

<https://doi.org/10.23913/ride.v16i31.2493>

*Artículos científicos*

## **Metodología y herramientas para apoyar la introducción de la Industria 4.0 en el contexto de la industria automotriz mexicana del sector manufacturero**

*Methodology and tools to support the introduction of Industry 4.0 with the context of the Mexican automotive industry of the manufacturing sector*

*Metodologia e ferramentas para apoiar a introdução da Indústria 4.0 no contexto da indústria automobilística mexicana*

**Lorenzo L. González Romeo\***

Instituto Politécnico Nacional, México

[lgonzalezr2100@alumno.ipn.mx](mailto:lgonzalezr2100@alumno.ipn.mx)

<https://orcid.org/0000-0001-7434-9203>

**Juan Bory Reyes**

Instituto Politécnico Nacional, México

[jboryr@ipn.mx](mailto:jboryr@ipn.mx)

<https://orcid.org/0000-0002-7004-1794>

**Jorge Rojas Ramírez**

Instituto Politécnico Nacional, México

[jrojasr@ipn.mx](mailto:jrojasr@ipn.mx)

<https://orcid.org/0000-0002-0779-1242>

\*Autor para correspondencia

### **Resumen**

La Industria 4.0 (en adelante I4.0) requiere de un alto nivel de dominio de lo que representa como paradigma, así como de cada una de las tecnologías que la componen con el fin de garantizar su pleno aprovechamiento y así promover una mayor automatización, personalización y flexibilidad en la producción, una fuerza laboral mejor capacitada y nuevos modelos de negocios, entre otras potencialidades. Respecto a los sistemas productivos mexicanos, la industria automotriz constituye un pilar fundamental, aunque la transición



hacia I4.0 en las empresas de dicho sector manufacturero aún es insuficiente. Por ello, este trabajo analiza el contexto que justifica la introducción de estas tecnologías en México y se propone una metodología para orientar y facilitar la transición a I4.0. El principal resultado es una metodología que promueve la introducción de I4.0 en la industria automotriz mexicana, detallando sus etapas y herramientas.

**Palabras clave:** Industria 4.0, Cuarta Revolución Industrial, Industria manufacturera automotriz mexicana, Sistemas ciberfísicos

### **Abstract**

Industry 4.0 (hereafter referred to as I4.0) requires a high level of mastery of what it represents as a paradigm, as well as of each of the involved technologies to ensure its full implementation and thus foster greater automation, customization, and flexibility in production, a more prepared workforce, and new business models, among other potentialities. In the context of Mexican production systems, the automotive industry is a fundamental support. However, the transition to I4.0 in this manufacturing sector remains limited. This study examines the need to introduce these technologies in Mexico, and a methodology is proposed to guide and facilitate the transition to I4.0. The main outcome is a structured methodology aimed at promoting the adoption of I4.0 in the Mexican automotive industry, detailing its stages and tools.

**Keywords:** Industry 4.0, Fourth Industrial Revolution, Mexican automotive manufacturing industry, Cyber-physical systems.

### **Resumo**

A Indústria 4.0 (doravante I4.0) exige um alto nível de domínio de seu paradigma, bem como de cada uma de suas tecnologias componentes, a fim de garantir sua plena utilização e, assim, promover maior automação, personalização e flexibilidade na produção, uma força de trabalho mais bem treinada e novos modelos de negócios, entre outras oportunidades potenciais. Em relação aos sistemas de produção mexicanos, a indústria automotiva é um pilar fundamental, embora a transição para a I4.0 nas empresas desse setor manufactureiro ainda seja insuficiente. Portanto, este artigo analisa o contexto que justifica a introdução dessas tecnologias no México e propõe uma metodologia para orientar e facilitar a transição

para a I4.0. O principal resultado é uma metodologia que promove a introdução da I4.0 na indústria automotiva mexicana, detalhando suas etapas e ferramentas.

**Palabras-clave:** Indústria 4.0, Quarta Revolução Industrial, Indústria automotiva mexicana, Sistemas ciberfísicos.

**Fecha Recepción:** Enero 2025

**Fecha Aceptación:** Junio 2025

---

## Introducción

Desde que en 2011 se presentó la propuesta “Industria 4.0” como una nueva revolución industrial durante la Feria de Hannover (Kagermann, *et al.*, 2011), el evento despertó un enorme interés en la comunidad científica internacional, el cual creció rápidamente y se extendió a diferentes sectores de la sociedad. Esta presentación fue complementada formalmente en 2013 por el Grupo de Trabajo Industria 4.0, establecido por la Academia Nacional de Ciencias e Ingeniería de Alemania, y patrocinado por el Ministerio Federal de Educación e Investigación de ese país, con el lanzamiento de la hoja de ruta de la Plataforma Industria 4.0. Este fue el primer documento en su tipo que describió las pautas para la implementación de I4.0 en Alemania (Kagermann, *et al.*, 2013). La estrategia estuvo dirigida principalmente a la fabricación inteligente utilizando Sistemas Ciberfísicos (CPS), con el objetivo de descentralizar la producción, y así lograr una mayor personalización y participación de los usuarios (Zhou, *et al.*, 2015).

La transformación de los sistemas de producción tradicionales en CPS implica la integración de una parte física y una interfaz que conecta el sistema a la red a través de tecnologías de internet, desde donde se reciben datos y a la que se pueden enviar instrucciones de control. Los CPS desempeñan un papel importante en el desarrollo de las denominadas fábricas inteligentes (Rajkumar, *et al.*, 2010; Jazdi, 2014; Seok-Kang, *et al.*, 2016). La introducción de los CPS en fábrica mejora la flexibilidad de la producción, reduce los tiempos de entrega e integra a los consumidores en el producto final, gracias a la retroalimentación proporcionada por múltiples plataformas digitales, facilitando una personalización masiva de la producción (Lu, 2017).

Del mismo modo, el cambio propuesto en materia de organización del trabajo, modelos de negocio y tecnologías de producción brindará un gran número de oportunidades económicas y sociales, como la creación de nuevos empleos mejor remunerados, vinculados a estas tecnologías, como el *Cloud Computing*, la Inteligencia Artificial, el Análisis de *Big Data* o los Gemelos Digitales (Pereira y Romero, 2017). Dominar este grupo de tecnologías

avanzadas requiere de una mayor preparación y formación, tanto para los estudiantes que aspiran a trabajar con estas tecnologías y ser más competitivos, como para los empleados que pretenden acceder a nuevos empleos más complejos y mejor remunerados, y para los empresarios que buscan actualizar sus conocimientos, modelos de negocio y aumentar los parámetros de producción.

Desde el surgimiento de I4.0, diversos gobiernos han patrocinado iniciativas y programas para fomentar su implementación, destacando Alemania como pionero en esta estrategia. Los países más desarrollados comenzaron a seguir la iniciativa tomada por el gobierno alemán, lanzando sus hojas de ruta e impulsando medidas que impulsaran una rápida transición hacia la I4.0, teniendo en cuenta las características de los sectores productivos y empresariales de cada una de estas naciones. Ejemplos de estos planes son Made in China 2025, Sociedad 5.0 en Japón, Asociación de Fabricación Avanzada en Estados Unidos, Industria Conectada 4.0 en España, entre muchos otros (Liao, *et al.*, 2017; Aceto, *et al.*, 2019; Majstorovic y Mitrovic, 2019; Yang y Gu, 2021). Sin embargo, las economías emergentes enfrentan varios desafíos que han impedido una transición más rápida hacia la I4.0. Estos incluyen la falta de recursos económicos, infraestructura tecnológica, capacitación laboral y acceso limitado de los ciudadanos a las tecnologías informáticas y de comunicaciones (CCT). México, al igual que otras naciones en desarrollo, enfrenta estos desafíos. A pesar de haber sido pionero en la publicación de una de las primeras hojas de ruta para I4.0 en América Latina (SE, 2016), inició varios programas gubernamentales e instituciones destinados a promover el desarrollo y la innovación. Hasta el momento, varias empresas nacionales han tomado iniciativas y desarrollado tecnologías para digitalizar e interconectar sus sistemas productivos, y aún existe un rezago importante en los aspectos antes mencionados, por lo que se necesitan más acciones para potenciar la implementación y uso eficiente de tecnologías de la I4.0.

En cuanto al desarrollo industrial en México, la industria automotriz es parte fundamental del sector manufacturero y de la economía nacional en general, no sólo por los ingresos que genera y los volúmenes de producción sino también por la cantidad de empleos que genera anualmente (Nava Aguirre, *et al.*, 2019). Este sector industrial se divide en cuatro categorías según su producto final: vehículos ligeros, autopartes, autobuses, camiones y tractocamiones, así como distribuidores. A su vez, el sector de autopartes se clasifica en las Fabricantes de Equipos Originales (por sus siglas en inglés, OEM), proveedores de primer nivel (Tier 1), de segundo nivel (Tier 2) y de tercer nivel (Tier 3) (Nava Aguirre, *et al.*, 2019).

En datos publicados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía en 2014, la industria automotriz mexicana ocupó el segundo lugar en Producto Interno Bruto (PIB) manufacturero después de la industria alimentaria, con una participación del 16.9 %. Actualmente, según datos recopilados por la Asociación Mexicana de la Industria Automotriz, la industria automotriz ocupa el primer lugar en cuanto a ingreso de divisas, con un superávit de US\$85 MM; ocupa el primer lugar en comparación con el resto de industrias automotrices en América Latina, ocupa el séptimo lugar a nivel mundial; ocupa el cuarto lugar en exportaciones de vehículos ligeros y ocupa el quinto en exportaciones de autopartes, generando un total de 930 758 empleos ese año (Asociación Mexicana de la Industria Automotriz, 2021).

Respecto a la transformación de este sector hacia la Cuarta Revolución Industrial, encuestas realizadas entre investigadores, trabajadores, directivos y expertos del sector industrial y académico muestran que un gran número de empresas aún desconocen la disponibilidad y diversidad de las tecnologías I4.0 que pueden apoyar sus procesos de producción. Como principal causa señalan la falta de información sobre el tema, así como la escasez de financiamiento. Además, mencionan la falta de desarrollo del capital humano como una limitación debido a la insuficiencia tecnológica (Nava Aguirre, *et al.*, 2019). Por lo tanto, esto conduce al desarrollo de una metodología que sirva de guía a las empresas mexicanas en términos de conocimiento y adopción de I4.0 para impulsar una modernización acelerada de la industria automotriz mexicana.

A pesar de dichos inconvenientes, existen múltiples casos de éxitos en cuanto a la introducción de I4.0 en la industria automotriz mexicana, entre los que destacan una de las herramientas más recurrentes con que cuentan las empresas del sector para potenciar su constante desarrollo y evolución, además del apoyo de los Centros de Innovación, es la asociación en Clústers Automotrices. Este tipo de alianzas facilitan el conocimiento e implementación de tecnologías avanzadas en los procesos y operaciones de las industrias, contribuyendo a la modernización de un mayor número de compañías nacionales (Nava Aguirre, *et al.*, 2019). Un ejemplo tangible de los logros alcanzados por estos clústers es el caso de la empresa Metalsa, un fabricante de chasis Tier 1, que ha conseguido un mayor control en la implementación de estrategias de automatización mediante la planeación y ejecución de estas, y entre los múltiples lauros que ostenta la empresa, se encuentra el reconocimiento en la categoría *Industria 4.0* otorgado en 2021 por el Clúster Automotriz de Nuevo León (CLAUT) (Leyva, *et al.*, 2020).

Por ello, el desarrollo de una metodología para la adopción de I4.0 en empresas del sector automotriz, trae consigo un mejor funcionamiento de sus componentes e interrelaciones. Además, la metodología propuesta puede facilitar la transición hacia I4.0, sirviendo como guía y autoevaluación respecto de la implementación de I4.0, tanto para grandes como para Pequeñas y Medianas Empresas (PYMEs) de la industria automotriz en México, donde el proceso de implementación de I4.0 es aún incipiente o inexistente. En la siguiente sección se profundiza en los conceptos y herramientas fundamentales de I4.0, mientras que en la Sección 3 se describe la metodología propuesta y sus aplicaciones.

### **Revisión de la literatura**

Para llevar a cabo una investigación de manera rigurosa, ya sea en el ámbito periodístico, el académico o en cualquier otra disciplina, es fundamental realizar una revisión adecuada, metódica y sistemática de la literatura. Esta tarea requiere, además del esfuerzo, la dedicación y la curiosidad del investigador.

Para realizar la revisión de literatura de este trabajo se empleó el método RACEER (Hurtado de Barrera, 2000). Éste consta de seis fases: (1) recopilación de la información, (2) almacenamiento en unidades informativas, (3) categorización de las fichas, (4) elaboración del esquema conceptual, (5) enlace de las unidades informativas y (6) redacción. En conjunto, estas fases resultan de gran utilidad para la redacción del marco teórico, ya que permiten al investigador centrarse en la pregunta de investigación, organizar de manera lógica la información recopilada, identificar ideas redundantes y detectar las principales áreas de oportunidad en su campo de estudio (Hurtado de Barrera, 2000).

De acuerdo con la fase exploratoria, se formularon diversas preguntas que motivan este trabajo de tesis, las cuales sirvieron como base para la recopilación de información. La búsqueda bibliográfica se llevó a cabo mediante el acceso remoto proporcionado por el Consorcio Nacional de Recursos de Información Científica y Tecnológica (CONRICyT) y la Biblioteca Digital del Instituto Politécnico Nacional (IPN), utilizando bases de datos como Scopus, ScienceDirect, Web of Science, IEEE, Taylor & Francis, Springer y Wiley, La búsqueda se centró en la temática de Industria 4.0, utilizando los siguientes términos clave en títulos y resúmenes: “Industria 4.0”, “Industry 4.0”, “Cuarta Revolución Industrial”, “Fourth Industrial Revolution”, “4ta Revolución Industrial”, “4th Industrial Revolution”, “Industry 4.0 implementation” y “Implementación Industria 4.0”.

Para organizar la información recopilada, se empleó un gestor bibliográfico que permitió clasificar los documentos por año de publicación y detectar duplicados. Posteriormente, mediante la aplicación de criterios de inclusión y exclusión definidos por el autor, la bibliografía final se delimitó a través de varias rondas de filtrado.

### **Industria 4.0**

Actualmente, se pueden encontrar innumerables trabajos en la literatura que abordan el tema de I4.0, con sus principales características (Gilchrist, 2016; Stock y Seliger, 2016), tecnologías que lo componen (Da-Xu, *et al.*, 2018; Phuyal, *et al.*, 2020), principios de diseño (Gilchrist, 2016), la normativa que acompaña su implementación (SCI 4.0, 2017; ISO, 2018), su impacto en temas sociales como la educación (Costa y Azevedo, 2021; López, *et al.*, 2021), la igualdad de género (Global Union, 2019; Chuang, *et al.*, 2021), así como la integración de esta revolución tecnológica en la vida económica de las naciones (Kucukaltan, *et al.*, 2022; Rahman, *et al.*, 2022). Esta sección abordará cuestiones inherentes a la implementación de I4.0, que se consideran cruciales para la metodología propuesta, que se detallarán en las siguientes subsecciones.

#### **Algunas herramientas para la implementación de la Industria 4.0**

Uno de los aspectos que destacan en la metodología presentada en este trabajo es el uso combinado de herramientas que potencian la implementación de I4.0 y la incorporación de mejoras a éstas. Se trata de los Modelos de Madurez y las Arquitecturas de Referencia, ambos se abordarán a continuación y posteriormente se detallarán las mejoras incorporadas, así como el uso combinado de estas.

Los modelos de madurez sirven como herramienta de diagnóstico para obtener una evaluación preliminar del grado de avance de una tendencia, tecnología o área de estudio específica. En Carreiro-Santos y Martinho (2020) se realiza una comparación de varios de los modelos de madurez antes mencionados, entre otros, y en base a sus fortalezas y áreas de oportunidad se propone un Nuevo Modelo de Madurez (NMM). Está compuesto por cinco dimensiones que evalúan, a través de cuestionarios, diversos aspectos de una empresa (mano de obra, fabricación inteligente o procesos inteligentes), y su conexión con la I4.0. Cada pregunta se evalúa en una escala de 0 a 5, donde 0 indica un nivel de implementación bajo o nulo, y 5 representa un referente en la aplicación de los conceptos y tecnologías de I4.0. Finalmente, permite, calculando el promedio de todas las evaluaciones dadas durante los



cuestionarios, tener una evaluación media final y estimar qué nivel de madurez tiene la empresa respecto a la implementación de I4.0 (Carreiro-Santos y Martinho, 2020).

Por otro lado, las arquitecturas de referencia son documentos que brindan las mejores prácticas, procedimientos, mecanismos y estandarización en un sector determinado. Yumi-Nakagawa, *et al.* (2021) presentan un estudio detallado sobre las principales arquitecturas de referencia para la implementación de I4.0. Se trata de la Arquitectura de Referencia del Internet Industrial (IIRA), una arquitectura independiente de dominio e impulsada por la industria que incluye manufactura, atención médica, energía, ciudades inteligentes y otros, desarrollada por el Consorcio de Internet Industrial (IIC) liderado por Estados Unidos (I. I. Consortium, 2019); el Modelo de Arquitectura de Referencia de la Industria 4.0 (RAMI 4.0), una arquitectura de dominio específico impulsada por el gobierno, desarrollada por la Asociación Alemana de Fabricantes Eléctricos y Electrónicos (ZVEI) (SCI 4.0, 2019); y la Arquitectura de Referencia de la Cadena de Valor Industrial (IVRA), una arquitectura conceptual desarrollada en Japón por la Iniciativa de la Cadena de Valor Industrial (Initiative, 2018).

Según su contenido, alcance y facilidad de aplicación, las arquitecturas de referencia se pueden clasificar en dos tipos. Abstracto (A), donde sus módulos pueden tener diferentes interpretaciones, lo que conduce a un amplio abanico de posibilidades de uso, y Detallado (D), en el que el proceso de comprensión de los mismos es más sencillo, lo que se traduce en una reducción del esfuerzo y tiempo para ser utilizados para su aplicación en la industria (Yumi-Nakagawa, *et al.*, 2021).

Cualquiera de las arquitecturas de referencia mencionadas podría utilizarse en la metodología propuesta, ya que fueron diseñadas para promover la transición hacia I4.0. Luego, recopilando la información publicada en Yumi-Nakagawa, *et al.* (2021), se establece una comparación entre ellos, para seleccionar el más completo considerando sus principales atributos. La comparación se muestra en la Tabla 1 y se puede concluir que, partiendo de ésta para su aplicación en la metodología propuesta, IIRA es la arquitectura de referencia más completa por la temática que incorpora y adecuada por su facilidad de comprensión y uso. Además, hay que sumar el hecho de que está clasificada como una arquitectura de referencia detallada, lo que ayuda a facilitar la comprensión y ejecución por parte del usuario.

**Tabla 1.** Comparación entre varias arquitecturas de referencia de la Industria 4.0.

Características	Arquitecturas de Referencia		
	IIRA	RAMI 4.0	IVRA
Persigue estandarización	X	X	X
Recibe actualizaciones regularmente	X	X	X
Incorpora los Gemelos Digitales	X	X	
Incorpora <i>Big Data</i> , <i>Machine Learning</i> , Minería de Datos	X		
Abstractas o Detalladas	D	A	A

Fuente: Yumi-Nakagawa, *et al.*, 2021

### Arquitectura de Referencia del Internet Industrial (IIRA)

Entre sus principales características, IIRA se compone de cuatro puntos de vista (Negocio, Uso, Funcional e Implementación), que buscan explorar todo lo relacionado con un sistema de Internet de las Cosas Industrial (IIoT), desde su concepción hasta su implementación, donde cada uno requieren la información e implementación del punto de vista anterior, mejorándose mutuamente a través de un proceso iterativo (I. I. Consortium, 2019). El Punto de Vista del Negocio persigue la identificación de los actores humanos fundamentales que forman parte, o de alguna manera intervienen, en el sistema donde se va a aplicar IIRA. También propone la definición de aspectos esenciales como visión, valores, objetivos principales, capacidades fundamentales y características clave, pretendiendo tener la visión más amplia posible del negocio. Posteriormente, en el Punto de Vista del Uso es donde se definirán textual y gráficamente las relaciones entre estas, tareas y actividades que detallan cómo interactúan entre sí y con agentes externos, teniendo en cuenta los diferentes escenarios o cambios en el entorno que podría experimentar el sistema.

El Punto de Vista Funcional tiene como propósito principal desarrollar las diversas funciones que debe realizar el sistema para soportar los usos, actividades, interacciones y roles identificados en los puntos de vista anteriores. Este punto de vista se compone de cuatro dominios (Negocio, Aplicación, Información y Operaciones), observados en la Figura 1. El Dominio Negocio reúne un conjunto de funciones administrativas específicas del negocio como Gestión de Relaciones con el Cliente, Planificación de Recursos Empresariales, Gestión del Ciclo de Vida del Producto, Sistema de Ejecución de Manufactura, entre otras funciones que un IIoT debe integrar para soportar sus operaciones. El Dominio Aplicación agrupa las funciones que aplican la lógica y reglas del negocio, en base a la información

proporcionada por el Dominio Información y los lineamientos desarrollados en el Dominio Negocio. Otro componente del dominio de aplicación son las interfaces de usuario para la interacción con los clientes. En el Dominio Información ocurre la recolección, transformación y análisis de datos de los demás dominios, para la adquisición de inteligencia del sistema completo y así optimizar las operaciones.

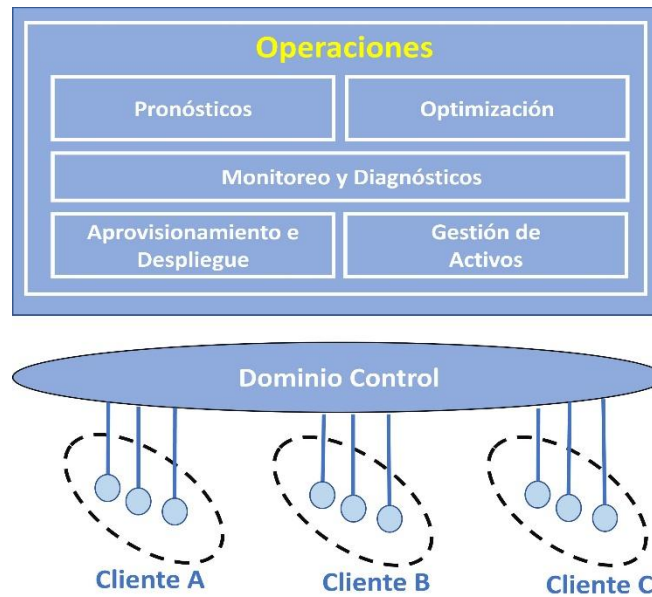
**Figura 1:** Funciones de los Dominios Negocio, Aplicación e Información.



Fuente: Adaptado de (I. I. Consortium, 2019).

En el Dominio Operaciones se desarrollan funciones que garantizan la continuidad de las operaciones de los activos presentes en el Dominio Control. Esto se realiza a través de la gestión y seguimiento remoto de los parámetros de producción, así como de la correcta configuración, actualizaciones periódicas, diagnóstico y mantenimiento preventivo de dichos activos, como se aprecia de manera esquemática en la Figura 2.

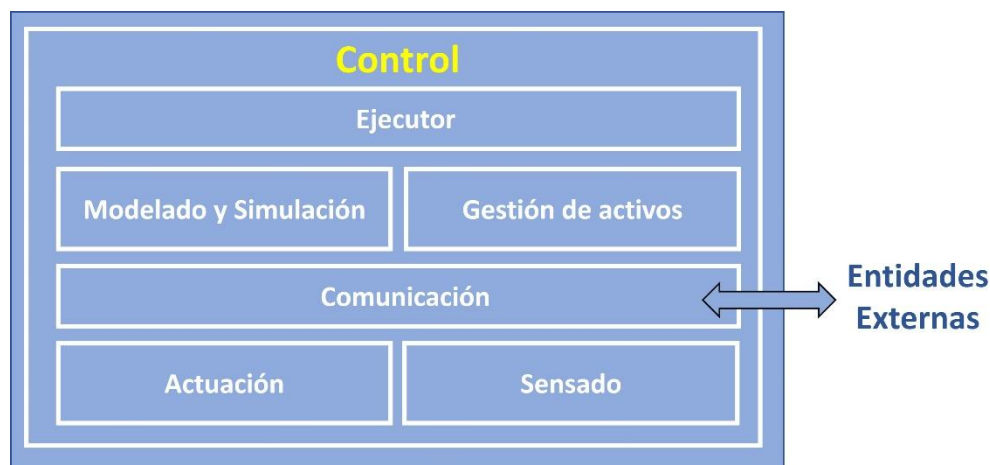
**Figura 2:** Funciones del Dominio Operaciones



Fuente: Adaptado de (I. I. Consortium, 2019).

Finalmente, en el Dominio Control, están los activos y actores comerciales que forman parte o están directamente involucrados en la producción o distribución del producto final, como maquinaria, sensores y robots que se pueden encontrar en la línea de producción y ensamblaje; supervisores, proveedores y otros trabajadores involucrados con la producción, por nombrar algunos ejemplos, ilustrados en la Figura 3. Estos activos y actores pueden operar de forma independiente o autónoma, interactuar con agentes externos y coordinarse a través de funciones diseñadas en los otros dominios. En este se implementan las funciones para el control de bucle cerrado del sistema automatizado, como la lectura de datos de los sensores, así como actuar para lograr los resultados deseados en el producto, siguiendo las reglas y lógica de negocio que provienen del Dominio Aplicación. Además, se realiza el Modelado y Simulación de futuros procesos, sistemas y productos a desarrollar en el negocio, para recopilar información y evaluar su viabilidad y posibles resultados.

**Figura 3:** Funciones del Dominio Control.

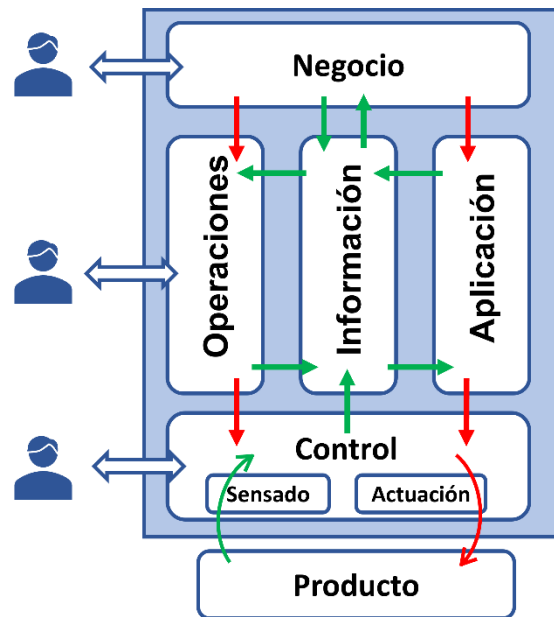


Fuente: Adaptado de (I. I. Consortium, 2019)

Luego de ser descritas las funciones que forman parte de cada dominio del Punto de Vista Funcional, el flujo de datos representado por flechas verdes, y de comandos de control, representado por flechas rojas, así como la intervención o la participación a lo largo del proceso productivo del usuario final, como parte del alto nivel de personalización que persigue la transición hacia I4.0 con el desarrollo de un sistema IIoT, se puede apreciar en la Figura 4. En esta se observa como el flujo de comandos de control en la organización va a emanar jerárquicamente, desde el Dominio Negocio, donde se toman las principales decisiones de la empresa, hacia el Dominio Control, donde se lleva a cabo la producción del producto final para el consumidor, no sin antes pasar dichos comandos por los dominios Operaciones y Aplicación; por otro lado, el flujo de información se realizará tanto vertical como horizontalmente, siendo procesado este gran volumen de datos en el Dominio Información.

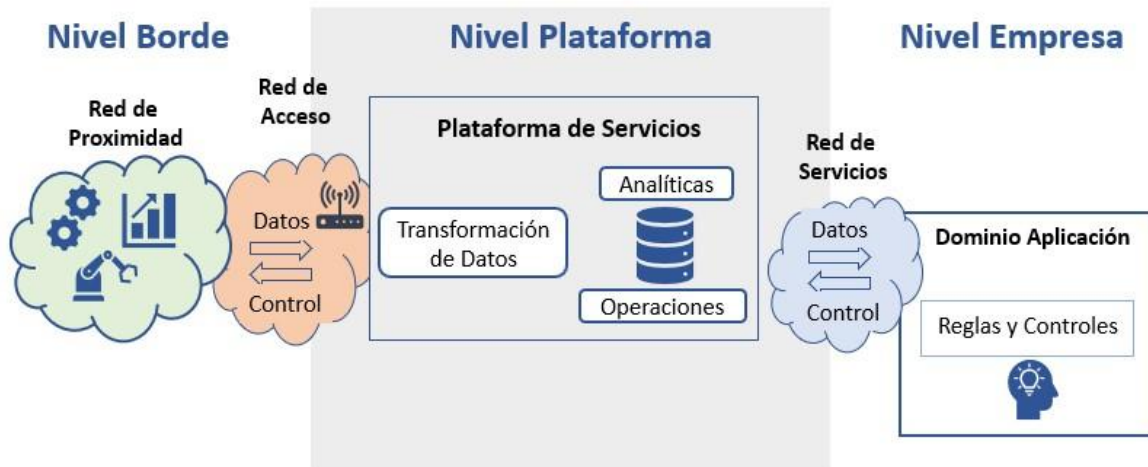
El Punto de Vista de Implementación tiene como objetivo llegar a una descripción general del nuevo sistema IIoT, donde se puedan reflejar y describir técnicamente todos los elementos, relaciones, actividades, funciones, interfaces y otros definidos en los puntos de vista anteriores (I. I. Consortium, 2019). Para esto, IIRA proporciona un patrón de arquitectura, que representa las características comunes, típicas y esenciales de sistemas IIoT implementados y, a su vez, brinda una visión simplificada de su implementación. Se trata del Patrón de Arquitectura de 3 Niveles (P.A.3.N), donde, como se aprecia en la Figura 5, en cada nivel se realizan funciones específicas de procesamiento y de control de los datos que intervienen en las actividades de la empresa.

**Figura 4:** Interacción entre los dominios funcionales



Fuente: Adaptado de (I. I. Consortium, 2019).

**Figura 5:** Patrón de Arquitectura de 3 Niveles (P.A.3.N).



Fuente: Adaptado de (I. I. Consortium, 2019)

En el patrón de arquitectura, los tres niveles mencionados son el nivel empresa, el nivel plataforma y el nivel borde. A Nivel Empresa se diseñan las reglas y dirección deseada del negocio, así como sistemas de soporte de decisiones e interfaces para los usuarios; además, los datos procesados se reciben en el nivel plataforma y son enviados como comandos de control. Como se mencionó, la función principal del Nivel Plataforma consiste en el procesamiento y el envío de datos y órdenes de control hacia y desde los niveles perimetrales (Borde y Empresa), así como la gestión de las operaciones de los activos

presentes en el Dominio Control. Finalmente, en el Nivel Borde, se ubican los elementos y los actores directamente relacionados con la producción y entrega del producto final.

Los tres niveles del P.A.3.N están conectados por redes, donde la Red de Proximidad acopla los sensores, actuadores, dispositivos, sistemas de control y activos del Nivel Borde, mientras que la Red de Acceso establece conectividad para garantizar flujos de datos y comandos de control entre los niveles borde y plataforma. Finalmente, la Red de Servicios, como su nombre lo indica, proporciona la conexión entre los servicios del Nivel Plataforma y los del Nivel Empresa, así como los servicios dentro de cada uno de estos niveles, y a su vez garantiza el flujo de datos y comandos de control entre éstos.

### **Industria 4.0 y Complejidad**

Como se ha mencionado anteriormente, la innovación constante, el fomento de la competitividad entre empresas y la capacidad de adaptación y flexibilidad para aplicar nuevas tecnologías son aspectos esenciales para garantizar una implementación sostenible de I4.0. Además de la reducción de costos y tiempos de fabricación, así como el aumento de la productividad, la implementación de I4.0 también conlleva un incremento en la complejidad de los sistemas productivos. Esto se debe al mayor volumen de datos y su procesamiento, la incorporación de nuevas tecnologías y otros factores que pueden representar un desafío para los fabricantes (Akundi y Lopez, 2021).

La transición a I4.0 mediante la adopción de nuevas tecnologías ya implica un aumento de la complejidad del sistema, pero hay que tener cuidado de que ese aumento no sea tan elevado que acabe siendo contraproducente para la empresa, es decir, que en lugar de mejorar los Indicadores Clave de Desempeño, asegurando la rentabilidad y competitividad de la empresa frente a la volatilidad del mercado y la variedad de productos, por falta de preparación de la fuerza laboral o de infraestructura, terminan perjudicando dichos cambios. Por ello, es fundamental cuantificar y supervisar el nivel de complejidad de los sistemas de producción antes, durante y después de la transición a I4.0 (Alkan, *et al.*, 2018).

Existen diversas metodologías para analizar la complejidad de los sistemas productivos. Un compendio y una explicación detallada de estas metodologías, junto con sus áreas de aplicación, se encuentra en Efthymiou, *et al.* (2016). Dentro de este amplio grupo de metodologías, hay varias en las que ya se ha puesto el foco en los últimos tiempos, para ser utilizadas en la cuantificación de la complejidad de los sistemas con la implementación de I4.0. Destacan entonces los métodos basados en la entropía de Shannon (Martínez-Olvera

2020a, Martínez-Olvera 2020b). Este método se basa en la medición de entropía en sistemas de comunicación (Shannon, 1948), donde la fuente de información, el mensaje, el transmisor, la señal, la fuente de ruido, el receptor y el destino estarán presentes como elementos fundamentales. En concreto, con este cálculo de entropía buscamos cuantificar la probabilidad de que un mensaje y su contenido sean recibidos con éxito por el destinatario deseado, cuando se conoce el mensaje. En el contexto de I4.0, esta idea se puede trasladar a cuantificar la probabilidad de que datos e instrucciones se reciban con éxito entre cada uno de los niveles del sistema productivo o cadenas de suministro, tanto en sentido horizontal como vertical.

Uno de los principales resultados obtenidos con el desarrollo de metodologías de medición de la complejidad en sistemas I4.0, basadas en la entropía de Shannon, es la propuesta de una herramienta para evaluar la disponibilidad del flujo de información en I4.0. En Martínez-Olvera (2020a) se presenta una métrica que cubre tanto la complejidad inducida por la variedad de personalización como la debida al paradigma I4.0, obteniendo un estimador que indica con precisión el aumento/disminución en el rendimiento del sistema, y que puede usarse para evaluar el grado de complejidad de un programa de producción.

El desarrollo reciente del cálculo fraccionario, área del cálculo matemático que generaliza las operaciones de diferenciación e integración a órdenes no enteros, ha permitido la introducción de medidas fraccionarias de la entropía de Shannon. Estas incluyen uno o dos parámetros fraccionarios que permiten cuantificar ciertas características del sistema. Para más detalles, véase Ramírez-Arellano, *et al.* (2021) y Lopes y Machado (2020). El análisis de vectores (Mourtzis, *et al.*, 2018); el marco de Gestión de la Complejidad Estratégica (SCM) (Freund, *et al.*, 2021a,b); y los Modelos Basados en Ingeniería de Sistemas (MBSE) (Akundi y Lopez, 2021), dan como resultado otros métodos para cuantificar la complejidad, que podrían tenerse en cuenta en el contexto de la implementación de I4.0.

## Metodología propuesta

El principal objetivo de este trabajo es proponer una metodología que guíe y facilite la transición a I4.0 en las empresas mexicanas del sector automotriz. Por lo tanto, la metodología propuesta está dirigida a empresas mexicanas de ese sector que desean realizar la transición de sus sistemas productivos hacia I4.0, pero que, debido a la falta de conocimiento, infraestructura u otros factores, aún no han tomado acciones para lograrlo. También podrá ser utilizado en empresas mexicanas del mismo rubro, pero que apenas inician

acciones piloto para llevar a cabo la transición a I4.0. La metodología propuesta consta de siete pasos e incluye un mecanismo de autoevaluación en el último de ellos. Al finalizar el paso siete, la empresa podrá verificar si la implementación ha sido exitosa y si está avanzando en la transición a I4.0. En caso contrario, será necesario reiniciar desde el paso uno y realizar las correcciones pertinentes. Esta metodología estará compuesta por dos herramientas fundamentales comentadas anteriormente, como son el NMM (Carreiro-Santos y Martinho, 2020) y el IIRA (I. I. Consortium, 2019).

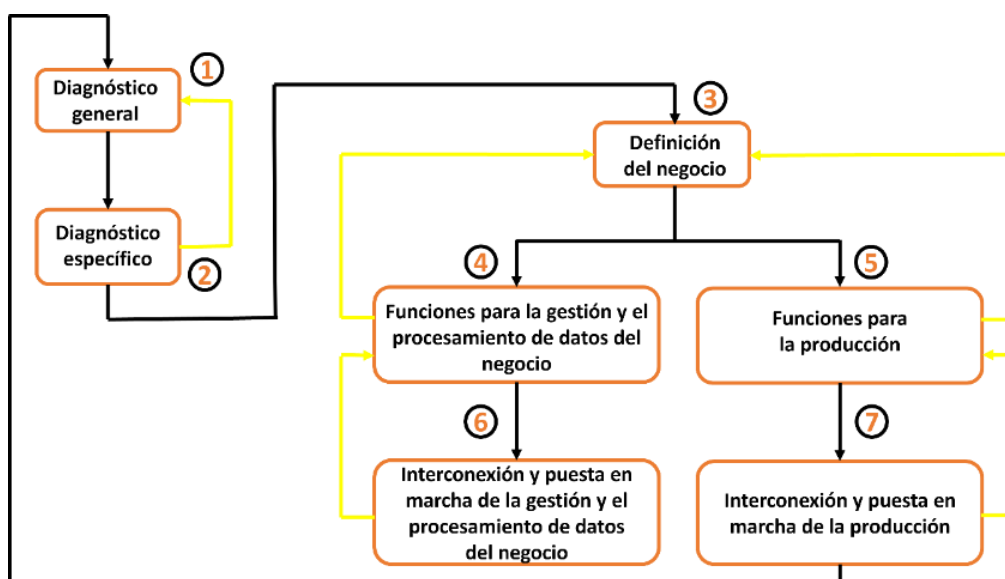
El NMM se utilizará para evaluar el nivel de implementación de I4.0 en empresas de la industria automotriz mexicana mediante un cuestionario estructurado por dimensiones. Este incluirá preguntas sobre experiencias en el sector a nivel nacional, aspectos de sustentabilidad y el grado de complejidad de los procesos productivos, como se detalla en el Apéndice A, para reforzar y complementar el alcance de la evaluación. Entre las mejoras incorporadas al NMM en la metodología propuesta se encuentra la asignación de valores más precisos a los niveles de evaluación en los cuestionarios. En lugar de emplear una escala numérica del 0 al 5, se propuso el uso de ponderaciones basadas en la escala triádica, siguiendo una progresión geométrica, es decir, un Leve (L): 20, Moderado (M): 21, o Grave (G): ponderación 22 (Portocarrero-Quispe, 2017); por lo tanto, en este caso, los niveles 0 y 1 de la evaluación NMM tendrán una ponderación M, el nivel 2 tendrá una ponderación G y los niveles 3, 4 y 5 tendrán una ponderación L. Esto nos permitirá apreciar la mayor relevancia de pasar del Nivel 0 al Nivel 2 (de la nula implementación de I4.0 a ya estar en camino y recibir un retorno económico), que del Nivel 3 al 5 (de tener una implementación avanzada de I4.0, para convertirse en un referente), por poner un ejemplo. En cuanto a la elección de la media utilizada para calcular la evaluación final de la empresa, una vez completado el segundo paso de la metodología, se permitirá seleccionar la opción más adecuada según el caso. Existen diversas medias en la literatura, como la aritmética (originalmente empleada), la geométrica y la armónica, entre otras (Paz, 2007), cuya aplicación dependerá de la situación específica para obtener un resultado más preciso.

Como parte de los aspectos mejorados realizados al NMM e incorporados en este trabajo, además de los aspectos evaluativos en cuanto a indicadores de sostenibilidad que se pueden ver en el Apéndice A, también se encuentra la evaluación de la complejidad de los procesos productivos. Para ello, en este trabajo se deja a elección del usuario la posibilidad de utilizar cualquiera de las herramientas de cuantificación de complejidad basadas en el cálculo de la entropía de Shannon, que se pueden encontrar en la literatura. Con esta premisa,

se analizará la variedad de generalizaciones realizadas hasta el momento a la medida de entropía de Shannon encontradas en la literatura, desde entropías paramétricas (Ramírez-Arellano, *et al.*, 2020) hasta entropías de orden fraccionario (Ramírez-Arellano, *et al.*, 2021; Lopes y Machado, 2020), que son producto de la sinergia entre medidas de entropía y Cálculo fraccional (Kilbas, *et al.*, 2006; Podlubny, 1998; Baleanu, *et al.*, 2012), todos los cuales reflejan la posibilidad de utilizar la medida de entropía ideal en la metodología propuesta para cuantificar la complejidad de los procesos de producción, dependiendo del caso de uso específico.

La segunda herramienta incorporada a la metodología es IIRA, que como se mencionó anteriormente, es una arquitectura de referencia que favorece la estandarización y conceptualización del nuevo sistema IIoT, hasta su implementación, y para ello, como se describió anteriormente, se desglosa en varios puntos de vista. Luego, cada uno de los pasos de la metodología propuesta se puede observar en la Figura 1. Asimismo, una vez detalladas las herramientas que componen la Metodología Propuesta, así como las mejoras incorporadas, es interesante saber cómo se compara esta con otras desarrolladas en los últimos años que persiguen el mismo objetivo de impulsar la implantación de I4.0. Para ello se elaboró un cuadro comparativo que tiene como pilares los mejores aspectos de la metodología propuesta y puede ser consultado en la Tabla 2.

**Figura 6:** Pasos de la Metodología Propuesta.



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se detallará cada paso de la metodología propuesta, indicando qué aspectos se toman de las herramientas utilizadas y cómo se combinan en su aplicación.

### **Diagnóstico general**

El primer paso de la metodología propuesta consiste en la aplicación de las dimensiones primera y segunda del NMM. La primera dimensión (estrategia, estructura y cultura organizacional) aborda aspectos generales de la aplicación de I4.0 en la operación de la empresa, mientras que la segunda dimensión (fuerza de trabajo) aborda el desarrollo y la relación de la plantilla con las herramientas y los objetivos de I4.0. Como se mencionó anteriormente, cada una de las cinco dimensiones del NMM se aplica a través de cuestionarios a emprendedores o líderes de una organización para poder verificar el nivel de avance en la implementación de I4.0. Ejemplos de estas preguntas se pueden consultar en el Apéndice 1, donde se muestran algunas agregadas al NMM en este trabajo. El resto se puede consultar en Carreiro-Santos y Martinho (2020). Dado el alcance de estas dos dimensiones y el contenido de sus preguntas, su aplicación permite estimar de manera preliminar el nivel de implementación de I4.0 en la empresa.

### **Diagnóstico específico**

En el segundo paso, se aplican la tercera dimensión (fabricación inteligente), la cuarta dimensión (procesos inteligentes) y la quinta dimensión (productos y servicios inteligentes) del NMM a través de cuestionarios. En esta fase se analiza el uso de tecnologías de I4.0 en la producción, los procesos, los productos y los servicios específicos de la empresa. Una vez aplicadas todas las dimensiones del NMM, se calcula la valoración final promediando los valores obtenidos en cada una de las respuestas del cuestionario, conforme a los pesos que se explicaron anteriormente. El usuario tiene la libertad de elegir la media que mejor convenga para el cálculo medio de las valoraciones.

**Tabla 2:** Selección de artículos que presentan metodologías para implementar la Industria

4.0

Metodologías	Componente ciberfísico	Auto-evaluación	Cuantificación y validación de procesos	Flexibilidad en indicadores cuantitativos	Alcance	País de origen/ País de aplicación
Metodología Propuesta	Sí	Sí	Sí	Sí	Industria automotriz	México/ México
Propuesta de adopción de tecnologías asociadas a la Industria 4.0 en las pymes mexicanas (Buenrostro-Mercado, 2022)	Sí	No	No	No	PYMEs	México/ México
Industry 4.0 Implementation Framework for the Composite Manufacturing Industry (Stojkovic y Butt, 2022)	Sí	Sí	Sí	Sí	Industria de Componentes	Reino Unido/ Internacional
Using Industry 4.0 concepts and theory of systems for improving company supply chain: the example of a joinery (Dossou, 2019)	No	Sí	No	No	Industria maderera / PYMEs	Francia/ Francia
Manufacturing strategy 4.0: a framework to usher towards I4.0 implementation for digital transformation (Dohale, <i>et al.</i> , 2023)	No	Sí	No	No	Sector manufacturero	India-USA/ Internacional
A DMS to Support Industrial Process Decision-Making: a contribution under I4.0 (Ribeiro-Pereira, <i>et al.</i> , 2019)	No	Sí	Sí	No	Industria automotriz	Portugal/ Internacional
A two-stage fuzzy approach for I4.0 project portfolio selection within criteria and Project interdependencies context (Demircan-Keskin, 2020)	No	No	No	No	Empresas en general	Turquía/ Internacional

A conceptual framework to support digital transformation in manufacturing using an integrated business process management approach (Butt, 2020a)	Sí	Sí	Sí	Sí	Sector manufacturero	Reino Unido/Internacional
A strategic roadmap for the manufacturing industry to implement industry 4.0 (Butt, 2020b)	No	Sí	Sí	No		Reino Unido/Internacional
<i>Big data</i> /analytics platform for I4.0 implementation in advanced manufacturing context (Bonnard, <i>et al.</i> , 2021)	Sí	No	Sí	No	Sector Manufacturero	Brasil/Brasil
Decision support for the implementation of I4.0 methods: Toolbox, Assessment and Implementation Sequences for Industry 4.0 (Liebrecht, <i>et al.</i> , 2021)	No	No	Sí	No	Empresas en general	Alemania -USA/Internacional

Fuente: elaboración propia

Si, tras la aplicación de los pasos uno y dos, la empresa obtiene una calificación de nivel 0 o 1, significa que aún no ha implementado tecnologías de I4.0 o apenas está iniciando este proceso. En este caso, se procederá con la aplicación de los siguientes pasos de la metodología. Por el contrario, si la puntuación del NMM indica que la implementación ya está en marcha, el proceso se detendrá en esta etapa, ya que la empresa habrá superado el rango de acción previsto por la metodología propuesta. Cabe señalar que una vez finalizada la aplicación del paso dos o durante su realización, si se detecta que hubo alguna otra duda o tema respecto a aspectos generales de la empresa relacionados con I4.0, se abre la posibilidad de volver al paso uno nuevamente e incorporarlas.

## **Definición del negocio**

El tercer paso se centra en el desarrollo de los puntos de vista comercial y de uso. En el punto de vista del negocio, se identifican los principales actores con relación directa o indirecta en el proceso productivo de la empresa, incluidos los externos. También se define el modelo de negocio, considerando la visión, los valores y los objetivos clave de la organización. En el punto de vista del uso se establecen las relaciones entre los actores identificados y las actividades que desempeñan.

## **Funciones para la gestión y el procesamiento de datos del negocio**

En este paso se definen las funciones que se llevarán a cabo en los dominios de negocio, aplicaciones, información y operaciones desde un enfoque funcional, así como los actores responsables de dichas funciones. Estas funciones están vinculadas a la gestión de los activos de la empresa, la toma de decisiones y el procesamiento de datos, y se pueden encontrar varios ejemplos en la subsección 2.1.1. Una vez definidas las funciones, si se detecta que alguna de ellas requiere actores no considerados en el paso 3, se puede regresar a dicho paso y actualizar la lista de actores.

## **Funciones para la producción**

Las funciones relacionadas con la producción incluyen aquellas del dominio de control dentro del punto de vista funcional. Estas funciones involucran a actores con participación directa en la producción, como supervisores, trabajadores de la línea de producción y agentes externos, entre ellos los proveedores, ya que en este dominio se realizan las actividades que impactan directamente en el producto final, las cuales fueron delineadas y gestionadas a nivel de negocio en los dominios definidos en el paso 4. Siguiendo la misma premisa del paso anterior, si se detecta que una función definida para el dominio de control requiere un actor no identificado previamente, se podrá regresar al paso 3 para su corrección.

## **Interconexión y puesta en marcha de la gestión y el procesamiento de datos**

En la fase final de la metodología propuesta se inicia el proceso de toma de decisiones y de corrección de problemas detectados en los pasos 1 y 2. Por tanto, siguiendo la lógica de los pasos 4 y 5 en términos de jerarquía empresarial, el paso 6 propone la implementación de los niveles Empresa y Plataforma del P.A.3.N, desde el Punto de Vista Implementación. Tal como se especifica en P.A.3.N, en estos niveles se llevarán a cabo las funciones previamente definidas para los dominios mencionados en el paso 4, que contienen los actores involucrados en la gestión de los activos y el procesamiento de datos de la empresa. Los niveles de empresa y plataforma deberán estar conectados mediante una red de servicio, que facilitará el envío y la recepción de datos entre los distintos actores, así como la transmisión de instrucciones de control.

Una vez finalizada la implementación y conexión de los niveles correspondientes a este paso, si se detecta alguna operación errónea que pueda deberse a fallas o ausencia de funciones requeridas en éstos, y que no estuvieran previamente definidas en ninguno de los dominios organizados en dichos niveles, se puede volver al paso 4 y hacer correcciones.

## **Interconexión y puesta en marcha de la producción**

En el paso 7 se implementará el nivel de borde del P.A.3.N dentro del punto de vista de implementación. Este nivel se encargará de ejecutar las acciones específicas que impactan directamente en el producto final, vinculadas a las funciones del dominio de control definidas en el paso 5. Para su correcto funcionamiento, empleará la red de proximidad y la red de acceso, permitiendo el envío de datos y la recepción de comandos e instrucciones desde los demás niveles. Si se detectan problemas en la interconexión o el funcionamiento del nivel de borde en relación con las funciones del dominio de control, será posible regresar al paso 5 y realizar las correcciones necesarias.

Una vez implementado el paso 7, los resultados obtenidos servirán como retroalimentación para una nueva aplicación del NMM, es decir, de los pasos 1 y 2. Esto permitirá realizar la mencionada autoevaluación de la correcta implementación de la propia metodología, y con los nuevos resultados del NMM, saber si fue exitosa (nivel 2 o superior), o si es necesario iniciar nuevamente la aplicación del paso 3 en adelante (nivel 0 o 1), lo que significa que se cometieron errores en el proceso de conceptualización del negocio y diseño del nuevo sistema IIoT.



## Discusión

La metodología desarrollada en este trabajo es aplicable al contexto nacional de México. En el diagnóstico se incluyen preguntas sobre la participación de las empresas en iniciativas mexicanas orientadas a la divulgación de experiencias relacionadas con la implementación de Industria 4.0, como los clústeres de la industria automotriz. En términos generales, la metodología propuesta se destaca por su capacidad de autoevaluación y el uso de herramientas cuantitativas flexibles, lo que la convierte en una alternativa competitiva frente a otras metodologías publicadas con el propósito de fomentar la implementación de I4.0, como se muestra en la Tabla 2.

Uno de los principales desafíos enfrentados en esta investigación fue la obtención de datos verídicos sobre la implementación de Industria 4.0 en empresas del sector automotriz mexicano, así como de un mayor número de evidencias y casos documentados de éxito en la transición hacia este modelo. Todo esto con el objetivo de obtener un mejor análisis previo, de manera tal que el desarrollo de la metodología y el producto final pudiese tener una aplicación más cercana al contexto mexicano.

Por lo anterior, la implementación práctica de la metodología propuesta en las empresas mexicanas de la industria automotriz aún resulta un objetivo futuro, ya que la experiencia palpada hasta el momento, indica que muchas veces las empresas son renuentes a aceptar cambios o modificaciones provenientes de la academia, sobre todo si son experimentales o podrían provocar un cambio dramático de su modelo de negocio. A pesar de este obstáculo, se seguirá trabajando con base a poder aplicar experimentalmente la metodología, e igualmente se seguirá actualizando, e incorporando elementos de Industria 5.0, de manera que resulte más atractiva su aplicación.

## Conclusiones

Este trabajo aborda aspectos clave de la transición a I4.0 en el sector manufacturero. Además, los datos analizados evidencian la relevancia de la industria automotriz en el desarrollo económico de México. Se describieron las particularidades de dos herramientas esenciales relacionadas con la implementación de I4.0 como lo son el Nuevo Modelo de Madurez y la Arquitectura de Referencia de Internet Industrial, y a partir de estas, la propuesta de la Metodología que sirve de guía y autoevaluación en la transición hacia I4.0 en empresas mexicanas de la industria manufacturera automotriz. Los primeros dos pasos de

la metodología incluyen la aplicación de un NMM mejorado, que incorpora preguntas sobre la sostenibilidad y la complejidad de los procesos productivos, lo que representa una mejora respecto al NMM original. Otras mejoras adicionales residen en el uso de una ponderación en cada uno de los niveles de evaluación, así como la flexibilidad en la elección de la media por utilizar para la evaluación final del NMM, y de la medida de entropía para cuantificar la complejidad del proceso productivo, favoreciendo así la obtención de un resultado más completo y preciso una vez finalizada la aplicación de los pasos de la metodología propuesta.

Como fortaleza se puede destacar que esta propuesta aplica para cualquier empresa del sector automotriz mexicano, teniendo la libertad de adaptar su aplicación y la elección de las diversas medidas que se incluyen. Como limitación, cabe señalar la dificultad para recopilar datos concretos sobre productividad, complejidad, sostenibilidad, entre otros parámetros de empresas del sector, lo cual ayudaría a afinar y obtener un margen más preciso de aspectos cuantitativos que se especifican en el NMM, como la medición de la complejidad o elementos de sostenibilidad.

### **Futuras Líneas de Investigación**

Como recomendación, para ampliar la implementación de Industria 4.0 en México, es fundamental que los responsables de la formulación de políticas promuevan leyes que faciliten su adopción y proporcionen apoyo económico a las empresas, incluidos incentivos fiscales. Por su parte, los empresarios deben estar dispuestos a embarcarse en la gran inversión que implica involucrarse de lleno en la implementación de este paradigma tecnológico, que eventualmente les permitirá elevar sus modelos de negocio al siguiente nivel. Asimismo, las empresas y la academia deben trabajar juntas para encontrar nuevas estrategias y soluciones que favorezcan la implementación de la Industria 4.0 en la industria mexicana. Con estas iniciativas, el país daría un paso adelante en su desarrollo industrial y económico, acercándose a los estándares de las economías más avanzadas, con mejores salarios, condiciones laborales y una fuerza de trabajo mejor capacitada para afrontar los desafíos que supone la adopción de estas nuevas tecnologías.

Asimismo, se considera relevante la incorporación de nuevas tendencias relacionadas con la Industria 4.0 y la actualización de la metodología con preceptos y principios emergentes de la Industria 5.0. Una vez implementada la metodología en diferentes empresas de la industria automotriz mexicana, y habiendo sido comprobados sus resultados, un

atractivo para el futuro resulta la adaptación de esta metodología a otros sectores industriales del país, con el fin de seguir promoviendo la transición hacia la Industria 4.0.

## Referencias

- Aceto, G., Persico, V. y Pescapé, A. (2019). A survey on information and communication technologies for industry 4.0: State-of-the-art, taxonomies, perspectives, and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(4), 3467-3501. <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2938259>
- Akundi, A. y Lopez, V. (2021). A review on application of model-based systems engineering to manufacturing and production engineering systems. *Procedia Computer Science*, 185, 101-108. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.05.011>
- Alkan, B., Vera, D. A., Ahmad, M., Ahmad, B. y Harrison, R. (2018). Complexity in manufacturing systems and its measures: A literature review. *European Journal of Industrial Engineering*, 12(1), 116-150. <https://doi.org/10.1504/EJIE.2018.089883>
- Asociación Mexicana de la Industria Automotriz (2021). *Importancia de la industria automotriz*. [https://www.amia.com.mx/publicaciones/industria\\_automotriz/](https://www.amia.com.mx/publicaciones/industria_automotriz/)
- Baleanu, D., Diethelm, K., Scalas, E. y Trujillo, J. J. (2012). *Fractional Calculus: Models and Numerical Methods*, (3). World Scientific.
- Bonnard, R., Arantes-Da Silva, M., Lorbieski, R., Maciel-Vieira, K. M. y Canzian-Nunes, M. (2021). Big data/analytics platform for Industry 4.0 implementation in advanced manufacturing context. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 117(5-6), 1959-1973. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07834-5>
- Buenrostro-Mercado, E. (2022). Propuesta de adopción de tecnologías asociadas a la Industria 4.0 en las pymes mexicanas. *Entreciencias: Diálogos en la sociedad del conocimiento*, 10(24). <https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2022.24.81347>
- Butt, J. (2020a). A conceptual framework to support digital transformation in manufacturing using an integrated business process management approach. *Designs*, 4(3), 17. <https://doi.org/10.3390/designs4030017>
- Butt, J. (2020b). A strategic roadmap for the manufacturing industry to implement industry 4.0. *Designs*, 4(2), 11. <https://doi.org/10.3390/designs4020011>
- Carreiro-Santos, R. y Martinho, J. L. (2020). An Industry 4.0 maturity model proposal. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(5), 1023-1043. <https://doi.org/10.1108/JMTM-09-2018-0284>

- Chuang, S., Dean, J. C. y Graham, C. M. (2021). Challenges for gender equality in the workplace: Acknowledging the past and embracing the future of work in a smart technology world. En: Morel, H. (ed.) *Gender Equality: Past, Present and Future Perspectives*, 39-74. Nova Science Publishers. Recuperado de <https://novapublishers.com/shop/gender-equality-past-present-and-future-perspectives/>
- Costa C. y Azevedo G. (2021). Industry 4.0 contributions to education 4.0. In *16th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, 1-6. <https://doi.org/10.23919/CISTI52073.2021.9476512>
- Da-Xu, L., Xu, E. L. y Li, L. (2018). Industry 4.0: state of the art and future trends. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2941-2962. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806>
- Hurtado de Barrera, J. (2000). *Metodología de la investigación holística*. 3ª ed., Caracas: Servicios y Proyecciones para América Latina.
- Demircan-Keskin, F. (2020). A two-stage fuzzy approach for Industry 4.0 project portfolio selection within criteria and project interdependencies context. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 27(1-2), 65-83. <https://doi.org/10.1002/mcda.1691>
- Dohale, V., Verma, P., Gunasekaran, A. y Akarte, M. (2022). Manufacturing strategy 4.0: A framework to usher towards industry 4.0 implementation for digital transformation. *Industrial Management & Data Systems*, 123(1), 10-40. <https://doi.org/10.1108/IMDS-12-2021-0790>
- Dossou, P. E. (2019). Using industry 4.0 concepts and theory of systems for improving company supply chain: The example of a joinery. *Procedia Manufacturing*, 38, 1750-1757. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.093>
- Efthymiou, K., Mourtzis, D., Pagoropoulos, A., Papakostas, N. y Chryssolouris, G. (2016). Manufacturing systems complexity analysis methods review. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 29(9), 1025-1044. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2015.1130245>
- Freund, L., Al-Majeed, S. y Millard, A. (2021a). Case study application of a strategic complexity management framework for complex industrial systems. *Industry 4.0*, 6(2), 41-45. Recuperado de <https://stumejournals.com/journals/i4/2021/2/41>
- Freund, L., Al-Majeed, S. y Millard, A. (2021b). Case studies key-findings of a strategic complexity management framework for industrial manufacturing systems. En: *2021*

- 16th International Conference of System of Systems Engineering (SoSE), 55-60.  
<https://doi.org/10.1109/SOSE52739.2021.9497489>
- Gilchrist, A. (2016). *Industry 4.0: the industrial internet of things*. New York: Springer.  
<https://doi.org/10.1007/978-1-4842-2047-4>
- Global Union, Industriall (2019). *Industria 4.0 en América Latina: La perspectiva de género*.  
Recuperado de <https://www.industriall-union.org/es/industria-40-en-america-latina-la-perspectiva-de-genero>
- I. I. Consortium (2019). *The Industrial Internet Reference Architecture Version 1.9*,  
Recuperado de <https://www.iiconsortium.org/IIRA/>
- Initiative, I. V. C. (2018). *Industrial Value Chain Reference Architecture-Next*. En: *Strategic Implementation Framework of Industrial Value Chain for Connected Industries*.  
Recuperado de [https://iv-i.org/wp-content/uploads/2018/04/IVRA-Next\\_en.pdf](https://iv-i.org/wp-content/uploads/2018/04/IVRA-Next_en.pdf)
- International Standardization Organization [ISO] (2018). *Revista ISO FOCUS*. Recuperado de  
[https://www.iso.org/isofocus\\_131.html](https://www.iso.org/isofocus_131.html)
- Jazdi, N. (2014). *Cyber physical systems in the context of Industry 4.0*. En: *2014 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics*, Miclea, L. y Stoian, I. (Eds.), 1-4. <https://doi.org/10.1109/AQTR.2014.6857843>
- Kagermann, H., Lukas, W. D. y Wahlster, W. (2011). *Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution*. *VDI Nachrichten*. Recuperado de  
[https://www.live.dfki.de/fileadmin/user\\_upload/DFKI/Medien/News\\_Media/Presse/Presse-Highlights/vdinach2011a13-ind4.0-Internet-Dinge.pdf](https://www.live.dfki.de/fileadmin/user_upload/DFKI/Medien/News_Media/Presse/Presse-Highlights/vdinach2011a13-ind4.0-Internet-Dinge.pdf)
- Kagermann, H., Wahlster, W. y Helbig, J. (2013). *Securing the future of German manufacturing industry: Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group*. National Academy of Science and Engineering of Germany. Recuperado de  
[https://www.academia.edu/36867338/Securing\\_the\\_future\\_of\\_German\\_manufacturing\\_industry\\_Recommendations\\_for\\_implementing\\_the\\_strategic\\_initiative\\_INDUSTRIE\\_4\\_0\\_Final\\_report\\_of\\_the\\_Industrie\\_4\\_0\\_Working\\_Group](https://www.academia.edu/36867338/Securing_the_future_of_German_manufacturing_industry_Recommendations_for_implementing_the_strategic_initiative_INDUSTRIE_4_0_Final_report_of_the_Industrie_4_0_Working_Group)
- Kilbas, A., Srivastava, H. M. y Trujillo, J. J. (2006). *Theory and Applications of Fractional Differential Equations*, 204. Mathematics Studies, Amsterdam: Elsevier. Recuperado de [http://sutlib2.sut.ac.th/sut\\_contents/H103746.pdf](http://sutlib2.sut.ac.th/sut_contents/H103746.pdf)

- Kucukaltan, B., Saatcioglu, O. Y., Irani, Z. y Tuna, O. (2022). Gaining strategic insights into Logistics 4.0: Expectations and impacts. *Production Planning & Control*, 33(2-3), 211-227.  
[https://bradscholars.brad.ac.uk/bitstream/handle/10454/18959/Irani\\_et\\_al\\_Production\\_Planning\\_and\\_Control.pdf](https://bradscholars.brad.ac.uk/bitstream/handle/10454/18959/Irani_et_al_Production_Planning_and_Control.pdf)
- Leyva, A., Pérez, B., Rodríguez, D., Ordaz, M. F. y Nava Aguirre, K. M. (2020). Humanos y máquinas trabajando en conjunto para la implementación del internet de las cosas: un desafío en el sector de autopartes en Nuevo León. *UTCJ Theorema Revista Científica*, 14, 99-107.
- Liao, Y., Deschamps, F., Rocha-Loures, E. D. F. y Pierin-Ramos, L. F. (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.  
<https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1308576>
- Liebrecht, C., Kandler, M., Lang, M., Schaumann, S., Stricker, N., Wuest, T. y Lanza, G. (2021). Decision support for the implementation of Industry 4.0 methods: Toolbox, Assessment and Implementation Sequences for Industry 4.0. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 412-430. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.12.008>
- Lopes, A. M. y Tenreiro-Machado, J. A. (2020). A review of fractional order entropies. *Entropy*, 22(12), 1374. <https://doi.org/10.3390/e22121374>
- López, H. A., Ponce, P., Molina, A., Ramírez-Montoya, M. S. y López-Caudana, E. (2021). Design framework based on TEC21 educational model and Education 4.0 implemented in a Capstone Project: A case study of an electric vehicle suspension system. *Sustainability*, 13(11), 5768. <https://doi.org/10.3390/su13115768>
- Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*, 6, 1-10.  
<https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>
- Majstorovic, V. D. y Mitrovic, R. (2019). Industry 4.0 programs worldwide. En: *Proceedings of the 4th International Conference on the Industry 4.0 Model for Advanced Manufacturing, AMP 2019*. L. Monostori, V. Majstorovic, S. Hu y D. Djurdjanovic (Eds.), Lecture Notes in Mechanical Engineering, 78-99. Belgrade: Springer.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-18180-2\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-18180-2_7)

- Martínez-Olvera, C. (2020a). An entropy-based formulation for assessing the complexity level of a mass customization industry 4.0 environment. *Mathematical Problems in Engineering*, 1-19. <https://doi.org/10.1155/2020/6376010>
- Martínez-Olvera, C. (2020b). An entropy-based formulation for the support of sustainable mass customization 4.0. *Mathematical Problems in Engineering*, 1-21. <https://doi.org/10.1155/2020/3840426>
- Mourtzis, D., Fotia, S., Boli, N. y Pittaro, P. (2018). Product-service system (PSS) complexity metrics within mass customization and Industry 4.0 environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97, 91-103. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1903-3>
- Mourtzis, D., Fotia, S. y Boli, N. (2017). Metrics definition for the product-service system complexity within mass customization and industry 4.0 environment. En: *2017 International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)* Madeira, R. Jardim-Gonçalves, J. Pedro-Mendoza, M. Pallot, A. Zarli, J. Martins y M. Marques (Eds.), 1166-1172. <https://doi.org/10.1109/ICE.2017.8280013>
- Nava Aguirre, K. M., Silva Ábrego, J. G., Guajado García, A., Leyva Velázquez, O. U. y Torres Camarillo, C. Y. (2019). La incorporación de la Industria 4.0 en el sector de autopartes en Nuevo León, México. *Innovaciones de Negocios*, 16(32), 232-270. <https://doi.org/10.29105/rinn16.32-3>
- Paz, K. (2007). Media aritmética simple. *Boletín Electrónico*, 07, 1-13. Recuperado de <http://www.editorialkamar.com/et/archivo11.pdf>
- Pereira, A. C. y Romero, F. (2017). A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept. *Procedia Manufacturing*, 13, 1206-1214. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.032>
- Phuyal, S., Bista, D. y Bista, R. (2020). Challenges, opportunities and future directions of smart manufacturing: a state of art review. *Sustainable Futures*, 2, 100023. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2020.100023>
- Podlubny, I. (1998). An introduction to fractional derivatives, fractional differential equations, to methods of their solution and some of their applications. *Mathematics in Science Engineering*, 198, 340.

- Portocarrero-Quispe, J. A. (2017). Ponderación= Balancing. *Eunomia: Revista en Cultura de la Legalidad*, 12, 210-223. Recuperado de <https://e-revistas.uc3m.es/index.php/EUNOM/article/view/3653>
- Rahman, M., Mustafa-Kamal, M., Aydin, E. y Ul-Haque, A. (2022). Impact of Industry 4.0 drivers on the performance of the service sector: comparative study of cargo logistic firms in developed and developing regions. *Production Planning & Control*, 33(2-3), 228-243. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1810758>
- Rajkumar, R., Lee, I., Sha, L. y Stankovic, J. (2010). Cyber-physical systems: The next computing revolution. *47<sup>th</sup> Design Automation Conference*, New York: IEEE, 731-736. <https://doi.org/10.1145/1837274.1837461>
- Ramírez-Arellano, A., Hernández-Simón, L. M. y Bory-Reyes, J. (2021). Two-parameter fractional Tsallis information dimensions of complex networks. *Chaos, Solitons & Fractals*, 150, 111113. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2021.111113>
- Ramírez-Arellano, A., Sigarreta-Almira, J. M. y Bory-Reyes, J. (2020). Fractional information dimensions of complex networks. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 30(9), 093125. <https://doi.org/10.1063/5.0018268>
- Ribeiro-Pereira, M. T., Silva, A., Pinto-Ferreira, L., Sá, J. C. y Gomes-da Silva, F. J. (2019). A DMS to support industrial process decision-making: a contribution under Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 38, 613-620. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.079>
- SCI 4.0 (2017). Consejo de Normalización de Industria 4.0. Recuperado de <https://www.sci40.com/>
- SCI 4.0 (2019). Reference Architecture Model Industrie 4.0. Recuperado de <https://www.sci40.com/english/thematic-fields/rami4-0/>
- Secretaría de Economía [SE] (2016). *Crafting the Future: A Roadmap for Industry 4.0 in Mexico*. Recuperado de <https://amiti.org.mx/wp-content/uploads/2018/01/Crafting-the-future-10-agosto-2016.pdf>
- Seok-Kang, H., Yeon-Lee, J., Choi, S., Kim, H., Hee-Park, J., Yeon-Son, J., Hyun-Kim, B. y Do-Noh, S. (2016). Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 3(1), 111-128. <https://doi.org/10.1007/s40684-016-0015-5>

- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27(3), 379-423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
- Stock, T. y Seliger, G. (2016). Opportunities of sustainable manufacturing in industry 4.0. *Procedia CIRP*, 40, 536-541. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.129>
- Stojkovic, M. y Butt, J. (2022). Industry 4.0 Implementation Framework for the Composite Manufacturing Industry. *Journal of Composites Science*, 6(9), 258. <https://doi.org/10.3390/jcs6090258>
- Yang, F. y Gu, S. (2021). Industry 4.0, a revolution that requires technology and national strategies. *Complex & Intelligent Systems*, 7(3), 1311-1325. <https://doi.org/10.1007/s40747-020-00267-9>
- Yumi-Nakagawa, E., Oliveira-Antonino, P., Schnicke, F., Capilla, R., Kuhn, T. y Liggesmeyer, P. (2021). Industry 4.0 reference architectures: State of the art and future trends. *Computers & Industrial Engineering*, 156, 107241. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107241>
- Zhou, K., Liu, T. y Zhou, L. (2015). Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges. En: J. D. Zhuo-Tang, S., Yin, H. Ligang y L. Renfa (Eds.), *12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)*, 2147-2152. New Jersey: IEEE. <https://doi.org/10.1109/FSKD.2015.7382284>

## Apéndice A – Preguntas añadidas al NMM

- ¿La empresa forma parte de alguno de los clústeres de la industria automotriz del país, para el intercambio de experiencias, iniciativas y formación de talento en torno a las nuevas tecnologías que se aplican en el sector? (primera dimensión)
- ¿La empresa conoce o aplica los principios del modelo Triple Bottom Line (TBL) en la implementación de la Industria 4.0? (primera dimensión)
- ¿La empresa aplica medidas y tecnologías en materia de tratamiento de residuos de producción? (primera dimensión) (tercera dimensión)
- ¿La empresa utiliza nuevas tecnologías para garantizar el uso eficiente de sus recursos energéticos o materias primas? (tercera dimensión)
- ¿La empresa mantiene un nivel satisfactorio de complejidad en sus procesos productivos? (cuarta dimensión)

Rol de Contribución	Autor (es)
Conceptualización	Lorenzo L. González Romeo (principal), Juan B. Reyes (que apoya), Jorge Rojas Ramírez (que apoya)
Metodología	Lorenzo L. González Romeo (principal), Juan Bory Reyes (que apoya), Jorge Rojas Ramírez (que apoya)
Software	NO APLICA
Validación	Juan Bory Reyes
Análisis Formal	NO APLICA
Investigación	Lorenzo L. González Romeo (principal), Juan B. Reyes (que apoya), Jorge Rojas Ramírez (que apoya)
Recursos	Jorge A. Rojas Ramírez
Curación de datos	NO APLICA
Escritura - Preparación del borrador original	Lorenzo L. González Romeo
Escritura - Revisión y edición	Lorenzo L. González Romeo (igual), Jorge A. Rojas Ramírez (igual)
Visualización	Lorenzo L. González Romeo
Supervisión	Juan Bory Reyes (igual), Jorge A. Rojas Ramírez (igual)
Administración de Proyectos	Juan Bory Reyes (igual), Jorge A. Rojas Ramírez (igual)
Adquisición de fondos	Jorge A. Rojas Ramírez