Madurez sostenible habilitada por IoT en manufactura mexicana hacia Industria 5.0

IoT-enabled sustainability maturity in Mexican manufacturing toward Industry 5.0

Mario Alberto Morales Rodríguez [1]
Gabriela Cervantes Zubirías [2]
Diana Movilla Quesada [3]
Marco Antonio Díaz Martínez [4]

RESUMEN

La disponibilidad de sensores no permite determinar, por sí sola, la madurez sostenible de una empresa manufacturera. Se propone un modelo socio-técnico para orientar el diagnóstico de esta madurez y su uso en la formación del ingeniero en México. El estudio es conceptual y utiliza una síntesis narrativa crítica de catorce referencias seleccionadas por pertinencia temática; no incluye trabajo de campo ni revisión sistemática. El resultado es un marco de cinco dimensiones: infraestructura IoT, decisión basada en datos, alineación socio-técnica, desempeño sostenible y preparación para Industria 5.0. Se establecen indicadores sugeridos, cinco niveles orientativos y actividades educativas que relacionan medición, interpretación y decisiones responsables. Se concluye que el modelo ofrece una estructura para examinar capacidades y resultados de manera diferenciada, pero su utilidad diagnóstica y educativa requiere validación empírica antes de emplearlo como instrumento de clasificación empresarial.

.

PALABRAS CLAVES: internet de las Cosas; sostenibilidad; manufactura; Industria 5.0; formación del ingeniero.

Fecha de recepción: 19 de junio, 2026.

Fecha de aceptación: 20 de octubre, 2026.

[1] Profesor de Tiempo Completo, Departamento de Ingeniería Industrial, Unidad Académica Multidisciplinaria Reynosa Aztlán, Universidad Autónoma de Tamaulipas. mmorales@docentes.uat.edu.mx, https://orcid.org/0000-0002-1342-297X
[2] Profesora de Tiempo Completo, Departamento de Ingeniería Industrial, Unidad Académica Multidisciplinaria Reynosa Aztlán, Universidad Autónoma de Tamaulipas. gabriela.cervantes@docentes.uat.edu.mx, https://orcid.org/0000-0002-9912-5035
[3] Profesora de Tiempo Completo, Departamento de Ingeniería Civil, Escuela Politécnica Superior de Zamora, Universidad de Salamanca, España. dmovilla@usal.es, https://orcid.org/0000-0003-2779-8166
[4] Profesor de Tiempo Completo, Departamento de Ingeniería Industrial y Departamento de Posgrado e Investigación, TecNM–Instituto Tecnológico Superior de Pánuco, Veracruz 93990, México. marco.dm@panuco.tecnm.mx, https://orcid.org/0000-0003-1054-7088

ABSTRACT

The availability of sensors alone does not establish the sustainability maturity of a manufacturing firm. This study proposes a socio-technical model to guide maturity assessment and its use in engineering education in Mexico. It is a conceptual study based on a critical narrative synthesis of fourteen references selected for thematic relevance; it includes neither fieldwork nor a systematic review. The outcome is a five-dimensional framework covering IoT infrastructure, data-driven decision-making, socio-technical alignment, sustainability performance, and readiness for Industry 5.0. Suggested indicators, five indicative maturity levels, and educational activities connect measurement, interpretation, and responsible decisions. The model provides a structure for examining capabilities and outcomes separately. However, its diagnostic and educational usefulness requires empirical validation before it can be used to classify manufacturing firms.

KEYWORDS: internet of things; sustainability; manufacturing; industry 5.0; engineering education.

INTRODUCCIÓN

El Internet de las Cosas (IoT) conecta equipos y sistemas para obtener información sobre la operación industrial. Las revisiones de Díaz-Martínez et al. (2026a, 2026b) describen su relación con monitoreo, aprovechamiento de recursos y sostenibilidad. Estas aplicaciones plantean una pregunta para la ingeniería industrial: ¿cómo distinguir la disponibilidad tecnológica de la capacidad organizacional para utilizarla responsablemente? Contar con datos no equivale a demostrar mejoras ambientales, económicas o sociales.

La transformación digital involucra cambios en procesos, organización y creación de valor, además de la incorporación de herramientas (Vial, 2019). A su vez, Industria 5.0 complementa el paradigma de Industria 4.0 con sostenibilidad, centralidad humana y resiliencia (European Commission, 2021). Por ello, un diagnóstico centrado únicamente en sensores o automatización sería insuficiente para valorar la preparación de un sistema productivo desde esta perspectiva.

La propuesta se dirige a la manufactura mexicana como ámbito de aplicación futura, sin atribuir a todas sus empresas un mismo nivel de digitalización. El estudio de García Alcaraz et al. (2022), realizado en la industria maquiladora mexicana, relaciona herramientas de manufactura esbelta con dimensiones de sostenibilidad. Este antecedente muestra la pertinencia de estudiar capacidades operativas y resultados en un contexto industrial concreto, aunque no valida el modelo IoT aquí planteado ni permite generalizarlo al país.

El problema abordado es la necesidad de traducir los vínculos entre digitalización y sostenibilidad en una estructura diagnóstica que permita examinar evidencias, responsabilidades y decisiones, y que sea utilizable en la formación del ingeniero. El objetivo es proponer un modelo socio-técnico de madurez sostenible habilitada por IoT, con indicadores y niveles orientativos para la manufactura mexicana, y explicitar su aplicación educativa. La pregunta principal es: ¿qué dimensiones y evidencias conviene integrar para evaluar capacidades digitales, resultados sostenibles y preparación humana y organizacional?

Los modelos previos ya consideran componentes organizacionales y ambientales: el índice de acatech incorpora cultura y estructura organizacional (Schuh et al., 2020), y Zoubek et al. (2021) integran atributos ambientales en la evaluación de madurez. Por tanto, la contribución aquí planteada reside en una integración específica: distinguir capacidades IoT, decisiones documentadas y resultados sostenibles, incorporar criterios humanos y de continuidad, y convertir ese perfil en tareas

CC BY NC ND

formativas con evidencias verificables. La originalidad se plantea en esa articulación y deberá contrastarse con un conjunto más amplio de modelos; no se sostiene una primacía universal ni superioridad validada.

JUSTIFICACIÓN

La pertinencia para la formación del ingeniero reside en conectar competencias habitualmente trabajadas por separado: instrumentación, análisis de datos, mejora de procesos, evaluación de sostenibilidad y juicio ético. Una actividad de monitoreo puede producir información técnicamente correcta y, aun así, conducir a una decisión inadecuada si omite la seguridad del trabajador, la calidad del producto o el consumo de recursos. El modelo permite discutir esas interdependencias mediante evidencias y alternativas de intervención.

La sostenibilidad se considera desde las dimensiones ambiental, económica y social de la triple cuenta de resultados (Elkington, 1997). La circularidad agrega la atención a la conservación del valor de materiales y productos, para la cual las tecnologías digitales pueden apoyar estrategias manufactureras (Kristoffersen et al., 2020; Ertz y Gasteau, 2023). Estas perspectivas justifican que el diagnóstico incluya resultados y capacidades humanas, además de conectividad. Su utilización educativa se propone como una aplicación del marco, no como una intervención ya evaluada.

METODOLOGÍA

Diseño y delimitación del corpus

Se desarrolla un estudio conceptual mediante síntesis narrativa crítica de un corpus bibliográfico delimitado. La unidad de análisis es la aportación conceptual de cada publicación a la relación entre tecnología, decisiones, organización y sostenibilidad; no son las empresas ni los trabajadores. Se emplean catorce referencias de 1997 a 2026, incluidos fundamentos teóricos, revisiones, modelos de madurez y un antecedente sobre maquiladoras mexicanas. Se adopta este diseño porque el objetivo es integrar categorías y reglas de interpretación, antes de construir y validar una escala empresarial. Las referencias utilizadas se identifican en la Tabla 1 y en la bibliografía. La selección es intencional, basada en pertinencia, y no constituye una búsqueda exhaustiva de toda la literatura disponible.

Se incluyen trabajos que aportan al menos uno de estos elementos: mecanismos digitales en producción, medición de desempeño, circularidad, transformación organizacional o principios de Industria 5.0. Se incluyen dos modelos de referencia para contrastar la arquitectura diagnóstica y una revisión reciente para situar sus límites de transferencia. Se dejan fuera de la síntesis las fuentes sin una relación explícita con estos componentes; esta delimitación corresponde al objetivo conceptual y no constituye una evaluación de calidad de todo el campo. Los textos históricos e institucionales cumplen una función de fundamento; los artículos de revisión y los estudios empíricos proporcionan antecedentes. Las fuentes de revisión no se tratan como observaciones independientes de empresas ni se suman sus muestras, debido a su posible solapamiento. Tampoco se traslada a este artículo el carácter sistemático de las revisiones citadas.

El diseño no establece un protocolo de revisión sistemática ni permite estimar la cobertura del corpus frente al conjunto de publicaciones del campo. La síntesis se limita al contenido conceptual verificable en las publicaciones y sus secciones accesibles. La disponibilidad desigual de textos completos y la

CC BY NC ND

selección intencional restringen la cobertura y profundidad del análisis; por tanto, las relaciones propuestas deben considerarse una interpretación teórica sujeta a revisión.

Procedimiento de síntesis

La síntesis se organiza mediante cuatro campos de comparación: objeto evaluado, componentes tecnológicos y organizacionales, tratamiento de resultados sostenibles y alcance de la validación. La Tabla 1 registra la función conceptual de las fuentes. A partir de esas funciones se distinguen capacidades, acciones y resultados; después se proponen definiciones operativas e indicadores en la Tabla 2 y descriptores en la Tabla 3. La Tabla 4 contrasta el diseño con dos modelos previos y una revisión del campo. Esta organización permite examinar el razonamiento de la propuesta, sin atribuirle una codificación independiente, consenso entre expertos o fiabilidad interevaluador no realizados.

Tabla 1. Fundamentos bibliográficos de la síntesis conceptual

Eje analítico	Referencias	Función en la propuesta
IoT y producción sostenible	Díaz-Martínez et al. (2026a, 2026b); Román-Salinas et al. (2026)	Sustentar la distinción entre captura de datos, mecanismos operativos y resultados.
Transformación y medición	Vial (2019); Tortorella et al. (2019); Kamble et al. (2020)	Considerar capacidades organizacionales y evaluación del desempeño; evitar equiparar adopción con madurez.
Sostenibilidad y circularidad	Elkington (1997); Kristoffersen et al. (2020); Ertz y Gasteau (2023)	Incluir resultados ambientales, económicos y sociales y conservación del valor de recursos.
Orientación humana y contexto	European Commission (2021); García Alcaraz et al. (2022)	Incorporar centralidad humana y resiliencia y delimitar un antecedente manufacturero mexicano.
Modelos y transferencia	Schuh et al. (2020); Zoubek et al. (2021); Reyes Domínguez et al. (2026)	Contrastar componentes del diagnóstico y precisar sus límites de validación y adaptación.

Fuente: elaboración propia. La tabla muestra la función de las fuentes; no es una evaluación de su calidad ni un inventario exhaustivo del campo.

La inclusión de una categoría exige que tenga una función distinguible en el diagnóstico y una evidencia identificable. D1 describe disponibilidad y calidad de captura; D2 documenta el uso de esa información; D3 reúne competencias y responsabilidades; D4 registra consecuencias comparables; D5 examina criterios humanos y preparación ante interrupciones. Una misma evidencia puede informar varias dimensiones, pero su interpretación debe explicitar el papel que cumple en cada una. Los niveles se construyen como descriptores de uso, sin derivarlos de una distribución empírica ni de una secuencia universal.

Proposiciones y alcance

Se plantean tres proposiciones contrastables. P1: para una cobertura y calidad de datos comparables, la trazabilidad de las decisiones se asociaría con mejoras de desempeño; se

CC BY NC ND

examinaría relacionando registros de alertas, intervenciones y resultados normalizados. P2: competencias y responsabilidades claras facilitarían convertir una alerta en una acción; se contrastaría mediante evidencias de capacitación, asignación y cierre de intervenciones. P3: resultados ambientales u operativos favorables no bastarían para establecer preparación hacia Industria 5.0; deberían acompañarse de participación, supervisión humana y continuidad evaluada. Estas proposiciones orientan el diseño futuro y no son hipótesis comprobadas.

La unidad de una aplicación futura deberá ser un proceso o una planta delimitados. El contraste de P1 requerirá considerar mezcla de productos, volumen, mantenimiento y cambios simultáneos; P2 exige examinar mecanismos organizativos y no sólo contar cursos; P3 requiere descriptores observables para cada criterio humano y de resiliencia. Las flechas de la Figura 1 expresan el razonamiento conceptual, no efectos estimados.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Estructura y contribución del modelo

El resultado de la síntesis es un modelo con cinco dimensiones. Las tres primeras describen capacidades habilitadoras; la cuarta reúne resultados observables; la quinta examina preparación organizacional para los principios de Industria 5.0. Esta separación evita definir la madurez únicamente por el número de dispositivos y evita utilizar resultados sostenibles como prueba automática de capacidad digital. Una mejora puede responder a cambios de producto, mantenimiento convencional u otras acciones ajenas al IoT.

Tabla 2. Dimensiones e indicadores sugeridos del modelo

Dimensión y función	Definición operativa	Evidencia sugerida
D1 Infraestructura IoT Capacidad	Capturar e integrar datos confiables de variables críticas de un proceso.	Inventario de equipos; cobertura de variables; disponibilidad y calibración; integración de registros.
D2 Decisión basada en datos Capacidad	Interpretar información y convertirla en acciones trazables.	Reglas de alerta; responsables; órdenes de intervención; decisiones documentadas y seguimiento.
D3 Alineación socio-técnica Capacidad	Coordinar competencias, participación y responsabilidades en el uso de tecnología.	Evaluación de competencias; consulta al personal; protocolos de acceso; roles y gestión del cambio.
D4 Desempeño sostenible Resultados	Examinar cambios ambientales, económicos y sociales con una base comparable.	kWh por unidad conforme; residuos por unidad; costo por unidad; tiempos de paro; incidentes y condiciones ergonómicas.
D5 Preparación para Industria 5.0 Orientación	Incorporar centralidad humana, resiliencia y criterios éticos a las decisiones.	Planes de continuidad probados; revisión de riesgos; supervisión humana; protección de datos y participación en el diseño.

CC BY NC ND

Fuente: elaboración propia a partir de los ejes de la Tabla 1. Los indicadores se adaptarán al proceso y no constituyen un instrumento validado.

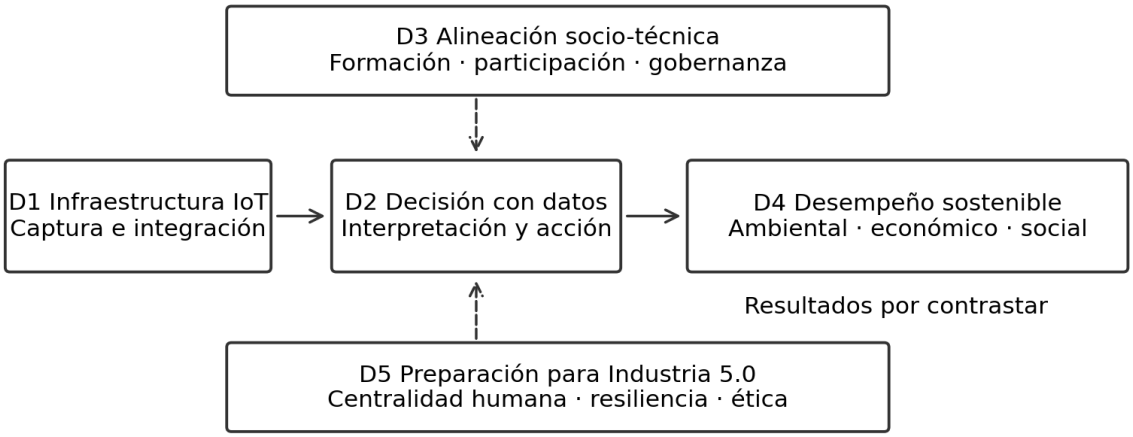


Figura 1. Relaciones conceptuales entre capacidades y resultados

Fuente: elaboración propia. Las flechas continuas representan el mecanismo propuesto entre datos, acciones y resultados; las discontinuas indican condiciones organizacionales. No representan causalidad estimada ni una secuencia obligatoria de adopción.

La infraestructura permite observar el proceso, pero la decisión introduce el mecanismo de intervención. La alineación socio-técnica sostiene la interpretación y ejecución, mientras que la preparación para Industria 5.0 establece criterios para valorar cómo se decide. La dimensión social de los resultados se refiere a consecuencias observables para las personas; D3 se refiere a capacidades organizativas y D5 a criterios y preparación. Por tanto, capacitación, bienestar y centralidad humana no se utilizan como sinónimos.

Niveles orientativos y uso diagnóstico

La Tabla 3 presenta cinco niveles como descriptores de referencia. No son etapas universales ni intervalos de una escala numérica: una planta puede integrar datos y mantener brechas en participación o resiliencia. Se propone elaborar primero un perfil por dimensión y documentar qué evidencia respalda cada juicio. El nivel 5 expresa una orientación hacia Industria 5.0, no una certificación de cumplimiento.

Tabla 3. Niveles orientativos para organizar un diagnóstico futuro

Nivel	Descriptor propuesto	Evidencia que se buscaría
1 Inicial	Registros predominantemente manuales y actuación reactiva.	Descripción del proceso, fuentes de datos y brechas de medición.
2 Digital básico	Captura digital parcial y uso local de información.	Sensores o registros identificados, responsables y limitaciones de integración.

CC BY NC ND

Nivel	Descriptor propuesto	Evidencia que se buscaría
3 Integrado	Datos vinculados con acciones de producción, calidad o mantenimiento.	Alertas, decisiones e intervenciones trazables; competencias y controles de acceso.
4 Orientado a sostenibilidad	Decisiones vinculadas con objetivos ambientales, económicos y sociales.	Líneas base, indicadores comparables y revisión conjunta de beneficios y efectos adversos.
5 Orientado a Industria 5.0	Criterios humanos, éticos y de resiliencia incorporados a la gestión.	Participación del personal, supervisión humana, continuidad evaluada y seguimiento de resultados.

Fuente: elaboración propia. La asignación de niveles y sus umbrales requiere validación; no se calcula un índice agregado en este artículo.

Para una aplicación piloto se recomienda delimitar el proceso, identificar objetivos, recopilar documentos y contrastar las respuestas de producción, mantenimiento, calidad, seguridad y recursos humanos. La evidencia faltante debe registrarse como no disponible, sin convertirla automáticamente en desempeño nulo. Antes de agregar puntuaciones se deberán validar ítems, reglas y ponderaciones. El desempeño de D4 se reportaría por separado para evitar circularidad entre capacidades y resultados.

Comparación con modelos previos y aportación específica

El índice de acatech organiza la transformación digital en seis etapas y cuatro áreas estructurales: recursos, sistemas de información, cultura y estructura organizacional (Schuh et al., 2020). Esta referencia muestra que la madurez digital ya comprende organización y aprendizaje. La propuesta conserva esa preocupación, pero concentra el análisis en la trazabilidad de una decisión IoT y sus consecuencias sostenibles, con productos de aprendizaje vinculados a cada dimensión.

Zoubek et al. (2021) incorporan atributos ambientales de procesos productivos y no productivos en un modelo de madurez. La sostenibilidad, por tanto, tampoco constituye por sí sola una novedad. El diseño aquí propuesto amplía la discusión hacia resultados económicos y sociales y distingue esos resultados de la capacidad de medirlos y de los criterios humanos utilizados al decidir. Se trata de una diferencia de organización conceptual, no de una comparación empírica de precisión diagnóstica.

Tabla 4. Comparación conceptual con antecedentes seleccionados

Referencia y objeto	Componentes o alcance documentados	Relación con la propuesta
Schuh et al. (2020) Transformación digital	Seis etapas; recursos, sistemas, cultura y estructura organizacional.	Se retoman capacidades organizativas; se focaliza la cadena dato–decisión–resultado y su uso formativo.

CC BY NC ND

Referencia y objeto	Componentes o alcance documentados	Relación con la propuesta
Zoubek et al. (2021) Madurez y ambiente	Atributos ambientales de procesos productivos y no productivos.	Se distingue desempeño de capacidades; se consideran también consecuencias económicas y sociales.
Reyes Domínguez et al. (2026) Revisión del campo	Validación, alcance sectorial y aplicabilidad de modelos a economías emergentes.	Se explicitan límites de transferencia y una ruta de validación contextual.

Fuente: elaboración propia a partir de las referencias citadas. La comparación es selectiva y conceptual; no evalúa exhaustivamente sus instrumentos ni prueba superioridad del modelo propuesto.

La aportación específica es una regla de interpretación del diagnóstico: la existencia del dato se examina en D1, la acción documentada en D2, sus condiciones organizativas en D3, las consecuencias en D4 y su orientación humana y resiliente en D5. Esa separación permite identificar brechas distintas y evita que una puntuación tecnológica elevada oculte resultados adversos. Su uso educativo exige que el estudiante justifique la relación entre evidencia y decisión; la utilidad de esta regla deberá evaluarse frente a otros enfoques.

Relación con los antecedentes y límites de interpretación

La propuesta da continuidad conceptual a tres investigaciones previas en las que participa Morales-Rodríguez como coautor. Díaz-Martínez et al. (2026a) examinan las relaciones entre IoT y sostenibilidad corporativa en ecosistemas de Industria 4.0; Díaz-Martínez et al. (2026b) revisan el impacto del IoT sobre la sostenibilidad; y Román-Salinas et al. (2026) organizan mecanismos de sostenibilidad en sistemas productivos y su relación con la manufactura centrada en las personas. Estos antecedentes fundamentan la atención a captura de datos, uso de información y resultados sostenibles. El presente artículo desarrolla una aplicación distinta: organiza esos vínculos en dimensiones diagnósticas, evidencias sugeridas y tareas para la formación del ingeniero. Esta continuidad no implica reutilizar sus resultados como validación del modelo ni presentar las revisiones como evidencia empresarial independiente. La distinción entre adopción tecnológica y desempeño también se apoya en Tortorella et al. (2019) y Kamble et al. (2020).

El marco de circularidad de Kristoffersen et al. (2020) y el estudio de Ertz y Gasteau (2023) ayudan a distinguir mecanismos digitales y conservación del valor de los productos. En esta propuesta, trazabilidad y datos sobre materiales pueden apoyar preguntas sobre recuperación, reutilización o extensión de vida útil. Esa relación es una posibilidad de aplicación; no implica que toda instalación de IoT reduzca residuos ni que una estrategia circular produzca beneficios netos en cualquier contexto.

Para la manufactura mexicana, la adaptación deberá considerar tamaño de planta, proceso, acceso a infraestructura y responsabilidades de gestión. El antecedente de maquiladoras de García Alcaraz et al. (2022) aporta pertinencia contextual, pero no sustituye evidencia sobre IoT. No se extrapolan hallazgos de otros países al conjunto de México ni se presenta un diagnóstico nacional. La validación debe examinar qué dimensiones son relevantes y qué evidencias pueden obtenerse en cada sector.

La revisión de Reyes Domínguez et al. (2026) identifica dificultades de validación, transferencia contextual y operacionalización de dimensiones de Industria 5.0. Esas dificultades también afectan

CC BY NC ND

a este diseño: nombrar a México como ámbito futuro no acredita pertinencia nacional. Por ello, su adaptación deberá examinar disponibilidad de registros, responsabilidades y restricciones de cada proceso; las conclusiones de esa revisión no se convierten aquí en estimaciones sobre empresas mexicanas.

Aplicación en la formación del ingeniero

Se propone emplear el modelo en un proyecto integrador de ingeniería industrial, organizado alrededor de un proceso real autorizado o un caso didáctico claramente identificado. El problema puede consistir en relacionar consumo energético, defectos y tiempos de paro. El estudiante deberá delimitar el sistema, seleccionar variables, justificar una estrategia de medición y explicar qué decisión podría tomarse con cada dato. La adquisición de información debe ser proporcional al problema y a los recursos disponibles.

La actividad puede desarrollarse en tres entregables. El primero describe el proceso y la arquitectura de captura, con criterios de calidad de datos. El segundo integra registros, calcula indicadores comparables y propone una intervención. El tercero analiza su viabilidad económica, sus riesgos laborales, las necesidades de capacitación y la continuidad ante fallas. De este modo se articulan conocimientos de medición, estadística, calidad, mantenimiento, sustentabilidad y gestión de proyectos, sin exigir una implementación empresarial completa.

La evaluación educativa propuesta considera coherencia entre problema y medición, trazabilidad de cálculos, justificación de decisiones, análisis de impactos y comunicación técnica. Cada criterio debe contar con descriptores y evidencias definidos por el docente antes de la actividad. Una solución técnicamente eficiente que omita seguridad o use datos personales sin justificación no debería considerarse suficiente. Esta rúbrica es una recomendación de diseño: no se ha aplicado a estudiantes ni se han medido ganancias de aprendizaje.

Un caso didáctico podría presentar datos simulados de una línea con mediciones de energía y paros. La integración de esos registros permitiría discutir D1 y D2; el registro de capacitación y responsabilidades permitiría examinar D3; una comparación de indicadores normalizados abordaría D4; y un escenario de pérdida de conectividad serviría para D5. El ejemplo no representa una empresa observada ni prueba efectos del modelo. Su utilidad es mostrar cómo una misma situación puede requerir decisiones técnicas, sociales y éticas.

Como regla propuesta para el caso didáctico, cada decisión debe acompañarse de variable, unidad, periodo, fuente, calidad del registro y responsable. Por ejemplo, una reducción del consumo total no permite afirmar una mejora de eficiencia si disminuyó la producción: el estudiante deberá comparar energía por unidad conforme y explicar cambios de producto y carga. También deberá reconocer posibles compensaciones, como menor tiempo de paro con mayor costo o exposición laboral. Esta exigencia convierte el modelo en una herramienta para argumentar decisiones, cuya eficacia educativa sigue pendiente de evaluación.

Limitaciones y validación futura

La selección intencional del corpus puede introducir sesgo; las revisiones citadas pueden compartir estudios y no deben contarse como evidencia independiente. No se dispone de una muestra empresarial, mediciones propias, evaluación de expertos ni resultados educativos. Por ello, el modelo no tiene validez de constructo, fiabilidad o capacidad predictiva establecidas. Las dimensiones pueden solaparse y los niveles no cuentan con umbrales comprobados. También será necesario valorar costos de conectividad, mantenimiento, seguridad y tratamiento de datos, además de los beneficios esperados.

CC BY NC ND

La validación futura deberá iniciar con revisión de contenido por expertos, delimitación de ítems y una aplicación piloto en procesos manufactureros. Posteriormente podrán examinarse comprensión, acuerdo entre evaluadores, estructura de las dimensiones y relación con indicadores externos. El diseño muestral y la técnica estadística dependerán del instrumento y de los datos disponibles; no se recomienda aplicar ecuaciones estructurales de manera automática. La aplicación educativa requerirá una evaluación independiente mediante productos de aprendizaje y un diseño adecuado para atribuir cambios a la intervención.

CONCLUSIONES

La síntesis conceptual produjo un marco de cinco dimensiones, indicadores sugeridos y cinco niveles orientativos. La comparación selectiva reconoce que otros modelos ya integran organización y ambiente. Su aportación específica es vincular la cadena dato–decisión–resultado con criterios humanos y de continuidad y con tareas formativas verificables, manteniendo diferenciadas las evidencias de cada componente. La pregunta de investigación se responde mediante una estructura que incorpora captura de datos, acción, coordinación humana, resultados y preparación ética y resiliente; no mediante la medición de empresas o estudiantes.

Se concluye que el modelo ofrece una base conceptual para orientar el análisis de la madurez sostenible habilitada por IoT y su enseñanza en ingeniería industrial, siempre que sus categorías se utilicen como propuestas por validar. Para emplearlo como instrumento de clasificación en la manufactura mexicana se requiere demostrar pertinencia contextual, fiabilidad y validez; para sostener beneficios educativos se requiere evaluar su aplicación. En consecuencia, su alcance actual es organizar preguntas y evidencias para diagnóstico y aprendizaje, sin certificar niveles de madurez ni afirmar mejoras causales.

REFERENCIAS

Díaz-Martínez, M. A., Román-Salinas, R. V., Fuentes-Rubio, Y. A., Morales-Rodríguez, M. A., Cervantes-Zubirias, G., & Rivera-García, G. E. (2026a). IoT-driven pathways toward corporate sustainability in Industry 4.0 ecosystems: A systematic review. Sustainability, 18(2), 1052. https://doi.org/10.3390/su18021052

Díaz-Martínez, M. A., Román-Salinas, R. V., Vargas-Castilleja, R. C., Morales-Rodríguez, M. A., Cervantes-Zubirias, G., Fuentes-Rubio, Y. A., Grande-Ramírez, J. R., & González-Rubín, V. I. (2026b). The impact of the internet of things on corporate sustainability in the Industry 4.0 era: A systematic literature review. Results in Engineering, 29, 109304. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.109304

Elkington, J. (1997). Cannibals with forks: The triple bottom line of 21st century business. Capstone.

Ertz, M., & Gasteau, F. (2023). Role of smart technologies for implementing industry 4.0 environment in product lifetime extension towards circular economy: A qualitative research. Heliyon, 9(6), e16762. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16762

CC BY NC ND

European Commission, Directorate-General for Research and Innovation. (2021). Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry. Publications Office of the European Union. https://doi.org/10.2777/308407

García Alcaraz, J. L., Morales García, A. S., Díaz Reza, J. R., Blanco Fernández, J., Jiménez Macías, E., & Puig i Vidal, R. (2022). Machinery lean manufacturing tools for improved sustainability: The Mexican maquiladora industry experience. Mathematics, 10(9), 1468. https://doi.org/10.3390/math10091468

Kamble, S. S., Gunasekaran, A., Ghadge, A., & Raut, R. (2020). A performance measurement system for industry 4.0 enabled smart manufacturing system in SMMEs: A review and empirical investigation. International Journal of Production Economics, 229, 107853. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107853

Kristoffersen, E., Blomsma, F., Mikalef, P., & Li, J. (2020). The smart circular economy: A digital-enabled circular strategies framework for manufacturing companies. Journal of Business Research, 120, 241–261. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.07.044

Reyes Domínguez, D., Infante Abreu, M. B., & Parv, A. L. (2026). Industry 4.0/5.0 maturity models: Empirical validation, sectoral scope, and applicability to emerging economies. Systems, 14(2), 134. https://doi.org/10.3390/systems14020134

Román-Salinas, R. V., Díaz-Martínez, M. A., Fuentes-Rubio, Y. A., Vargas-Castilleja, R. d. C., Rivera-García, G. E., Ramírez-Vázquez, J. C., Morales-Rodríguez, M. A., Cervantes-Zubirias, G., & Grande-Ramírez, J. R. (2026). IoT-enabled sustainability in production systems: A systematic review of Industry 4.0 mechanisms and the transition toward human-centric manufacturing. Sustainability, 18(12), 6299. https://doi.org/10.3390/su18126299

Schuh, G., Anderl, R., Dumitrescu, R., Krüger, A., & ten Hompel, M. (Eds.). (2020). Industrie 4.0 maturity index: Managing the digital transformation of companies (Update 2020). acatech. https://en.acatech.de/publication/industrie-4-0-maturity-index-update-2020/

Tortorella, G. L., Giglio, R., & van Dun, D. H. (2019). Industry 4.0 adoption as a moderator of the impact of lean production practices on operational performance improvement. International Journal of Operations & Production Management, 39(6/7/8), 860–886. https://doi.org/10.1108/IJOPM-01-2019-0005

Vial, G. (2019). Understanding digital transformation: A review and a research agenda. The Journal of Strategic Information Systems, 28(2), 118–144. https://doi.org/10.1016/j.jsis.2019.01.003

Zoubek, M., Poor, P., Broum, T., Basl, J., & Simon, M. (2021). Industry 4.0 maturity model assessing environmental attributes of manufacturing company. Applied Sciences, 11(11), 5151. https://doi.org/10.3390/app11115151

CC BY NC ND