

PYMES E INDUSTRIA 4.0, DESARROLLO Y PLANTEO DE UN MODELO DE MEDICIÓN

SMEs AND INDUSTRY 4.0: DEVELOPMENT AND PROPOSAL OF A MEASUREMENT MODEL

Blanc, Rafael Lujan ¹; **Lepratte, Leandro** ²; **Ruhl Leonardo** ³; **Alvisto, Francisco** ⁴.

rafaellujanblanc@yahoo.com.ar, llepratte@gmail.com, leonardoruhl@gmail.com, alvistof@gmail.com

^{1,2,3,4} UTN - FRCU, Ing. Pereyra 676, CP: 3260, Concepción del Uruguay, Argentina.

Recibido 21/05/2024; Aceptado: 11/07/2024

Resumen: Las tecnologías de la Industria 4.0 son cruciales para la competitividad empresarial, por lo que es importante medir su nivel de implementación. Los modelos de madurez evalúan el grado de adopción de estas tecnologías, permitiendo diagnosticar y planificar mejoras tecnológicas en las industrias. Sin embargo, debido a su complejidad metodológica y la necesidad de conocimientos especializados, estos modelos son difíciles de aplicar en pymes. Nuestro trabajo propone un instrumento de diagnóstico y una metodología para evaluar la madurez en la implementación de tecnologías de Industria 4.0 en pymes. Se realiza primero un análisis de los modelos de madurez globales, luego se desarrolla un instrumento para evaluar el grado de avance en la aplicación de tecnologías de automatización y análisis de datos, y finalmente se aplica este instrumento a doce pymes argentinas, discutiendo los resultados obtenidos.

Palabras Claves: modelos de madurez; pymes; metodología de medición.

Abstract: Industry 4.0 technologies are crucial for business competitiveness, making it important to measure their level of implementation. Maturity models assess the degree of adoption of these technologies, enabling the diagnosis and planning of technological improvements in industries. However, due to their methodological complexity and the need for specialized knowledge, these models are challenging to apply in SMEs. Our work proposes a diagnostic tool and a methodology to evaluate the maturity of Industry 4.0 technology implementation in SMEs. We first conduct an analysis of global maturity models, then develop an instrument to assess the progress in applying automation and data analysis technologies, and finally apply this instrument to twelve Argentine SMEs, discussing the results obtained.

Keywords: Maturity models; Small and medium-sized enterprises (SMEs); Measurement methodology.

1. Introducción

La Industria 4.0 (I40), también conocida como la Cuarta Revolución Industrial, es un concepto que describe la convergencia de tecnologías digitales, físicas y biológicas para transformar fundamentalmente los procesos de producción y manufactura en la sociedad contemporánea. La Industria 4.0 tiene como objetivo mejorar la eficiencia, la flexibilidad y la capacidad de adaptación de las empresas al permitir la recopilación y el análisis en tiempo real de datos, lo que facilita la toma de decisiones informadas. Además, promueve la personalización de productos, la reducción de residuos y la optimización de recursos. Esta transformación tiene un profundo impacto en la economía global, la fuerza laboral y la competitividad de las

organizaciones, y se espera que continúe moldeando la forma en que producimos y consumimos bienes y servicios en el futuro (Casalet, 2018; AA.VV., 2021).

Las herramientas y enfoques de I40 se difunden dado que algunos cambios logran impulsarla. Entre ellos, se destacan el mejoramiento del hardware de procesamiento, mejoras del almacenamiento, expansión del software de control, el surgimiento y crecimiento redes de comunicación de datos tanto físicas como móviles. Estos fenómenos son acompañados por caídas de los costos de implementación y mantenimiento. Por otro lado, la evolución de las computadoras personales y la expansión de Internet, genera un proceso de cierre a nivel tecnológico en los dispositivos móviles que permiten tanto a empresarios como clientes tener una comunicación fluida (Verkasalo, 2009; Levä, Hämmäinen y Kilkki, 2009; Yadav, 2017).

Las tecnologías que componen la I40 entre otras son: big data, internet de las cosas, robotización, inteligencia artificial, aprendizaje automático, impresión 3D, sensores, realidad virtual, servicios en la nube, y otras. Estas tecnologías están asociadas a la digitalización y la conectividad. Que están cambiando: la forma de producir, los modelos de negocios, el mercado laboral y las tareas que llevan adelante los trabajadores (Hermann, Pentek y Otto, 2016; Reiner y Jürgen, 2016; Mittal et al., 2018; Rauch et al., 2019; Ghobakhloo et al., 2021).

Con el fin de comprobar el grado de avance de las empresas en los procesos de implementación de I40 cobran importancia los modelos de madurez (MM). Estos modelos de diagnóstico y análisis con una fuerte impronta ingenieril funcionan como guías para la implementación de tecnologías y que establecen estadios dentro de la digitalización y automatización. Los mismos implican un examen de la organización para identificar brechas de adopción, que van desde procesos dentro de la organización a impactos tecnológicos y metodológicos en el negocio y hasta por los recursos humanos y la gestión de la organización. Sin embargo, los MM se han diseñado en líneas generales para ser aplicados a grandes firmas y, por lo tanto, su adecuación al contexto de las pymes es un requerimiento planteado a nivel global (Schuh et al, 2017; Nick, Szaller y Várgedó, 2020).

Este trabajo tiene por objetivo por un lado exponer los MM más utilizados en la actualidad, y por otro el desarrollo otro MM adaptado a pymes y mostrar sus resultados de medición en una muestra de quince empresas de Argentina.

El trabajo se estructura de la siguiente forma a continuación se exponen los antecedentes de los MM, luego se presenta la metodología del trabajo seguido de la descripción del modelo de medición y sus resultados en el apartado resultados. Finalmente, en la discusión y conclusiones se reflexiona sobre lo alcanzado hasta el momento y próximos pasos para la mejora de la medición e implementación.

2. Antecedentes

Los MM implican un análisis minucioso de la organización para identificar brechas y debilidades en la adopción de tecnologías 4.0. El diagnóstico se lleva a cabo en toda la organización, en cada etapa de los procesos y se evalúa los requisitos que son necesarios para que la firma adopte la I40. Los datos se obtienen a través de cuestionarios que tratan sobre el estado de la transformación digital, el análisis de los procesos principales y entrevistas con el personal involucrado para identificar brechas tanto de los procesos como de las skills. El resultado del análisis se utiliza para estimar el nivel de madurez tecnológica de la organización y sus áreas correspondientes (Canetta, Barni y Montini, 2018). Las métricas de nivel de madurez pueden permitir la comparación entre varias organizaciones consideradas en términos de los niveles. Es importante su aporte para el desarrollo de las hojas de rutas (planificaciones), que permiten a las empresas iniciar la transformación en post de la implementación de la I40.

2.1. Modelo Acatech

Uno de los MM más utilizados es el de Acatech perteneciente a la Academia Alemana de Ciencia e Ingeniería. (Schuh et al., 2017; Kagermann, Wahlster y Helbig, 2013; Schmitz, 2020) permite a las organizaciones identificar su estado respecto a la etapa de digitalización hacia la I40. Las evaluaciones se realizan en el contexto de la organización, con un enfoque en los procesos de fabricación y el ambiente sociotécnico asociado al mismo. El proceso de aplicación es en tres fases: fase de diagnóstico, dos el plan de mejoras o desarrollo de capacidades, finalmente planificación para su aplicación. Los niveles resultantes del instrumento de medición son seis, siendo el primero el de menor desarrollo y el sexto el de máximo. Las denominaciones de los niveles son: Informatización, Conectividad, Visibilidad, Transparencia, Capacidad Predictiva y finalmente Adaptabilidad.

Para introducir al modelo Acatech en la Tabla 1 se detallan las áreas y sus componentes, acompañados de una breve descripción a fin de contextualizar el modelo.

Tabla 1 - Áreas estructurales Acatech.

Áreas	Componentes	Descripción
Recursos	Capacidades digitales	Competencias de los empleados en información digital, presencias de sensores y actuadores para digitalización en tiempo real de datos y el procesamiento descentralizado de los datos.
	Comunicaciones estructuradas	Sistemas de comunicación eficientes y trazables de unívoca interpretación
Sistemas de información	Autoaprendizaje y procesamiento	Calidad y disponibilidad de la información (procesamiento, análisis y almacenamiento local y en nube)
	Integración del sistema de información	Se analiza los sistemas de información en cuanto a su nivel de integración, interfaces, manejo de datos y ciber seguridad.
Estructura Organizacional	Organización Interna orgánica	Analiza el funcionamiento de los recursos humanos y sus formas de trabajo (manejo ágil de grupos y equipos de trabajo, los sistemas de motivación de empleados, toma de decisiones liderazgo, comunicación)
	Colaboración con la cadena de valor	Analiza la estructura de recursos humanos, si es funcional al modelo de valor del cliente y si está enfocada en lograr ventajas competitivas, las competencias e interacción de los proveedores y empresa en post de satisfacer a los clientes.
Cultura	Apoyo al cambio	Reconocimiento y uso de los errores como enseñanzas, sistemas de innovación abierta y aprendizaje basado en datos para la toma de decisiones. Desarrollo profesional continuo y propensión al cambio.
	Colaboración social	Sistema democrático de liderazgo, confianza en la comunicación y el sistema social, modelos abiertos y colaborativos de interacción.

Fuente: elaboración propia en base a artículos sobre MM

Las cuatro áreas estructurales anteriores (Tabla 1) componen las partes de las áreas funcionales, por lo cual se evalúa su funcionamiento dentro de las mismas (Tabla 2).

Tabla 2 - Áreas funcionales Acatech.

Área funcional	Descripción
Desarrollo	Aspectos relacionados a la creación y puesta en marcha de nuevos productos y servicios.
Producción	Aspectos relacionados a la actividad de la empresa y a los servicios relacionas en lo relativo a su realización.
Logística	Procesos relacionados a los movimientos tanto internos como externos de inputs y outputs de la producción.

Servicios	Servicios que dan soporte a las diferentes áreas de la empresa a fin de que puedan cumplir sus objetivos.
Marketing y ventas	Actividades relacionadas a la actividad comercial y al seguimiento de clientes.

Fuente: elaboración propia en base a artículos sobre MM

2.2. Modelo industria inteligente de Singapur (SIRI)

El Índice de preparación para la industria inteligente de Singapur (SIRI) (SEDB, 2020a; SEDB, 2020b) es un MM que se creó para ayudar a las empresas a comprender los beneficios de la I40 mediante la identificación de las debilidades y los pasos necesarios para la adopción. Consta de cuatro pasos: primero aprender conceptos claves y crear un lenguaje común, segundo evaluar los niveles de madurez actuales de la I40 de las instalaciones existentes, tercero diseñar una estrategia integral de transformación y una hoja de ruta de implementación, cuarto puesta en marcha de las iniciativas de transformación. Se compone de tres áreas fundamentales: Tecnología, Procesos y Organización, que están respaldadas por ocho componentes claves. Para evaluar a las empresas que utilizan SIRI, a las tres áreas fundamentales (Tecnología, Procesos y Organización) se le incorporan ocho componentes, como se muestra en las Tablas 3 y 4.

Tabla 3 - Áreas estructurales SIRI.

Áreas	Componentes	Descripción
Tecnología	Automatización	Analizar la adopción de tecnología para monitorear, controlar y ejecutar la producción de productos y servicios
	Conectividad	Medir el estado de interconexión entre equipos, máquinas y sistemas para la comunicación y el intercambio de datos activos.
	Inteligencia	Analizar el procesamiento y análisis de datos
Procesos	Operaciones	Analizar la planificación y ejecución de procesos para producir bienes y servicios.
	Cadena de abastecimiento	Analizar, desde el punto de origen hasta el consumo, la planificación y gestión de las materias primas y el inventario de bienes y servicios de una empresa.
	Ciclo de vida producto	Analizar las etapas por las que atraviesan los productos, desde el diseño hasta la retirada del mercado
Organización	Disponibilidad de talento	Analizar la capacidad de una empresa para permitir que la fuerza laboral mejore e impulse la adopción de la I40
	Estructura y gerenciamiento	Analizar las políticas de una empresa para influir en los equipos e implementar iniciativas. Además, analizar la capacidad de una empresa para fomentar el trabajo en equipo y el liderazgo para lograr objetivos comunes.

Fuente: elaboración propia en base a artículos sobre MM

Tabla 4 - Dimensiones modelo SIRI.

Dimensión	Área estructural	Descripción
Integración vertical	Proceso -Operaciones	Evalúa la integración de procesos y sistemas en la jerarquía para la conectividad de un extremo a otro.
Integración horizontal	Proceso- Cadena de abastecimiento	Evalúa la integración organizativa de los procesos y las partes interesadas en la cadena de valor.
Ciclo de vida del producto integrado	Proceso - Ciclo de vida del producto	Evalúa la integración organizativa de los procesos y las partes interesadas en la cadena de valor. Analiza la recopilación, la gestión y el análisis de

		datos para cada etapa del ciclo de vida del producto
Automatización, Planta de producción, Empresa e instalación	Tecnología – Automatización, conectividad e inteligencia.	Evalúa el alcance y la integración de la automatización y los sistemas en las capas de la planta, la empresa y las instalaciones.
Conectividad: planta, empresa e instalación	Tecnología – Automatización, conectividad e inteligencia.	Evalúa la interconectividad entre equipos, máquinas y sistemas en todo el piso de producción, la empresa y las instalaciones.
Inteligencia: planta, empresa e instalación	Tecnología – Automatización, conectividad e inteligencia.	Evalúa la capacidad de los sistemas de tecnologías de la información (TI) y tecnología de operaciones (OT) en los niveles de planta, empresa e instalaciones en la identificación, el diagnóstico y la adaptación de desviaciones.
Aprendizaje y desarrollo de la fuerza laboral	Organización - Disponibilidad de talento	Evalúa el programa de aprendizaje y desarrollo de una empresa en términos de calidad.
Competencia de liderazgo	Organización - Disponibilidad de talento	Evalúa la gestión de una empresa para saber si está preparada para aprovechar nuevos conceptos y tecnologías para seguir siendo relevante y competitiva.
Colaboración entre empresas e interna	Organización - Estructura y gerenciamiento	Evalúa el proceso de una empresa para permitir que los equipos internos y externos colaboren en un objetivo común.
Estrategia y gobernanza	Organización - Estructura y gerenciamiento	Evalúa las políticas de una empresa con respecto a los objetivos a largo plazo, como la identificación de prioridades y hojas de ruta tecnológicas.

Fuente: elaboración propia en base a artículos sobre MM

2.3. Modelo IMPULS Preparación para Industria 4.0

Es una herramienta autoadministrada evalúa a las empresas el estado de avance en industria 4.0, pertenece a VDMA (Asociación de la Industria de Ingeniería Mecánica de Alemania) y evalúa a las empresas interesadas en seis "dimensiones" diferentes: Estrategia y organización, Fábrica inteligente, Operaciones inteligentes, Productos inteligentes, Servicios basados en datos y Empleados. La escala resultante va desde 0 (externo) hasta 5 (máximo desempeño) (Lichtblau et al., 2015; Yevgeniy et al., 2022).

La encuesta de evaluación consta de un total de veinticuatro preguntas en total para seis dimensiones relacionadas (Tabla 5) que tienen formato Likert de cinco niveles y se relevan datos para posicionar la firma en el contexto sectorial como la cantidad de empleados y el volumen de facturación.

Su público objetivo son ejecutivos y directores técnicos de pequeñas y medianas empresas que están comenzando en la transformación digital como a las que están creciendo y se encuentran en estadios intermedios y avanzados. Las firmas avanzadas pueden utilizar la herramienta como benchmarking para verificar su autopercepción en cuanto al nivel de digitalización en cuanto al rubro de pertenencia.

Tabla 5 - Dimensiones modelo IMPULS.

Dimensiones	Componentes
Estrategia y organización	Estrategia Inversiones Gestión de la innovación
Fábrica inteligente	Modelización digital Infraestructura de equipos Uso de datos Sistemas informáticos
Operaciones inteligentes	Uso de la nube. Seguridad informática Procesos autónomos Intercambio de información
Productos inteligentes	Análisis de datos en fase de uso y funcionalidades complementarias de las TIC
Servicios basados en datos	Porcentaje de datos utilizados Porcentaje de ingresos. Servicios basados en datos.
Empleados	Adquisición de habilidades. Conjuntos de habilidades de los empleados

Fuente: elaboración propia en base a artículos sobre MM

2.4. Autodiagnóstico INDTECH

En el marco del Plan de Desarrollo Productivo Argentina 4.0 se desarrolló el Autodiagnóstico de Madurez Digital INDTEch. Es una herramienta desarrollada en colaboración público privada durante el año 2022 que está conformada por la SEPYPE, la Agencia Nacional de Promoción de la Investigación, el Desarrollo Tecnológico y la Innovación (Agencia I+D+i); la Unión Industrial Argentina (UIA); la Asociación de Industrias Metalúrgicas de la República Argentina (ADIMRA), la Cámara Argentina de Industrias Electrónicas, Electromecánicas y Luminotécnicas (CADIEEL), y el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI). Se trata de una herramienta online¹ que permite a las firmas conocer su grado de digitalización de su negocio, saber su posicionamiento por sector productivo y regional. El resultado del autodiagnóstico arroja cinco niveles que van desde 0 (sin Industria 4.0) a 4 (estadio avanzado de aplicación). En la Tabla 6 se presentan las dimensiones y descripción del sistema de INDTECH.

Tabla 6 - Dimensiones autodiagnóstico INDTECH.

Dimensiones	Descripción
Estrategia Y Modelo De Negocio	Se realizan cinco preguntas sobre decisiones y responsables de las tecnologías 4.0
Estructura, RR.HH. y Cultura	Siete preguntas sobre las características de los RR.HH. y cuestiones asociadas.
Cadenas De Valor	Releva la posición de la firma dentro de su cadena de valor mediante cuatro preguntas.
Sistemas de Información y Recursos Tecnológicos	Examina cuestiones relevantes sobre la toma y utilización de los datos de negocio mediante cinco preguntas.
Productos y Servicios	Explora como se identifican, se digitalizan y se comunica la información en cuestiones relativas a los productos mediante seis preguntas.
Procesos	Identifica cuestiones relativas a indicadores, trazabilidad, mantenimiento y automatización de la planta por medio de cinco preguntas.

Fuente: elaboración propia en base a artículos sobre MM

3. Metodología

En el presente trabajo se presentan dos procesos metodológicos el primero a) desarrollo del instrumento de medición y el segundo b) aplicación del modelo de medición y análisis de resultados.

¹ Disponible en: <https://indtech.ar/home.htm>

3.1. Desarrollo del instrumento de medición

La metodología adoptada para el desarrollo del modelo de madurez de este estudio se basó en Acatech y Siri (Schuh et al., 2017; Kagermann, Wahlster y Helbig, 2013; Schmitz, 2020; SEDB, 2020a; SEDB, 2020b). Estos son aplicables a industrias heterogéneas lo cual los hace convenientes como referencia de medición de I40. Para la realización del modelo se propuso una secuencia de *cinco etapas iterativas*. Las etapas de diseño y cogeneración del modelo fueron las siguientes: E1 Objetivo y definición, E2 Diseño instrumento de medición, E3 Componentes del modelos y validación, E4 Implementación y E5 Publicación.

Etapas 1 - Objetivo y definición, se consideraron las definiciones del ámbito del modelo y la combinación de definiciones que configuran las fronteras de los componentes del mismo. Las principales definiciones se focalizan las características de las empresas de tipo pyme. En base a las mismas se definió un instrumento sencillo y entendible para la organización, de fácil aplicación y que permita indicar un grado de desarrollo en I40.

Etapas 2 - Diseño del instrumento de medición, a partir de lo expuesto en la E1 se realizó un primer formulario piloto que cuenta con cinco bloques de preguntas de diagnóstico: A) Hardware y Redes, B) Recursos Humanos, C) Software y Sistemas de Información, D) Producto y F) Cultura y Estrategia. Luego se seleccionaron las variables contenidas en cada bloque.

Etapas 3 - Componentes del modelos y validación, el formulario es sometido a diferentes procesos como los siguientes: adaptación cultural, consistencia interna, escala y especificidad de las variables, validez de las variables tanto para expertos como población objetivo. Durante estos procesos se realizó un pre test del instrumento en cinco casos² a fin de detectar errores de interpretación por parte de los encuestados, y dificultades de carga y errores en alternativas y valores de las variables. Además, fue sometido a la valoración de expertos conformados por profesionales pertenecientes a empresas de implementación de tecnología 4.0³.

Etapas 4 – Implementación, actualmente se encuentra en la etapa de utilización del formulario en la medición⁴. Por otra parte, se trabaja en el diseño de la metodología de consolidación de resultados escalas, niveles y pesos asignados a los resultados.

Fase 5 – Publicación, finalmente se liberará el formulario y la metodología de medición para su utilización por empresarios y académicos para su mejora y como herramienta de diagnóstico.

3.2. Aplicación del modelo de medición y análisis de resultados

A fin de cumplir con la etapa 4 de implementación del instrumento de medición se realizó un muestreo estratificado por conveniencia, a fin de representar el estado de avance de las empresas radicadas en las provincias de Entre Ríos y Santa Fe (Argentina). Además, se utilizó criterios de tamaño para que cumplan con ser pymes y que pertenezcan a diferentes rubros manufactureros.

Se aplicó un formulario único con encuestador en forma presencial, y en las firmas de mayor porte hubo instancias auto administradas para luego efectuar un chequeo de la información por parte de un encuestador. En la instancia presencial a su vez se efectuó un chequeo de los datos relevados en el formulario con identificación de las

² Los cinco casos fueron seleccionados por un diseño aleatorio simple son pymes del sector de la provincia de Entre Ríos y Santa Fe y se realizó en el marco del proyecto “Evaluación y diseño de modelos de madurez para industria 4.0 orientados a pymes”.

³ Se presento el formulario a tres empresas de implementación de soluciones tecnológicas y a cinco profesionales independientes de este sector a fin de evaluar su pertinencia.

⁴ Se está aplicando a firmas actualmente; se encuentran relevados quince casos de diferentes rubros pertenecientes al nivel pymes. Se pretende alcanzar veinte casos que sean de diversos tamaño y nivel tecnológico a fin de analizar la variabilidad de resultados del instrumento.

tecnologías mencionadas y un análisis cualitativo de las mismas para ajustar el respectivo módulo de análisis del nivel de madurez.

Se realizó un análisis de datos primarios de firmas para lo cual fueron relevadas 15 (quince) durante el segundo semestre del año 2022 y el primero del año 2023. A partir de los mismos, se realiza un análisis descriptivo de estado de implementación de la I4.0 con el fin de lograr un estado de situación en cuanto a los modelos actuales de producción industrial.

A continuación, en el apartado resultados se describe parte de la Etapas 4 Implementación y Etapa 5 del diseño de la metodología consolidación de resultados escalas, niveles y pesos asignados a los valores de las variables a fin exponer los procedimientos a otros interesados para obtener feedback para la mejora.

5. Resultados

5.1 Desarrollo del instrumento de medición

Para plantear una alternativa a los modelos de mayor complejidad como SIRI y ACATECH se propone un modelo de complejidad media que abarca cuatro grandes dimensiones: Hardware, Software, Recursos Humanos y Estrategia. Para el análisis de las mismas se realizará un relevamiento mediante un formulario semi cerrado a fin de evaluar cada dimensión y llevar a cabo un diagnóstico en conjunto del estado de la firma. A continuación, en la Tabla 7 se presentan los bloques del modelo.

Tabla 7 - Bloques del modelo simplificado de diagnóstico*.

Software	Hardware
Presencia y nivel de uso de: Sistemas SCADA; Sistemas MES; Sistemas MOM; Sistemas MRP II; Sistemas ERP; Sistemas CRM. Software de simulación y análisis estadístico, Software de programación (python y r). Nivel de uso de los datos recolectados por lo sistemas de software.	Redes de comunicación (físicas e inalámbricas). Servidores (internos y/o cloud). Hardware de control. Interfaces de control. Sistemas identificación (QR, Barra, Rfid). Manufactura aditiva. Robótica. Nivel de interacción de los apartados anteriores con el software.
RR.HH.	Producto
Disponibilidad de profesionales relacionados a I40, Cantidad y dedicación a la firma. Contratación de consultoría o staff en I40. Entrenamiento en temática de I40. Debilidades actuales del personal en relación a I40.	Es inteligente de alguna forma: Posee sensores; Posee memoria; Almacena datos de uso; Almacena datos de estado y ubicación; Comunica datos de estado y ubicación; Comunica datos de uso.
Cultura y Estrategia	
Interés y objetivos definidos por la gerencia en transformación hacia la I40. Conocimiento de su nivel tecnológico. Conocimiento de los líderes de su sector. Sistema de vigilancia tecnológica. Nivel de inversión en I40. Interés o propuestas de incrementar el nivel tecnológico hacia I40 del producto y/o servicios.	

*Los componentes son enunciados generalizados de los contenidos dado que debido a cantidad es complejo agruparlos dentro de una tabla. Fuente: elaboración propia.

Considerando la bibliografía sobre I40 y los modelos de madurez analizados se puede plantear que una empresa tiene cuatro estadios (Tabla 8). El primero I es la ausencia de tecnologías 4.0 en el cual no se cuenta con los drivers para esta industria como son el hardware y el software necesario. Estadio II en donde se posee los drivers y se toman datos, pero se hace uso escaso o básico de los mismos (indicadores sencillos). En el estadio III rutinas avanzadas la empresa posee datos y personal con capacidad de hacer uso de los mismos en modelos de predicción, simulación y otros análisis. Estas rutinas le permiten no solo percibir la situación actual si no proponer mejoras a futuro. Finalmente, en el estadio IV expansión la empresa tiene incorporado el uso de tecnologías como parte de la lógica de negocio y tiene una política de difusión de la misma hacia sus proveedores y clientes logrando un proceso de digitalización amplio.

Tabla 8 - Comportamiento de los bloques para los estadios.

I Ausencia	II Control de datos	III Rutinas avanzadas	IV Expansión
Bajo desempeño en los bloques de Software y Hardware. Escasas capacidades en los RR.HH. y faltas de Cultura y Estrategia hacia 4.0.	Adecuado desempeño en los bloques de Software y Hardware. Apropriadas capacidades en los RR.HH. y faltas de Cultura y Estrategia hacia 4.0.	Buen desempeño en los bloques de Software y Hardware. Correctas capacidades en los RR.HH. y presencia de Cultura y Estrategia hacia 4.0	Excelente desempeño en los bloques de Software y Hardware. Elevadas capacidades en los RR.HH. y una arraigada Cultura y Estrategia hacia 4.0.
Fuertemente analógico con algunas cuestiones digitales básicas.	Empresa automatizada con toma de datos, pero con bajo uso de los mismos.	Empresa automatizada con toma de datos y análisis de los mismos para toma de decisiones y mejora de la firma.	Empresa automatizada con toma de datos y análisis de los mismos para toma de decisiones y mejora de la firma. Y un proceso de expansión aguas abajo (clientes) y aguas arriba (proveedores y asociados)

Fuente: elaboración propia.

Se toma a las dimensiones hardware, software y producto como de nivel 1 dado que son las bases de cualquier sistema de I40 por lo cual sin las mismas este tipo de industria no puede existir. Por su parte las mismas se encuentran sometidas al manejo por parte de los recursos humanos y el uso de sus datos en post de la mejora de la firma. El nivel 3 o estrategia tiene que coordinar y visualizar oportunidades de mejora tanto para el nivel 1 como el 2 (ver Tabla 9).

Tabla 9 - Relaciones entre las dimensiones.

Nivel	Relación entre los componentes		
3	Estrategia		
2	Recursos Humanos		
1	Hardware	Software	Producto

Fuente: elaboración propia.

A partir de las dimensiones se desarrollan los bloques de variables que se dividen en niveles de implementación. Dado que algunos de los bloques soportan un nivel básico de uso, un nivel intermedio y finalmente un superior dependiendo de la complejidad de implementación de 4.0 (Tabla 10).

El concepto de rutina se refiere al conjunto de variables de que presenta la empresa en cada bloque y valor global es representado por la sumatoria de las mismas. Se debe tener en cuenta que las diferencias en los tres niveles de columna (Rutinas) se da en el nivel de avance de implementación del bloque (fila) por ejemplo software puede que tengan paquetes básicos como un MRP (nivel base) o puede que tengan un ERP y lo utilicen parcialmente (nivel intermedio), o que lo utilicen de forma completa dentro de toda la empresa y utilicen sus capacidades de análisis de forma indicador clave de rendimiento (KPI) y tendencias y estacionalidad de los diferentes procesos de la empresa para tomar decisiones operativas y estratégicas (nivel avanzado).

Tabla 10 - Bloques rango de valores de acuerdo al nivel de implementación.

Bloques	Rutina Base (drivers)	Rutinas intermedias	Rutinas Superiores	Total Bloque
Hardware	0 – 10	0 – 3		0 – 13
Software	0 – 7	0 - 10	0 - 4	0 – 21
Recursos Humanos	0 – 3	0 - 4		0 – 7

Productos⁵	0 - 4	0 - 2		0 - 6
Cultura y Estrategia		0 - 4	0 - 3	0 - 7
Total Nivel	0 - 20/24	0 - 21/23	0 - 7	

Fuente: elaboración propia.

A fin de lograr un valor global que sería útil sobre todo para clasificar y comparar firmas se utiliza un promedio ponderado que reduce las variables analizadas en los resultados por columna de la Tabla 8 a un valor único. **Nivel global Implementación 4.0.:** $0,2^* \text{ Tecnologías Base} + 0,3^* \text{ Rutinas intermedias} + 0,5^* \text{ Rutinas Superiores}$. A continuación, en la Tabla 11 se exponen los valores para los diferentes niveles.

Tabla 11 - Nivel global Implementación 4.0 rangos por estadio.

	I Ausencia	II Control de datos	III Rutinas avanzadas	IV Expansión
Sin bloque producto	0 - 3,45	3,46 - 6,9	6,91 - 10,35	10,36 - 13,8
Con bloque producto	0 - 3,8	3,81 - 7,6	7,7 - 11,4	11,41 - 15,2

Fuente: elaboración propia.

Como herramienta de diagnóstico interno será valioso para la empresa el uso de los niveles de bloques y niveles de rutinas y tecnologías en forma individual (Tabla 12). Son relevantes por las variables que los componen para poder desarrollar los planes de mejora dentro de la firma.

Tabla 12 - Niveles de rendimiento por bloque y rutinas.

	I	II	III	IV
Hardware	0 - 3,350	3,360 - 6,500	6,51 - 9,75	9,76 - 13
Software	0 - 5,25	5,26 - 10,50	10,51 - 15,75	15,76 - 21
Recursos Humanos	0 - 1,75	1,76 - 3,5	3,51 - 5,25	5,26 - 7
Productos	0 - 1,5	1,51 - 3,00	3,01 - 4,5	4,51 - 6
Cultura y Estrategia	0 - 1,75	1,76 - 3,5	3,51 - 5,25	5,26 - 7
Tecnologías Base (S/producto)	0 - 5,00	5,1 - 10,00	10,10 - 15,00	15,10 - 20
Rutinas intermedias (S/producto)	0 - 5,25	5,26 - 10,50	10,51 - 15,75	15,76 - 21
Rutinas Superiores	0 - 1,75	1,76 - 3,5	3,51 - 5,25	5,26 - 7

Fuente: elaboración propia.

En el siguiente apartado se destacan los aprendizajes e interrogantes que se obtuvieron durante el proceso del desarrollo del trabajo.

5.2. Aplicación del modelo de medición y análisis de resultados

La muestra está compuesta por empresas de una media de antigüedad de 32 años y con un promedio de 155 empleados. En cuanto al mercado todas las firmas comercializan en el mercado nacional, el 47% de las firmas exportan. Las empresas clasificadas por tamaño, el 80% corresponde a pequeñas y el 20% restante a medianas tramo 1. En cuanto al rubro los más representados son: fabricación de vehículos automotores, remolques y semirremolques; elaboración de productos alimenticios y fabricación de maquinaria y equipo n.c.p.

⁵ El bloque producto puede existir o no dentro de los valores resultantes dependiendo que tipo de industria al que se aplique el formulario. Hay productos que no admiten implementación de tecnologías asociadas al internet de las cosas (IoT) ejemplos de ellos son los alimentos envasados, piezas de metal y madera, entre otros.

Las dimensiones con menor desempeño general en la muestra son el software y la cultura y estrategia. Otra dimensión fundamental con una implementación baja es el hardware, que concentra el 33% de los casos en el nivel 1, siendo superado únicamente por el software, que cuenta con un 53% en dicho nivel. El aspecto de recursos humanos se encuentra distribuido de manera parcialmente uniforme, dividiendo la muestra en los cuatro niveles con frecuencias similares entre ellos. A pesar de que la cultura y estrategia muestran un bajo desempeño, es la que ha logrado alcanzar más casos en el nivel 3, con un 33%. Esto podría indicar que en el futuro la trayectoria podría cambiar debido al interés de los líderes de las empresas (ver Figura 1).

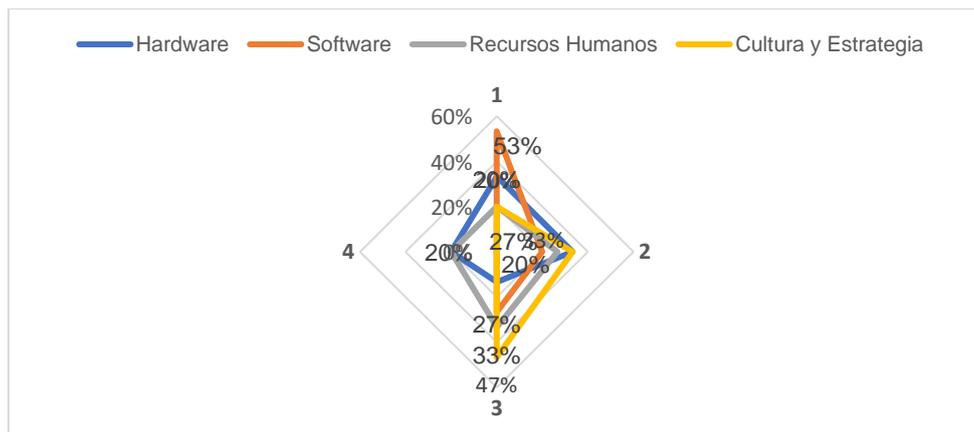


Figura 1 - Niveles alcanzados por la muestra en las diferentes dimensiones.

Las rutinas intermedias presentan la distribución más uniforme, ya que están presentes en los cuatro niveles. Por otro lado, las tecnologías base muestran un claro sesgo hacia el primer nivel, con un 47% de los casos ubicados en este nivel. Observamos un fenómeno similar en cuanto a las rutinas superiores, que se agrupan de manera significativa en el nivel 2, con un 53% de los casos (ver Figura 2).

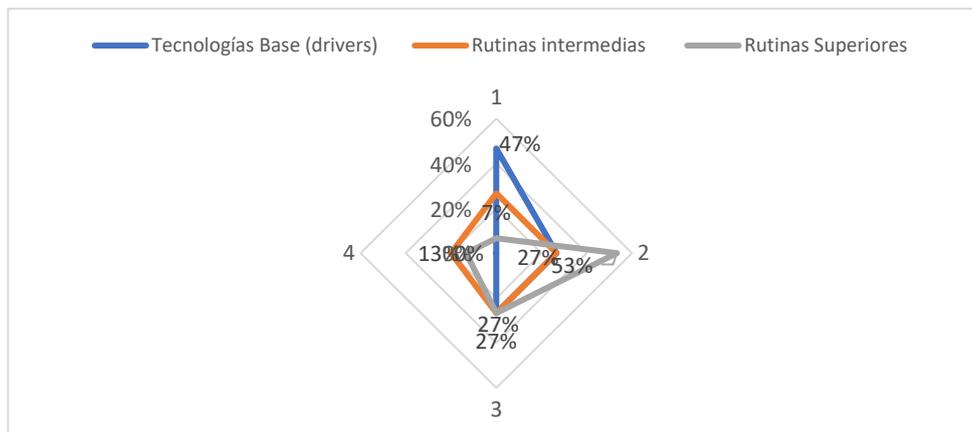


Figura 2 - Niveles alcanzados por las rutinas de industria 4.0.

La madurez de la muestra, de acuerdo al indicador desarrollado, se concentra principalmente en los niveles I de Ausencia y II de Control de Datos, ambos con un 33%. Solo un 13.33% de las empresas alcanzan el nivel máximo IV de Expansión en la Industria 4.0 (ver Tabla 13).

Tabla 13 - Niveles de madurez alcanzados por la muestra

I Ausencia	II Control de datos	III Rutinas avanzadas	IV Expansión
33,33%	33,33%	20,00%	13,33%

Fuente: elaboración propia.

6. Conclusiones y discusión

La Industria 4.0 es un conjunto de tecnologías que representan el modelo actual de producción. Por lo tanto, es importante que las empresas lo consideren para mantener su posición en el mercado. Esto hace relevante los modelos de madurez como herramienta de diagnóstico, permitiendo a las firmas planificar mejoras en su nivel de utilización y aprovechamiento tecnológico. La cantidad de componentes, dimensiones y relaciones que se deben evaluar para establecer el grado de avance tecnológico de una empresa hace que el planteamiento de un modelo de medición sea un trabajo complejo que requiere la participación de múltiples actores en su proceso de validación, a fin de evitar errores en los resultados obtenidos.

Los modelos SIRI y ACATECH son sólidos y permiten un diagnóstico excepcional del estado de una empresa en cuanto a la adopción de tecnologías. Sin embargo, presentan la desventaja de que los cuestionarios de diagnóstico no están disponibles al público, ni tampoco lo están los modelos para establecer escalas, lo que requiere la asistencia de un equipo de consultoría para su implementación. Esto dificulta que las pequeñas y medianas empresas tengan acceso a estos recursos. En cuanto a los modelos autoadministrados, resultan muy interesantes ya que posicionan a la empresa en su sector de referencia, pero sería beneficioso que proporcionaran más información interna, como rutinas y dimensiones, para poder planificar de manera más efectiva el desarrollo de estas tecnologías basándose en ellos.

Los resultados de la muestra revelan una debilidad o un escaso grado de desarrollo en las tecnologías fundamentales que constituyen la base de la Industria 4.0. Esto se refleja en los bajos niveles de las dimensiones de software y hardware, que deben ser dominadas para alcanzar un nivel elevado en el contexto de la Industria 4.0. Es positivo y destacable que las empresas muestren un elevado compromiso y comprensión de la importancia de estas tecnologías, por lo cual la situación podría mejorar en el futuro si se logran superar las barreras comunes a estos procesos, como la inversión elevada, el financiamiento y la compatibilidad de equipos. La medición del modelo de madurez determina que el 33% se encuentra en el nivel de ausencia, lo cual es preocupante en relación con la idea del nuevo paradigma de producción, lo que podría llevar a que estas empresas enfrenten problemas a mediano plazo. Por otra parte, es positiva la presencia de un pequeño grupo en el nivel máximo de la escala IV (13.3%), y finalmente, un grupo intermedio en los niveles II y III (53.3%), que se encuentra en el proceso de implementación de la Industria 4.0.

En este estudio, se realiza una primera aproximación al desarrollo de escalas tanto internas como externas de un instrumento de medición diseñado para evaluar el nivel de madurez de una empresa. Este instrumento se ha aplicado a una muestra específica la cual no fue medida con otro instrumento en forma simultánea por ejemplo uno de los modelos autoadministrados como el INDTECH (ver 2.4) esto sería importante para detectar si se producen o no diferencias significativas entre ambos modelos de medición.

Se prevé que este instrumento sea objeto de iteraciones que lo lleven a la mejora a medida que se analicen más datos y se reciba retroalimentación por parte de académicos y profesionales. En el futuro, se avanzará en la consolidación de los resultados obtenidos, se definirán los pasos necesarios para su implementación y se llevará a cabo su publicación, con el propósito de que estén disponibles para las pequeñas y medianas empresas que deseen utilizarlos.

7. Referencias bibliográficas

AA.VV. (2021). Plan de Desarrollo Productivo Argentina 4.0. Ministerio de desarrollo productivo de argentina.

Canetta, L., Barni, A., Montini, E. (2018). Development of a digitalization maturity model for the manufacturing sector. In: 2018 IEEE international conference on engineering, technology and innovation (ICE/ITMC). IEEE, pp. 1–7

Casalet, M. (2018). “La digitalización industrial: un camino hacia la gobernanza colaborativa. Estudios de casos”, Documentos de Proyectos (LC/TS.2018/95), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

Ghobakhloo, M., Fathi, M., Iranmanesh, M., Maroufkhani, P., Morales, M. (2021) Industry 4.0 Ten Years On: A Bibliometric and Systematic Review of Concepts, Sustainability Value Drivers, and Success Determinants, Journal of Cleaner Production.

Hermann, M.; Pentek T. & Otto, B. (2016). Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios. 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), Koloa, HI, pp. 3928-3937.

Kagermann, H.; Wahlster, W. & Helbig, J. (2013). Securing the future of German manufacturing industry. Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0. Frankfurt: Acatech-National Academy of Science and Engineering.

Levä, T., Hämmäinen, H. y Kilkki, K. (2009). Scenario Analysis on Future Internet. First International Conference on Evolving Internet, 2009, pp. 52-59.

Lichtblau, K.; Stich, V.; Bertenrath, R.; Blum, M.; Bleider, M. y Millack, A. (2015). IMPULS-Industrie 4.0-Readiness, Impuls-Stiftung des VDMA, Aachen-Köln.

Mittal, S., Khan, M. A., Romero, D., & Wuest, T. (2018). A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs). Journal of Manufacturing Systems, 49, 194-214. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.10.005>

Nick, G.; Szaller, Á.; Várgedő, T. (2020). CCMS Model – a Novel Approach to Digitalization Level Assessment for Manufacturing Companies. European conference on management, leadership and governance. ISSN 2048-9021.

Rauch, E.; Stecher, T.; Unterhofer, M.; Dallasega, P. & Matt, D. (2019). Suitability of Industry 4.0 Concepts for Small and Medium Sized Enterprises: Comparison between an Expert Survey and a User Survey. Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Bangkok, Thailand, March 5-7.

Reiner A. & Jürgen F. (2016) Guideline Industrie 4.0.

Schmitz, S. (2020). Industrie 4.0 at scale How to transform manufacturing companies. i4.0MC - Industrie 4.0 Maturity Center GmbH.

Schuh, G., Anderl, R., Gausemeier, J., Ten Hompel, M., Wahlster, W. (2017). Industrie 4.0 maturity index: managing the digital transformation of companies. Utz, Herbert.

Singapore Economic Development Board (SEDB) a (2020). The Singapore smart industry readiness index. Catalysing the transformation of manufacturing.

Singapore Economic Development Board (SEDB) b (2020). The Prioritisation Matrix. Catalysing the transformation of manufacturing.

Verkasalo, H. (2009). Analysis of mobile internet usage among early-adopters. Vol. 11 No. 4, pp. 68-82.

Yadav, R. (2017). Challenges and Evolution of Next generation. Wireless Communication Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2017 Vol II, IMECS 2017, Hong Kong.

Yevgeniy Likhmanov, Dinara Dikhanbayeva, Bauyrzhan Yertayev, Essam Shehab, Ali Turkyilmaz,(2022). An advisory system to support Industry 4.0 readiness improvement, Procedia CIRP, Volume 107, Pages 1361-1366, ISSN 2212-8271.