportados, el 12.1% de los encuestados tenían puestos directivos o gerenciales, el 22.9% eran mandos medios, el 43.2% reportaron tener puesto de ingenieros o técnicos y el 20.8% reportó tener otro puesto. En cuanto al sector industrial de la planta en la que laboran los encuestados, el 42.2% de los encuestados laboraban en el sector automotriz, el 15.1% en el sector de productos médicos, el 15.6% en el sector eléctrico/electrónico/computacional, el 7.8% en el sector de servicios técnicos y tecnológicos, el 4.2% en el sector de metalmecánica y de aplicación de pintura y el 8.9% reportaron laborar en otros sectores.

Tabla 5.3: Estadísticos descriptivos del modelo de medición

Conocimiento de las tecnologías de la I4.0					
¿En qué medida conoce personalmente el alcance de las siguientes tecnologías?					
Ítem		Min	Max	Media	Desv. Est.
con1	Machine learning/deep learning	1	5	2.09	1.091
con2	Realidad aumentada	1	5	2.02	1.053
con3	Realidad virtual	1	5	2.30	1.009
con4	Robótica autónoma	1	5	2.26	1.168
con5	Robots/ robótica colaborativa	1	5	2.22	1.156
con6	Big Data	1	5	2.03	1.102
con7	Vehículos autoguiados	1	5	2.23	1.131
con8	Cloud Computing	1	5	2.15	1.212
con9	Block Chain	1	5	1.78	1.062
con10	Esquemas de seguridad	1	5	2.61	1.206
con11	Internet de las cosas (IoT)	1	5	2.59	1.203
con12	Computer vision	1	5	2.41	1.224
con13	Sensado y colección digital de datos	1	5	2.60	1.241

con14	Simulación/modelado digital	1	5	2.43	1.239
con15	Integración vertical y horizontal	1	5	1.96	1.129
con16	Gemelo digital	1	5	1.56	0.884
con17	Monitoreo de procesos en tiempo real	1	5	2.57	1.288
con18	Gestión inteligente de energía	1	5	2.10	1.158

Implementación de las tecnologías de la I4.0

Indique en qué grado se implementan las siguientes tecnologías en la planta donde trabaja.

Ítem		Min	Max	Media	Desv. Est.
imp1	Machine learning/deep learning	1	5	2.08	1.139
imp2	Realidad aumentada	1	5	1.77	1.018
imp3	Realidad virtual	1	5	1.83	1.045
imp4	Robótica autónoma	1	5	2.37	1.340
imp5	Robots/ robótica colaborativa	1	5	2.31	1.304
imp6	Big Data	1	5	2.24	1.192
imp7	Vehículos autoguiados	1	5	1.94	1.174
imp8	Cloud Computing	1	5	2.26	1.246
imp9	Block Chain	1	5	1.80	1.089
imp10	Esquemas de seguridad	1	5	2.83	1.317
imp11	Internet de las cosas (IoT)	1	5	2.59	1.315
imp12	Computer vision	1	5	2.41	1.233
imp13	Sensado y colección digital de datos	1	5	2.66	1.312
imp14	Simulación/modelado digital	1	5	2.39	1.337
imp15	Integración vertical y horizontal	1	5	2.05	1.227
imp16	Gemelo digital	1	5	1.69	1.000
imp17	Monitoreo de procesos en tiempo real	1	5	2.69	1.423
imp18	Gestión inteligente de energía	1	5	2.34	1.409

Eficiencia productiva de la empresa

De acuerdo a su experiencia, ¿en qué medida está de acuerdo con las siguientes afirmaciones?

Ítem		Min	Max	Media	Desv. Est.
efe1	La Industria 4.0 reduce los costos de la mano de obra.	1	5	3.49	1.039
efe2	La Industria 4.0 reduce los costos administrativos.	1	5	3.40	1.029
efe3	La Industria 4.0 reduce el número de empleos (puestos de trabajo).	1	5	3.14	1.163
efe4	La Industria 4.0 aumenta la productividad de la planta.	1	5	3.77	1.074
efe5	La Industria 4.0 reduce los tiempos de ciclo de los procesos.	1	5	3.52	1.107
efe6	La Industria 4.0 reduce los costos de producción.	1	5	3.45	1.125

Salarios y prestaciones percibidas

De las siguientes afirmaciones, seleccione la opción que mejor corresponda según la siguiente categoría:

Ítem	N=192	Min	Max	Media	Desv. Est.
sal1	Considero que el salario promedio de los ingenieros de la planta donde trabajo es:	1	5	3.00	0.874
sal2	Considero que el salario promedio de los obreros que laboran en la planta donde trabajo es:	1	5	2.99	0.904
sal3	Considero que el salario promedio del personal administrativo en la planta donde trabajo es:	1	5	3.10	0.853
pre1	Considero que las prestaciones de los ingenieros de la planta donde trabajo son:	1	5	3.22	0.974
pre2	Considero que las prestaciones de los obreros de la planta donde trabajo son:	1	5	3.02	0.918

pre3	Considero que las prestaciones del personal administrativo de la planta donde trabajo son:	1	5	3.19	0.926
------	--	---	---	------	-------

Sobrecarga laboral

De acuerdo a su puesto de trabajo, ¿en qué medida está de acuerdo con las siguientes afirmaciones?

Ítem	N=192	Min	Max	Media	Desv. Est.
car1	Me falta tiempo para cumplir con mis metas.	1	5	2.83	1.119
car2	Es demasiado el trabajo que tengo, cómo para que lo haga yo solo.	1	5	2.74	1.155
car3	En mi trabajo tengo que hacer más de una tarea a la vez.	1	5	3.57	1.200
car4	Cuando cometo algún error afecta gravemente los resultados de mi trabajo.	1	5	3.08	1.155
car5	Mi puesto de trabajo requiere que tome demasiadas decisiones.	1	5	3.32	1.228
car6	Tengo muy poco tiempo para tomar las decisiones exigidas por mi trabajo.	1	5	2.75	1.167
car7	Es demasiado el esfuerzo mental que demanda mi trabajo.	1	5	2.95	1.252

Fuente: elaboración propia.

La tabla 5.3 presenta el modelo de medición y los estadísticos descriptivos. Los ítems de conocimiento de tecnologías de la I4.0, implementación de tecnologías de la I4.0 y eficiencia productiva de la empresa fueron adecuados a partir de las escalas de AXIS (2019); los ítems de salarios y prestaciones percibidas son de elaboración propia; los ítems *car1* y *car2* fueron adecuados a partir de la escala de Fournier *et al.* (2010) y los ítems *car3*, *car4*, *car5*, *car6* y *car7* fueron adecuados a partir de las

escalas de Rivera y Romero (2016).

Capítulo 6

Resultados

Con el propósito de cumplir con los objetivos principales de la investigación, primero se presenta la estimación para el nivel de conocimiento de tecnologías de la I4.0 y el nivel de implementación de tecnologías de la I4.0. Después, para lograr los objetivos específicos planteados -evaluar la relación que tiene el conocimiento e implementación de la I4.0 con la eficiencia de la empresa y el bienestar de los trabajadores-, se formuló un modelo de ecuaciones estructurales con mínimos cuadrados parciales (PLS-SEM) utilizando el paquete estadístico SmartPLS 3. El análisis del modelo se divide en dos etapas, en la primera se examinan los atributos de validez y confiabilidad del modelo de medición y en la segunda se evalúa el modelo estructural planteado.

6.1. Estimación del nivel de conocimiento, implementación de tecnologías asociadas con la Industria 4.0

Para la estimación del nivel de conocimiento e implementación de tecnologías de la I4.0 se tomaron en cuenta las 19 tecnologías propuestas por AXIS (2019), además, se tomaron en cuenta los 5 ítems de la encuesta que estiman el nivel de la intención de implementación de tecnologías de la I4.0. En este contexto, se utilizó el promedio del puntaje de las escalas Likert¹ del conocimiento, implementación e intención de implementación de I4.0 reportados. Para determinar los niveles de medición se utilizó el siguiente criterio: un promedio menor a 2.33 es considerado bajo, un promedio entre 2.33 y 3.66 es considerado medio y un promedio mayor de 3.66 es considerado alto. La tabla 6.1 muestra la prueba de las hipótesis descriptivas con respecto al nivel de conocimiento e implementación de las tecnologías asociadas con la I4.0.

¹Las escalas Likert deben analizarse como una escala de intervalo, además es apropiado utilizar estadísticos descriptivos como la media para la tendencia central y la desviación estándar para la variabilidad (Boone y Boone, 2012; Jamieson, 2004).

Tabla 6.1: Pruebas de hipótesis con respecto a los niveles de conocimiento e implementación de tecnologías de la I4.0.

Variable	Hipótesis	Media	Nivel	Resultado
Conocimiento de la I4.0	H1. Los trabajadores de Ciudad Juárez tienen un nivel bajo de conocimiento de tecnologías de la I4.0	2.22	Conocimiento bajo	Se valida
Implementación de la I4.0	H2. Las maquiladoras de Ciudad Juárez tienen un nivel bajo de implementación de tecnologías de la I4.0	2.24	Complejidad baja	Se valida

Fuente: elaboración propia.

En relación con el nivel de conocimiento de las tecnologías asociadas con la I4.0 que tienen los trabajadores, se encontró que éste es bajo, validando la H1. En torno al nivel de implementación de tecnologías asociadas con la I4.0 que tienen las maquiladoras, se encontró que éste es bajo, validando la H2. Por su parte, el nivel de la intención de implementación de tecnologías asociadas con la I4.0 que tienen las empresas [3.22] es medio.

El apéndice F presenta a detalle los estadísticos descriptivos² en torno al nivel de conocimiento e implementación de la I4.0.

²El apéndice F contiene datos estadísticos acerca de lo siguiente: (1) el nivel de implementación de la I4.0 por área de la empresa, (2) el nivel de conocimiento, implementación e intención de implementación de la I4.0 por trabajador encuestado, (3) el nivel de conocimiento, implementación e intención de implementación de la I4.0 por sector industrial, (4) el nivel de conocimiento de la I4.0 por tecnología, (5) nivel de implementación de la I4.0 por tecnología, (6) nivel de conocimiento e implementación de tecnologías de la I4.0 por tecnología, (7) nivel de conocimiento de la I4.0 por sector industrial, (8) nivel de implementación de la I4.0 por sector industrial, (9) nivel de conocimiento de la I4.0 por tecnología y sector y, (10) nivel de implementación de la I4.0 por tecnología y sector.

6.2. Modelo de ecuaciones estructurales (PLS-SEM)

Como se muestra en la tabla 6.2, el modelo estructural plantea nueve relaciones correlacionales: En torno al nivel de implementación de la I4.0 se considera que (1) impacta de forma positiva el nivel de conocimiento de la I4.0, además, (2) impacta de forma negativa el nivel de sobrecarga laboral de los trabajadores, (3) tiene un impacto positivo sobre la percepción de los salarios y prestaciones de los trabajadores e (4) impacta de forma positiva la eficiencia de la empresa. En cuanto a el nivel de conocimiento de la I4.0 se plantea que (5) tiene un efecto negativo sobre el nivel de sobrecarga laboral de los trabajadores, y (6) afecta de forma positiva sobre la percepción de salarios y prestaciones de los trabajadores. En torno al nivel de sobrecarga laboral, se plantea que (7) impacta de forma positiva al nivel de salarios y prestaciones que tienen los trabajadores y (8) afecta positivamente sobre el nivel de eficiencia de la empresa. Finalmente, se plantea que (9) la percepción del nivel salarial y de prestaciones que tienen los trabajadores impacta de forma positiva el nivel de eficiencia productiva de la empresa.

Tabla 6.2: Relaciones planteadas y signos esperados

VARIABLES EXPLICATIVAS	SIGNO ESPERADO	VARIABLES EXPLICADAS
Nivel de implementación de I4.0	+	Nivel de conocimiento de I4.0
	-	Sobrecarga laboral
	+	Percepción de salarios y prestaciones
	+	Eficiencia de la empresa
Nivel de conocimiento de I4.0	-	Sobrecarga laboral
	+	Percepción de salarios y prestaciones
Sobrecarga laboral	+	Percepción de salarios y prestaciones
	+	Eficiencia de la empresa
Percepción de salarios y prestaciones	+	Eficiencia de la empresa

Fuente: elaboración propia.

6.2.1. Modelo de medición

Con el propósito de evaluar la robustez del modelo de medición, se realizó el análisis de las cargas factoriales -magnitud y significancia estadística-, además se revisaron el alfa de Cronbach, los índices de fiabilidad compuesta (IFC) y los indicadores de varianza extraída (AVE).

Cargas factoriales Las cargas factoriales mostraron valores entre 0.603 y 0.878, con valores t mayores a 1.96, los cuales arrojaron valores entre 6.906 y 44.164 con significancia estadística del 99.9%. El modelo planteado inicialmente incluía 55 indicadores, sin embargo, el indicador *car1* fue eliminado ya que mostró una carga factorial menor al punto de corte de 0.6 (Hair, Risher, Sarstedt, y Ringle, 2019). Así, el modelo presentado se compone por 54 indicadores. La tabla 6.3 muestra los indicadores de las cargas factoriales y sus respectivos valores t .

Tabla 6.3: Cargas factoriales y valores t

Conocimiento de I4		Implementación de I4		Sobrecarga laboral		Salarios y prestaciones		Eficiencia de la empresa	
<i>con1</i>	0.660 [t=13.898]	<i>imp1</i>	0.717 [t=19.550]	<i>car2</i>	0.603 [t=06.936]	<i>sal1</i>	0.835 [t=25.493]	<i>efe1</i>	0.842 [t=28.173]
<i>con2</i>	0.705 [t=14.236]	<i>imp2</i>	0.692 [t=13.724]	<i>car3</i>	0.699 [t=09.759]	<i>sal2</i>	0.733 [t=15.114]	<i>efe2</i>	0.819 [t=23.345]
<i>con3</i>	0.700 [t=14.412]	<i>imp3</i>	0.677 [t=13.562]	<i>car4</i>	0.609 [t=06.909]	<i>sal3</i>	0.811 [t=17.882]	<i>efe3</i>	0.704 [t=13.704]
<i>con4</i>	0.840 [t=35.198]	<i>imp4</i>	0.719 [t=17.696]	<i>car5</i>	0.873 [t=36.634]	<i>pre1</i>	0.866 [t=32.463]	<i>efe4</i>	0.821 [t=23.113]
<i>con5</i>	0.840 [t=35.154]	<i>imp5</i>	0.742 [t=19.679]	<i>car6</i>	0.791 [t=20.325]	<i>pre2</i>	0.825 [t=24.227]	<i>efe5</i>	0.867 [t=36.149]
<i>con6</i>	0.751 [t=19.563]	<i>imp6</i>	0.785 [t=28.652]	<i>car7</i>	0.855 [t=35.638]	<i>pre3</i>	0.878 [t=44.164]	<i>efe6</i>	0.811 [t=17.910]
<i>con7</i>	0.767 [t=19.563]	<i>imp7</i>	0.680 [t=14.395]						
<i>con8</i>	0.721 [t=16.748]	<i>imp8</i>	0.714 [t=17.878]						
<i>con9</i>	0.699 [t=14.159]	<i>imp9</i>	0.744 [t=20.435]						
<i>con10</i>	0.763 [t=23.462]	<i>imp10</i>	0.719 [t=20.352]						
<i>con11</i>	0.778 [t=23.798]	<i>imp11</i>	0.791 [t=28.225]						
<i>con12</i>	0.830 [t=35.546]	<i>imp12</i>	0.816 [t=31.594]						
<i>con13</i>	0.791 [t=28.084]	<i>imp13</i>	0.787 [t=25.926]						
<i>con14</i>	0.824 [t=24.721]	<i>imp14</i>	0.788 [t=23.466]						
<i>con15</i>	0.770 [t=22.722]	<i>imp15</i>	0.755 [t=20.454]						
<i>con16</i>	0.696 [t=16.616]	<i>imp16</i>	0.708 [t=16.331]						
<i>con17</i>	0.826 [t=35.163]	<i>imp17</i>	0.780 [t=25.808]						
<i>con18</i>	0.817 [t=29.166]	<i>imp18</i>	0.835 [t=38.795]						

Fuente: elaboración propia.

Indicadores de validez convergente Para evaluar la fiabilidad compuesta del modelo se analizaron los indicadores Alfa de Cronbach y los Índices de Fiabilidad compuesta (IFC). Los coeficientes alfa de Cronbach muestran valores entre 0.842 y 0.959, los IFC arrojan valores entre 0.881 y 0.962 superando los puntos de corte considerados de 0.70 y 0.60 (Bagozzi y Yi, 1988). Además, en todas las variables, los indicadores de varianza extraída media (AVE) se encuentran por arriba del punto de corte de 0.50 (Bagozzi y Yi, 1988; Fornell y Larcker, 1981; Seidel y Back, 2009).

Tabla 6.4: Indicadores de validez convergente del modelo de medición

Variable latente	Alfa de Cronbach	IFC	AVE
Conocimiento I4.0	0.959	0.962	0.589
Eficiencia de la empresa	0.897	0.921	0.660
Implementación I4.0	0.954	0.958	0.560
Sal y pres	0.906	0.928	0.682
Sobrecarga laboral	0.842	0.881	0.557

Fuente: elaboración propia.

Validez discriminante El criterio de validez discriminante advierte la medida en la que un constructo determinado se diferencia de otros constructos (Martínez Ávila y Fierro Moreno, 2018). Se utilizaron 2 criterios para evaluar la validez discriminante del modelo: Fornell-Larcker y Heterotrait-Monotrait Ratio (HTMT). De acuerdo con el criterio Fornell-Larcker, el modelo planteado muestra validez discriminante, ya que los valores de la raíz cuadrada AVE de las variables del modelo –sobre la diagonal–, son más grandes que los coeficientes de relación entre ellas (Fornell y Larcker, 1981; Seidel y Back, 2009). Asimismo, el indicador HTMT arrojó evidencia de validez discriminante ya que las medias de las correlaciones entre indicadores que miden distintos constructos son inferiores al punto de corte establecido de 0.8 (Henseler, Ringle, y Sarstedt, 2015). La proporción HTMT más alta fue 0.684 *Implementación de I4.0–Conocimiento de I4.0*, misma que se encuentra por debajo del punto de corte señalado.

Tabla 6.5: Criterios de validez discriminante

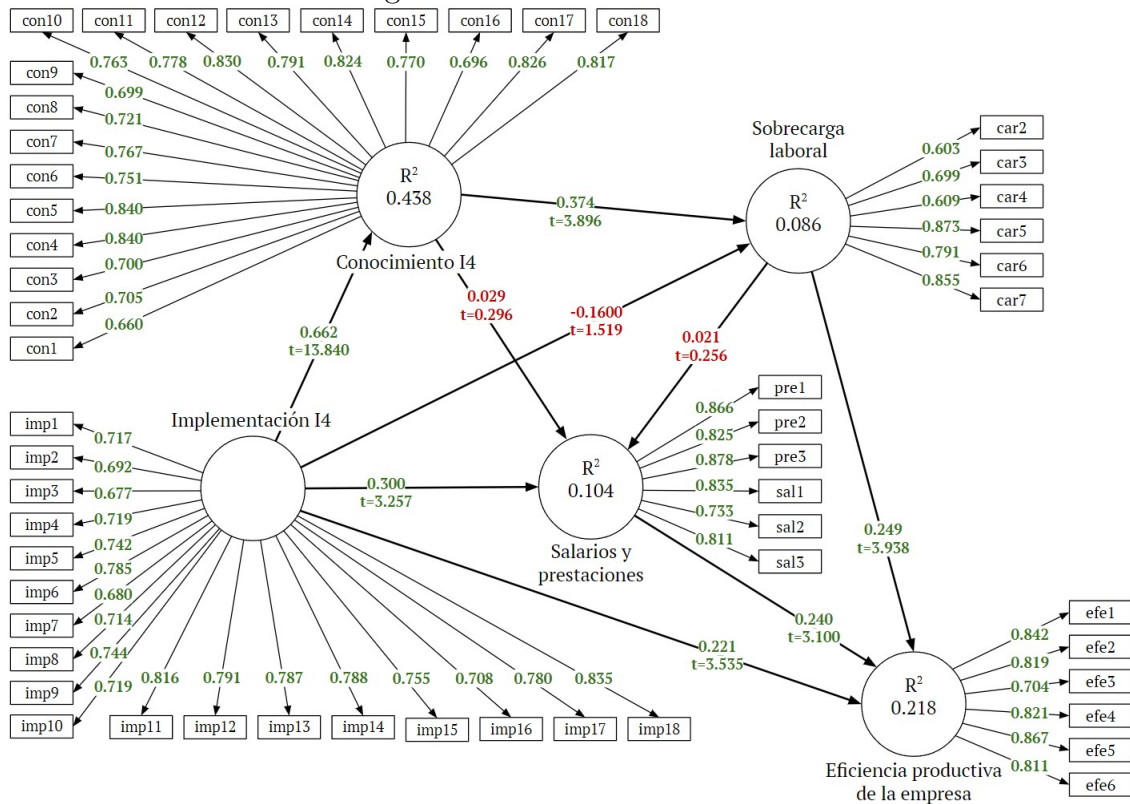
Criterio Fornell Larcker [AVE]					Heterotrait-Monotrait Ratio [HTMT]				
	<i>con</i>	<i>e fe</i>	<i>imp</i>	<i>sal</i>	<i>car</i>	<i>con</i>	<i>e fe</i>	<i>imp</i>	<i>sal</i>
<i>con</i>	0.767								
<i>e fe</i>	0.298	0.812				0.313			
<i>imp</i>	0.662	0.320	0.749			0.684	0.332		
<i>sal</i>	0.233	0.324	0.321	0.826		0.243	0.345	0.337	
<i>car</i>	0.268	0.282	0.088	0.055	0.746	0.255	0.297	0.130	0.099

Fuente: elaboración propia.

6.2.2. Modelo estructural

El modelo estructural evaluado se muestra en la figura 6.1, asimismo, se presentan los indicadores para: los valores de las cargas factoriales de los constructos del modelo, los coeficientes path de las relaciones estructurales y el valor R^2 del conocimiento de la I4.0, la sobrecarga laboral, la percepción de salarios y prestaciones, y la eficiencia productiva de la empresa. La calidad de predicción del modelo se calculó a partir de los coeficientes path y el valor R^2 .

Figura 6.1: Modelo contrastado



Fuente: elaboración propia.

La evaluación de los valores path del modelo se llevó a cabo tomando en cuenta el signo algebraico, la magnitud y la significancia de estos. Así, seis de las nueve relaciones evaluadas son estadísticamente significativas con valores-t mayores a 2.576, para un nivel de significancia del 99 %, además, la magnitud de los valores path excede el punto de corte de 0.20 (Chin, 2010).

Dado lo anterior y de acuerdo con Henseler, Ringle, y Sinkovics (2009), cuando los indicadores path concuerdan con los postulados a priori, existe una validación empírica parcial de las relaciones teóricas propuestas. En este sentido, se validan H4,

H5, H6, H7, H9 y H10 (ver tabla 6.6) demostrando que: (1) el conocimiento de la I4.0 influye positiva y significativamente en el nivel de la sobrecarga laboral, (2) la implementación de la I4.0 influye positiva y significativamente en el nivel de conocimiento de la I4.0, (3) la implementación de la I4.0 influye positiva y significativamente en la eficiencia productiva de la empresa, (4) la implementación de la I4.0 influye positiva y significativamente en el nivel percibido de salarios y prestaciones, (5) el nivel percibido de salarios y prestaciones influye positiva y significativamente en la eficiencia productiva de la empresa y, (6) el nivel de la sobrecarga laboral influye positiva y significativamente en la eficiencia productiva de la empresa.

Tabla 6.6: Pruebas de hipótesis correlacionales con respecto a las relaciones estructurales del modelo PLS

	Hipótesis y relaciones estructurales	Path	Valor t	Valor p	Resultado
H3.	Conocimiento I4.0 → sal y pres	0.029	0.296	0.767	Se rechaza
H4.	Conocimiento I4.0 → sobrecarga laboral	0.374	3.896	0.000	Se valida
H5.	Implementación I4.0 → conocimiento I4.0	0.662	13.840	0.000	Se valida
H6.	Implementación I4.0 → eficiencia de la empresa	0.221	3.535	0.000	Se valida
H7.	Implementación I4.0 → sal y pres	0.300	3.257	0.001	Se valida
H8.	Implementación I4.0 → sobrecarga laboral	-0.160	1.519	0.129	Se rechaza
H9.	Sal y pres → eficiencia de la empresa	0.240	3.100	0.002	Se valida
H10.	Sobrecarga laboral → eficiencia de la empresa	0.249	3.938	0.000	Se valida
H11.	Sobrecarga laboral → sal y pres	0.021	0.256	0.798	Se rechaza

Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, no se encontró evidencia que indique que: (7) el conocimiento de la I4.0 influya significativamente sobre el nivel percibido de salarios y prestaciones, (8) que la implementación de la I4.0 influya significativamente sobre el nivel de sobrecarga laboral y que (9) el nivel de sobrecarga laboral influya significativamente sobre el nivel percibido de salarios y prestaciones.

Efectos mediados planteados en el modelo

De acuerdo con Ringle, Wende, y Becker (2015), la mediación ocurre cuando una variable latente exógena provoca un cambio en la variable mediadora, la cual, a su vez provoca un cambio en la variable endógena del modelo *path* de PLS. Por lo tanto, una variable mediadora gobierna la naturaleza de las relaciones entre dos variables. El modelo estructural planteado supone un conjunto de 15 efectos mediados, de los cuales 4 son estadísticamente significativos al nivel de significancia del 95 % con valores-*p* menores a 0.05 y valores-*t* mayores a 1.96 (ver tabla 6.7).

Tabla 6.7: Efectos mediados estadísticamente significativos

Relaciones estructurales mediadas	Path	Valor t	Valor p
Implem. I4.0 → conoc. I4.0 → sobrecarga laboral	0.247	3.388	0.001
Conoc. I4.0 → sobrecarga laboral → efect. empresa	0.093	2.952	0.003
Implem. I4.0 → sal. y pres. → efect. empresa	0.072	2.354	0.019
Implem. I4.0 → conoc. I4.0 → sobrecarga laboral → efect. empresa	0.062	2.690	0.007

Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos evidencian que:

- La implementación de la I4.0 influye de forma indirecta, positiva y estadísticamente significativa sobre el nivel de sobrecarga laboral a través del nivel de conocimiento de la I4.0.
- El conocimiento de la I4.0 influye de forma indirecta, positiva y estadísticamente significativa sobre la eficiencia productiva de la empresa a través del nivel de sobrecarga laboral.
- La implementación de la I4.0 influye de forma indirecta, positiva y estadísticamente significativa sobre la eficiencia productiva de la empresa a través del

nivel salarial y de prestaciones de los trabajadores.

- La implementación de la I4.0 influye de forma indirecta, positiva y estadísticamente significativa sobre la eficiencia productiva de la empresa a través del nivel de conocimiento de la I4.0 y el nivel de sobrecarga laboral.

Coefficiente de determinación

El coeficiente de determinación evalúa el grado en el cual el modelo explica los datos (Seidel y Back, 2009); tal que, una R^2 de 0.67 se considera sustancial, una R^2 de 0.35 moderada, y una R^2 de 0.19 débil (Chin *et al.*, 1998; Henseler *et al.*, 2009). En ese sentido, los resultados evidenciaron que, de forma sustancial-moderada, la implementación de I4.0 predice el conocimiento de la I4.0. [$R^2 = 0.438$], de forma débil, la implementación de I4.0 y el conocimiento de la I4.0 predicen el nivel de sobrecarga laboral [$R^2 = 0.086$], de forma débil, la implementación de I4.0, el conocimiento de la I4.0 y el nivel de sobrecarga laboral predicen el nivel percibido de salarios y prestaciones [$R^2 = 0.104$], de forma moderada-débil, la implementación de I4.0, el nivel de sobrecarga laboral y el nivel percibido de salarios y prestaciones predicen la eficiencia productiva de la empresa [$R^2 = 0.218$].

Calidad predictiva

Además del criterio predictivo R^2 , Rehman (2018), considera apropiado considerar el indicador Q^2 para complementar la evaluación de la relevancia predictiva del modelo de medición. En este sentido, se considera que la relevancia predictiva de los constructos debe ser positiva y arrojar valores mayores a cero (Hair *et al.*, 2019). Tal que, un valor de Q^2 de 0.02 indica poca relevancia predictiva, un valor de Q^2 de 0.15 indica mediana relevancia predictiva y un valor de Q^2 de 0.35 indica gran relevancia

predictiva (Chin, 2010)

De esta forma, la relación *implementación I4.0-conocimiento de la I4.0* [$Q^2 = 0.253$] tiene una media-alta relevancia predictiva, la relación *implementación I4.0-eficiencia de la empresa* [$Q^2 = 0.135$] tiene una media relevancia predictiva, la relación *implementación I4.0-percepción de salarios y prestaciones* [$Q^2 = 0.063$] tiene una débil-media relevancia predictiva, y la relación *implementación I4.0-sobrecarga laboral* [$Q^2 = 0.040$] tiene una débil relevancia predictiva.

Capítulo 7

Conclusiones

7.1. Principales hallazgos

- Los trabajadores de las maquiladoras aún están lejos de poseer las cualificaciones necesarias para dominar por completo todos los aspectos que componen a la I4.0.
- Las empresas maquiladoras aún están lejos tener una implementación de la I4.0 generalizada.
- El conocimiento y la implementación de la I4.0 no son determinantes del bienestar de los trabajadores.
- Los trabajadores con un alto nivel de conocimiento de la I4.0 tienden a tener un nivel alto de salarios, un nivel alto de sobrecarga laboral y tienden a trabajar en grandes empresas que implementan en mayor medida las tecnologías de la I4.0.
- Las empresas maquiladoras de Ciudad Juárez son capaces beneficiarse de la reducción de costos y los aumentos en la productividad derivados de la implementación de tecnologías de la I4.0, así como de la sobreexplotación de los empleados cualificados que son capaces de dominar dichas tecnologías.

7.2. Conclusiones generales

Los resultados generales de la investigación muestran que el nivel de conocimiento de los trabajadores especializados de las maquiladoras de ciudad Juárez es bajo (ver tabla 6.1), en este tenor, el 7.8% de los trabajadores encuestados reportaron tener un alto nivel de conocimiento de las tecnologías asociadas con la I4.0, mientras que

el 58.3% de los trabajadores encuestados reportaron tener poco o nulo conocimiento de las tecnologías de la I4.0 (ver tabla F.2).

En relación con el nivel de implementación de tecnologías asociadas con la I4.0, los resultados generales muestran que este es bajo (ver tabla 6.1). En este sentido, el 7.2% de las empresas tienen un nivel alto de implementación de tecnologías de la I4.0, mientras que el 58.8% de las empresas tienen nivel bajo o nulo de implementación de tecnologías de la I4.0 (ver tabla F.2).

Las tecnologías que mostraron los niveles más altos de conocimiento e implementación son (1) esquemas de ciberseguridad, (2) censado y colección digital de datos, (3) monitoreo de procesos en tiempo real e (4) internet de las cosas. Por otro lado, las tecnologías que mostraron los niveles más bajos de conocimiento e implementación son (1) realidad aumentada, (2) realidad virtual, (3) vehículos autoguiados, (4) blockchain y (5) gemelo digital (ver figura F.2).

De acuerdo con la clasificación de tecnologías de la I4.0 propuesta por AXIS (2019), (ver tabla G.1), las tecnologías que más se conocen e implementan tienden a tener un nivel bajo de complejidad para el usuario y un nivel bajo de novedad industrial. Asimismo, las tecnologías menos conocidas e implementadas son las que tienden a ser intangibles, a tener un alto nivel de complejidad para el usuario y un alto nivel de novedad industrial.

Tomando en cuenta los niveles de conocimiento que tienen los trabajadores cualificados y los niveles de implementación tecnológica que tienen las maquiladoras, se puede concluir que, para el caso de los trabajadores, que estos aún están lejos de poseer las cualificaciones necesarias para dominar por completo todos los aspectos que componen a la I4.0 y para el caso de las empresas, se puede afirmar que estas aún están lejos tener una amplia implementación la I4.0. Estos resultados son congruentes con los estudios realizados para el caso de Baja California por AXIS (2019)

y después por Carrillo *et al.* (2020).

7.3. Conclusiones acerca de la implementación de la Industria 4.0 y el bienestar de los trabajadores

El modelo de ecuaciones estructurales tuvo el propósito de hacer avances en el conocimiento acerca de la relación que tienen el conocimiento e implementación de la I4.0 con el bienestar de los trabajadores medido a través del nivel de sobrecarga laboral y el nivel de salarios y prestaciones percibido, así como la relación entre la implementación de la I4.0 y la eficiencia productiva de las empresas.

Los resultados obtenidos muestran que el conocimiento de la I4.0 que poseen los trabajadores [*con*] tiene efectos positivos y estadísticamente significativos sobre el nivel de sobrecarga laboral que poseen los trabajadores [*car*], además, el nivel de implementación de I4.0 que poseen las empresas [*imp*] tiene efectos positivos y estadísticamente significativos sobre el nivel de conocimiento de la I4.0 que poseen los trabajadores [*con*], el nivel de eficiencia productiva de la empresa [*efe*] y el nivel de salarios y prestaciones percibido por los trabajadores [*sal*]. Asimismo, el nivel de salarios y prestaciones percibido por los trabajadores [*sal*] tiene efectos positivos y estadísticamente significativos sobre el nivel de eficiencia productiva de la empresa [*efe*]. Por último, el nivel de sobrecarga laboral que poseen los trabajadores [*car*] tiene efectos positivos y estadísticamente significativos sobre el nivel de eficiencia productiva de la empresa [*efe*] (ver tabla 6.6). En consecuencia, este trabajo de investigación configura una aportación al avance del conocimiento sobre la I4.0 y su relación con el bienestar de los trabajadores y la eficiencia productiva de la empresa.

El primer resultado que conviene destacar indica una fuerte relación positiva y estadísticamente significativa entre el nivel de implementación de tecnologías de la I4.0

que poseen las empresas y el nivel de conocimiento de la I4.0 que poseen los trabajadores. Esto denota que las empresas que hacen esfuerzos de adopción de tecnologías de la I4.0 también contratan trabajadores que tienen las cualificaciones necesarias para utilizar las nuevas tecnologías, asimismo, estas empresas promueven que los empleados existentes adquieran la preparación necesaria para la exitosa transición hacia la I4.0. Por otro lado, las empresas que no hacen esfuerzos por adoptar estas tecnologías no tienen los incentivos para contratar personal con cualificaciones en torno a la I4.0 y/o preparar en este rubro a sus empleados existentes.

En cuanto a la relación entre el nivel de conocimiento de las tecnologías de la I4.0 y su impacto sobre el nivel de sobrecarga laboral que poseen los trabajadores y contrario a lo esperado, se encontró una relación positiva y estadísticamente significativa. Si bien, autores como Van Acker *et al.* (2019) y Maczewska *et al.* (2019) han argumentado que los trabajadores en el contexto de la I4.0 disfrutan de disminuciones en el nivel de carga laboral física, Maczewska *et al.* (2019) expresa que la carga psicológica podría aumentar. En congruencia con esto, Raso-Delgue (2018) expresa que la sobrecarga laboral puede acentuarse en los entornos de I4.0 debido a los nuevos esquemas laborales caracterizados por ritmos intensos y rápidos de trabajo durante lapsos prolongados, asimismo, la variabilidad e imprevisibilidad de la actividad cotidiana a realizar y los incrementos en el número de responsabilidades a realizar por el trabajador son factores que se conjugan y desempeñan un papel importante en el aumento del nivel de sobrecarga laboral.

En torno al nivel de salarios y prestaciones percibido por los trabajadores, se encontró que el nivel de implementación de tecnologías asociadas con la I4.0 que tienen las empresas está relacionado con éste de forma positiva y estadísticamente significativa. Se considera que este resultado es derivado de la generación de nuevos puestos de trabajo bien remunerados que requieren altos niveles de preparación y

conocimiento en torno a las nuevas tecnologías (Bensusán Areous, 2017; Frey y Osborne, 2017; Rajnai y Kocsis, 2017). En relación con esto, es importante destacar que la implementación de la I4.0 no es una variable determinante del nivel de salarios y prestaciones de los trabajadores, ya que existen otros factores que ayudan a explicarlo, tales como el nivel de educación, la tasa de sindicalización y el tamaño de la organización (Acevedo y Romero, 2014).

Entre las relaciones positivas que tiene el nivel de sobrecarga laboral, sobresale el efecto positivo y significativo que tiene sobre el nivel de salarios y prestaciones percibido por los trabajadores. Este resultado es congruente con el argumento que proponen autores como Bensusán Areous (2017), Frey y Osborne (2017) y Rajnai y Kocsis (2017), quienes destacan que la I4.0 genera nuevos puestos de trabajo bien remunerados que requieren altos niveles de preparación, sin embargo, estos empleos también tienden a tener altos niveles de sobrecarga laboral psicológica (Maczewska *et al.*, 2019). Tomando esto en cuenta, se concluye que el alto nivel salarial y de prestaciones de los nuevos puestos de trabajo que genera la I4.0 actúa como un incentivo para atraer empleados cualificados a pesar del alto nivel de sobrecarga laboral que los caracteriza.

Por otro lado, la relación entre el nivel de conocimiento de la I4.0 y el nivel de salarios y prestaciones no mostró un efecto significativo. Este resultado es importante ya que sugiere que tener un alto nivel de conocimiento en relación con la I4.0 no necesariamente lleva a tener un alto nivel de salarios y prestaciones, más bien se debe tomar en cuenta como un requisito para ser contratado por una empresa que implemente tecnologías de la I4.0, las cuales tienden a ofrecer niveles superiores de salarios y prestaciones en comparación con las empresas que no implementan tecnologías de la I4.0. En otras palabras, los trabajadores con altos niveles de conocimiento de la I4.0 pueden obtener puestos de trabajo con altos niveles salariales y de prestaciones,

sin embargo, el nivel de conocimiento acerca de la I4.0 no debe considerarse como un determinante del nivel salarial y de prestaciones de los trabajadores.

Otra relación que no tuvo un efecto significativo fue entre el nivel de implementación de la I4.0 y el nivel de sobrecarga laboral de los trabajadores. Sin embargo, el nivel de la implementación de la I4.0 tiene un efecto mediado sobre la sobrecarga laboral a través del conocimiento tecnológico de la I4.0. Este efecto es positivo y estadísticamente significativo (ver tabla 6.7), lo que indica que mayores niveles de implementación de I4.0 están asociados con mayores niveles conocimiento de la I4.0 y estos a la vez con mayores niveles de sobrecarga laboral. Este resultado es congruente con los argumentos ya mencionados de Raso-Delgue (2018) y Maczewska *et al.* (2019) quienes destacan que la I4.0 tiende a aumentar la carga psicológica de trabajo a través de la intensificación del ritmo laboral y el aumento de las responsabilidades de los trabajadores.

Tomando en cuenta estos resultados se concluye que la implementación de tecnologías asociadas con la I4.0 no es un determinante del bienestar de los trabajadores, ya que no se encontró evidencia que sugiera que ésta tenga un efecto directo sobre el nivel de sobrecarga laboral de los trabajadores. Por otro lado, el nivel de conocimiento de la I4.0 sí está asociado con incrementos en el nivel de sobrecarga laboral de los trabajadores. Otra variable que aumenta el nivel salarial y de prestaciones es el nivel de implementación de la I4.0, sin embargo, se debe tomar en cuenta que ésta relación puede ser explicada por otros factores como el nivel de educación, la tasa de sindicalización y el tamaño de la organización, tal que, grandes empresas que cuentan con recursos financieros suficientes para implementar exitosamente las tecnologías de la I4.0, también tienen los medios para atraer trabajadores con un alto nivel de cualificación y remunerarlos acordeamente. Por otra parte, no se encontró evidencia que indique que el nivel de sobrecarga laboral esté relacionado con el nivel

salarial y de prestaciones de los trabajadores.

Tomando en cuenta lo anterior, se puede destacar que los trabajadores con altos niveles de cualificación en relación con la I4.0 tienden a tener mejores salarios, sin embargo, estos aumentos salariales no se atribuyen a su nivel de preparación, más bien, se explican por el nivel de adopción tecnológica de la empresa que los emplea. También es importante señalar que los empleos que genera la I4.0 se caracterizan por tener jornadas laborales intensas asociadas a altos niveles de sobrecarga laboral.

7.4. Conclusiones acerca de la implementación de la I4.0 y la eficiencia productiva de la empresa

El nivel de implementación de tecnologías de la I4.0 que posee la empresa influye positiva y significativamente en el nivel de eficiencia productiva de la misma. Este resultado es importante, ya que indica que las empresas maquiladoras de Ciudad Juárez son capaces de obtener beneficios derivados de la adopción de las tecnologías propias de la I4.0. Entre los beneficios de la implementación de la I4.0 se encuentran las mejoras en la productividad y la reducción de los costos productivos. Este resultado es congruente con lo expresado por autores como Illés *et al.* (2017), Basantes Montero (2019), T. Zheng *et al.* (2021), Ciano *et al.* (2021), Bai *et al.* (2020), Adeyeri *et al.* (2015) y Wang y Wang (2016), quienes destacan que las mejoras en la eficiencia de los procesos productivos y la reducción de costos forman parte de los beneficios más notorios de la implementación de las tecnologías inherentes a la I4.0.

Otro resultado relevante indica que el nivel de salarios y prestaciones percibido por los trabajadores influye de forma positiva y estadísticamente significativa sobre el nivel de eficiencia productiva de la empresa. De acuerdo con Malul *et al.* (2021) este resultado es coherente con la noción económica ampliamente aceptada que señala

que los salarios altos son necesarios porque es gracias a ellos que se puede asegurar la eficiencia económica. En este tenor, los autores destacan que el motivo por el cual los trabajadores más talentosos pueden demandar salarios superiores es porque son capaces de incrementar las ganancias de la empresa.

Otro resultado importante denota que, el nivel de sobrecarga laboral que poseen los trabajadores impacta de forma positiva y estadísticamente significativa sobre el nivel de eficiencia productiva de la empresa. Resultados similares fueron encontrados por Ali *et al.* (2013) quienes a través de un estudio a trabajadores de manufactura en África subsahariana encontraron que existe una relación positiva entre la carga laboral y la productividad de los trabajadores, tal que, aumentos en la carga laboral y las horas de trabajo pueden mejorar la productividad. Sin embargo, los autores también destacan que altas cargas laborales pueden llevar a reducciones de la productividad en el largo plazo. Aunado a esto, también se encontró que la implementación de la I4.0 tiene un efecto mediado positivo y estadísticamente significativo sobre el nivel de eficiencia productiva de la empresa a través del nivel de conocimiento de la I4.0 que poseen los trabajadores y el nivel de sobrecarga laboral de los mismos (ver tabla 6.7). Esto indica que el nivel de implementación de la I4.0 impacta positivamente el nivel de eficiencia productiva de la empresa por dos canales; primero de forma directa y después de forma indirecta, a través de las mejoras en el conocimiento que se relacionan a mayores niveles de sobrecarga laboral y estos a su vez con mayores niveles de eficiencia productiva.

Tomando en cuenta los resultados obtenidos en torno al impacto de la implementación de la I4.0 y la eficiencia productiva de la empresa, se concluye que las empresas maquiladoras de Ciudad Juárez son competentes en la reducción de costos y mejora de la productividad a través de la adopción de tecnologías asociadas a la I4.0. Por otro lado, los resultados muestran que las maquiladoras de la localidad tienden a

asignar salarios y prestaciones superiores a aquellos trabajadores cualificados que poseen la capacidad de aumentar las ganancias de la organización. Por último, las maquiladoras de Ciudad Juárez también son capaces de aumentar su eficiencia productiva a través de incrementos en el nivel de sobrecarga laboral de sus trabajadores cualificados.

7.5. Limitaciones de la investigación

- El cuestionario se envió a trabajadores de maquiladoras a través de correo electrónico y redes sociales durante la pandemia de COVID-19. El periodo de administración fue del 11 de agosto de 2020 al 3 de febrero de 2021.
- La decisión de los trabajadores de participar o no en la encuesta puede presentar limitaciones relacionadas con el sesgo de selección. En este caso, la autoselección de los encuestados puede introducir limitaciones de validez interna.
- El instrumento de medición utilizado estima la percepción de los trabajadores acerca de las seis variables utilizadas para el análisis. Es por ello, que las respuestas obtenidas constituyen la opinión de los encuestados.

Bibliografía

- Acevedo, B. E. G., y Romero, L. Q. (2014). Determinantes de la desigualdad salarial en las regiones de México: 2005-2010. una visión alternativa a la teoría del capital humano. *Paradigma económico*, 6(1), 33–48.
- Adeyeri, M. K., Mpofu, K., y Olukorede, T. A. (2015). Integration of agent technology into manufacturing enterprise: A review and platform for industry 4.0. En *2015 international conference on industrial engineering and operations management (ieom)* (pp. 1–10).
- Aguilar, L. J. (2017). Ciberseguridad: la colaboración público-privada en la era de la cuarta revolución industrial (industria 4.0 versus ciberseguridad 4.0). *Cuadernos de estrategia*(185), 19–64.
- Ali, A. Y. S., Ali, A. A., y Adan, A. A. (2013). Working conditions and employees' productivity in manufacturing companies in sub-saharan african context: Case of somalia. *Educational research international*, 2(2), 67–78.
- Almenara, J. C. (1998). Impacto de las nuevas tecnologías de la información y la comunicación en las organizaciones educativas. *Grupo Editorial Universitaria*.
- Amador Hidalgo, L. (1996). *Inteligencia artificial y sistemas expertos*. Universidad de Córdoba, Servicio de Publicaciones.
- Ang, J., Goh, C., Saldivar, A., y Li, Y. (2017). Energy-efficient through-life smart

- design, manufacturing and operation of ships in an industry 4.0 environment. *Energies*, 10(5), 610.
- Arvind, A., y Bourne, D. (2016). Architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Degree of Master of Science in Robotics. School of Computer Science Carnegie Mellon University*.
- Atik, H., y Ünlü, F. (2019). The measurement of industry 4.0 performance through industry 4.0 index: An empirical investigation for turkey and european countries. *Procedia Computer Science*, 158, 852–860.
- Autor, D. H., y Dorn, D. (2013). The growth of low-skill service jobs and the polarization of the us labor market. *American economic review*, 103(5), 1553–97.
- AXIS. (2019). *AXIS Vantage Point: BAJA i4.0. Industria 4.0 en Baja California*. Descargado de <https://vp.inteliaxis.com/PDF/Bajai40.pdf>
- Bag, S., Gupta, S., y Kumar, S. (2021). Industry 4.0 adoption and 10R advance manufacturing capabilities for sustainable development. *International journal of production economics*, 231, 107844.
- Bagozzi, R. P., y Yi, Y. (1988). On the evaluation of structural equation models. *Journal of the academy of marketing science*, 16(1), 74–94.
- Bai, C., Dallasega, P., Orzes, G., y Sarkis, J. (2020). Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective. *International journal of production economics*, 229, 107776.
- Basantos Montero, D. T. (2019). *Sistema de manufactura flexible orientado a industria 4.0* (Tesis de Master no publicada). Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería en Sistemas.
- Basl, J., y Doucek, P. (2019). A metamodel for evaluating enterprise readiness in the context of industry 4.0. *Information*, 10(3), 89.

- Baumgart, B. G. (1975). A polyhedron representation for computer vision. En *Proceedings of the may 19-22, 1975, national computer conference and exposition* (pp. 589–596).
- Benešová, A., y Tupa, J. (2017). Requirements for education and qualification of people in industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11, 2195–2202.
- Bensusán Areous, G. (2017). Nuevas tendencias en el empleo: retos y opciones para las regulaciones y políticas del mercado de trabajo. *Las transformaciones tecnológicas y sus desafíos para el empleo, las relaciones laborales y la identificación de la demanda de cualificaciones*. Santiago: CEPAL, 2017. LC/TS. 2017/111. p. 81-179.
- Bensusán Areous, G., Eichhorst, W., y Rodríguez, J. M. (2017). Las transformaciones tecnológicas y sus desafíos para el empleo, las relaciones laborales y la identificación de la demanda de cualificaciones. *Documentos de Proyectos*.
- Boone, H. N., y Boone, D. A. (2012). Analyzing likert data. *Journal of extension*, 50(2), 1–5.
- Cardoso, G. B., Parra-Michel, J. R., Ceja-Bravo, L. A., Olivares, S. A., y Bautista, R. M.-P. (2021). ¿qué es Industria 4.0?: Elementos clave de la Industria 4.0. *Tecnotrend*.
- Carreón, H., y Ramos, R. M. (2012). México hacia una sociedad del conocimiento. *Nóesis: Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, 21(41), 122–136.
- Carrillo, J., y Gomis, R. (2005). Generaciones de maquiladoras: Un primer acercamiento a su medición. *Frontera norte*, 17(33), 25–51.
- Carrillo, J., Gomis, R., De los Santos, S., Covarrubias, L., y Matus, M. (2020). ¿Podrán transitar los ingenieros a la industria 4.0? Análisis industrial en Baja California. *Entreciencias: diálogos en la sociedad del conocimiento*, 8(22).
- Centro de Estudios de las Finanzas Públicas. (2021). *Evolución de los recur-*

- ses aprobados al Ramo 10 "Economía", 2016-2021.* Descargado el 11 de enero de 2022, de <https://www.cefp.gob.mx/publicaciones/nota/2021/notacefp0512021.pdf>
- Chaudhuri, S., Kalogerakis, E., Guibas, L., y Koltun, V. (2011). Probabilistic reasoning for assembly-based 3d modeling. En *Acm siggraph 2011 papers* (pp. 1–10).
- Chen, Z., y Xing, M. (2015). Upgrading of textile manufacturing based on industry 4.0. En *5th international conference on advanced design and manufacturing engineering*.
- Cheng, G.-J., Liu, L.-T., Qiang, X.-J., y Liu, Y. (2016). Industry 4.0 development and application of intelligent manufacturing. En *2016 international conference on information system and artificial intelligence (isai)* (pp. 407–410).
- Chihuahua Futura. (2022). *Diagnóstico Industria 4.0 en Chihuahua*. Descargado el 13 de enero de 2022, de <https://chihuahuafutura.org/portfolio/diagnostico-industria-4-0-en-chihuahua/>
- Chin, W. W. (2010). How to write up and report PLS analyses. En *Handbook of partial least squares* (pp. 655–690). Springer.
- Chin, W. W., y cols. (1998). The partial least squares approach to structural equation modeling. *Modern methods for business research*, 295(2), 295–336.
- Cho, J., y Kim, J. (2018). Identifying factors reinforcing robotization: interactive forces of employment, working hour and wage. *Sustainability*, 10(2), 490.
- Ciano, M. P., Dallasega, P., Orzes, G., y Rossi, T. (2021). One-to-one relationships between Industry 4.0 technologies and Lean Production techniques: a multiple case study. *International journal of production research*, 59(5), 1386–1410.
- Cluster Industrial. (2021). *Secretaría de Economía y Microsoft México impulsarán desarrollo de MiPyMEs*. Cluster Industrial. Descargado el 12 de enero de 2022, de <https://www.clusterindustrial.com.mx/noticia/4221/secretaria>

- de-economia-y-microsoft-mexico-impulsaran-desarrollo-de-mipymes
- Contreras, J. (2021). *Seis proyectos que empujan la industria 4.0 en Querétaro*. Lider Empresarial. Descargado el 12 de enero de 2022, de <https://www.liderempresarial.com/seis-proyectos-que-empujan-la-industria-4-0-en-queretaro>
- Cota, I. (2021). *México producirá menos petróleo y gastará más en programas sociales en 2022*. Descargado el 11 de enero de 2022, de <https://elpais.com/mexico/2021-09-08/mexico-producira-menos-petroleo-y-gastara-mas-en-programas-sociales-en-2022.html>
- Córdova, F. (2017). *Presentan la iniciativa Nuevo León 4.0*. Manufactura Expansión. Descargado el 12 de enero de 2022, de <https://manufactura.mx/industria/2017/05/30/presentan-la-iniciativa-nuevo-leon-40>
- Daemrich, A. (2017). Invention, innovation systems, and the fourth industrial revolution. *Technology & Innovation*, 18(4), 257–265.
- Dassisti, M., Giovannini, A., Merla, P., Chimienti, M., y Panetto, H. (2018). An approach to support i4. 0 adoption in smes: a core-metamodel and applications. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 42–47.
- Del Val Román, J. L. (2016). Industria 4.0: la transformación digital de la industria. En *Valencia: Conferencia de directores y decanos de ingeniería informática, informes coddii*.
- de Sousa Jabbour, A. B. L., Jabbour, C. J. 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*, 132, 18–25.
- Dilberoglu, U. M., Gharehpapagh, B., Yaman, U., y Dolen, M. (2017). The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11,

545–554.

- Eichhorst, W. (2017). Las instituciones del mercado laboral y el futuro del trabajo: ¿buenos empleos para todos? *Las transformaciones tecnológicas y sus desafíos para el empleo, las relaciones laborales y la identificación de la demanda de cualificaciones*. Santiago: CEPAL, 2017. LC/TS. 2017/111. p. 11-30.
- Ford, M. (2015). *Rise of the robots: Technology and the threat of a jobless future*. Basic Books.
- Fornell, C., y Larcker, D. F. (1981). Evaluating structural equation models with unobservable variables and measurement error. *Journal of marketing research*, 18(1), 39–50.
- Fournier, C., Tanner Jr, J. F., Chonko, L. B., y Manolis, C. (2010). The moderating role of ethical climate on salesperson propensity to leave. *Journal of Personal Selling & Sales Management*, 30(1), 7–22.
- Frank, A. G., Dalenogare, L. S., y Ayala, N. F. (2019). Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*, 210, 15–26.
- Frey, C. B., y Osborne, M. A. (2017). The future of employment: how susceptible are jobs to computerisation? *Technological forecasting and social change*, 114, 254–280.
- Galvis, O. L. P., y Palacio, G. J. P. O. (2018). Impacto de las nuevas tecnologías de “industry 4.0” en Colombia. *Revista Loginn: Investigación Científica y Tecnológica*, 2(2).
- Gentner, S. (2016). Industry 4.0: Reality, future or just science fiction? how to convince today’s management to invest in tomorrow’s future! successful strategies for industry 4.0 and manufacturing it. *CHIMIA International Journal for Chemistry*, 70(9), 628–633.

- Gökalp, E., Şener, U., y Eren, P. E. (2017). Development of an assessment model for industry 4.0: industry 4.0-mm. En *International conference on software process improvement and capability determination* (pp. 128–142).
- González-Páramo, J. (2017). Cuarta revolución industrial, empleo y estado de bienestar. *Real Academia de las Ciencias Morales y Políticas*, <https://googl/ehQYup>.
- Guo, D., Li, M., Lyu, Z., Kang, K., Wu, W., Zhong, R. Y., y Huang, G. Q. (2021). Synchronoperation in industry 4.0 manufacturing. *International Journal of Production Economics*, 108171.
- Hair, J. F., Risher, J. J., Sarstedt, M., y Ringle, C. M. (2019). When to use and how to report the results of pls-sem. *European business review*.
- Hecklau, F., Galeitzke, M., Flachs, S., y Kohl, H. (2016). Holistic approach for human resource management in industry 4.0. *Procedia CIRP*, 54, 1–6.
- Henseler, J., Ringle, C. M., y Sarstedt, M. (2015). A new criterion for assessing discriminant validity in variance-based structural equation modeling. *Journal of the academy of marketing science*, 43(1), 115–135.
- Henseler, J., Ringle, C. M., y Sinkovics, R. R. (2009). The use of partial least squares path modeling in international marketing. En *New challenges to international marketing*. Emerald Group Publishing Limited.
- Illés, B., Tamás, P., Dobos, P., y Skapinyecz, R. (2017). New challenges for quality assurance of manufacturing processes in industry 4.0. En *Solid state phenomena* (Vol. 261, pp. 481–486).
- Index Juárez, A. (2022). *Información estadística mensual. 14 de Enero de 2022*. Descargado el 18 de enero de 2022, de <https://indexjuarez.com/wp-content/uploads/2022/01/14-de-Enero.pdf>
- ITM. (2022). *Industrial Transformation Mexico*. Descargado el 12 de enero de 2022,

de <https://industrialtransformation.mx/>

- Jacquez-Hernández, M. V., y Torre, V. G. L. (2018). Modelos de evaluación de la madurez y preparación hacia la Industria 4.0: una revisión de literatura. *Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias*, 6(20), 61–78.
- Jamieson, S. (2004). Likert scales: How to (ab) use them? *Medical education*, 38(12), 1217–1218.
- Kelly, J. (2020). *U.s. lost over 60 million jobs—now robots, tech and artificial intelligence will take millions more*. Descargado el 27 de octubre de 2020, de <https://www.forbes.com/sites/jackkelly/2020/10/27/us-lost-over-60-million-jobs-now-robots-tech-and-artificial-intelligence-will-take-millions-more>
- Khan, A., y Turowski, K. (2016). A survey of current challenges in manufacturing industry and preparation for industry 4.0. En *Proceedings of the first international scientific conference “intelligent information technologies for industry” (iiti’16)* (pp. 15–26).
- Kim, D.-G., y Park, M.-G. (2014). Horizontal integration between cyber physical system based on industry 4.0 and manufacture execution systems through middleware building. *Journal of Korea Multimedia Society*, 17(12), 1484–1493.
- Kinzel, H. (2017). Industry 4.0—where does this leave the human factor? *Journal of Urban Culture Research*, 15, 70–83.
- Koska, A., GÖKSU, N., Erdem, M. B., y FETTAHLIOĞLU, H. S. (2017). Measuring the maturity of a factory for industry 4.0. *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*, 7(7), 52–61.
- Kronfle Catalán, V. N. (2018). *Los empleo del mañana emprendimiento, innovación y tecnología en américa latina* (B.S. thesis). Universidad de especialidades espíritu santo.

- Krull, S. (2016). El cambio tecnológico y el nuevo contexto del empleo tendencias generales y en américa latina. *Documentos de proyectos*.
- Li, D., Tang, H., Wang, S., y Liu, C. (2017). A big data enabled load-balancing control for smart manufacturing of industry 4.0. *Cluster Computing*, 20(2), 1855–1864.
- 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*, 135, 66–74.
- Liao, Y., Deschamps, F., Loures, E. d. F. R., y Ramos, L. F. P. (2017). Past, present and future of industry 4.0-a systematic literature review and research agenda proposal. *International journal of production research*, 55(12), 3609–3629.
- Liu, Y., y Xu, X. (2017). Industry 4.0 and cloud manufacturing: A comparative analysis. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 139(3), 034701.
- Maczewska, A., Polak-Sopinska, A., y Wisniewski, Z. (2019). Computer-aided occupational risk assessment of physical workload in the logistics 4.0. En *International conference on applied human factors and ergonomics* (pp. 378–390).
- Magdalena, G., y Ernst, P. (2016). Industry 4.0 and sustainability impacts: Critical discussion of sustainability aspects with a special focus on future of work and ecological consequences. *International Journal of Engineering*, XIV, 131–136.
- Malul, M., Rosenboim, M., y Shapira, D. (2021). Are very high salaries necessary for achieving economic efficiency? *Journal of Behavioral and Experimental Economics*, 101725.
- Martín, A. (2016). La industria 4.0: implicarnos en su desarrollo y anticipar sus efectos. *nueva etapa n^o27. dic. 2016*.
- Martínez, F. P., y cols. (2011). Presente y futuro de la tecnología de la realidad virtual. *Creatividad y sociedad*, 16, 1–39.

- Martínez Ávila, M., y Fierro Moreno, E. (2018). Aplicación de la técnica PLS-SEM en la gestión del conocimiento: un enfoque técnico práctico. *RIDE. Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, 8(16), 130–164.
- Martínez-Martínez, A. (2020). Retos en la implementación de Industria 4.0: el caso de GKN Driveline. *Proyectos UNAM PAPIIT IN309819 Industria 4.0, cadena global de valor y nuevos modelos de negocio: 3 estudios de caso de la industria automotriz en Guanajuato*, 4, 133–152.
- Mitchell, T. M. (1997). Does machine learning really work? *AI magazine*, 18(3), 11–11.
- Müller, J. M., Kiel, D., y Voigt, K.-I. (2018). What drives the implementation of Industry 4.0? The role of opportunities and challenges in the context of sustainability. *Sustainability*, 10(1), 247.
- Murray, J. (2013). Likert data: what to use, parametric or non-parametric? *International Journal of Business and Social Science*, 4(11).
- Naji, M. J. (2018). Industria 4.0, competencia digital y el nuevo sistema de formación profesional para el empleo. *Relaciones Laborales y Derecho del Empleo*, 6(1).
- Nara, E. O. B., da Costa, M. B., Baierle, I. C., Schaefer, J. L., Benitez, G. B., do Santos, L. M. A. L., y Benitez, L. B. (2021). Expected impact of industry 4.0 technologies on sustainable development: A study in the context of brazil's plastic industry. *Sustainable Production and Consumption*, 25, 102–122.
- Naya, S. (2018). Nuevo paradigma de big data en la era de la industria 4.0. *Revista electrónica de terapia ocupacional Galicia, TOG*(27), 2.
- NRI. (2021). *Network Readiness Index 2021*. Portulans Institute. Descargado el 13 de enero de 2022, de <https://networkreadinessindex.org/wp-content/uploads/reports/mexico.pdf>

- Pernías-Peco, P. A. (2017). Nuevos empleos, nuevas habilidades:¿ estamos preparando el talento para la cuarta revolución industrial? *ICE, Revista de Economía*(898).
- Perret-Erhard, E. (2021). *ProMéxico*. Nexos. Descargado el 11 de enero de 2022, de <https://www.nexos.com.mx/?p=57786>
- Pikas, B., Zhang, X., Peek, W. A., y Lee, T. (2016). The transformation and upgrading of the chinese manufacturing industry: Based on “german industry 4.0”. *Journal of Applied Business and Economics*, 18(5).
- Rajnai, Z., y Kocsis, I. (2017). Labor market risks of industry 4.0, digitization, robots and ai. En *2017 ieee 15th international symposium on intelligent systems and informatics (sisy)* (pp. 343–346).
- Raso-Delgue, J. (2018). América latina: El impacto de las tecnologías en el empleo y las reformas laborales. *Relaciones Laborales y Derecho del Empleo*, 6(1).
- Redinha, M. R. G. (2017). Protección del trabajador y tecnologías de la información y de la comunicación en el contrato de trabajo. *Derechos fundamentales y tecnologías innovadoras: actas del III Encuentro Internacional sobre Transformaciones del Derecho del Trabajo Ibérico*.
- Rehman, A. (2018). *Ipredictive relevance (q2) with smartpls2*. Descargado el 19 de octubre de 2019, de <https://youtu.be/dWPzr9NjJxU>
- Ringle, C., Wende, S., y Becker, J.-M. (2015). *Smartpls3*. Descargado el 10 de octubre de 2021, de <https://www.smartpls.com>
- Riquelme, R. (2021). *Industria manufacturera en México invertirá 3,500 millones de dólares en tecnología en 2022*. *El Economista*. Descargado el 12 de enero de 2022, de <https://www.eleconomista.com.mx/empresas/Industria-manufacturera-en-Mexico-invertira-3500-millones-de-dolares-en-tecnologia-en-2022-20211201-0057.html>

- Rivera, M. M., y Romero, R. R. (2016). Medicion de carga mental de trabajo en la industria automotriz en mexico. *European Scientific Journal*, 12(26).
- Rodríguez, J. M. (2017). Transformaciones tecnológicas, su impacto en el mercado de trabajo y retos para las políticas del mercado de trabajo. *Las transformaciones tecnológicas y sus desafíos para el empleo, las relaciones laborales y la identificación de la demanda de cualificaciones*. Santiago: CEPAL, 2017. LC/TS. 2017/111. p. 33-80.
- 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(1), 54–89.
- Sachon, M. (2018). Los pilares de la industria 4.0. *Revista de Antiguos Alumnos del IESE*(148).
- Saldivar, A. A. F., Li, Y., Chen, W.-n., Zhan, Z.-h., Zhang, J., y Chen, L. Y. (2015). Industry 4.0 with cyber-physical integration: A design and manufacture perspective. En *2015 21st international conference on automation and computing (icac)* (pp. 1–6).
- Salvadorinho, J., y Teixeira, L. (2021). Organizational knowledge in the i4. 0 using bpmn: a case study. *Procedia Computer Science*, 181, 981–988.
- Sanders, A., Elangeswaran, C., y Wulfsberg, J. P. (2016). Industry 4.0 implies lean manufacturing: Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing. *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*, 9(3), 811–833.
- Saquicela, J. L. S. (2020). Transformación digital de la industria 4.0. *Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional*, 5(8), 1344–1356.
- Scheuermann, C., Verclas, S., y Bruegge, B. (2015). Agile factory-an example of an industry 4.0 manufacturing process. En *2015 ieee 3rd international conference*

- on cyber-physical systems, networks, and applications* (pp. 43–47).
- Schlechtendahl, J., Keinert, M., Kretschmer, F., Lechler, A., y Verl, A. (2015). Making existing production systems industry 4.0-ready. *Production Engineering*, 9(1), 143–148.
- Schumacher, A., Erol, S., y Sihn, W. (2016). A maturity model for assessing industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises. *Procedia Cirp*, 52, 161–166.
- Secretaría de Desarrollo Económico y Portuario. (2020). *Programa para la Productividad y Competitividad Industrial, PPCI*. Descargado el 11 de enero de 2022, de <http://www.veracruz.gob.mx/desarrolloeconomico/ppci/>
- Secretaría de Economía. (2016a). *Programa para el Desarrollo de la Industria de Software (PROSOFT) y la Innovación 2019*. Descargado el 11 de enero de 2022, de <https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/programa-para-el-desarrollo-de-la-industria-de-software-prosoft-y-la-innovacion-2016?state=published>
- Secretaría de Economía. (2016b). *Programa para la Productividad y Competitividad Industrial, PPCI*. Descargado el 11 de enero de 2022, de <https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/programa-para-la-productividad-y-competitividad-industrial-ppci>
- Secretaría de Economía. (2021). *PROMÉXICO. Inversión y comercio*. Descargado el 11 de enero de 2022, de <https://www.ccmexcol.com/Cooperacion.pdf>
- Seidel, G., y Back, A. (2009). *Success factor validation for global erp programmes*. Università di Verona, Facoltà di Economia, Dipartimento de Economia Aziendale.
- Sipsas, K., Alexopoulos, K., Xanthakis, V., y Chryssolouris, G. (2016). Collaborative maintenance in flow-line manufacturing environments: An industry 4.0

- approach. *Procedia Cirp*, 55, 236–241.
- Sommer, L. (2015). Industrial revolution-industry 4.0: Are german manufacturing smes the first victims of this revolution? *Journal of Industrial Engineering and Management*, 8(5), 1512–1532.
- Sony, M., y Naik, S. (2019). Key ingredients for evaluating industry 4.0 readiness for organizations: a literature review. *Benchmarking: An International Journal*.
- Spremolla, G. C. (2018). Economía digital e industria 4.0: reflexiones desde el mundo del trabajo para una sociedad del futuro. *Relaciones Laborales y Derecho del Empleo*, 6(1).
- Sumer, B. (2018). Impact of industry 4.0 on occupations and employment in turkey. *European Scientific Journal*, 14(10), 1–17.
- Thames, L., y Schaefer, D. (2016). Software-defined cloud manufacturing for industry 4.0. *Procedia CIRP*, 52, 12–17.
- Trujillo-Albarrán, S., Salgado-Gallegos, M., y Pérez-Merlos, J. C. (2020). Integración de la gestión del conocimiento y la Industria 4.0: una guía para su aplicación en una organización. *RILCO DS: Revista de Desarrollo sustentable, Negocios, Emprendimiento y Educación*(7), 6.
- Ushakova, T. (2018). De la máquina al trabajador y viceversa. un ensayo sobre la implicación de las nuevas tecnologías en el mundo laboral. *Relaciones Laborales y Derecho del Empleo*, 6(1).
- Van Acker, B. B., Conradie, P., Vlerick, P., y Saldien, J. (2019). Employee acceptability of wearable mental workload monitoring in industry 4.0: a pilot study on motivational and contextual framing. En *Proceedings of the design society: International conference on engineering design* (Vol. 1, pp. 2101–2110).
- Veza, I., Mladineo, M., y Peko, I. (2015). Analysis of the current state of croatian manufacturing industry with regard to industry 4.0. En *15th international*

scientific conference on production engineering-cim'2015: Computer integrated manufacturing and high speed machining.

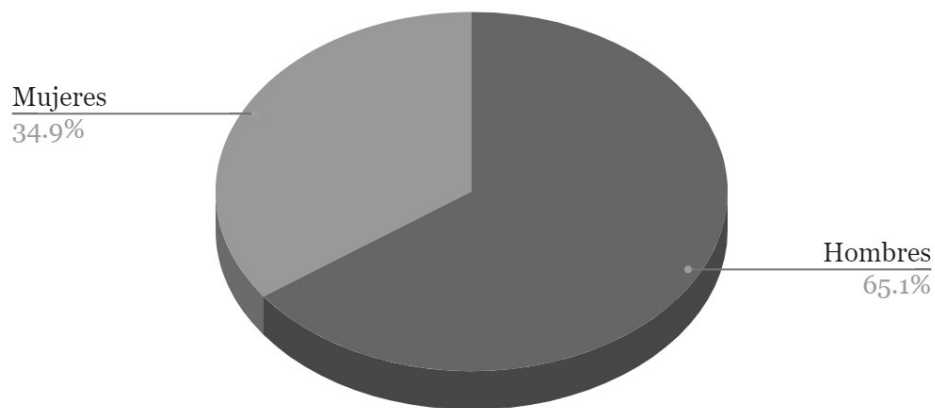
- Wang, L., y Wang, G. (2016). Big data in cyber-physical systems, digital manufacturing and industry 4.0. *International Journal of Engineering and Manufacturing (IJEM)*, 6(4), 1–8.
- Yen, C.-T., Liu, Y.-C., Lin, C.-C., Kao, C.-C., Wang, W.-B., y Hsu, Y.-R. (2014). Advanced manufacturing solution to industry 4.0 trend through sensing network and cloud computing technologies. En *2014 ieee international conference on automation science and engineering (case)* (pp. 1150–1152).
- Ynzuna-Cortés, C., Izar-Landeta, J., y Chacón, G., Bocarando-Chacón. (2017). El Entorno de la Industria 4.0: Implicaciones y Perspectivas Futuras. *Conciencia tecnológica*(54), 33–45.
- Zhang, X., Peek, W. A., Pikas, B., y Lee, T. (2016). The transformation and upgrading of the chinese manufacturing industry: Based on “german industry 4.0”. *Journal of Applied Business and Economics*, 18(5), 97–105.
- Zheng, P., Sang, Z., Zhong, R. Y., Liu, Y., Liu, C., Mubarok, K., . . . others (2018). Smart manufacturing systems for industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 13(2), 137–150.
- Zheng, T., Ardolino, M., Bacchetti, A., y Perona, M. (2021). The applications of industry 4.0 technologies in manufacturing context: a systematic literature review. *International Journal of Production Research*, 59(6), 1922–1954.

Apéndice A

Estadísticos descriptivos del instrumento de medición

La figura A.1 muestra la proporción de los trabajadores de acuerdo a su sexo.

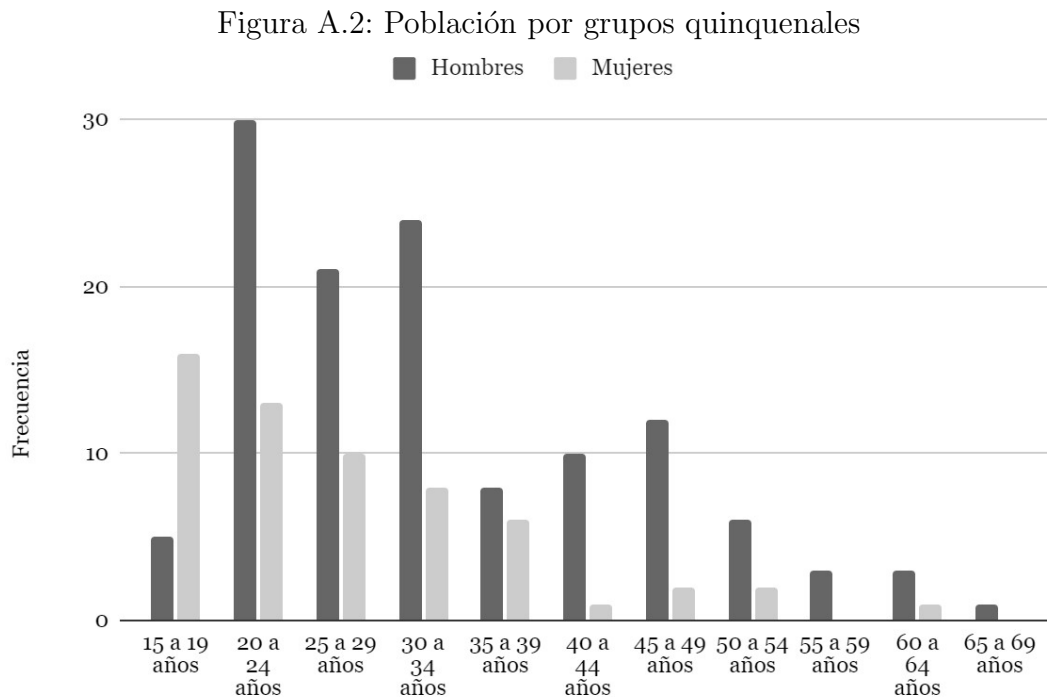
Figura A.1: Población por sexo



Fuente: elaboración propia.

La figura A.2 muestra población de trabajadores por grupos quinquenales de edades, donde se logra apreciar que el grueso de la población masculina (61 %) tiene de 21 a 34 años, mientras que el 72.3% de las mujeres tienen de 21 a 40 años. Además, proporcionalmente la población femenina tiende a ser más joven que la

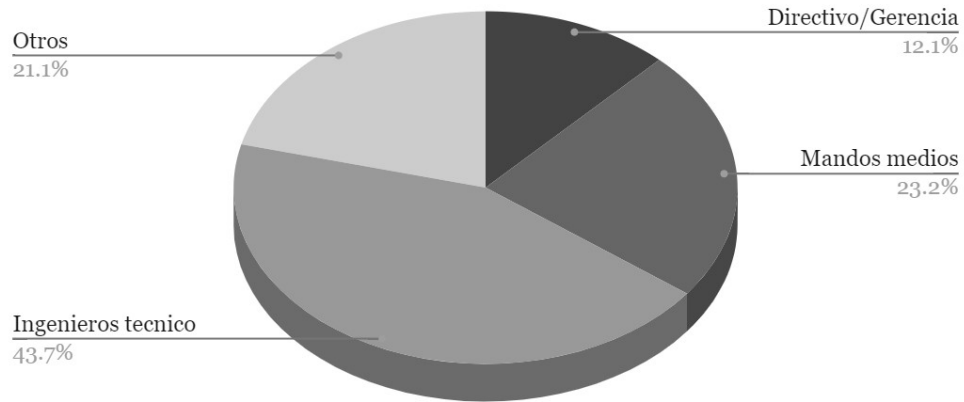
población masculina.



Fuente: elaboración propia.

En relación con los puestos de los encuestados, la figura A.3 muestra que el 43.7% pertenece a un puesto de ingeniero/técnico, el 23.2% respondió tener un puesto de mandos medios, el 12.1% un tiene un puesto directivo/gerencial y, el 21.1% pertenece a otro tipo de puesto.

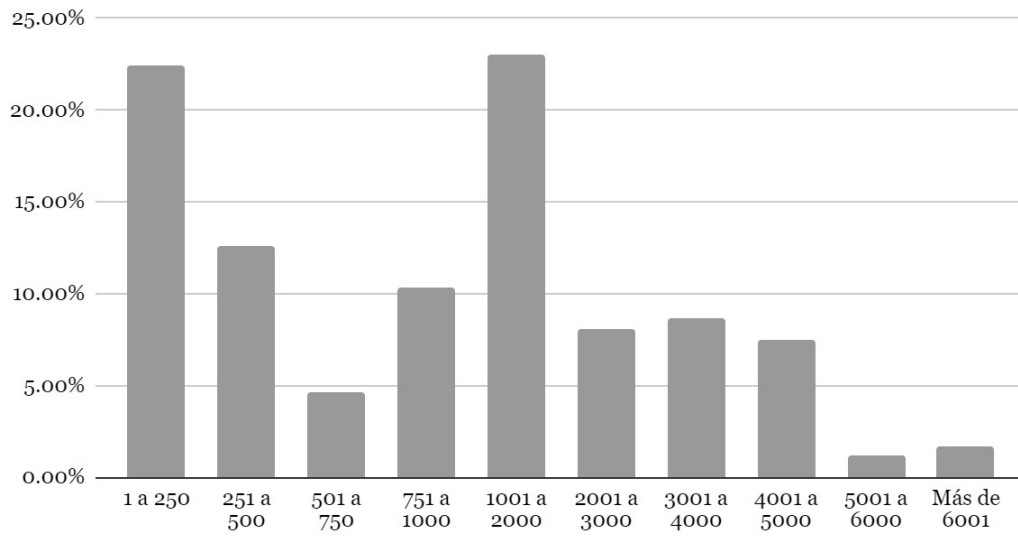
Figura A.3: Población por puesto



Fuente: elaboración propia.

La figura A.4 muestra el tamaño de las plantas maquiladoras de acuerdo al número de trabajadores que emplean. El 22.4 % de las plantas emplea de 1 a 250 trabajadores, el 12.6 % emplea de 251 a 500 trabajadores, el 4.6 % emplea de 501 a 750 trabajadores, el 10.3 % emplea de 751 a 1,000 trabajadores, el 23.0 % emplea de 1,001 a 2,000 trabajadores, el 8.0 % emplea de 2,001 a 3,000 trabajadores, el 8.6 % emplea de 3,001 a 4,000 trabajadores, el 7.5 % emplea de 4,001 a 5,000 trabajadores y el 2.8 % restante de las plantas emplean a más de 5,000 trabajadores.

Figura A.4: Número de empleados ocupados por planta maquiladora



Fuente: elaboración propia.

Apéndice B

Efectos percibidos de la implementación de la Industria 4.0 en las maquiladoras

La tabla B.1 muestra la percepción de los efectos que tiene la implementación de tecnologías 4.0 en las maquiladoras. Para determinar el nivel de conocimiento e implementación, se utilizó la mediana en virtud de la naturaleza ordinal de los ítems tomados en cuenta. Los niveles de medición obedecen a la siguiente escala de medición: 1 = totalmente en desacuerdo, 2 = en desacuerdo, 3 = ni de acuerdo ni en desacuerdo, 4 = de acuerdo, 5 = totalmente de acuerdo. En general, los empleados de maquiladora están de acuerdo en que la implementación de las tecnologías 4.0 reduce la mano de obra, aumenta la productividad y reduce los tiempos de ciclo. Por otra parte, tienen una postura neutral con respecto a la reducción de costos administrativos, la reducción de costos de producción y la reducción en el número de empleados.

Tabla B.1: Percepción de los efectos que tiene la implementación de las tecnologías 4.0 en las maquiladoras

Efecto sobre la planta	Media	Mediana	Moda	Rango	
Reducción de mano de obra	3.49	4.00	4.00	4.00	De acuerdo
Reducción de costos administrativos	3.40	3.00	3.00	4.00	Ni de acuerdo ni en desacuerdo
Reducción de costos de producción	3.45	3.00	3.00	4.00	Ni de acuerdo ni en desacuerdo
Reduce el número de empleados	3.14	3.00	3.00	4.00	Ni de acuerdo ni en desacuerdo
Aumenta la productividad	3.77	4.00	4.00	4.00	De acuerdo
Reduce los tiempos de ciclo	3.52	4.00	3.00	4.00	De acuerdo

Fuente: elaboración propia.

La tabla B.2 muestra la estimación de la percepción de los efectos que tiene la implementación de tecnologías 4.0 en 3 aspectos de interés. El efecto denominado *reducción de costos y aumentos en la productividad* incluye los ítems de reducción de costos y los ítems de aumentos en la productividad. Para llevar a cabo este análisis, se utilizó la media debido que los datos en cuestión son de intervalo. Los niveles de medición obedecen el siguiente criterio: una media menor a 2.33 es considerada baja, una media entre 2.33 y 3.66 es considerada media y una media mayor a 3.66 considerada alta. En general, los trabajadores de la maquiladora consideran que la implementación de tecnologías 4.0 tiene un impacto medio sobre la reducción de costos y un impacto medio sobre los aumentos en la productividad.

Tabla B.2: Percepción de los efectos que tiene la implementación de las tecnologías 4.0 en las maquiladoras por dimensión

Efecto sobre la planta	Media	Desv est	Min	Max	Magnitud del efecto
Reducción de costos y aumentos en la prod.	3.46	1.10	1.00	5.00	Impacto medio
Reducción de costos	3.45	1.06	1.00	5.00	Impacto medio
Aumentos en la productividad	3.47	1.14	1.00	5.00	Impacto medio

Fuente: elaboración propia.

La tabla B.3 muestra la percepción de los efectos que tiene la implementación de tecnologías 4.0 según el puesto del trabajador. Para este análisis, se utilizó la

mediana en virtud de la naturaleza ordinal de los ítems tomados en cuenta. Los niveles de medición obedecen a la siguiente escala de medición: 1 = totalmente en desacuerdo, 2 = en desacuerdo, 3 = ni de acuerdo ni en desacuerdo, 4 = de acuerdo, 5 = totalmente de acuerdo.

Los trabajadores con puestos directivos y de gerencia están de acuerdo que que la implementación de las tecnologías 4.0 reduce la mano de obra, reduce los costos administrativos, reduce los costos de producción, aumenta la productividad y reduce los tiempos de ciclo, asimismo tienen una postura neutral con respecto a la reducción del número de empleados.

Tabla B.3: Mediana de la percepción de los efectos que tiene la implementación de las tecnologías 4.0 en las maquiladoras por puesto

Puesto	Reduce la mano de obra		Reduce costos administrativos		Reduce costos de producción		Reduce el número de empleados		Aumenta la productividad		Reduce los tiempos de ciclo	
Directivo/gerencia	4.00	De acuerdo	4.00	De acuerdo	4.00	De acuerdo	3.00	Neutral	4.00	De acuerdo	4.00	De acuerdo
Mandos medios	4.00	De acuerdo	3.00	Neutral	4.00	De acuerdo	3.00	Neutral	4.00	De acuerdo	3.50	De acuerdo
Ingeniero/técnico	3.00	Neutral	3.00	Neutral	3.00	Neutral	3.00	Neutral	4.00	De acuerdo	3.00	Neutral
Otros	4.00	De acuerdo	3.00	Neutral	3.00	Neutral	3.00	Neutral	4.00	De acuerdo	4.00	De acuerdo

Fuente: elaboración propia.

Por su parte, los trabajadores con puestos de mandos medios, están de acuerdo que que la implementación de las tecnologías 4.0 reduce la mano de obra, reduce los costos de producción, aumenta la productividad y reduce los tiempos de ciclo, asimismo tienen una postura neutral con respecto a la reducción del número de empleados y la reducción de los costos administrativos. Los trabajadores con puestos de ingeniero o técnico están de acuerdo en que la implementación de tecnologías 4.0 aumenta la productividad, pero, tienen una postura neutral con respecto a la reducción de la mano de obra, la reducción de costos administrativos, la reducción de costos de producción, la reducción del número de empleados y la reducción de los tiempos de ciclo.

Por otro lado, los trabajadores con otros puestos están de acuerdo que que la implementación de tecnologías 4.0 reduce la mano de obra, aumenta la productividad y reduce los tiempos de ciclo pero mantienen una postura neutral con respecto a la reducción de costos administrativos, la reducción de costos de producción y la reducción del número de empleados. La clasificación de los puestos utilizados para el análisis se muestra en la tabla B.4.

Tabla B.4: Reclasificación de los puestos reportados en la encuesta

Reclasificación	Puesto reportado
Directivo/gerencia	Gerente Contralor Directivo
Mandos medios	Jefe de departamenteo Administrativo
Ingenieros/técnicos	Ingeniero Técnico
Otros	Supervisor Operador Médico Prácticante Otro

Fuente: elaboración propia.

Apéndice C

Percepción del salario y las prestaciones recibidas

La tabla C.1 muestra la percepción de los salarios y las prestaciones recibidas por los trabajadores de maquiladora en relación al salario y las prestaciones que ofrecen otras empresas similares. Para el análisis se utilizó la media debido que los datos en cuestión son de intervalo. Los niveles de medición obedecen el siguiente criterio: una media menor a 2.33 es considerada baja, una media entre 2.33 y 3.66 es considerada a la par y una media mayor a 3.66 es considerada alta. En general, los trabajadores de la maquiladora consideran que los salarios y las prestaciones que perciben se encuentran a la par que otras empresas similares.

Tabla C.1: Media de la percepción de los salarios y las prestaciones recibidas.

	Salarios		Prestaciones	
Media	2.99	A la par	3.14	A la par

Fuente: elaboración propia.

La tabla C.2 muestra la percepción de los salarios recibidos por los trabajadores según su puesto. Para este análisis, se utilizó la mediana en virtud de la naturaleza ordinal de los ítems tomados en cuenta. Los niveles de medición obedecen a la si-

guiente escala de medición: 1 = muy inferior a otras empresas similares, 2 = inferior a otras empresas similares, 3 = comparable con otras empresas similares, 4 = superior a otras plantas similares, 5 = muy superior a otras plantas similares. Los resultados muestran que en general, los empleados de todos los puestos reportados consideran que el salario de los ingenieros, los obreros y el personal administrativo se encuentra a la par que el salario ofrecido por otras empresas similares.

Tabla C.2: Mediana de la percepción de los salarios recibidos según el puesto del trabajador.

Puesto	Ingenieros		Obreros		Admnistrativos	
Directivo/gerencia	3.0	A la par	3.0	A la par	3.0	A la par
Mandos medios	3.0	A la par	3.0	A la par	3.0	A la par
Ingeniero/técnico	3.0	A la par	3.0	A la par	3.0	A la par
Otros	3.0	A la par	3.0	A la par	3.0	A la par

Fuente: elaboración propia.

La tabla C.3 muestra la percepción de las prestaciones recibidas por los trabajadores según su puesto. Para este análisis, se utilizó la mediana en virtud de la naturaleza ordinal de los ítems tomados en cuenta. La escala de medición es la misma que se utilizó en la tabla anterior. Los resultados muestran que en general, los empleados consideran que las prestaciones de los ingenieros, los obreros y el personal administrativo se encuentran a la par que las prestaciones ofrecidas por otras empresas similares, sin embargo, los trabajadores con puestos directivos o gerenciales consideran que los ingenieros gozan de prestaciones superiores a las ofrecidas por otras plantas similares.

Tabla C.3: Mediana de la percepción de las prestaciones recibidas según el puesto del trabajador

Puesto	Ingenieros		Obreros		Administrativos	
Directivo/gerencia	4.0	Altas	3.0	A la par	3.0	A la par
Mandos medios	3.0	A la par	3.0	A la par	3.0	A la par
Ingeniero/técnico	3.0	A la par	3.0	A la par	3.0	A la par
Otros	3.0	A la par	3.0	A la par	3.0	A la par

Fuente: elaboración propia.

Apéndice D

Carga laboral percibida

La tabla D.1 muestra los resultados obtenidos con relación a la estimación de la carga laboral percibida por los trabajadores de maquiladora. De un total de 192 respuestas recibidas, 56 [29.17 %] trabajadores reportaron tener un alto nivel de carga laboral, 110 [57.29 %] reportaron tener un nivel medio de carga laboral y 26 [13.54 %] reportaron tener un nivel bajo de carga laboral.

Tabla D.1: Carga laboral por ítem

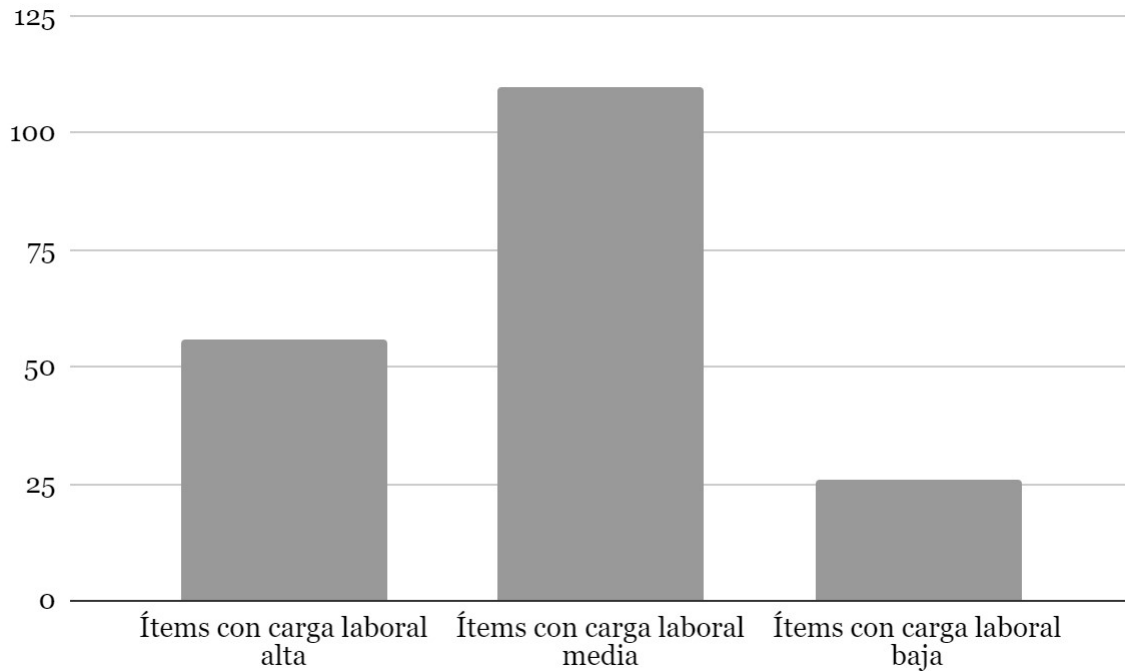
Nivel de carga laboral	Frecuencia	Porcentaje
Alto	56	29.17
Mediano	110	57.29
Bajo	26	13.54
Total	192	100.00

Fuente: elaboración propia.

El análisis de los resultados de la estimación de la carga laboral percibida por los trabajadores se realizó a través de la escala sumativa de los 7 ítems que configuran esta dimensión. Las respuestas se categorizaron de acuerdo al siguiente criterio: puntajes menores de 15 se consideran con carga laboral baja, puntajes entre 15 y 25 se

consideran con carga laboral media y puntajes mayores a 25 se consideran con carga laboral alta. La figura D.1 muestra la distribución de la carga laboral percibida por los trabajadores.

Figura D.1: Carga laboral por ítem



Fuente: elaboración propia.

El análisis de la carga laboral percibida por sexo se realizó utilizando la media de la sumatoria de los puntajes de la carga laboral percibida según el sexo reportado. La categorización de los puntajes se realizó utilizando el mismo criterio que en la tabla anterior. La tabla D.2 muestra que la carga laboral percibida por los hombres es marginalmente mayor que la carga laboral percibida por las mujeres. Sin embargo,

ambos sexos perciben cargas laborales medias.

Tabla D.2: Carga laboral por sexo

Sexo	Media	Nivel de carga laboral
Hombre	21.77	Carga mediana
Mujer	20.50	Carga mediana

Fuente: elaboración propia.

Los resultados del análisis de la carga laboral percibida por el puesto de los trabajadores se muestra en la tabla D.3. Éste análisis utilizó la media como medida de tendencia central debido a que los datos en cuestión son de intervalo. Los niveles de medición obedecen el siguiente criterio: una media menor a 2.33 es considerada carga laboral baja, una media entre 2.33 y 3.66 es considerada carga laboral mediana y una media mayor a 3.66 es considerada carga laboral alta. En general, los trabajadores de maquiladora reportan tener cargas laborales medias sin importar el puesto desempeñado.

Tabla D.3: Carga laboral por puesto

Puesto	Media	Nivel de carga laboral
Directivo/gerencia	3.22	Carga mediana
Mandos medios	2.95	Carga mediana
Ingeniero/técnico	2.92	Carga mediana
Otros	3.08	Carga mediana

Fuente: elaboración propia.

Apéndice E

Correlaciones entre las variables del instrumento de medición

La tabla E.1 muestra el coeficiente de correlación r entre los promedios del nivel de implementación de I4.0, conocimiento de la I4.0, intención de implementación de la I4.0, nivel de sobrecarga laboral, nivel de eficacia productiva de la empresa y, nivel de salarios y prestaciones percibidos. La tabla muestra resultados estadísticamente significativos que sugieren lo siguiente:

Tabla E.1: Correlaciones de Pearson del promedio de las variables de la encuesta

<i>Variable</i>	<i>trab</i>	<i>con</i>	<i>imp</i>	<i>int</i>	<i>car</i>	<i>sal</i>	<i>efe</i>
<i>trab</i> <i>N=174</i>	1.000	0.095 0.213	0.240** 0.001	0.134 0.079	0.057 0.457	0.116 0.129	0.098 0.198
<i>con</i> <i>N=192</i>	0.095 0.213	1.000	0.655** 0.000	0.261** 0.000	0.212** 0.003	0.230** 0.001	0.292** 0.000
<i>imp</i> <i>N=192</i>	0.240** 0.001	0.655** 0.000	1.000	0.468** 0.000	0.052 0.473	0.318** 0.000	0.312** 0.000
<i>int</i> <i>N=192</i>	0.134 0.079	0.261** 0.000	0.468** 0.000	1.000	0.042 0.567	0.473** 0.000	0.335** 0.000
<i>car</i> <i>N=192</i>	0.057 0.457	0.212** 0.003	0.052 0.473	0.042 0.567	1.000	0.036 0.618	0.248** 0.001
<i>sal</i> <i>N=192</i>	0.116 0.129	0.230** 0.001	0.318** 0.000	0.473** 0.000	0.036 0.618	1.000	0.310** 0.000
<i>efe</i> <i>N=192</i>	0.098 0.198	0.292** 0.000	0.312** 0.000	0.335** 0.000	0.248** 0.001	0.310** 0.000	1.000

Fuente: elaboración propia. **. Indica que la correlación es significativa en el nivel de 0.01 (prueba de dos colas).

- El nivel de implementación de la I4.0 que tienen las empresas está relacionado de forma positiva [0.655] con el nivel de conocimiento de la I4.0 que tienen los trabajadores.
- El nivel de implementación de la I4.0 que tienen las empresas está relacionado de forma positiva [0.468] con el nivel de intención de implementación de la I4.0 que tienen las empresas.
- El nivel de implementación de la I4.0 que tienen las empresas está relacionado de forma positiva [0.318] con el nivel de salarios y prestaciones percibido por

los trabajadores.

- El nivel de implementación de la I4.0 que tienen las empresas está relacionado de forma positiva [0.240] con el número reportado de trabajadores de la empresa.
- El nivel de implementación de la I4.0 que tienen las empresas está relacionado de forma positiva [0.312] con el nivel de efectividad productiva de la empresa.
- El nivel de conocimiento de la I4.0 que tienen los trabajadores está relacionado de forma positiva [0.212] con el nivel de sobrecarga laboral percibido por los trabajadores.
- El nivel de conocimiento de la I4.0 que tienen los trabajadores está relacionado de forma positiva [0.230] con el nivel de salarios y prestaciones percibido por los trabajadores.
- El nivel de conocimiento de la I4.0 que tienen los trabajadores está relacionado de forma positiva [0.261] con el nivel de intención de implementación que tienen las empresas.
- El nivel de conocimiento de la I4.0 que tienen los trabajadores está relacionado de forma positiva [0.312] con el nivel de efectividad productiva de la empresa.
- El nivel de la intención de implementación de la I4.0 que tienen las empresas está relacionado de forma positiva [0.473] con el nivel de salarios y prestaciones percibido por los trabajadores.
- El nivel de la intención de implementación de la I4.0 que tienen las empresas está relacionado de forma positiva [0.335] con el nivel de efectividad productiva de la empresa.

- El nivel de sobrecarga laboral percibido por los trabajadores está relacionado de forma positiva [0.248] con el nivel de efectividad productiva de la empresa.
- El nivel de salarios y prestaciones percibido por los trabajadores está relacionado de forma positiva [0.310] con el nivel de efectividad productiva de la empresa.

Apéndice F

Estadísticos descriptivos acerca del conocimiento e implementación de la I4.0

F.1. Nivel de implementación de la I4.0 por área de la empresa

La tabla F.1 muestra la estimación del nivel implementación de la I4.0 de acuerdo a las diferentes áreas de las empresas de manufactura. Para determinar el nivel de complejidad por área, se utilizó la mediana en virtud de la naturaleza ordinal de los ítems tomados en cuenta¹. Los niveles de medición obedecen el siguiente criterio: una mediana menor a 2.33 es considerada baja, una mediana entre 2.33 y 3.66 es considerada media y una mediana mayor a 3.66 considerada alta.

¹El análisis de tendencia central para datos ordinales –ítems tipo Likert– debe realizarse utilizando la mediana o la moda (Murray, 2013). Además, las manipulaciones aritméticas requeridas para calcular la media y la desviación estándar son inapropiadas para el análisis estadístico de datos ordinales (Jamieson, 2004).

Tabla F.1: Implementación de la I4.0 por área

Área	Mediana	Nivel de complejidad
Investigación y desarrollo	3.00	Complejidad mediana
Ingeniería de producto/proceso	4.00	Complejidad alta
Cadena de suministros (Proveduría, B2B)	3.00	Complejidad mediana
Manufactura/Producción	4.00	Complejidad alta
Control de calidad	4.00	Complejidad alta
Mantenimiento	4.00	Complejidad alta
Distribución/logística	4.00	Complejidad alta
Planeación	4.00	Complejidad alta
Formación de recursos humanos (entrenamiento/capacitación)	3.00	Complejidad mediana

Fuente: elaboración propia.

Las áreas de investigación y desarrollo, cadena de suministros y formación de recursos humanos mostraron un nivel de complejidad tecnológica mediano, mientras que las áreas de ingeniería de producto/proceso, manufactura/producción, control de calidad, mantenimiento, distribución/logística y planeación mostraron un alto nivel de complejidad tecnológica.

F.2. Nivel de conocimiento, implementación e intención de implementación de la Industria 4.0 por trabajador encuestado

El análisis del nivel de conocimiento, implementación e intención de implementación de la I4.0 por trabajador encuestado arrojó los siguientes resultados: En torno al conocimiento de las tecnologías de I4.0, 15 trabajadores [7.81 %] respondieron tener un nivel de conocimiento alto, 65 [33.86 %] respondieron tener un nivel medio y 112 [58.33 %] respondieron tener un nivel bajo de conocimiento; en lo que respecta a la implementación de las tecnologías de I4.0, 14 empleados [7.29 %] reportaron tener un alto nivel de implementación en la empresa en la que laboran, 65 [33.85 %] reportaron tener un nivel medio de implementación en la empresa en la que laboran

y 113 [58.86 %] reportaron tener un bajo nivel de implementación en la empresa en la que laboran; en relación a la intención de implementación de las tecnologías de la I4.0, 72 trabajadores [37.5 %] reportaron un alto nivel de intención de implementación en la empresa donde laboran, 79 [41.15 %] reportaron un nivel medio de intención de implementación y 41 [21.35 %] reportaron un bajo nivel de intención de implementación en la empresa donde laboran.

Tabla F.2: Conocimiento, implementación e intención de implementación de Industria 4.0 por trabajador encuestado

Dimensión	Nivel	Frecuencia	Porcentaje
Conocimiento de las tecnologías de la Industria 4.0	Alto	15	7.81
	Medio	65	33.86
	Bajo	112	58.33
	Total	192	100.00
Implementación de las tecnologías de la Industria 4.0	Alta	14	7.29
	Media	65	33.85
	Baja	113	58.86
	Total	192	100.00
Intención de implementación de las tecnologías de la Industria 4.0	Alta	72	37.50
	Media	79	41.15
	Baja	41	21.35
	Total	192	100.00

Fuente: elaboración propia.

La tabla F.2 muestra que la mayoría de los trabajadores [58.3 %] tienen un nivel bajo de conocimiento de las tecnologías de la I4.0. Además, la mayoría de los trabajadores [58.8 %] reportan que las empresas en dónde trabajan tienen un nivel bajo de implementación de tecnologías propias de la I4.0. Por otro lado, el nivel de intención de implementación de tecnologías de I4.0 tiende a ser medio-alto [41.15 % y 37.5 %

respectivamente].

F.3. Nivel de conocimiento, implementación e intención de implementación de la I4.0 por sector industrial

Se estimó el nivel de conocimiento, implementación e intención de implementación de tecnologías de la Industria 4.0 de acuerdo a la siguiente clasificación: el sector manufactura engloba empresas de productos médicos, automotrices, de productos eléctricos/electrónicos y de equipo computacional; el sector de actividades de soporte a la manufactura incluye empresas de servicios técnicos y tecnológicos, metalmecánica, plásticos y aplicación de pintura; el sector otros incluye empresas de construcción, filtros, financieras, de la industria marina, entre otras (Ver tabla F.3).

Tabla F.3: Promedio del conocimiento, implementación e intención de implementación de la Industria 4.0 por sector industrial

no. de datos	Sector	Conocimiento de la I4.0		Implementación de tecnologías de la I4.0		Intencion de implementación de tecnologías de la I4.0	
140	Manufactura	2.52	Media	2.59	Media	3.36	Media
33	Actividades de soporte a la manufactura	2.60	Media	2.33	Baja/media	3.56	Media
17	Otros	1.85	Baja	1.94	Baja	2.66	Media

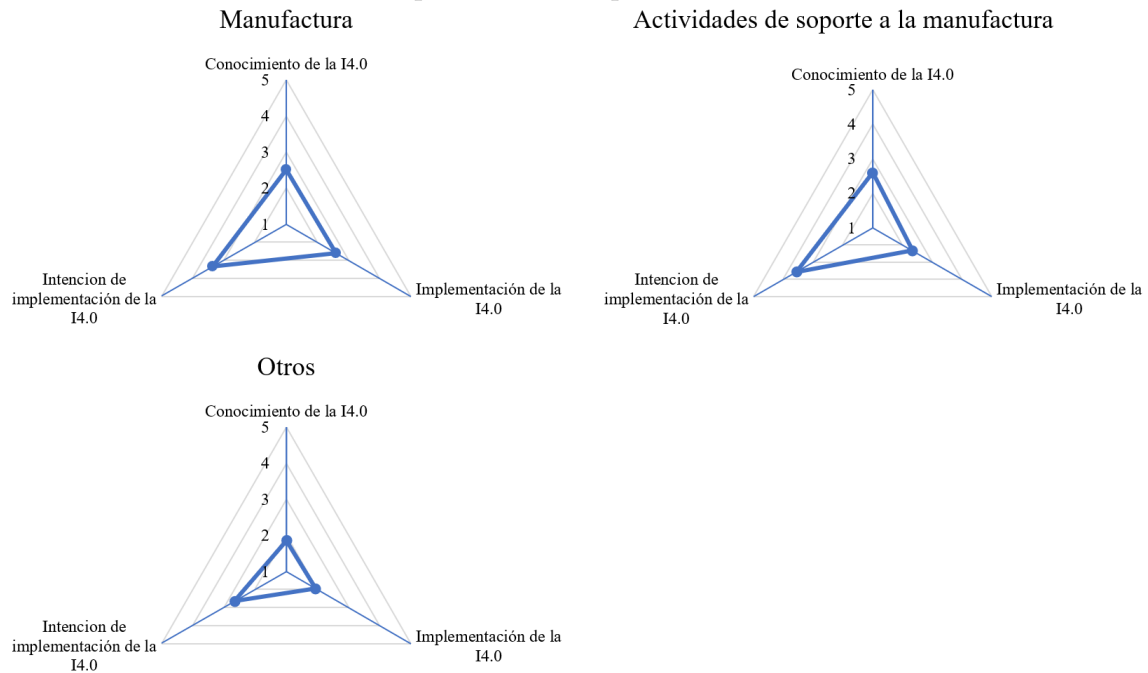
Fuente: elaboración propia.

Las empresas del sector manufactura mostraron un nivel medio para el conocimiento, implementación e intención de implementación de tecnologías de la I4.0; las empresas de actividades de soporte a la manufactura obtuvieron un nivel medio para

el conocimiento de la I4.0, un nivel bajo/medio para la implementación de tecnologías de la I4.0 y un nivel medio para la intención de implementación de tecnologías de la I4.0. Las empresas clasificadas como otros, mostraron niveles bajos de conocimiento de la I4.0 y de implementación de tecnologías de la I4.0, pero, un nivel medio de intención de implementación de tecnologías de la I4.0.

A pesar de lo anterior, la brecha en la implementación entre las empresas de manufactura y las de soporte a la manufactura es marginal, como se muestra en la figura F.1. Además, las empresas de actividades de soporte a la manufactura tienen un puntaje ligeramente mayor que las empresas de manufactura en la intención de implementación de tecnologías 4.0. Por si parte, las empresas clasificadas como otros tienen puntajes bajos relativos a las empresas de manufactura y actividades de soporte a la manufactura.

Figura F.1: Gráficas radiales del conocimiento, implementación e intención de implementación de la industria 4.0 por sector maquilador



Fuente: elaboración propia.

F.4. Nivel de conocimiento de la I4.0 por tecnología

La tabla F.4 muestra la estimación del nivel de conocimiento de tecnologías de la I4.0 al interior de las empresas. Para determinar el nivel de conocimiento e implementación, se utilizó se utilizó la mediana las respuestas de los ítems. Los niveles de medición obedecen a la siguiente escala de medición: 1 = no se conoce, 2 = nociones básicas, 3 = conocimiento medio, 4 = conocimiento amplio, 5 = es experto.

Tabla F.4: Mediana del conocimiento de tecnologías de la I4.0 por tecnología

Tecnología		Conocimiento
Esquemas de seguridad	3.0	Conocimiento medio
Sensado y colección digital de datos	3.0	Conocimiento medio
Monitoreo de procesos en tiempo real	3.0	Conocimiento medio
Internet de las cosas (IoT)	2.5	Conocimiento medio/básico
Machine learning/deep learning	2.0	Nociones básicas
Robótica autónoma	2.0	Nociones básicas
Robots/ robótica colaborativa	2.0	Nociones básicas
Big Data	2.0	Nociones básicas
Cloud Computing	2.0	Nociones básicas
Computer vision	2.0	Nociones básicas
Simulación/modelado digital	2.0	Nociones básicas
Integración vertical y horizontal	2.0	Nociones básicas
Gestión inteligente de energía	2.0	Nociones básicas
Impresión Aditiva (3D)	2.0	Nociones básicas
Realidad aumentada	1.0	No se conoce
Realidad virtual	1.0	No se conoce
Vehículos autoguiados	1.0	No se conoce
Block Chain	1.0	No se conoce
Gemelo digital	1.0	No se conoce

Fuente: elaboración propia.

Los resultados muestran las tecnologías de la I4.0 en orden descendente de acuerdo al nivel de conocimiento reportado. Las tecnologías esquemas de seguridad, sensado y colección digital de datos, y monitoreo en tiempo real tienen un nivel de conocimiento medio. Internet de las cosas tiene un nivel medio-básico de conocimiento. Machine learning, robótica autónoma, robots/robótica colaborativa, big data, cloud computing, computer vision, simulación/modelado digital, integración vertical y horizontal, gestión inteligente de energía e impresión aditiva tienen un nivel de conocimiento básico. Realidad aumentada, realidad virtual, vehículos autoguiados, blockchain y

gemelo digital no se conocen en las maquiladoras de Ciudad Juárez.

F.5. Nivel de implementación de la I4.0 por tecnología

La tabla F.5 muestra la estimación del nivel de implementación de tecnologías de la I4.0 al interior de las empresas. Para determinar el nivel de conocimiento e implementación, se utilizó se utilizó la mediana de las respuestas de los ítems. Los niveles de medición obedecen a la siguiente escala de medición: 1 = no se implementa, 2 = complejidad baja, 3 = complejidad media, 4 = complejidad alta, 5 = se implementa totalmente.

Tabla F.5: Mediana de la implementación de tecnologías de la I4.0 por tecnología

Tecnología	Implementación	
Sensado y colección digital de datos	3.0	Nivel medio
Machine learning/deep learning	2.0	Nivel bajo
Realidad aumentada	2.0	Nivel bajo
Realidad virtual	2.0	Nivel bajo
Robótica autónoma	2.0	Nivel bajo
Robots/ robótica colaborativa	2.0	Nivel bajo
Big Data	2.0	Nivel bajo
Vehículos autoguiados	2.0	Nivel bajo
Cloud Computing	2.0	Nivel bajo
Esquemas de seguridad	2.0	Nivel bajo
Internet de las cosas (IoT)	2.0	Nivel bajo
Computer vision	2.0	Nivel bajo
Simulación/modelado digital	2.0	Nivel bajo
Integración vertical y horizontal	2.0	Nivel bajo
Monitoreo de procesos en tiempo real	2.0	Nivel bajo
Gestión inteligente de energía	2.0	Nivel bajo
Impresión Aditiva (3D)	2.0	Nivel bajo
Block Chain	1.0	No se implementa
Gemelo digital	1.0	No se implementa

Fuente: elaboración propia.

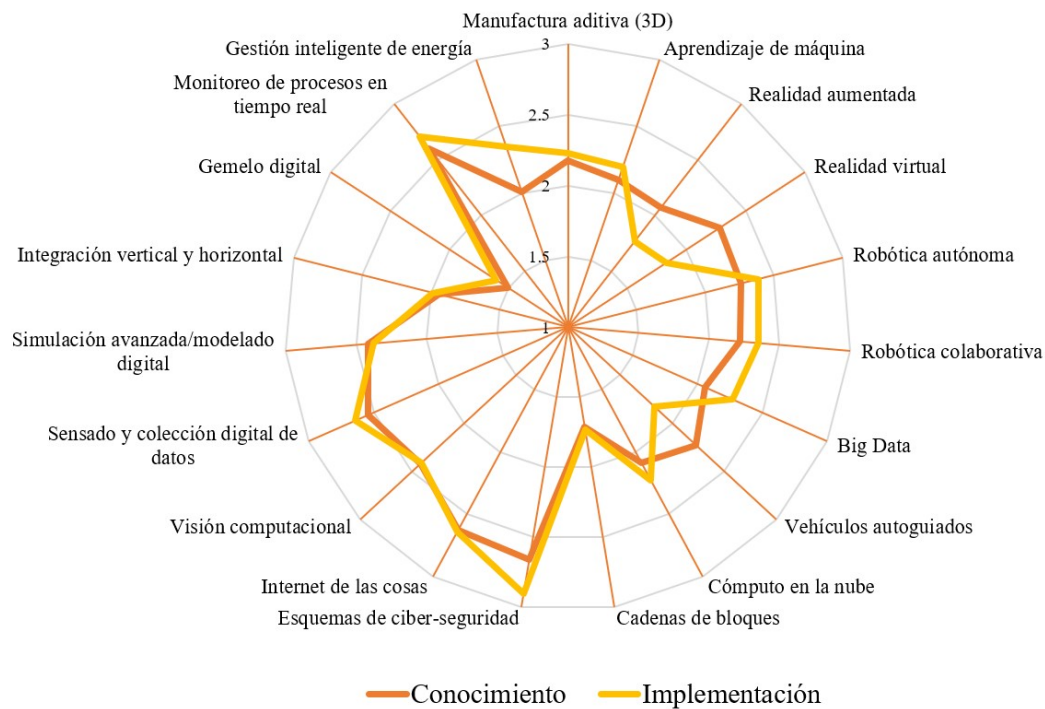
Los resultados muestran las tecnologías de la I4.0 en orden descendente de acuerdo al nivel de implementación reportado. Las tecnología sensado y colección digital de datos tiene un nivel medio de implementación. Machine learning, realidad aumentada, realidad virtual, robótica autónoma, robots/robótica colaborativa, big data, vehículos autoguiados, cloud computing, esquema de seguridad, internet de las cosas, computer vision, simulación/modelado digital, integración vertical y horizontal, monitoreo de procesos en tiempo real, gestión inteligente de energía, impresión aditiva tienen un nivel bajo de implementación. Blockchain y gemelo digital no se

implementan en las maquiladoras de Ciudad Juárez.

F.6. Nivel de conocimiento e implementación de la I4.0 por tecnología

La figura F.2 muestra el nivel de conocimiento de las tecnologías asociadas a la I4.0 que tienen los trabajadores y el nivel de implementación de tecnologías de la I4.0 que tienen las empresas maquiladoras.

Figura F.2: Nivel de conocimiento e implementación de la I4.0 por tecnología



Fuente: elaboración propia.

F.7. Nivel de conocimiento de la I4.0 por sector industrial

La tabla F.6 y la figura F.3 muestran el nivel de conocimiento de la I4.0 en las empresas por sector de acuerdo de la proporción de las mismas que tienen un

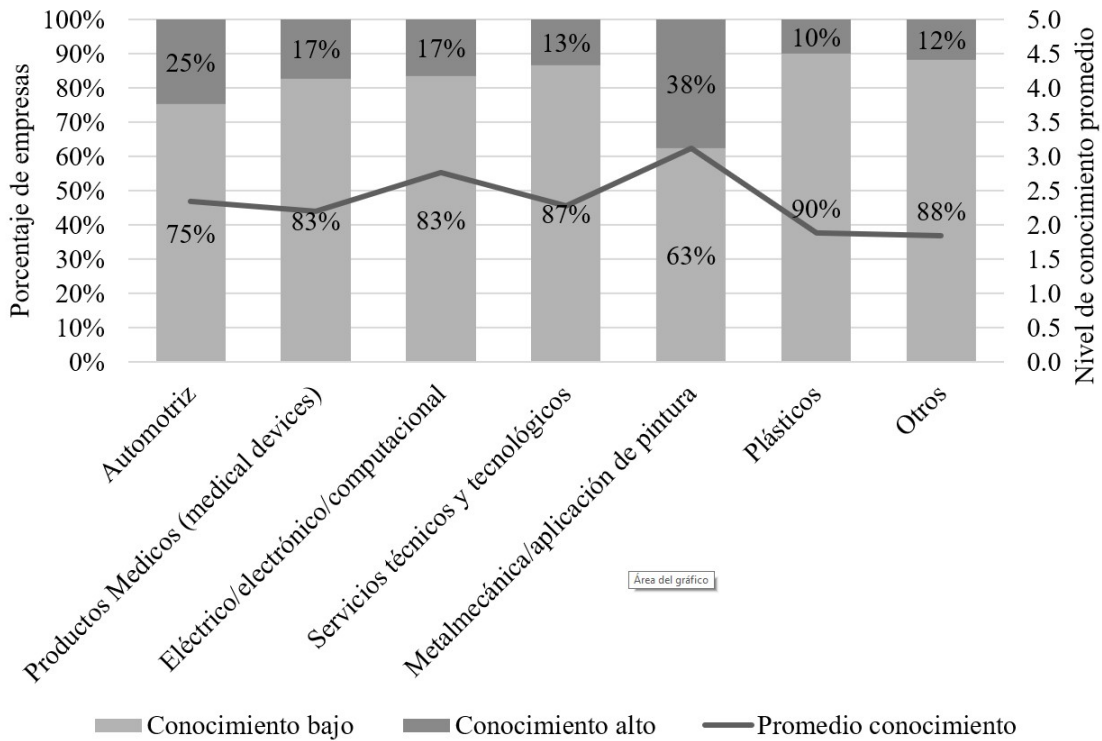
alto y bajo conocimiento. Se observa que que la mayoría de los sectores tienen un nivel bajo de conocimiento, siendo los trabajadores de *metalmecánica/aplicación de pintura y eléctrico/electrónico/computacional* los que tienden a atener en promedio el nivel más alto de conocimiento, mientras que los trabajadores de *plásticos y otros* tienden a tener el promedio más bajo de conocimiento de tecnologías de la I4.0. En relación a la proporción de empresas con alto conocimiento, son los sectores de *metalmecánica/aplicación de pintura* [38 %] y *automotriz* [25 %] los que tienen la mayor proporción de empresas con un nivel alto de conocimiento, y los sectores de *plásticos* [10 %] y *otros* [12 %] tienen la menor proporción de empresas con alto nivel de conocimiento de tecnologías de la I4.0.

Tabla F.6: Nivel de conocimiento de la I4.0 en las empresas

Sector	Promedio conocimiento	Conocimiento bajo	Conocimiento alto
Automotriz	2.4	75 %	25 %
Productos Medicos (medical devices)	2.2	83 %	17 %
Eléctrico/electrónico/computacional	2.8	83 %	17 %
Servicios técnicos y tecnológicos	2.3	87 %	13 %
Metalmecánica/aplicación de pintura	3.1	63 %	38 %
Plásticos	1.9	90 %	10 %
Otros	1.9	88 %	12 %

Fuente: elaboración propia con base en el trabajo de Carrillo *et al.* (2020).

Figura F.3: Nivel de conocimiento de la I4.0 en las empresas



Fuente: elaboración propia base en el trabajo de Carrillo *et al.* (2020).

F.8. Nivel de implementación de la I4.0 por sector industrial

La tabla F.7 y la figura F.4 muestran el nivel de implementación de tecnologías de la I4.0 en las empresas por sector de acuerdo de la proporción de las mismas que tienen un alto y bajo nivel de implementación. Se observa que que la mayoría de los sectores tienen un nivel bajo de implementación de tecnologías de la I4.0, siendo las empresas de los sectores de *eléctrico/electrónico/computacional* y *productos médicos* los que tienden a atener en promedio el nivel más alto de implementación, mientras

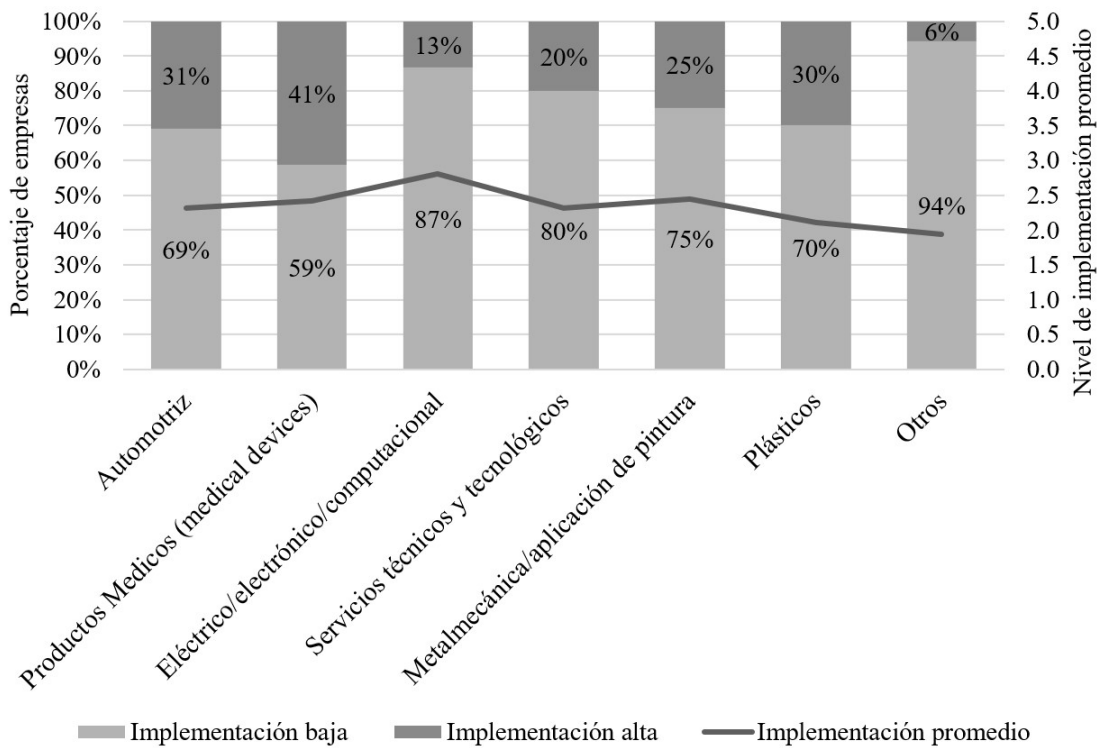
que las empresas de los sectores *plásticos* y *otros* tienden a tener el promedio más bajo de implementación de tecnologías de la I4.0. En relación a la proporción de empresas con alto nivel de implementación, son los sectores de *productos médicos* [41 %] y *automotriz* [31 %] los que tienen la mayor proporción de empresas con un nivel alto de implementación de tecnologías de la I4.0, y los sectores de *plásticos* [10 %] y *otros* [12 %], los que tienen la menor proporción de empresas con alto nivel de conocimiento de las tecnologías de la I4.0.

Tabla F.7: Nivel de implementación de la I4.0 en las empresas

Sector	Implementación promedio	Implementación baja	Implementación alta
Automotriz	2.3	69 %	31 %
Productos Medicos (medical devices)	2.4	59 %	41 %
Eléctrico/electrónico/computacional	2.8	87 %	13 %
Servicios técnicos y tecnológicos	2.3	80 %	20 %
Metalmecánica/aplicación de pintura	2.5	75 %	25 %
Plásticos	2.1	70 %	30 %
Otros	1.9	94 %	6 %

Fuente: elaboración propia con base en el trabajo de Carrillo *et al.* (2020).

Figura F.4: Nivel de implementación de la I4.0 en las empresas



Fuente: elaboración propia base en el trabajo de Carrillo *et al.* (2020).

F.9. Nivel de conocimiento de la I4.0 por tecnología y sector

La tabla F.8 muestra el promedio del conocimiento por tecnología y por sector, la última columna de la tabla muestra los totales de conocimiento por tecnología y la última fila muestra el total de conocimiento por sector. En relación a los sectores, destacan los de *metalmecánica/aplicación de pintura* y *automotriz* como los que tienen mayor nivel de conocimiento entre los trabajadores, mientras que *eléctrico/electrónico/computacional* y *plásticos* tienen los niveles más bajos de conocimiento de tecnologías de la I4.0 entre los trabajadores de las empresas. En cuanto a las

tecnologías tomadas en cuenta para el análisis, resaltan, *esquemas de seguridad*, *internet de las cosas*, *sensado digital de datos* y *simulación/modelado digital* como las tecnologías que más conocen los trabajadores. Asimismo, se hace notar que *blockchain* y *gemelo digital* son las tecnologías con el nivel más bajo de conocimiento entre los trabajadores de las empresas.

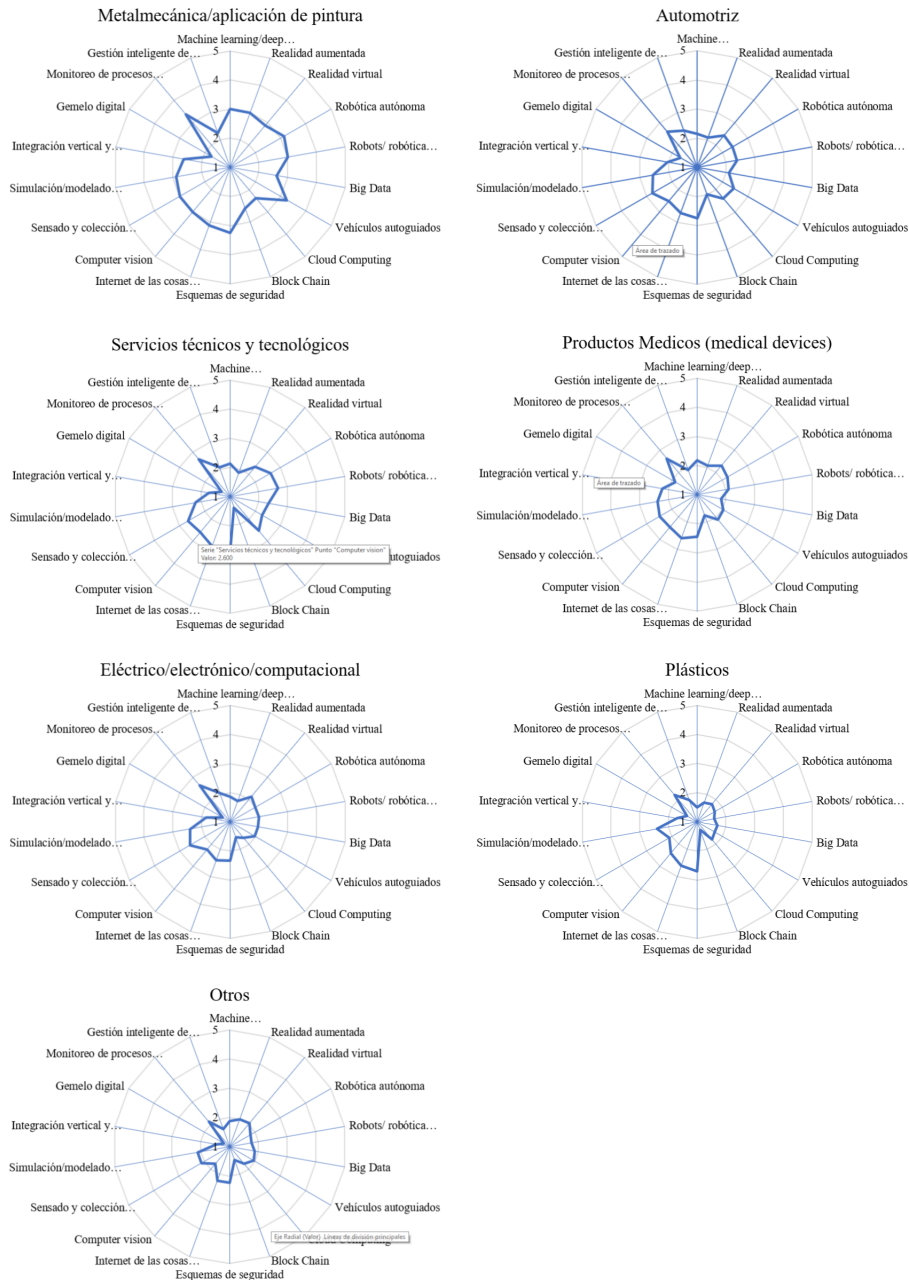
Tabla F.8: Promedio de conocimiento por tecnología y por sector

Tecnología	Automotriz	Productos Medicos	Eléctrico/ electrónico/ computacional	Servicios técnicos y tecnológicos	Metalmecánica/ aplicación de pintura	Plásticos	Otros	Total
Machine learning/deep learning	2.148	2.172	1.867	2.133	3.000	1.500	1.882	2.100
Realidad aumentada	2.086	2.069	1.767	1.867	3.000	1.700	2.000	2.070
Realidad virtual	2.432	2.310	2.133	2.333	2.875	1.800	2.059	2.277
Robótica autónoma	2.395	2.207	2.000	2.600	3.125	1.700	1.824	2.264
Robots/ robótica colaborativa	2.383	2.103	2.000	2.667	3.000	1.600	1.765	2.217
Big Data	2.099	1.828	1.967	2.333	2.625	1.700	1.882	2.062
Vehículos autoguiados	2.444	2.034	1.967	2.267	3.250	1.700	1.941	2.229
Cloud Computing	2.383	2.103	1.700	2.533	2.375	1.800	1.765	2.094
Block Chain	1.988	1.759	1.567	1.400	2.500	1.300	1.471	1.712
Esquemas de seguridad	2.753	2.448	2.333	2.867	3.250	2.700	2.235	2.655
Internet de las cosas (IoT)	2.667	2.586	2.400	2.800	3.125	2.600	2.235	2.630
Computer vision	2.519	2.448	2.233	2.600	3.000	2.400	1.765	2.424
Sensado y colección digital de datos	2.778	2.483	2.600	2.667	3.000	2.100	2.118	2.535
Simulación/modelado digital	2.543	2.379	2.400	2.200	2.875	2.400	2.118	2.416
Integración vertical y horizontal	2.037	2.207	1.833	1.733	2.625	1.700	1.471	1.944
Gemelo digital	1.667	1.862	1.300	1.333	1.750	1.400	1.235	1.507
Monitoreo de procesos en tiempo real	2.605	2.621	2.633	2.667	3.375	2.200	2.118	2.603
Gestión inteligente de energía	2.333	1.897	2.067	2.067	2.250	1.800	1.647	2.009
Total	2.348	2.195	2.043	2.282	2.833	1.894	1.863	2.208

Fuente: elaboración propia con base en el trabajo de Carrillo *et al.* (2020).

La figura F.5 muestra las gráficas radiales del conocimiento de los trabajadores por sector. Las gráficas aparecen en orden descendente según el nivel de conocimiento de la I4.0 que tienen los trabajadores. Es destacable que *monitoreo de procesos en tiempo real* y *esquemas de seguridad*, tienden a tener un nivel de conocimiento alto a través de los sectores en relación con el nivel de conocimiento de las otras tecnologías de la I4.0. Asimismo, *blockchain* tiene un nivel de conocimiento bajo a través de los sectores de la maquiladora.

Figura F.5: Gráficas radiales del conocimiento de la industria 4.0 por tecnología y sector



Fuente: elaboración propia.

F.10. Nivel de implementación de la I4.0 por tecnología y sector

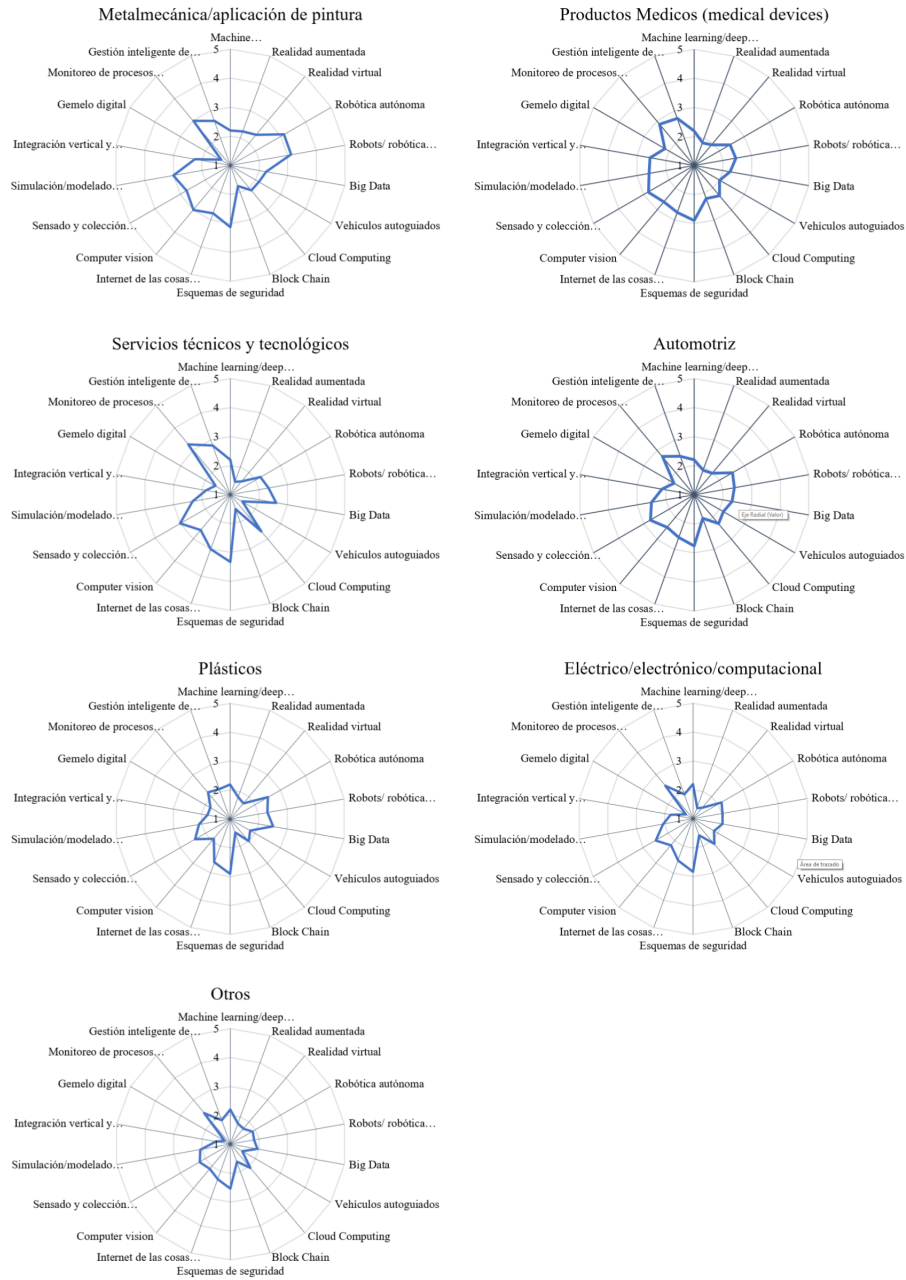
La tabla F.9 muestra el promedio de implementación de la I4.0 tecnología y por sector, la última columna de la tabla muestra los totales de implementación por tecnología y la última fila muestra el total de implementación por sector. En cuanto a las tecnologías tomadas en cuenta para el análisis, destacan *esquemas de seguridad*, *monitoreo de procesos en tiempo real*, *internet de las cosas* y *sensado/colección digital de datos* como las tecnologías que tienen el nivel más alto de implementación dentro de las empresas. En relación a los sectores, son los de *productos médicos* y *metal-mecánica/aplicación de pintura* los que tienen un nivel mayor de implementación de tecnologías de la I4.0, mientras que los sectores *eléctrico/electrónico/computacional* y *plásticos* son los que tienen el nivel más bajo de implementación de tecnologías de la I4.0 a través de las empresas.

Tabla F.9: Promedio de implementación por tecnología y por sector

Tecnología	Automotriz	Productos Médicos	Eléctrico/ electrónico/ computacional	Servicios técnicos y tecnológicos	Metalmecánica/ aplicación de pintura	Plásticos	Otros	Total
Machine learning/deep learning	2.198	2.198	2.198	2.198	2.198	2.198	2.198	2.198
Realidad aumentada	1.901	1.828	1.400	1.467	2.250	1.800	1.765	1.773
Realidad virtual	1.963	1.931	1.500	1.600	2.375	1.700	1.706	1.825
Robótica autónoma	2.506	2.414	2.133	2.200	3.125	2.500	1.882	2.394
Robots/ robótica colaborativa	2.395	2.448	2.033	2.333	3.125	2.300	1.824	2.351
Big Data	2.309	2.241	2.033	2.600	2.250	2.500	1.941	2.268
Vehículos autoguiados	2.148	2.000	1.833	1.467	2.125	1.800	1.471	1.835
Cloud Computing	2.296	2.345	2.133	2.667	2.125	2.000	2.059	2.232
Block Chain	1.864	2.207	1.600	1.533	1.750	1.500	1.647	1.729
Esquemas de seguridad	2.765	2.897	2.833	3.333	3.125	2.900	2.529	2.912
Internet de las cosas (IoT)	2.568	2.724	2.533	3.000	2.750	2.600	2.294	2.638
Computer vision	2.457	2.621	2.200	2.600	3.000	1.900	2.118	2.414
Sensado y colección digital de datos	2.741	2.828	2.500	3.000	2.750	2.400	2.235	2.636
Simulación/modelado digital	2.506	2.586	2.067	2.333	3.000	2.100	2.059	2.379
Integración vertical y horizontal	2.136	2.552	1.800	1.867	2.250	1.800	1.529	1.991
Gemelo digital	1.802	2.172	1.300	1.600	1.375	1.800	1.235	1.612
Monitoreo de procesos en tiempo real	2.716	2.862	2.500	3.267	3.000	2.200	2.412	2.708
Gestión inteligente de energía	2.407	2.724	1.900	2.800	2.625	2.100	1.882	2.348
Total	2.315	2.421	2.028	2.326	2.511	2.117	1.933	2.236

Fuente: elaboración propia con base en el trabajo de Carrillo *et al.* (2020).

Figura F.6: Gráficas radiales de la implementación de la industria 4.0 por tecnología y sector



Fuente: elaboración propia.

La figura F.6 muestra las gráficas radiales de la implementación de tecnologías de la I4.0 que tienen las empresas por sector. Las gráficas aparecen en orden descendente según el nivel de implementación de tecnologías de I4.0 que tienen las empresas. Es destacable *gemelo digital* y *blockchain* tienden a tener el nivel más bajo de implementación a través de los sectores, por otro lado, *monitoreo de procesos en tiempo real*, *esquemas de seguridad*, *sensado/colección de datos en tiempo real* y *robótica autónoma* tienden a tener altos niveles de implementación en las empresas a través de los sectores.

Apéndice G

Clasificación de tecnologías de acuerdo a los niveles de complejidad para el usuario y novedad industrial

La tabla G.1 muestra la clasificación de 19 tecnologías asociadas a la I4.0. De acuerdo con AXIS (2019), las tecnologías intangibles tienden a ser de naturaleza digital y se apoyan de interfaces visuales, mientras que las tecnologías tangibles son aquellas basadas en maquinaria y/o robots. En relación con el nivel de complejidad de las tecnologías, se considera que las empresas tienden a implementar primero las de baja complejidad, dejando para etapas posteriores las tecnologías más complejas y recientes.

Tabla G.1: Clasificación de tecnologías de acuerdo al tipo de tecnología, el nivel de complejidad para el usuario y el nivel de novedad industrial

Tecnología	Tipo de tecnología		Nivel de complejidad para el usuario			Nivel de novedad industrial		
	Tangible	Intangible	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto
Impresión aditiva (3D)	*		*			*		
Machine learning/deep learning		*			*			*
Realidad aumentada		*		*			*	
Realidad virtual		*		*		*		
Robótica autónoma	*			*			*	
Robots/ robótica colaborativa	*			*			*	
Big Data		*			*		*	
Vehículos autoguiados	*		*			*		
Cloud Computing		*	*				*	
Block Chain		*			*			*
Esquemas de seguridad		*		*			*	
Internet de las cosas (IoT)		*	*				*	
Computer vision	*				*		*	
Sensado y colección digital de datos	*		*			*		
Simulación/modelado digital		*	*			*		
Integración vertical y horizontal		*		*			*	
Gemelo digital		*			*			*
Monitoreo de procesos en tiempo real	*			*		*		
Gestión inteligente de energía		*		*			*	

Fuente: elaboración propia con base en (AXIS, 2019, p. 55).

Además, AXIS destaca que existe una relación positiva entre el nivel de complejidad de las tecnologías y su nivel de novedad industrial, siendo las tecnologías más recientes las que tienden a ser las más complejas para el usuario.