
Artículo

Diseño de un índice de madurez digital basado en DEMATEL-ANP para la adopción de DTO en PYMEs manufactureras

Design of a Digital Maturity Index Based on DEMATEL-ANP for DTO Adoption in Manufacturing SMEs

Valentina Figueroa Gallardo, Marcela Gutiérrez Oyarzun, Erik Schulze-González *

¹ Escuela de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad de Valparaíso.

 <https://orcid.org/0000-0001-5242-9659>

Resumen: La implementación de Gemelos Digitales Organizacionales (DTO) en PYMEs suele enfrentar altas tasas de fracaso debido a la falta de una evaluación rigurosa de las capacidades basales de interoperabilidad. Este estudio propone el diseño de un índice de madurez digital específico para este contexto, utilizando una metodología híbrida DANP (DEMATEL-based ANP) para mitigar la subjetividad de los modelos de autodiagnóstico tradicionales. Los resultados teóricos revelan un hallazgo significativo respecto a la literatura general: la dimensión de Tecnología y Datos (30.6 %) constituye el habilitador causal crítico, superando a la Cultura Digital en la etapa de preparación inicial. El índice diseñado, validado mediante un caso de estudio, ofrece una hoja de ruta prescriptiva que permite a los gerentes priorizar la resolución de la deuda técnica de datos antes de realizar inversiones complejas en simulación, optimizando así la asignación de recursos en la Industria 4.0.

Palabras claves: Gemelo Digital Organizacional (DTO), Madurez Digital, DANP, Simulación, Optimización, Modelado de Procesos, Toma de Decisiones basada en Datos.

Abstract: The implementation of organisational digital twins (ODTs) in SMEs often has a high failure rate due to a lack of rigorous assessment of baseline interoperability capabilities. This study proposes designing a digital maturity index specific to this context using a hybrid DANP (DEMATEL-based ANP) methodology, which mitigates the subjectivity of traditional self-diagnostic models. The theoretical results reveal a significant finding in relation to the existing literature: the Technology and Data dimension (30.6 %) is the most important enabler of initial preparation, surpassing Digital Culture. The designed index, which was validated through a case study, provides managers with a prescriptive roadmap that enables them to prioritise resolving data technical debt before making complex investments in simulation. This optimises resource allocation in Industry 4.0.

Keywords: Organizational Digital Twin (ODT), Digital Maturity, DANP, Simulation, Optimization, Process Modeling, Data-Driven Decision Making.

Citación: Diseño de un índice de madurez digital basado en DEMATEL-ANP para la adopción de DTO en PYMEs manufactureras.

Revista de Investigación Aplicada en Ciencias empresariales, 2026, Volumen 14, Issue 1 9. <https://doi.org/10.22370/riace.2025.14.1.5621>

Recibido: 05 de diciembre de 2025

Aceptado: 10 de enero de 2026

Publicado: 22 de enero de 2026

Copyright: © 2026 by the author. Presentado a Revista de Investigación Aplicada en Ciencias empresariales para publicación de acceso abierto bajo los términos y condiciones de Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introducción

En los últimos años, la era de la Industria 4.0 se ha fundamentado en la convergencia de tecnologías digitales, tales como la inteligencia artificial, el Internet de las Cosas (IoT) y el análisis de datos masivos, lo que ha dado lugar a nuevos paradigmas de simulación, como es el caso de los Gemelos Digitales (DT) (Fantozzi et al., 2025). Estos modelos constituyen réplicas virtuales de procesos, activos u operaciones que permiten facilitar la toma de decisiones estratégicas y anticiparse a escenarios futuros dentro de entornos de alta complejidad (Lemian y Bode, 2025). Si bien en grandes corporaciones los DT han demostrado generar

*Corresponding: erik.schulze@uv.cl

mejoras significativas en la eficiencia operativa y la reducción de costos, su implementación en pequeñas y medianas empresas (PYMEs) enfrenta desafíos estructurales, tales como restricciones financieras, recursos limitados y brechas en el capital humano especializado para operar dichas tecnologías (Cremonini et al., 2025).

A pesar de su rol preponderante en la economía global, representando entre el 50 % y el 60 % del empleo y del valor agregado en diversas naciones, las PYMEs enfrentan barreras sustanciales para adoptar procesos de transformación digital integrales (Santana y Albareda, 2022). En ese contexto, autores como Jones et al. (2020) y R. P. Silva et al. (2022), plantean que la evaluación de la madurez digital constituye un prerrequisito indispensable para la transformación digital, ya que permite identificar capacidades instaladas y brechas tecnológicas, orientando así la toma de decisiones estratégicas y promoviendo el desarrollo organizacional sostenido.

Sin embargo, persiste una carencia de metodologías específicas que permitan diagnosticar el nivel de madurez de las PYMEs con un enfoque orientado hacia tecnologías avanzadas como los DTO. Asimismo, se carece de marcos que orienten a aquellas empresas con baja preparación a transformarse progresivamente hasta alcanzar el nivel de interoperabilidad necesario. Antes de considerar la implementación de un DTO, las PYMEs deben digitalizar sus procesos basales mediante herramientas de gestión de información. Sin una ruta clara, este esfuerzo puede derivar en una asignación inefficiente de recursos de inversión. La digitalización puede definirse como el uso de herramientas tecnológicas, sistemas computacionales y plataformas digitales en los procesos operativos y de gestión (Dimoso y Utonga, 2024). No obstante, la adopción de tecnologías digitales no se limita a la adquisición de software o hardware, sino que requiere el desarrollo de competencias internas (Perera y Razi, 2025). Ante esta problemática, surge la siguiente pregunta de investigación que guía este estudio: ¿Cómo se debe diseñar un índice metodológicamente robusto que clasifique la preparación de las PYMEs manufactureras para la adopción de DTO, integrando factores tecnológicos y organizacionales?.

Para dar respuesta a esta interrogante, la solución propuesta se enfoca en el diseño de un índice de madurez digital especializado, que evalúe integralmente el grado de desarrollo tecnológico y la capacidad de transformación. Este índice busca integrar las principales dimensiones de modelos consolidados adaptándolas a la realidad operativa y de recursos de las PYMEs, persiguiendo el objetivo general de diagnosticar el nivel de desarrollo tecnológico y organizacional de estas empresas para determinar su grado de preparación hacia la adopción progresiva de DTO.

2. Revisión de la Literatura

La definición y clasificación de las PYMEs representa el punto de partida para cualquier análisis de madurez digital, dado que no existe un consenso universal sobre su categorización. Autores como Berisha y Pula (2015) destacan la complejidad inherente a su clasificación, la cual varía según los criterios de distintos organismos y resulta esencial para el diseño de políticas de apoyo. Para efectos de esta investigación, una forma robusta de clasificar a las organizaciones manufactureras es mediante el sistema UNSPSC (United Nations Standard Products and Services Code) (United Nations Global Marketplace, 2025). Este sistema permite distinguir con precisión aquellas PYMEs con el perfil productivo adecuado para la adopción de tecnologías avanzadas, abarcando rubros desde la transformación de materias primas y productos químicos hasta la fabricación de equipos industriales, componentes tecnológicos y suministros médicos. Es en este contexto productivo donde la implementación de modelos de simulación avanzada cobra relevancia.

Específicamente, el concepto de Gemelo Digital Organizacional (DTO) emerge como una evolución del Gemelo Digital (DT) tradicional. Mientras que un DT refiere a una representación virtual de un sistema físico actualizada mediante un intercambio continuo de información (Neugebauer et al., 2024), un DTO es una tipología específica que asume características únicas de la organización, tales como agencia, conflicto y emergencia, diferenciándose de los gemelos digitales de producto (van der Aalst et al., 2021). Sin embargo,

la adopción de esta tecnología no es un proceso inmediato; requiere que la organización haya alcanzado un cierto estatus de evolución tecnológica conocido como madurez digital.

Tabla 1: Clasificaciones UNSPSC de rubros manufactureros

Rubro	Definición
Materias primas, productos químicos, papel y combustible	Empresas que fabrican o procesan insumos básicos que posteriormente son utilizados en otras fábricas.
Herramientas y equipos industriales	Fabricación de maquinaria, herramientas y equipos que permiten producir, ensamblar o procesar materiales.
Suministros y componentes	Producción de piezas y partes que otras empresas utilizan para ensamblar productos finales.
Suministros y equipos de construcción y transporte	Empresas que fabrican materiales estructurales, maquinaria o equipos utilizados en obras e infraestructura.
Productos farmacéuticos y médicos	Fabricación de medicamentos, insumos clínicos, dispositivos médicos y equipos de laboratorio.
Suministros y equipos tecnológicos	Empresas que producen hardware, dispositivos de telecomunicaciones, equipos informáticos o de oficina.
Suministros domésticos y personales	Producción de bienes de uso cotidiano, como electrodomésticos, productos de aseo o artículos para el hogar.

La madurez digital actúa como el habilitador estratégico que conecta la realidad operativa de la PYME con la complejidad del DTO. Este concepto trasciende la mera disponibilidad de herramientas tecnológicas para evaluar su uso efectivo, la calidad de los datos y la capacidad de aplicar la información de manera independiente (Perera y Razi, 2025). Su evaluación debe considerar tanto criterios cuantitativos (ventas, dotación de personal) que aseguren la viabilidad financiera, como criterios cualitativos (liderazgo, cultura, independencia operativa) que garanticen la sostenibilidad del cambio. En esta línea, el modelo Gartner citado en Lyytinen et al. (2023), sugiere que el éxito del DTO no radica solo en usar la tecnología, sino en la preparación organizacional para capitalizarla. Como refuerza Teichert (2019), el vínculo entre el DT y la madurez digital es indisoluble, abarcando componentes tanto tecnológicos como de gestión, lo que convierte a la madurez digital en el indicador crítico para medir el rendimiento de la adaptación hacia los DTOs.

A pesar de la claridad conceptual sobre la necesidad de la madurez digital, la revisión del estado del arte evidencia barreras significativas en la práctica. R. Silva et al. (2023), señalan que las empresas enfrentan dificultades para cambiar su paradigma debido a la escasez de recursos y competencias. Si bien sectores complejos como el portuario y la construcción han logrado adoptar gemelos digitales (González-Cancelas et al., 2025; Lemian y Bode, 2025), las PYMEs manufactureras siguen luchando con la falta de interoperabilidad (Cimino et al., 2023). Aunque existen propuestas recientes, como marcos basados en dispositivos IoT acopiables (Kang y Kim, 2024) u hojas de ruta de integración progresiva (Yasin et al., 2021), persisten limitaciones críticas. Estudios recientes de Marino et al. (2024) y Gill et al. (2022) identifican que la integración de datos, la ciberseguridad, la dificultad para evaluar el retorno de inversión y la falta de procesos planificados siguen siendo obstáculos no resueltos.

Tabla 2: Limitaciones en la implementación DT en pequeñas y medianas empresas

Referencia	Título del artículo	Limitaciones identificadas
Marino et al. (2024)	Digital Twin in SMEs: Implementing Advanced Digital Technologies for Engineering Advancements	La integración de datos, la ciberseguridad y los requisitos de habilidades continúan siendo barreras críticas para la adopción efectiva.
Gill et al. (2022)	Method for selecting Digital Twins of Entities in a System-of-Systems approach based on essential Information Attributes	Dificultad para evaluar esfuerzos y beneficios; restricciones de recursos para modelos de alta fiabilidad; complejidad innecesaria para ciertos casos de uso.
Gandouzi et al. (2023)	Recent Development Techniques on Digital Twins for Manufacturing: State of the Art	Falta de marcos metodológicos adaptados específicamente a las PYMEs; muchos enfoques teóricos aún no han sido validados en entornos industriales reales.
Yasin et al. (2021)	A roadmap to integrate digital twins for small and medium-sized enterprises	Necesidad de estandarización de datos y modelos; requerimientos de control de seguridad interno y protección de la propiedad intelectual.
González-Varona et al. (2021)	Building and development of an organizational competence for digital transformation in SMEs	Ausencia de un proceso planificado para identificar capacidades organizacionales; alcance y validación limitados de los modelos existentes.

Esta revisión permite identificar una clara brecha investigativa: actualmente no existe una herramienta integrada y práctica que permita diagnosticar de manera efectiva el nivel de madurez digital de una PYME y, a partir de ello, priorizar casos de uso de DTO. Los modelos consolidados como Acatech, Forrester o MIT, aunque valiosos, carecen de mecanismos adaptados a los recursos limitados de las PYMEs, evidenciando la necesidad del diseño de un índice especializado que responda a las particularidades de este sector manufacturero.

3. Metodología, Material y Métodos

Esta investigación presenta un diseño no experimental, descriptivo y con enfoque cuantitativo centrado en la propuesta metodológica del instrumento. El proceso de investigación se estructura en una secuencia lógica de tres fases: (1) Definición conceptual y adaptación de dimensiones basada en literatura, (2) Determinación de pesos mediante juicio experto y modelado matemático DANP, y (3) Diseño del algoritmo de clasificación y validación mediante caso ilustrativo.

3.1. Definición de Dimensiones Basada en la Literatura

Para garantizar la validez de contenido del índice, las dimensiones y subdimensiones no se seleccionaron arbitrariamente, sino que derivan de una adaptación de modelos de madurez consolidados internacionalmente, específicamente el Industrie 4.0 Maturity Index de Acatech (Schuh et al., 2020), el modelo de Forrester (Gill y Vanboskirk, 2016) y el marco de transformación digital del MIT (Westerman et al., 2012).

Sin embargo, dado que estos modelos están orientados a grandes corporaciones, se realizó un proceso de filtrado y adaptación contextual para las PYMEs manufactureras. Se descartaron indicadores de alta complejidad (como I+D avanzada o robótica autónoma) para centrarse en los habilitadores basales de interoperabilidad necesarios para un DTO. El resultado es un modelo robusto compuesto por cuatro dimensiones operativas:

- **Procesos y Operaciones Digitales:** Adaptado de la dimensión "Procesos" de Acatech, enfocado en la estandarización como paso previo a la digitalización.
- **Tecnología y Datos:** Fusión de los ejes de Sistemas de "Información y Recursos" de Forrester, priorizando la captura, interoperabilidad y seguridad de datos.
- **Personas y Cultura Digital:** Basado en el eje de "Cultura" del MIT, evaluando la predisposición al cambio y la adopción de herramientas más que la especialización técnica avanzada.
- **Estrategia y Relación Digital:** Evalúa la alineación estratégica del negocio y la asignación de recursos para sostener la transformación.

3.2. *Instrumento de Medición Propuesto*

Para operativizar estas dimensiones teóricas, se diseñó un instrumento de medición compuesto por cuestionarios estructurados. Cada ítem fue redactado para ser auditabile y observable, evitando constructos subjetivos difíciles de verificar en una auditoría técnica. Además, para facilitar el análisis de influencia causal por parte de los expertos (Fase DANP), se asignó una etiqueta corta a cada criterio. Las Tablas 3 a 6 detallan los ítems para evaluar el índice.

Tabla 3: Dimensión 1 - Procesos y Operaciones Digitales

Código	Descripción	Criterio
C1.1	Los procesos operativos fundamentales (ventas, compras e inventario) están digitalizados.	Digitalización basal
C1.2	Las distintas áreas de la empresa comparten información mediante sistemas digitales integrados.	Integración de sistemas
C1.3	Se cuenta con procesos automatizados que reducen tiempos operativos o minimizan errores.	Automatización
C1.4	La gestión de proyectos se realiza mediante herramientas digitales.	Gestión digital
C1.5	La productividad y los costos operativos se miden a través de sistemas digitales.	Medición operativa

Tabla 4: Dimensión 2 - Tecnología y Datos

Código	Descripción	Criterio
C2.1	Se cuenta con conectividad estable y equipamiento tecnológico adecuado.	Conectividad
C2.2	Se utiliza software de gestión (ERP, CRM, facturación o similar).	Software de Gestión
C2.3	Los datos operativos se analizan para apoyar la toma de decisiones gerenciales.	Inteligencia de Negocios
C2.4	Se cuenta con identificadores digitales actualizados sobre clientes o desempeño.	Identidad Digital
C2.5	Se ejecutan protocolos formalizados de ciberseguridad y respaldo de datos.	Ciberseguridad

Tabla 5: Dimensión 3 - Personas y Cultura Digital

Código	Descripción	Criterio
C3.1	Los líderes fomentan activamente una mentalidad innovadora en los equipos.	Fomento a la Innovación
C3.2	Los trabajadores utilizan activamente las herramientas digitales disponibles.	Adopción Digital
C3.3	Se realizan talleres sobre competencias digitales.	Capacitación
C3.4	Se aplican metodologías ágiles para la gestión del cambio en procesos.	Gestión del Cambio
C3.5	La comunicación y colaboración entre equipos se realiza mediante plataformas digitales.	Colaboración Digital

Tabla 6: Dimensión 4 - Estrategia y Relación Digital

Código	Descripción	Criterio
C4.1	La empresa tiene presencia digital activa (web, redes sociales, Marketplace).	Presencia Online
C4.2	Se usan canales digitales para distribuir sus productos o servicios.	Canales Digitales
C4.3	Se analizan datos de comportamiento del cliente para personalizar la oferta.	Inteligencia de Cliente
C4.4	Existen objetivos estratégicos asociados a la digitalización.	Visión Estratégica
C4.5	Se monitorean KPIs de ventas y satisfacción en canales digitales.	Desempeño Comercial

3.3. Selección de Expertos y Determinación de Pesos (DANP)

Para evitar la arbitrariedad en la asignación de la importancia relativa de cada dimensión, se aplicó el método DANP (DEMATEL-based Analytic Network Process). Este método, propuesto originalmente por Yang et al. (2008) y profundizado por Tzeng y Huang (2011), permite resolver los problemas de interdependencia y retroalimentación entre criterios que el ANP tradicional no captura eficientemente cuando se desconoce la estructura de red *a priori*.

Criterios de Selección del Panel de Expertos: Se utilizó un muestreo intencional o por juicio, seleccionando un panel de 3 expertos que cumplieran rigurosamente con los siguientes criterios de inclusión para garantizar la validez de los pesos resultantes:

- Experiencia Profesional: Mínimo 10 años de experiencia comprobable en el sector industrial o tecnológico.
- Perfil Híbrido: Trayectoria que combine la academia (investigación en ingeniería industrial) con la consultoría práctica en empresas, asegurando una visión teórica y pragmática.
- Especialización Temática: Conocimiento demostrable en implementación de sistemas de gestión (ERP), Industria 4.0 o modelado de procesos (BPMN).

Procedimiento de Cálculo DANP: Los expertos seleccionados evaluaron la influencia directa entre las dimensiones utilizando la escala de DEMATEL (Tabla 7). Se utilizaron matrices de influencia directa para capturar la causalidad.

Tabla 7: Escala de Evaluación de Influencia - DEMATEL

Puntuación	Significado
0	Sin influencia
1	Baja influencia
2	Media influencia
3	Alta influencia
4	Muy alta influencia

Paso 1: Matriz de Influencia Total (T). Con los inputs de los expertos se genera la matriz directa promedio, definida como D . Esta matriz se normaliza dividiendo cada elemento por el mayor valor de la suma de sus filas o columnas, obteniendo la Matriz de Relación Directa Normalizada (X). A partir de X , se calcula la Matriz de Influencia Total (T) que captura tanto las influencias directas como las indirectas:

$$T = X(I - X)^{-1} \text{ (Ec.1)}$$

Donde I es la matriz de identidad.

Paso 2: Construcción de la supermatriz. En el método DANP, la supermatriz no ponderada (\mathbf{W}) se deriva directamente de la normalización de la matriz de influencia total (T), la cual se divide en submatrices correspondientes a las dimensiones (\mathbf{T}_D) y a los criterios (\mathbf{T}_C).

Paso 3: Ponderación y límite. La supermatriz se pondera multiplicando sus elementos por los pesos normalizados de las dimensiones (\mathbf{T}_D^w), obteniéndose la supermatriz ponderada (\mathbf{W}_w). Finalmente, esta matriz se eleva a una potencia límite ($k \rightarrow \infty$) hasta alcanzar la convergencia estable de los valores.

$$W_{\lim} = \lim_{k \rightarrow \infty} (W_w)^k \text{ (Ec.2)}$$

Los valores de esta matriz límite representan los Pesos Globales (Z) definitivos, que integran toda la estructura causal del sistema y se utilizan para alimentar el algoritmo de clasificación.

3.4. Algoritmo de Evaluación y Clasificación

Para garantizar que el índice sea una herramienta operativa y libre de subjetividad, se diseñó un algoritmo de cálculo que procesa las valoraciones directas de un panel de expertos sobre la PYME analizada.

Paso 1: Agregación del juicio experto (input). Dado un conjunto de K expertos evaluadores que califican el desempeño de la empresa en cada dimensión d mediante una valoración E_{dk} , expresada en una escala continua o discreta, se obtiene el puntaje medio robusto \bar{X}_d a través de la media aritmética. Este procedimiento permite suavizar discrepancias individuales y obtener un valor representativo del estado real de la empresa:

$$\bar{X}_d = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K E_{dk} \text{ (Ec.3)}$$

Paso 2: Modelo de utilidad multiatributo (índice final). El índice no corresponde a una suma simple, sino a una función de utilidad ponderada. En este modelo se integran los promedios expertos \bar{X}_d con los pesos globales Z_d , derivados de la supermatriz límite del método DANP. Asimismo, resulta necesario normalizar el puntaje observado respecto de la escala máxima posible (S_{\max}), con el fin de obtener un índice porcentual de cumplimiento:

$$\text{IMD} = \sum_{d=1}^n \left(Z_d^{\text{DANP}} \times \frac{\bar{X}_d}{S_{\max}} \times 100 \right) \text{ (Ec.4)}$$

Expandiendo para las cuatro dimensiones del modelo, la formulación final es:

$$\text{IMD} = \left[Z_{D1} \cdot \frac{\bar{X}_{D1}}{S_{\max}} + Z_{D2} \cdot \frac{\bar{X}_{D2}}{S_{\max}} + Z_{D3} \cdot \frac{\bar{X}_{D3}}{S_{\max}} + Z_{D4} \cdot \frac{\bar{X}_{D4}}{S_{\max}} \right] \times 100$$

Esta formulación asegura que la calificación final (IMD) represente el porcentaje de madurez alcanzado respecto al ideal para DTO, ajustado por la importancia causal crítica de cada dimensión (Z_d).

El procedimiento computacional para la clasificación final de la PYME se describe en el siguiente pseudocódigo:

Algorithm 1 : Clasificación de Madurez Digital para DTO

```

INPUT: Evaluaciones_Expertos (E), Pesos_Globales_DANP (Z), Escala_Max (S_max)
OUTPUT: Nivel_Madurez, Recomendacion.DTO
1. PARA cada dimensión  $d$  HACER
    CALCULAR Promedio_Experto  $\bar{X}[d]$  (Ec. 3)
FIN PARA
2. CALCULAR IMD Normalizado (Ec. 4)
    // El resultado estará en rango [0 - 100]
3. DEFINIR Umrales (Basados en quartiles de madurez):
    Umbral_Basico = 25
    Umbral_Operativo = 50
    Umbral_Estructurado = 75
4. SI IMD < Umbral_Basico ENTONCES
    Nivel = "Básico (Analógico)"
SINO SI IMD < Umbral_Operativo ENTONCES
    Nivel = "Digital Operativo"
SINO SI IMD < Umbral_Estructurado ENTONCES
    Nivel = "Estructurado"
SINO
    Nivel = "Transformacional (Apto para DTO)"
FIN SI
5. RETORNAR Nivel

```

4. Resultados

Para verificar la consistencia interna del índice diseñado, se procedió a una aplicación ilustrativa del modelo (instanciación teórica), utilizando inputs basados en el juicio de tres expertos del área industrial y tecnológica. Este ejercicio demuestra la sensibilidad del algoritmo matemático propuesto frente a las interdependencias de las variables, comenzando por el análisis de las matrices de influencia.

4.1. Análisis de Influencia Causal (DEMATEL)

A partir de los cuestionarios aplicados al panel de expertos, se construyó la Matriz de Influencia Total (T). Esta matriz captura la intensidad de las relaciones directas e indirectas entre las dimensiones del modelo. Los valores normalizados se presentan en la Tabla 8, donde cada elemento t_{ij} representa el grado de influencia de la dimensión i sobre la dimensión j .

Tabla 8: Matriz de Influencia Total (T)

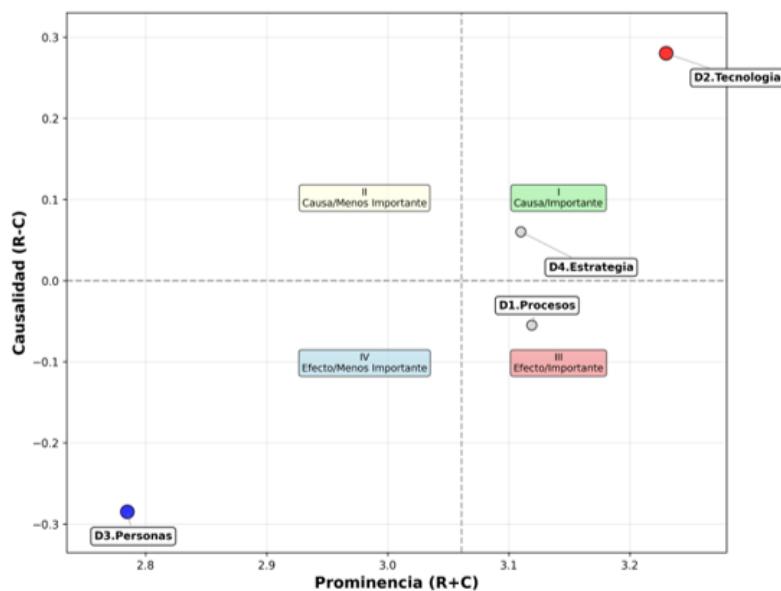
Dimensión	D1. Procesos	D2. Tecnología	D3. Personas	D4. Estrategia
D1. Procesos	0.342	0.415	0.380	0.395
D2. Tecnología	0.485	0.355	0.450	0.465
D3. Personas	0.320	0.295	0.285	0.350
D4. Estrategia	0.440	0.410	0.420	0.315

A partir de la matriz T, se calcularon los grados de Prominencia ($R+C$) y Causalidad ($R-C$) para cada dimensión (Tabla 9).

Tabla 9: Análisis de Prominencia y Causalidad

Dimensión	R (Suma filas)	C (Suma columnas)	R + C (Prominencia)	R - C (Causalidad)	Rol en el sistema
D1. Procesos	1.532	1.587	3.119	-0.055	Efecto
D2. Tecnología	1.755	1.475	3.230	-0.280	Causa neta
D3. Personas	1.250	1.535	2.785	-0.285	Efecto neto
D4. Estrategia	1.585	1.525	3.110	+0.060	Causa débil

Figura 1: Mapa de Causalidad e Influencia DEMATEL (IRM)



El análisis revela dos hallazgos estructurales críticos (Figura 1):

- **Tecnología y Datos (D2)** presenta el mayor índice de Causalidad (+0.280), confirmándose como la “causa raíz” del sistema. Esto implica que las mejoras en infraestructura tecnológica tienen el mayor impacto de propagación sobre el resto de las dimensiones.
- **Personas y Cultura (D3)** tiene el valor de causalidad más negativo (-0.285), lo que la define como un “receptor neto”. En el contexto de DTO, la cultura digital no surge espontáneamente, sino que es un efecto de la implementación exitosa de procesos y tecnología.

“texto entre comillas”

4.2. Ponderación Final (Supermatriz Límite)

La aplicación del procedimiento DANP completo, incluyendo la normalización de la supermatriz y su elevación a la potencia límite para la convergencia, arrojó los pesos globales definitivos (Tabla 10). Se confirma la preponderancia de la dimensión tecnológica. El peso final calculado para Tecnología y Datos es del 30.6 %, seguido por Estrategia (26.5 %) y Procesos (23.9 %). La dimensión de Personas y Cultura obtiene el menor peso relativo (19.0 %), lo cual es coherente con la naturaleza técnica de la implementación de un DTO, donde la interoperabilidad de datos es un prerrequisito funcional.

Tabla 10: Pesos Globales del Modelo (Z)

Dimensión	Peso global (Z)
D1. Procesos	0.239
D2. Tecnología	0.306
D3. Personas	0.190
D4. Estrategia	0.265

4.3. Validación Técnica mediante Caso de Estudio

Para comprobar la validez de constructo y la capacidad discriminante del índice propuesto, se llevó a cabo un caso de estudio controlado. El objetivo fue verificar si el algoritmo matemático, alimentado con los pesos del DANP, es capaz de identificar correctamente las barreras de adopción de DTO en una empresa con un perfil de madurez heterogéneo.

Definición del Caso de Estudio: Se seleccionó una PYME del sector metalmecánico con características típicas de una "modernización parcial":

- Procesos (D1): Altamente estandarizados bajo norma ISO 9001.
- Tecnología (D2): Gestión basada en hojas de cálculo y papel, sin integración IoT (Silos de información).
- Personas (D3): Personal operativo calificado, pero con baja cultura digital.
- Estrategia (D4): Gerencia con visión de mercado tradicional.

Datos de entrada (evaluación de expertos). Un panel de tres expertos independientes evaluó a la empresa metalmecánica utilizando el instrumento diseñado, basado en una escala de 1 a 5. Los resultados brutos fueron agregados mediante la Ecuación (Ec.3) para obtener los puntajes medios por dimensión (\bar{X}_d).

Tabla 11: Datos del Caso de Estudio (Inputs Agregados)

Dimensión (d)	Promedio de expertos (\bar{X}_d)	Escala máxima (S_{\max})	Nivel observado
D1. Procesos	4.25	5.0	Alto
D2. Tecnología	1.90	5.0	Bajo (crítico)
D3. Personas	3.00	5.0	Medio
D4. Estrategia	2.75	5.0	Medio-bajo

Implementación matemática del algoritmo. Utilizando los pesos globales (Z_d) obtenidos del modelo DANP (Tabla 10) y los datos de entrada del caso de estudio (Tabla 11), se aplica la Ecuación (Ec.4) para calcular el Índice de Madurez Digital (IMD), normalizado a una escala de 0 a 100:

$$\text{IMD} = \left[0,239 \left(\frac{4,25}{5} \right) + 0,306 \left(\frac{1,90}{5} \right) + 0,190 \left(\frac{3,00}{5} \right) + 0,265 \left(\frac{2,75}{5} \right) \right] \times 100$$

$$\text{MD} = [0,239(0,85) + 0,306(0,38) + 0,190(0,60) + 0,265(0,55)] \times 100$$

$$\text{IMD} = 57.90$$

Interpretación de la Validez: Interpretación de la Validez: El resultado final de 57.90 puntos sitúa a la empresa en el rango de "Estructurado" (Rango 50-75). Este hallazgo es relevante para la validación del índice:

- **Penalización por Estructura Causal:** El modelo DANP, al asignar un peso mayor a la Tecnología (0.306), penaliza severamente el bajo desempeño en D2 (1.90/5.0), reduciendo su contribución al índice total a solo 11.6 puntos porcentuales.

- **Discriminación Efectiva:** A pesar de tener procesos casi excelentes ($D1 = 4.25/5.0$), la falta de “habilitadores tecnológicos” impide que el índice se inflf artificialmente.

Conclusión del caso. El algoritmo clasificó correctamente a la empresa metalmecánica en un nivel que, si bien es estructurado, no es apto para DTO (que requeriría un nivel “Transformacional” > 75). Esto demuestra, de manera matemática, que el índice cumple su función de “filtro de seguridad”, impidiendo que una empresa sin la infraestructura de datos necesaria (la causa raíz identificada mediante DEMATEL) se aventure prematuramente en proyectos de Gemelos Digitales, validando así la hipótesis de diseño.

5. Discusión

Los resultados evidencian una discrepancia fundamental respecto a los modelos de madurez digital convencionales. Mientras que marcos consolidados como el Índice de Madurez de Industria 4.0 de Acatech (Schuh et al., 2020) o los modelos de Forrester (Gill y Vanboskirk, 2016) y MIT (Westerman et al., 2012) suelen proponer una evolución lineal donde la cultura organizacional y la estrategia actúan como los principales motores iniciales del cambio, nuestros hallazgos sugieren una jerarquía diferente para el caso específico de los DTOs en PYMEs.

El resultado más significativo de este estudio es la identificación de la dimensión Tecnología y Datos (D2) como la “Causa Fuerte” del sistema, con un peso global del 30.6 %. Esto contrasta notablemente con estudios recientes como el de Bánhidi y Dobos (2025), quienes, utilizando un enfoque basado en entropía para PYMEs húngaras, otorgaron el mayor peso a las “Habilidades Digitales” (27.3 %). La diferencia radica en el objeto de estudio: mientras que la transformación digital general puede ser impulsada por el capital humano, la implementación de un Gemelo Digital Organizacional es inherentemente intensiva en datos. Sin una infraestructura capaz de capturar, integrar y procesar datos operativos en tiempo real, la simulación avanzada es inviable, independientemente de la disposición cultural de la organización.

Nuestro modelo, al utilizar la metodología DANP, captura esta relación de causalidad que a menudo se pasa por alto en modelos basados en promedios simples o autodiagnósticos cualitativos. La validación mediante el caso de estudio de la empresa metalmecánico demostró empíricamente esta capacidad discriminante: una empresa con excelencia en procesos ($D1=85\%$) pero deficiente en gestión de datos ($D2=38\%$) obtuvo un índice de madurez de solo 57.90 puntos, clasificándose correctamente como no apta para DTO. Un modelo que ponderara equitativamente todas las dimensiones habría inflado este puntaje, generando una falsa sensación de preparación y potencialmente induciendo a inversiones fallidas en software de simulación complejo.

Por tanto, el índice propuesto no solo mide el estado actual, sino que actúa como un mecanismo de protección estratégica. Al penalizar la falta de interoperabilidad tecnológica, fuerza a los tomadores de decisiones en las PYMEs a resolver la deuda técnica de sus sistemas de información antes de intentar saltar hacia paradigmas de Industria 4.0 más avanzados. Esto confirma lo planteado por Cimino et al. (2023) sobre la interoperabilidad como la barrera crítica no resuelta en el sector manufacturero.

5.1. Limitaciones del Estudio

No obstante, a los resultados obtenidos, es necesario reconocer las limitaciones inherentes a esta investigación. En primer lugar, la determinación de pesos mediante el método DANP se basó en el juicio de un panel de tres expertos ($n=3$). Si bien el método DEMATEL es robusto para mapear estructuras causales con grupos pequeños de expertos cualificados, la generalización estadística de los pesos específicos (como el 30.6 % para Tecnología) requiere validación con una muestra más amplia y diversa de especialistas del sector industrial.

En segundo lugar, el caso de estudio presentado constituye una ‘instanciación teórica’ o prueba de concepto del algoritmo diseñado, utilizando datos controlados para verificar su lógica interna y sensibilidad. No representa una validación empírica masiva en campo.

Futuras líneas de investigación deberán aplicar este instrumento en una muestra representativa de PYMEs manufactureras para correlacionar los puntajes del índice con el éxito real de los proyectos de implementación de DTO, permitiendo así una calibración más fina de los umbrales de clasificación propuestos.

Finalmente, el índice actual ofrece una “fotografía estática” de la madurez digital. Dado que la tecnología y los mercados evolucionan dinámicamente, futuros desarrollos del modelo podrían incorporar variables de adaptabilidad en tiempo real para capturar la velocidad de aprendizaje de la organización, un aspecto crítico en entornos de alta incertidumbre.

6. Conclusión

Esta investigación ha cumplido su objetivo de diseñar un índice de madurez digital metodológicamente robusto para diagnosticar la preparación de las PYMEs manufactureras hacia la adopción de Gemelos Digitales Organizacionales (DTO). A diferencia de los modelos generalistas de madurez digital que ofrecen una evaluación estática y lineal basada a menudo en inventarios de herramientas, este trabajo propone un enfoque sistémico que integra causalidad y ponderación objetiva mediante la metodología DANP. El principal aporte radica en la superación de la subjetividad inherente a los autodiagnósticos simples, proporcionando un algoritmo capaz de discriminar y penalizar la falta de capacidades estructurales críticas.

El hallazgo fundamental de la investigación es la determinación cuantitativa de que la dimensión de Tecnología y Datos (30.6 %) actúa como el motor causal principal del sistema para la adopción de DTO en este contexto, superando en peso inicial a la estrategia y la cultura. Esta evidencia empírica desafía la visión tradicional de “la cultura primero” en el contexto específico de tecnologías de simulación compleja, demostrando que, sin la infraestructura de datos interoperables, la preparación organizacional es insuficiente. La validación teórica mediante el caso de estudio confirma que el índice funciona como un mecanismo de seguridad eficaz, evitando falsos positivos en la evaluación de la madurez.

En términos prácticos, el índice diseñado ofrece a las PYMEs una hoja de ruta prescriptiva clara: antes de avanzar hacia inversiones en software de simulación avanzada (etapa Transformacional), deben priorizar la resolución de su deuda técnica en gestión e integración de datos (etapa Digital Operativa). Esta priorización estratégica permite optimizar los limitados recursos financieros de las PYMEs y reduce el riesgo de fracaso en la implementación de proyectos de Industria 4.0. Se reconoce que la validación empírica a gran escala sigue siendo una tarea pendiente para futuras investigaciones, necesaria para calibrar los umbrales del modelo a la diversidad del tejido industrial regional.

Referencias

- Bánhidi, Z., & Dobos, I. (2025). An entropy-based digital maturity index for small and medium enterprises in Hungary. *Central European Journal of Operations Research*, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s10100-025-00985-w>
- Berisha, G., & Pula, J. S. (2015). Defining small and medium enterprises: A critical review. *Academic Journal of Business, Administration, Law and Social Sciences*, 1(1). <http://www.iipccr.org>
- Cimino, A., Gnoni, M. G., Longo, F., & Solina, V. (2023). Integrating multiple Industry 4.0 approaches and tools in an interoperable platform for manufacturing SMEs. *Computers & Industrial Engineering*, 186, 109732. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109732>
- Cremonini, C. E., Capela, C., da Silva, A., Gaspar, M. C., & Vasco, J. C. (2025). Digital twin integration for workforce training: Transforming SMEs in the ornamental stone industry. *Systems*, 13(2), 120. <https://doi.org/10.3390/systems13020120>
- Dimoso, R., & Utonga, D. (2024). A systematic review of digital technology adoption in small and medium-sized enterprises. *International Journal of Development and Management Review*, 19(1), 58-71. <https://doi.org/10.4314/ijdmr.v19i1.4>
- Fantozzi, I. C., Santolamazza, A., Loy, G., & Schiraldi, M. M. (2025). Digital twins: Strategic guide to utilize digital twins to improve operational efficiency in Industry 4.0. *Future Internet*, 17(1), 41. <https://doi.org/10.3390/FI17010041>

- Gandouzi, G., Belhadj, I., Hammadi, M., Aifaoui, N., & Choley, J.-Y. (2023). Recent development techniques on digital twins for manufacturing: State of the art. In *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, (pp. 77-86). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-23615-0_8
- Gill, M., Reiche, L. T., & Fay, A. (2022). Method for selecting digital twins of entities in a system-of-systems approach based on essential information attributes. *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. <https://doi.org/10.1109/ETFA52439.2022.9921489>
- Gill, M., & Vanboskirk, S. (2016). *The Digital Maturity Model 4.0 Benchmarks: Digital Business Transformation Playbook*. Forrester Research.
- González-Cancelas, N., Martínez Martínez, P., Vaca-Cabrero, J., & Camarero-Orive, A. (2025). Optimization of port asset management using digital twin and BIM/GIS in the context of Industry 4.0. *Processes*, 13(3), 705. <https://doi.org/10.3390/pr13030705>
- González-Varona, J., López-Paredes, A., Poza, D., & Acebes, F. (2021). Building and development of an organizational competence for digital transformation in SMEs. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 14(1), 15. <https://doi.org/10.3926/jiem.3279>
- Jones, D., Snider, C., Nashehi, A., Yon, J., & Hicks, B. (2020). Characterising the digital twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29, 36-52. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>
- Kang, B. G., & Kim, B. S. (2024). Attachable IoT-based digital twin framework specialized for SME production lines. *International Journal of Simulation Modelling*, 23(3), 471-482. <https://doi.org/10.2507/IJSIMM23-3-694>
- Lemian, D., & Bode, F. (2025). Digital twins in the building sector: Implementation and key features. *E3S Web of Conferences*, 608, 05004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202560805004>
- Lyytinen, K., Weber, B., Becker, M. C., & Pentland, B. T. (2023). Digital twins of organization: Implications for organization design. *Journal of Organization Design*, 13(3), 77-93. <https://doi.org/10.1007/s41469-023-00151-z>
- Marino, A., Pariso, P., & Picariello, M. (2024). Digital twin in SMEs: Implementing advanced digital technologies for engineering advancements. *Macromolecular Symposia*, 413(3), 2300176. <https://doi.org/10.1002/MASY.202300176>
- Neugebauer, J., Heilig, L., & Voß, S. (2024). Digital twins in the context of seaports and terminal facilities. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 36(3), 821-917. <https://doi.org/10.1007/s10696-023-09515-9>
- Perera, K. A. V. U., & Razi, M. J. M. (2025). Identifying enablers of digital transformation in SMEs: A systematic literature review. *Journal of Business and Technology*, 9(2), 124-139. <https://doi.org/10.4038/jbt.v9i2.176>
- Santana, C., & Albareda, L. (2022). Blockchain and the emergence of decentralized autonomous organizations. *Technological Forecasting and Social Change*, 182, 121806. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121806>
- Schuh, G., Anderl, R., Dumitrescu, R., & Krüger, A. (2020). *Industrie 4.0 Maturity Index*. Herbert Utz Verlag.
- Silva, R., Mamede, H. S., & Santos, V. (2023). Clarification of the present understanding of the assessment of an organization's digital readiness in SMEs. *Emerging Science Journal*, 7(6), 2279-2307. <https://doi.org/10.28991/ESJ-2023-07-06-025>
- Silva, R. P., Saraiva, C., & Mamede, H. S. (2022). Assessment of organizational readiness for digital transformation in SMEs. *Procedia Computer Science*, 204, 362-369. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.08.044>
- Teichert, R. (2019). Digital transformation maturity: A systematic review of literature. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 67(6), 1673-1687. <https://doi.org/10.11118/actaun201967061673>
- Tzeng, G.-H., & Huang, J.-J. (2011). *Multiple attribute decision making*. Chapman; Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/b11032>
- United Nations Global Marketplace. (2025). United Nations Standard Products and Services Code (UNSPSC). <https://www.ungm.org/Public/UNSPSC>
- van der Aalst, W. M. P., Hinz, O., & Weinhardt, C. (2021). Resilient digital twins. *Business & Information Systems Engineering*, 63(6), 615-619. <https://doi.org/10.1007/s12599-021-00721-z>
- Westerman, G., Bonnet, D., & McAfee, A. (2012). The advantages of digital maturity. *MIT Sloan Management Review*. <https://sloanreview.mit.edu/article/the-advantages-of-digital-maturity/>
- Yang, Y.-P. O., Shieh, H., Leu, J.-D., & Tzeng, G.-H. (2008). A novel hybrid MCDM model combined with DEMATEL and ANP with applications. *International Journal of Operations*.
- Yasin, A., Pang, T. Y., Cheng, C.-T., & Miletić, M. (2021). A roadmap to integrate digital twins for small and medium-sized enterprises. *Applied Sciences*, 11(20), 9479. <https://doi.org/10.3390/app11209479>