

Evaluación del grado de implementación de tecnologías Industria 4.0 en pymes metalmecánicas mediante el modelo de madurez IMPULS

Evaluation of the degree of implementation of Industry 4.0 technologies in metalworking SMEs using the IMPULS maturity model

PhD. Hugo Fernando Castro Silva¹, MSc. Marling Carolina Cordero Díaz²
MSc. Cristian Camilo Chaparro Serrano¹

¹ Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Facultad Seccional Sogamoso, Programa de Ingeniería Industrial, Grupo de Investigación GITYD, Sogamoso, Boyacá, Colombia.

² Universidad Francisco de Paula Santander, Departamento de Ciencias Contables y Financieras, Cúcuta, Colombia.

Correspondencia: marlingcarolinacd@ufps.edu.co

Recibido: 24 abril 2025. Aceptado: 03 agosto 2025. Publicado: 15 octubre 2025.

Cómo citar: «Evaluación del grado de implementación de tecnologías Industria 4.0 en pymes metalmecánicas mediante el modelo de madurez IMPULS», RCTA, vol. 2, n.º 46, pp. 217–225, oct. 2025.

Recuperado de <https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/rcta/es/article/view/4168>

Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.



Resumen: Este estudio evalúa la madurez en la transformación digital de las Pymes del sector metalmecánico en Boyacá, Colombia, usando el modelo IMPULS. Con una muestra de 24 Pymes, se aplicó un cuestionario para analizar seis dimensiones clave de la digitalización. Los resultados muestran que el 83% de las empresas están en niveles iniciales de madurez, y solo el 16.4% alcanza un nivel de principiantes. Las principales barreras identificadas son la falta de recursos financieros, infraestructura digital deficiente y baja integración de servicios basados en datos. Para avanzar hacia una transformación digital sostenible y competitiva, es esencial fortalecer las estrategias digitales, el talento humano y la infraestructura tecnológica.

Palabras clave: Industria 4.0, Pymes, transformación digital, madurez en industria 4.0, Impuls.

Abstract: This study evaluates maturity in the digital transformation of SMEs of the metalworking sector in Boyacá, Colombia, using the promotion model. With a sample of 24 SMEs, a questionnaire was applied to analyze six key dimensions of digitalization. The results show that 83% of the companies are at initial maturity levels, and only 16.4% reaches a level of beginners. The main barriers identified are the lack of financial resources, poor digital infrastructure and low data -based services integration. To move towards a sustainable and competitive digital transformation, it is essential to strengthen digital strategies, human talent and technological infrastructure.

Keywords: Industry 4.0, SMEs, digital transformation, maturity in industry 4.0, Impuls.

1. INTRODUCCIÓN

Desde comienzos del siglo XXI se introdujo el concepto de cuarta revolución industrial para definir la integración de la automatización con tecnologías digitales de avanzada como la Inteligencia Artificial (IA), blockchain, Internet de las Cosas (IoT), robots colaborativos, Big Data, computación en la nube y otras tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) de última generación [1], [2]. El concepto de Industria 4.0 fue utilizado por primera vez en 2011 en la la Feria tecnológica de Hannover-Messe en Alemania para referirse a la digitalización de sistemas y procesos industriales y su integración con IoT mediante internet con el propósito de mejorar la flexibilidad de los procesos productivos, luego se fueron incorporando oros adelantos de las TICs disruptivas como la computación en la nube, Big Data y la ciberseguridad en una visión de fabrica inteligente [1] [2] [3].

La fabricación inteligente ha generado nuevas condiciones que enmarcan el desarrollo, transformación y modernización de la economía global generando en la cual estan inmersas las empresas industriales. En el proceso de digitalización digital empresarial las grandes empresas tienen una ventaja comparativa en relación con las Pequeñas y Medianas Empresas (Pymes) que debido a la escasez de financiamiento, deficiencias tecnológicas, poca conciencia de transformación y falta de talento humano competente se ven enfrentadas a mayores problemas en la implantación de la digitalización empresarial [1]. Conviene destacar que, la Industria 4.0 surge con el objetivo de incrementar la productividad en el sector manufacturero, donde su aplicación permite a las empresas adaptarse mejor a las necesidades de los clientes mediante la personalización de la producción, al tiempo que optimiza los procesos y reduce los tiempos y costos de fabricación.

Los sistemas ciberfísicos que configuran las fábricas inteligentes son configuraciones que combinan capacidades físicas y de computación, interactuando a través de redes de datos, y en el caso de la Industria 4.0 son esenciales, ya que comprenden máquinas inteligentes y sistemas de almacenamiento que pueden operar de manera autónoma [4]. Estos sistemas ciberfísicos son capaces de intercambiar información, iniciar acciones y controlarse mutuamente de forma independiente, permitiendo optimizaciones significativas en los procesos industriales como la fabricación, el uso de

materiales y la gestión del ciclo de vida del producto [4], [5].

En el marco de la industria 4.0, la digitalización es definida como la utilización de tecnologías digitales en las organizaciones con los propósitos de generar valor y aumentar el rango de ingresos para lo cual se hace necesario un cambio en el modelo de negocio [6], [7]. El uso de estas tecnologías digitales (Big Data, IoT, redes sociales, computación en la nube, IA) en los procesos y operaciones habituales de las empresas generan cambios e impactos importantes en sus estructuras, esta evolución es conocida como transformación digital de las organizaciones [8] [9], [10]. Un marco adecuado e integral para la transformación digital de las organizaciones debe incluir tanto la gestión empresarial como las operaciones incluyendo factores críticos de éxito como la tecnología, el talento humano y la estrategia [11], [12].

De acuerdo con el informe sobre el desarrollo industrial de la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial, las tecnologías de la industria 4.0 están reconfigurando la forma en que se vive y se trabaja, ofreciendo soluciones innovadoras que pueden ayudar a superar los desafíos globales y avanzar hacia un desarrollo más inclusivo y sostenible [13]. Para que las Pymes se puedan integrar a la economía global es necesario que implementen estas tecnologías de la industria 4.0, sin embargo, se enfrentan a desafíos importantes como las restricciones de recursos, limitaciones al acceso de tecnologías de punta y capital humano con restricciones de conocimiento y experiencia en análisis e implementación de los elementos que conforman la industria 4.0 [14][15]. Por tanto, para evaluar la transformación digital organizacional se requiere tener en cuenta tanto aspectos estratégicos como operacionales [13]. En cuanto a la evaluación del grado de madurez en la transformación digital, las Pymes deben considerar tanto la tecnología como los procesos, utilizando indicadores claves como estrategia organizacional, hoja de ruta de la implementación, tecnología y talento humana con el objetivo de obtener una valoración integral [11].

La transformación digital es necesaria para las Pymes que desean aprovechar el inmenso potencial de estas tecnologías para expandir el mercado y fomentar un crecimiento sostenible a largo plazo [16]. Sin embargo, los retos de la transformación digital en las Pymes son significativos considerando que deben construir capacidades dinámicas que les permitan adaptarse, innovar y aprovechar las nuevas

oportunidades del mercado a la vez que gestionan eficazmente sus recursos limitados. Un estudio en Pymes de Malasia recomienda a los gerentes priorizar la incorporación de tecnologías de industria 4.0 en sus procesos y operaciones y promover la capacidad de adaptación a los rápidos cambios del mercado global para lograr un mejor desempeño en el ámbito internacional [16].

Un estudio en Pymes manufactureras de la provincia de Guangdong en China demostró que la implementación de tecnologías de la información y las comunicaciones de la industria 4.0 y la estrategia digital son factores clave en la transformación digital de las Pymes, además este estudio logró identificar que los principales problemas a que se enfrentan estas pequeñas y medianas empresas se relacionan con la innovación digital y con los procesos digitales en sí mismos [1]. En tanto que un análisis de nivel de madurez en industria 4.0 en Turquía utilizando un modelo inédito logró establecer que el principal obstáculo para la digitalización de las empresas industriales corresponde a la falta de talento humano capacitada en el uso de estas tecnologías digitales, además, el estudio identificó como obstáculos importantes en la transformación digital de estas empresas a la insuficiencia financiera y a la incertidumbre en el retorno de la inversión necesaria en estas tecnologías y en la modernización del modelo de negocio [17].

Estos dos últimos obstáculos para la transformación digital de la industria 4.0 relacionados con los altos costos de la tecnología y lo incierto del retorno de la inversión son respaldados para el caso de las Pymes por [18]. Un estudio en Pymes del sector manufacturero en Europa y el Reino Unido concluyó que el bajo nivel de implementación de la Industria 4.0 en las pymes es un reto complejo y multidimensional en donde intervienen variables de tipo tecnológico, organizacional y ambientales. Por un lado, muchas de estas Pymes no logran aprovechar todo el potencial de las nuevas tecnologías porque les faltan capacidades, infraestructura y habilidades en tecnología de la información. Por otro lado, cuando faltan factores organizacionales, también disminuye la capacidad de transformación digital [18]. Por ello, es fundamental que las pymes presten atención tanto a la parte tecnológica como a la organización interna para avanzar en la implementación de la Industria 4.0 y no quedarse atrás en un mercado competitivo y globalizado.

Un estudio a Pymes en Italia orienta sobre como estas empresas pueden orientar su ruta de transformación digital 4.0 en cada etapa de la cadena de suministro y pone de relieve la importancia del trabajo colaborativo entre la tripe hélice para identificar y aprovechar las oportunidades digitales. El IoT, Big Data y la simulación conformaron los tres grupos de oportunidades digitales que impactan positivamente el grado de adopción de tecnologías 4.0, en la fase de diseño es relevante las acciones encaminadas a mejorar la ciberseguridad, en la fase de producción la oportunidad digital relevante corresponde a robots colaborativos y en la fase de innovación de productos / servicios es importante la adopción de tecnologías de realidad aumentada y virtual [19].

En el entorno de la industria 4.0 las Pymes se ven enfrentadas a grandes retos para garantizar la sostenibilidad de sus procesos de producción. Un estudio en Pymes industriales en Brasil logró reconocer que la organización del proceso de producción, el desarrollo permanente de habilidades en los empleados, y la simplificación de la planificación y el control de la producción como factores críticos para aprovechar las tecnologías 4.0 con el propósito de hacer más sostenibles sus operaciones de fabricación [20]. Por tanto, es importante invertir en tecnologías de industria 4.0 para apoyar estas funciones y lograr mejorar la eficiencia operativa y el desempeño a largo plazo de las Pymes.

Algunos estudios revelan cómo la implementación de metodologías estructuradas mejora la eficiencia operativa en las pymes metalmecánicas. Un una Pyme en Lima - Perú, que aplicó la metodología lean para superar un déficit de eficiencia. Mediante el uso de herramientas de Gestión de Procesos Empresariales (BPM), pronósticos Holt-Winter, y un modelo de inventario optimizado a través del proceso DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar, Controlar), la empresa logró elevar su eficiencia operativa del 77% al 90%, el incremento mejoró la productividad y optimización de inventarios [21]. Este estudio demuestra cómo las prácticas estructuradas pueden facilitar la adopción de tecnologías de industria 4.0, resaltando la importancia de estas metodologías para mejorar la competitividad en la industria metalmecánica.

Un análisis sobre la implementación de las tecnologías de la Industria 4.0 en el sector manufacturero de Ciudad Juárez - México, evaluó su impacto en la eficiencia productiva y el bienestar laboral, incluyendo aspectos como salarios y

condiciones de trabajo. A través de un modelo de ecuaciones estructurales PLS, el estudio identificó que aunque el nivel de conocimiento e implementación de estas tecnologías es generalmente bajo en las Pymes, las empresas que las han adoptado reportan mejoras significativas en la productividad y en las condiciones laborales, lo que resalta la relevancia de la Industria 4.0 tanto en la mejora de la eficiencia como en el bienestar de los trabajadores [22].

La literatura reciente relacionada con los niveles de madurez en industria 4.0 buscan relacionar aspectos como las tecnologías digitales y la estrategia corporativa con temas como la innovación del modelo de negocio, las cadenas de suministro globales, la colaboración y el desempeño corporativo [23]. La mayoría de los estudios relacionados con modelos para determinar los niveles de madurez en industria 4.0, se han enfocado en grandes empresas, dejando un vacío en la literatura en lo relacionado con los impactos de estos modelos de madurez en la gestión, organización e infraestructura de la industria 4.0 en las Pymes [23]. Este vacío en la literatura científica da relevancia a este estudio enfocado en los niveles de madurez en industria 4.0 en Pymes de Colombia.

Colombia no es ajena a los impactos de estos avances tecnológicos de la cuarta revolución industrial, haciendo necesaria una transformación radical en los procesos productivos en la industria convencional colombiana y generando el desafío de integrar nuevas tecnologías digitales para innovar en productos y en estrategias de logística y marketing [24]. En el contexto colombiano se han realizado varios estudios relacionados con madurez en industria 4.0 en Pymes. En cuanto a la adopción de estrategias y tecnologías en las Pymes manufactureras de Bogotá, se ha identificado que el 85% no realiza capacitaciones en estas herramientas tecnológicas, apenas un 18.6% tiene un plan de inversión para implementarlas, un 3.9% utiliza software especializado para el tratamiento de datos y un 36.3% no emplea ningún método de ciberseguridad [25]. Esto evidencia una brecha considerable en la adopción de tecnologías avanzadas, limitando la competitividad y eficiencia de las Pymes en un mercado cada vez más globalizado y tecnológicamente avanzado.

Así mismo, la incorporación de tecnologías de la Industria 4.0 en el sector metalmecánico de Barranquilla - Colombia, ha permitido superar significativas barreras operacionales tradicionales, donde destacan cómo la automatización avanzada y

el uso de robots de soldadura, guiados por lógica difusa y controlados a través de sistemas sensoriales en tiempo real, han mejorado drásticamente la precisión y la eficiencia de los procesos de fabricación [26]. La implementación de estas tecnologías ha optimizado las rutas y movimientos de los robots para mejorar la trayectoria de la soldadura, facilitando la adaptación de las operaciones a los desafíos específicos de accesibilidad y configuración de las máquinas, proporcionando así soluciones personalizadas que refuerzan la competitividad del sector en el ámbito global

Un análisis relacionado con la integración de las tecnologías de la Industria 4.0 en 121 Pymes colombianas de los sectores manufacturero, de servicios y agrícola, logró identificar una baja adopción generalizada de industria 4.0 y destacar desafíos comunes como la falta de infraestructura adecuada y los altos costos de inversión, también se determinaron problemas particulares como la ciberseguridad y la resistencia al cambio s como obstáculos significativos en el proceso de transformación digital [27].

Este proyecto de investigación tuvo como propósito fundamental de identificar el nivel de adopción de tecnologías y procesos de Industria 4.0 en las Pymes del sector manufacturero metalmecánico Boyacá – Colombia. A través de un análisis identificaron barreras que dificultan dicha adopción y las oportunidades que se presentan para dinamizar la economía local y mejorar la eficiencia operativa de esta tipología de empresas. El proyecto se basa en el modelo de madurez en industria 4.0 conocido como IMPULS, el cual fue desarrollado por IW Consult y el Instituto de Gestión Industrial (FIR) de la Universidad RWTH Aachen, por encargo de la Fundación Impuls de la Federación de Ingeniería Alemana (VDMA).

2. METODOLOGÍA

Esta investigación empírica se enfoca en determinar el nivel de madurez en industria 4.0 de las Pymes del sector metalmecánico del sector del corredor industrial de Boyacá Colombia. El modelo de madurez utilizado en esta investigación corresponde al modelo IMPULS desarrollados por la Asociación Alemana de Ingenieros Mecánicos [28]. El modelo IMPULS - Industrie 4.0 Readiness fue desarrollado para evaluar la disposición de las empresas, especialmente en la ingeniería mecánica y la fabricación de plantas, para adoptar las tecnologías de la Industria 4.0, buscando proporcionar un

diagnóstico detallado y sistemático sobre el grado de preparación de las empresas para integrar estas tecnologías en sus procesos operativos y estratégicos [29]. Este modelo clasifica a las empresas en los seis niveles de madurez que se ilustran en la figura 1.



Fig. 1. Niveles de madurez del modelo IMPULS.

Fuente: [30].

La clasificación en los niveles de madurez del modelo IMPULS se realiza mediante la evaluación de indicadores clave en las seis dimensiones críticas que se presentan en la tabla 1.

Tabla 1: Dimensiones de madurez del modelo IMPULS

Dimensión	Aspectos que evalúa
1. Estrategia y organización	Grado de implementación de la Industria 4.0 en la estrategia de la empresa.
2. Fábrica inteligente	Nivel de una producción automatizada e integrada digitalmente basada en sistemas ciberfísicos.
3. Operaciones inteligentes	Grado en que los procesos y productos están modelados digitalmente y pueden ser controlados a través de sistemas y algoritmos TIC en un mundo virtual.
4. Productos inteligentes	Control de los productos con TI, lo que les permite comunicarse e interactuar con sistemas de nivel superior a lo largo de la cadena de valor.
5. Servicios basados en datos	Oferta de servicios basados en datos que solo son posibles mediante la integración de productos, producción y clientes.
6. Empleados	Habilidades necesarias para implementar los conceptos de la Industria 4.0.

El tipo de muestreo utilizado en este estudio fue por conveniencia considerando que la información recolectada resultó ser confidencial para algunas de las Pymes del sector metalmeccánico de Boyacá – Colombia. El tamaño de la muestra fue de 24 Pymes a quienes se les aplicó el cuestionario del modelo IMPULS. Los datos recopilados fueron analizados de acuerdo con los criterios de evaluación establecidos por el modelo de madurez en industria 4.0 seleccionado con los propósitos de clasificar a

las organizaciones en uno de los seis niveles de madurez y de identificar las principales barreras particulares de estas Pymes en su proceso de transformación digital 4.0.

El muestreo no probabilístico de conveniencia, aunque limita la capacidad de generalizar los resultados, es particularmente valioso en investigaciones donde las condiciones no permiten un muestreo probabilístico. Se ha utilizado extensamente en estudios exploratorios que buscan desarrollar hipótesis o insights preliminares en contextos específicos, donde la accesibilidad y la disposición de los sujetos de estudio pueden ser desafiantes [31]. La aplicación de este enfoque permitió una inmersión en las realidades específicas de las Pymes que estuvieron dispuestas a compartir información detallada y relevante relacionada con su proceso de transformación digital en el contexto de la industria 4.0.

3. RESULTADOS

Al evaluar el nivel de madurez en Industria 4.0 de las Pymes del sector manufacturero metalmeccánico en Boyacá con el modelo IMPULS, se logró clasificar a estas empresas según los niveles establecidos por el modelo, los resultados se ilustran en la figura 2. Como se puede apreciar en la figura 2, el 12,5% de las Pymes se clasificaron en el 0 que corresponde a aquellas que no han iniciado su proceso de transformación digital; el 70,8% de las Pymes se catalogaron con Principiantes; solamente el 16,7% de estas Pymes quedaron ubicadas en el nivel de madurez 3 que corresponde a intermedio en la adopción y aplicación de las tecnologías de la Industria 4.0. Es de resaltar que ninguna de las Pymes logró clasificarse como experimentada, experta o de máximo rendimiento, que corresponden a los tres niveles superiores de madurez en industria 4.0, haciendo evidente la necesidad de intervenciones para avanzar hacia niveles superiores de madurez, aprovechando las oportunidades que ofrece la Industria 4.0 para mejorar su competitividad en el entorno económico global.



Fig. 2. Clasificación de las Pymes de Boyacá en los niveles de madurez del modelo IMPULS. Fuente: [30].

El análisis cuantitativo del nivel de madurez general para este grupo de Pymes industriales del sector metalmecánico por dimensiones del modelo IMPULS se presenta en la tabla 2, en donde se relacionan los promedios generales tanto para las seis dimensiones como para cada uno de los factores que comprenden cada una de estas dimensiones de madurez en industria 4.0.

Tabla 2: Análisis de dimensiones de madurez para las Pymes

Dimensión	Promedio Dimensión	Factor	Promedio Factor
Estrategia y organización	1,4	Estado de implementación de la estrategia de la Industria 4.0	1,4
		Inversiones relacionadas con la Industria 4.0	1,2
		Uso de la tecnología y gestión de la innovación	1,6
Fabrica inteligente	1,5	Modelado digital	1
		Equipo e infraestructura	1,7
		Uso de datos	1,5
		Sistemas de IT	1,8
Operaciones inteligentes	2,2	Uso de computación en la nube	3
		Seguridad de IT	2,5
		Procesos autónomos	1,8
		Intercambio de información	1,5
Productos inteligentes	1,1	Análisis de datos en la fase de uso	1,2
		Funcionalidades TIC complementarias	1
Servicios basados en datos	1	Proporción de los datos utilizados	1
		Proporción de los ingresos derivados de los servicios basados en datos	1
		Disponibilidad de los servicios basados en datos	1
Empleados	1,4	Esfuerzos de la empresa por adquirir nuevas habilidades.	1,4
		Competencias de los empleados	1,4

En cuanto a la primera dimensión, se considera que la industria 4.0 va más allá de aspectos tecnológicos generando oportunidades para desarrollar un nuevo

modelo de negocio. Como se observa en la tabla2, al evaluar la dimensión de estrategia se obtienen puntajes muy bajos indicando que estas Pymes necesitan una hoja de ruta para la implementación de la estrategia de la Industria 4.0 que contemple la operativización y revisión de la estrategia mediante un sistema de indicadores. Es de resaltar que el principal obstáculo en esta dimensión corresponde a la inversión debido a los recursos limitados de estas Pymes y las dificultades para obtener financiación.

La dimensión 2, relacionada con fabrica inteligente considera los sistemas ciberfísicos (SFC), que conectan los mundos físico y virtual mediante la comunicación a través de una infraestructura de TI. Como se aprecia en los resultados de la tabla 2, a nivel general la madurez de estas Pymes del sector metalmecánico de Boyacá se ubica en el nivel 1 como principiantes en lo relacionado con los indicadores de fábrica inteligente. Este resultado pone de manifiesto la necesidad de implementar estrategias para lograr el modelado digital mediante la recopilación, el almacenamiento y el procesamiento inteligente de datos en el proceso de producción de estas Pymes, que es el factor con menor puntuación dentro de esta dimensión. También se pone en evidencia la deficiente colaboración interempresarial en tiempo real entre los sistemas de producción, las TICs y las personas en estas Pymes. Es necesario implementar estrategias que garanticen esta colaboración y el procesamiento y análisis de datos para la toma de decisiones.

La tercera dimensión del modelo de madurez es operaciones inteligentes que hace referencia a los requisitos técnicos de producción y planificación de la producción necesarios para lograr la pieza de trabajo autocontrolada. Para las Pymes analizadas esta dimensión fue la de mayor puntuación ubicándolas de manera general en el nivel 2 o intermedio. Este resultado indica que el énfasis de los elementos de industria 4.0, por parte de las Pymes del sector metalmecánico de Boyacá se orienta a los aspectos técnicos relacionado con los sistemas de información, IoT y computación en la nube para hacer más eficientes sus sistemas de planificación de la producción (PPS) y la gestión de la cadena de suministro (SCM).

La cuarta dimensión del modelo IMPULS, hace relación a la capacidad de los productos para recopilar datos, conocer su proceso de producción y comunicarse con los sistemas de nivel superior con el fin de mejorar y guiar los procesos de producción de forma autónoma y en tiempo real. Esta dimensión

de productos inteligentes fue una de las de menor puntuación general en el grupo de Pymes analizadas, por lo tanto, para avanzar en la madurez de transformación digital 4.0 estas empresas deben incorporar funcionalidades de TICs complementarias en sus productos de tal forma que se pueda supervisar su estado e incorporar el análisis de datos en la fase de uso.

La quinta dimensión de este modelo de madurez en industria 4.0 corresponde a servicios basados en datos y fue la menor puntuación general para el grupo de Pymes participantes en este estudio. Este resultado indica que estas Pymes al no contar con datos de sus productos en la fase de uso pierden la oportunidad de incorporar modelos de negocio y optimizar los beneficios para el cliente mediante el mejoramiento de la posventa basándose en el análisis de los datos recopilados de los productos colocados en el mercado. Finalmente, la sexta dimensión de madurez del modelo IMPULS se relaciona con el grado de implementación de estrategias por parte de las Pymes para preparar a sus empleados para afrontar eficientemente los cambios laborales del entorno laboral de la industria 4.0. El puntaje general para el grupo de Pymes analizadas en este estudio las ubica en el nivel de principiante.

4. CONCLUSIONES

Al analizar el proceso de transformación digital, en el contexto de la industria 4.0, de un grupo de Pymes industriales del sector metalmeccánico de Boyacá – Colombia, se pudo evidenciar que los esfuerzos de estas organizaciones en los aspectos estratégicos de la industria 4.0 y operacionales son incipientes. Lo anterior considerando que más del 83% de las Pymes que participaron en este estudio quedaron ubicadas en los niveles 0 y 1 de madurez en industria 4.0 de acuerdo con los criterios del modelo IMPULS. Tan solo el 16,7% de estas Pymes se clasificó en el 2 o intermedio de este modelo de madurez. Es de resaltar que las Pymes clasificadas en el nivel intermedio corresponden a empresas que compiten en el mercado nacional y en el internacional, mientras que las Pymes clasificadas en los niveles más bajos del modelo compiten en el mercado regional colombiano.

Dentro de las seis dimensiones de madurez en industria 4.0 que componen el modelo IMPULS, la mejor calificada en este grupo de Pymes del sector metalmeccánico fue la de Operaciones inteligentes. Este resultado permite afirmar que estas Pymes se han orientado preferiblemente a la implementación

de requisitos técnicos para la planificación y el control de la producción y la logística en búsqueda de la integración de lo físico y lo virtual en estos procesos. Dentro de la dimensión de operaciones inteligentes los aspectos técnicos más utilizados por este grupo de Pymes corresponden al uso de computación en la nube y los sistemas de seguridad informática. Esto sin olvidar que el grupo de Pymes en general se ubican mayormente como principiantes en su proceso de transformación digital en industria 4.0, según los resultados de aplicar el modelo IMPULS:

Como dimensiones de madurez en industria 4.0 con menor puntuación en este grupo de Pymes se destacan productos inteligentes y servicios basados en datos. Este resultado refleja la deficiencia de estas Pymes para lograr una producción automatizada, flexible y eficiente, destacando que deben buscar estrategias para integrar componentes TICs en los productos con el ánimo de recopilar datos sobre su entorno y su propio estado para mejorar la comunicación entre clientes y fabricantes. Así mismo, es importante para estas Pymes avanzar en su proceso de digitalización empresarial en recopilar datos posventas en búsqueda de optimizar los beneficios para el cliente y lograr iniciar un proceso de integración empresarial su cadena de abastecimiento.

Como obstáculos para avanzar en la transformación digital de estas Pymes del sector metalmeccánico se pueden mencionar 1) la escasa inversión debido a los limitados recursos de estas empresas y su dificultad para obtener financiación; 2) la falta de sistemas de modelado digital que permitan la recolección, procesamiento y análisis inteligente de datos en cada etapa del proceso de producción mediante sistemas ciberfísicos; 3) la falta de incorporación de complementos TICs en los productos para la generación y análisis de datos enfocados en mejorar la comunicación en la cadena de abastecimiento y la experiencia del cliente y ; 4) la falta de visión integral de industria 4.0 como oportunidad para desarrollar un nuevo modelo de negocio que además de mejorar los productos y procesos existentes, abra la posibilidad de una nueva cultura organizacional que se oriente a la eficiencia y competitividad en un ambiente global caracterizado por la digitalización.

Finalmente, los autores hacen explícita las limitaciones relacionadas con el tamaño de la muestra y con el diseño muestral por conveniencia. Estas limitaciones llaman a la prudencia a la hora de

generar generalizaciones de los resultados obtenidos en este estudio.

REFERENCIAS

- [1] Q. Chen, W. Zhang, N. Jin, X. Wang, and P. Dai, "Digital Transformation Evaluation for Small- and Medium-Sized Manufacturing Enterprises Using the Fuzzy Synthetic Method DEMATEL-ANP," *Sustainability* 2022, Vol. 14, Page 13038, vol. 14, no. 20, p. 13038, Oct. 2022, doi: 10.3390/SU142013038.
- [2] N. S. S. Carrero, N. M. A. Quintana, and L. M. S. Jaimes, "Lineamientos desde la industria 4.0 a la educación 4.0: caso tecnología IoT," *REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGIAS DE AVANZADA (RCTA)*, vol. 1, no. 39, pp. 81–92, Feb. 2022, doi: 10.24054/RCTA.V1I39.1379.
- [3] N. S. S. Carrero, N. M. A. Quintana, and L. M. S. Jaimes, "Lineamientos desde la industria 4.0 a la educación 4.0: caso tecnología IoT," *REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGIAS DE AVANZADA (RCTA)*, vol. 1, no. 39, pp. 81–92, Feb. 2022, doi: 10.24054/RCTA.V1I39.1379.
- [4] L. Joyanes Aguilar, *La cuarta revolución industrial "Industria 4.0,"* 1a ed., vol. 1. Madrid, España: Marcombo, 2017. Accessed: Jun. 21, 2025. [Online]. Available: https://www.marcombo.com/libro/libros-tecnicos-de-arte-y-cientificos/informatica-libros-tecnicos-y-cientificos/otros-informatica/industria-4-0-la-cuarta-revolucion-industrial/?srsltid=AfmBOoqKfQoiexJ_TFM C5QSoYOpkPhB2egT76enGsnzg_LfwOWn wSk4M
- [5] J. C. Ferreri, *Selección de escritos sobre inteligencia artificial. Inteligencia artificial: Algunos aspectos de su impacto*, Primera., vol. 1. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina: Academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires, 2022. Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://www.ciencias.org.ar/user/CETI/Compilado%20CETI%20final.pdf>
- [6] H. Gimpel, S. Hosseini, R. Huber, L. Probst, M. Röglinger, and U. Faisst, "Structuring Digital Transformation: A Framework of Action Fields and its Application at ZEISS," *Journal of Information Technology Theory and Application (JITTA)*, vol. 19, no. 1, Mar. 2018, Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://aisel.aisnet.org/jitta/vol19/iss1/3>
- [7] L. Asunción Pérez Domínguez, J. Roberto Ávila Lopez, and D. Luviano Cruz Profesor-Investigador, "Tendencia de la Industria 4.0 comparado con Industria 5.0," *Mundo FESC*, vol. 13, no. 25, pp. 7–19, Jan. 2023, doi: 10.61799/2216-0388.1248.
- [8] L. Li, F. Su, W. Zhang, and J. Y. Mao, "Digital transformation by SME entrepreneurs: A capability perspective," *Information Systems Journal*, vol. 28, no. 6, pp. 1129–1157, Nov. 2018, doi: 10.1111/ISJ.12153;SUBPAGE:STRING:ACCESS.
- [9] J. K. Nwankpa and P. Datta, "Balancing exploration and exploitation of IT resources: The influence of Digital Business Intensity on perceived organizational performance," *European Journal of Information Systems*, vol. 26, no. 5, pp. 469–488, Sep. 2017, doi: 10.1057/S41303-017-0049-Y;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:TJIS20;WGROU:STRING:PUBLICATION.
- [10] V. Sánchez-Castillo and P. Antropología, "Aplicaciones de la tecnología Internet of Things en las ciencias ambientales: un estudio mixto en la base de datos Scopus," *Respuestas*, vol. 30, no. 1, pp. 51–66, Dec. 2025, doi: 10.22463/0122820X.4689.
- [11] F. Caputo, F. Fiano, T. Riso, M. Romano, and A. Maalaoui, "Digital platforms and international performance of Italian SMEs: an exploitation-based overview," *International Marketing Review*, vol. 39, no. 3, pp. 568–585, Jun. 2022, doi: 10.1108/IMR-02-2021-0102/FULL/XML.
- [12] M. I. Guerrero-Molina, Y. A. Vásquez-Suárez, and D. M. Valdés-Mosquera, "Industria 4.0, aplicación y tecnologías de la información en instalaciones portuarias de américa latina," *AiBi Revista de Investigación, Administración e Ingeniería*, vol. 12, no. 1, pp. 230–243, Jan. 2024, doi: 10.15649/2346030X.3468.
- [13] Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial ONUDI, "Informe sobre el desarrollo industrial 2024," 2025, Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: <https://www.unido.org/sites/default/files/unido-publications/2024-02/IDR24-Overview-SP.pdf>
- [14] M. K. Borštnar and A. Pucihar, "Multi-Attribute Assessment of Digital Maturity of SMEs," *Electronics* 2021, Vol. 10, Page 885,

- vol. 10, no. 8, p. 885, Apr. 2021, doi: 10.3390/ELECTRONICS10080885.
- [15] J. Jeansson and K. Bredmar, "Digital Transformation of SMEs: Capturing Complexity," *BLED 2019 Proceedings*, Jan. 2019, doi: 10.18690/978-961-286-280-0.28.
- [16] S. U. Rehman, F. Jabeen, K. Shahzad, A. Riaz, and A. Bhatti, "Industry 4.0 technologies and international performance of SMEs: mediated-moderated perspectives," *International Entrepreneurship and Management Journal*, vol. 21, no. 1, pp. 1–32, Dec. 2025, doi: 10.1007/S11365-024-01048-3/TABLES/6.
- [17] C. Ünal, C. Sungur, and H. Yildirim, "Application of the Maturity Model in Industrial Corporations," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 15, p. 9478, Aug. 2022, doi: 10.3390/SU14159478/S1.
- [18] A. Marrucci, R. Rialti, and M. Balzano, "Exploring paths underlying Industry 4.0 implementation in manufacturing SMEs: a fuzzy-set qualitative comparative analysis," *Management Decision*, vol. 63, no. 6, pp. 1936–1959, Jun. 2023, doi: 10.1108/MD-05-2022-0644/FULL/PDF.
- [19] R. Ricci, D. Battaglia, and P. Neirotti, "External knowledge search, opportunity recognition and industry 4.0 adoption in SMEs," *Int J Prod Econ*, vol. 240, p. 108234, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.IJPE.2021.108234.
- [20] A. de M. Santos, Â. M. de O. Sant'Anna, A. S. Barbosa, A. M. Becker, and N. F. Ayala, "Multi-criteria decision-making model for sustainability functions integrated Industry 4.0 technologies within small and medium enterprises in emerging countries," *International Journal of Productivity and Performance Management*, May 2024, doi: 10.1108/IJPPM-10-2023-0557/FULL/PDF.
- [21] D. A. Contreras Stucchi and W. L. Vasquez Robles, "Implementación de un plan de mejora para la planificación de proyectos a través de la metodología lean para incrementar la eficiencia de una pyme metalmecánica del sector industrial en Lima," 2024.
- [22] E. Arriola Ruiz, "La adopción de la Industria 4.0 en Ciudad Juárez y su impacto sobre las empresas de manufactura y sus trabajadores.," 2022, *Universidad Autónoma de Ciudad Juárez*. Accessed: Jun. 23, 2025. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.11961/6197>
- [23] A. Guimarães Rehbein Satlher, P. Reis, and A. J. Marques, "Bibliometric Analysis of Studies on Industry 4.0 Maturity Assessment in SMEs," *Millenium, ISSN-e 1647-662X, N°. Extra 16, 2025 (Ejemplar dedicado a: Especial N°16)*, no. 16, p. 18, 2025, Accessed: Jun. 19, 2025. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9991789&info=resumen&idioma=ENG>
- [24] Ministerio de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones de Colombia, "Aspectos Básicos de la Industria 4.0." Accessed: Jun. 18, 2025. [Online]. Available: <https://colombiatic.mintic.gov.co/679/w3-article-124767.html>
- [25] J. Marcela, L. Fernández, D. Liseth, B. Barrero, L. Andrea, and R. Rojas, "Industria 4.0: el reto para las pymes manufactureras de Bogotá, Colombia," *Revista Mutis*, vol. 12, no. 1, Jan. 2022, doi: 10.21789/22561498.1784.
- [26] J. Coronado, J. Díaz, I. Paredes, M. Martínez, and F. Otero, "Estado del arte de la situación de la industria 4.0 en Colombia con énfasis en el sector industrial metalmecánico en la ciudad de Barranquilla.," *Universidad Simón Bolívar, Barranquilla, Colombia*, 2022. Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://bonga.unisimon.edu.co/server/api/core/bitstreams/21b3111c-c353-4914-9c05-063b7d7b81f6/content>
- [27] D. S. Muñoz-Pinzón, K. T. Valencia-Rivero, Y. P. Caviativa-Castro, and J. S. Castillo-Bustos, "Estado actual de la adopción de la industria 4.0 en pymes colombianas: desafíos y oportunidades," *Revista Politécnica*, vol. 20, no. 39, pp. 99–118, Mar. 2024, doi: 10.33571/RPOLITEC.V20N39A7.
- [28] A. Sajjad *et al.*, "Assessment by Lean Modified Manufacturing Maturity Model for Industry 4.0: A Case Study of Pakistan's Manufacturing Sector," *IEEE Trans Eng Manag*, vol. 71, pp. 6420–6434, 2024, doi: 10.1109/TEM.2023.3259005.
- [29] K. Lichtblau *et al.*, "INDUSTRIE 4.0 READINESS".
- [30] "Industrie 4.0-Readiness-Check." Accessed: Jun. 23, 2025. [Online]. Available: <https://www.industrie40-readiness.de/?lang=en>
- [31] I. Etikan, S. A. Musa, and R. S. Alkassim, "Comparison of Convenience Sampling and Purposive Sampling," *American Journal of Theoretical and Applied Statistics 2016, Volume 5, Page 1*, vol. 5, no. 1, pp. 1–4, Dec. 2015, doi: 10.11648/J.AJTAS.20160501.11.