



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), julio-agosto 2026,
Volumen 10, Número 4.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i4

CLÚSTERES TECNOLÓGICOS DE LA TRANSFORMACIÓN DIGITAL EN EL CICLO DE VIDA DEL PRODUCTO

TECHNOLOGICAL CLUSTERS OF DIGITAL TRANSFORMATION IN THE PRODUCT LIFE CYCLE

Cristian Joel Jáuregui Sánchez

Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Gisselle Blanca Silva Núñez

Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Gustavo Alexander Quiroz Chumbimuni

Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Royer Publio Osorio Huasco

Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Friedman Edgard Turín Alvarado

Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Clústeres tecnológicos de la transformación digital en el ciclo de vida del producto

Cristian Joel Jáuregui Sánchez¹

cristian.jauregui.s@uni.pe

<https://orcid.org/0009-0001-7971-4326>

Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Gisselle Blanca Silva Núñez

gisselle.silva.n@uni.pe

<https://orcid.org/0009-0005-5725-7784>

Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Gustavo Alexander Quiroz Chumbimuni

gustavo.quiroz.c@uni.pe

<https://orcid.org/0009-0003-0239-5341>

Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Royer Publio Osorio Huasco

r.osorio.h@uni.pe

<https://orcid.org/0009-0000-5947-062X>

Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Friedman Edgard Turín Alvarado

friedman.turin.a@uni.pe

<https://orcid.org/0009-0000-8509-471X>

Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

RESUMEN

La transformación digital integra siete clústeres tecnológicos -Internet de las Cosas, Big Data e Inteligencia Artificial, Cloud Computing, Fabricación Aditiva, Gemelos Digitales, Robótica Avanzada y Ciberseguridad/Blockchain- en el desarrollo de productos, aunque la literatura los aborda de forma dispersa. Esta revisión sistemática, bajo el protocolo PRISMA 2020, analizó la integración de estos clústeres en el desarrollo de productos, sus aplicaciones, beneficios y desafíos. Se buscó en Scopus y ScienceDirect (5592 registros identificados), evaluando 114 estudios en texto completo, de los cuales 82 cumplieron los criterios de elegibilidad. Los resultados muestran que el Gemelo Digital domina la literatura (74.4% de los estudios), concentrado en Diseño/Desarrollo (37.8%) y Manufactura (32.9%), con fuerte concentración geográfica en Alemania (72%) y editorial en Procedia CIRP (84%). Los beneficios reportados incluyen reducciones de hasta 98% en esfuerzo manual de ingeniería y clasificaciones de uso con más de 96% de precisión, mientras que las barreras son técnicas, organizacionales y económicas. Se concluye que el Gemelo Digital funciona como eje integrador de las demás tecnologías, identificándose vacíos en Ciberseguridad/Blockchain, Cloud Computing, la fase de fin de vida del producto, y en la representatividad geográfica de la evidencia disponible.

Palabras clave: transformación digital; ciclo de vida del producto; gemelos digitales; Industria 4.0; revisión sistemática.

¹Autor principal

Correspondencia: cristian.jauregui.s@uni.pe

Technological clusters of digital transformation in the product life cycle

ABSTRACT

Digital transformation integrates seven technological clusters -Internet of Things, Big Data and Artificial Intelligence, Cloud Computing, Additive Manufacturing, Digital Twins, Advanced Robotics, and Cybersecurity/Blockchain- into product development, although the literature addresses them separately. This systematic review, following the PRISMA 2020 protocol, analyzed the integration of these clusters in product development, their applications, benefits, and challenges. Scopus and ScienceDirect were searched (5592 records identified), yielding 114 full-text assessed studies, of which 82 met the eligibility criteria. Results show that Digital Twin dominates the literature (74.4% of studies), concentrated in Design/Development (37.8%) and Manufacturing (32.9%), with strong geographic concentration in Germany (72%) and editorial concentration in Procedia CIRP (84%). Reported benefits include reductions of up to 98% in manual engineering effort and usage-scenario classification with over 96% accuracy, while identified barriers are technical, organizational, and economic. Digital Twin is concluded to function as an integrating hub for the other technologies, with gaps identified in Cybersecurity/Blockchain, Cloud Computing, the end-of-life phase, and the geographic representativeness of the available evidence.

Keywords: digital transformation; product life cycle; digital twins; Industry 4.0; systematic review.

*Artículo recibido 20 mayo 2026
Aceptado para publicación: 20 junio 2026*



INTRODUCCIÓN

La cuarta revolución industrial ha situado a la transformación digital como un eje central en la manera en que las organizaciones diseñan, producen y gestionan sus productos a lo largo de todo su ciclo de vida. Dentro de este proceso conviven al menos siete clústeres tecnológicos interrelacionados -Internet de las Cosas (IoT/IIoT), Big Data e Inteligencia Artificial, Cloud Computing, Fabricación Aditiva, Gemelos Digitales y Realidad Extendida, Robótica Avanzada y Automatización, y Ciberseguridad y Blockchain-, cada uno con una literatura propia que rara vez se examina de forma conjunta bajo el marco del ciclo de vida del producto.

Diversas revisiones previas han abordado estos clústeres de manera parcial. Por ejemplo, Lo et al. (2021) revisan específicamente el uso del Gemelo Digital en el diseño y desarrollo de producto, mientras que Liu et al. (2021) y Ante (2021) se concentran en mapear conceptual y bibliométricamente el campo del Gemelo Digital en la manufactura inteligente, sin vincularlo explícitamente a otras fases del ciclo de vida más allá del diseño y la producción. Por su parte, Wang et al. (2021) examinan el rol de la Inteligencia Artificial a lo largo de las etapas de Product Lifecycle Management (PLM), y Lou et al. (2025) revisan los sistemas humano-ciber-físicos propios de la Industria 5.0, evidenciando que la investigación reciente tiende a analizar cada clúster tecnológico de forma aislada o, cuando mucho, en pares. Esta dispersión constituye un vacío de conocimiento relevante: no existe, hasta donde se ha podido identificar, una síntesis que integre los siete clústeres bajo un mismo marco de ciclo de vida del producto.

La relevancia de cerrar este vacío es tanto teórica como práctica. En el plano teórico, permite construir un mapa integral de qué tecnologías se aplican en qué fase del desarrollo de producto, y con qué evidencia empírica de respaldo. En el plano práctico, ofrece a gestores de ingeniería y de innovación un panorama basado en evidencia para priorizar inversiones tecnológicas según la fase del ciclo de vida en la que se encuentren sus productos.

Como marco teórico, este estudio se apoya en tres cuerpos de literatura complementarios. Primero, el paradigma de Industria 4.0, que articula la digitalización de los sistemas productivos mediante la interconexión de tecnologías físicas y digitales. Segundo, la disciplina de Product Lifecycle Management (PLM), que organiza la gestión de la información del producto a lo largo de sus fases de

ideación, diseño, manufactura, uso y fin de vida (Wang et al., 2021). Tercero, el concepto de Gemelo Digital como representación virtual sincronizada de un producto o sistema físico, identificado en revisiones previas como una de las tecnologías con mayor potencial transformador dentro del desarrollo de producto (Lo et al., 2021; Liu et al., 2021; Ante, 2021), pero cuya integración con los demás clústeres tecnológicos -más allá de estudios de caso aislados- aún no ha sido sistematizada.

Preguntas de investigación:

- PI1: ¿De qué manera se están aplicando los siete clústeres tecnológicos en las distintas fases del desarrollo de productos (ideación, diseño, prototipado, pruebas y lanzamiento)?
- PI2: ¿Qué impacto (reducción de tiempos, optimización de costos, mejora de calidad) reporta la literatura empírica al integrar estos clústeres?
- PI3: ¿Cuáles son las principales barreras o desafíos metodológicos para la adopción de estas tecnologías en el ciclo de vida del producto?

Objetivo principal: analizar el estado actual de la literatura científica respecto a la integración de los siete clústeres tecnológicos de la transformación digital en el proceso de desarrollo de nuevos productos, identificando sus aplicaciones, beneficios y desafíos.

METODOLOGÍA

Enfoque y tipo de investigación

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque cualitativo de tipo documental. Corresponde a una Revisión Sistemática de la Literatura (RSL), cuyo proceso de identificación, selección y reporte de estudios sigue los lineamientos establecidos por la declaración PRISMA 2020 (Page et al., 2021). El alcance del estudio es descriptivo, orientado a sintetizar la evidencia científica disponible sobre la integración de los siete clústeres tecnológicos de la transformación digital (Internet de las Cosas, Big Data e Inteligencia Artificial, Cloud Computing, Fabricación Aditiva, Gemelos Digitales y Realidad Extendida, Robótica Avanzada y Automatización, y Ciberseguridad y Blockchain) en las distintas fases del ciclo de vida del producto.

Fuentes de información y estrategia de búsqueda

La búsqueda se realizó en Scopus y ScienceDirect, combinando tres bloques conceptuales con el operador AND: (1) desarrollo de productos y ciclo de vida, (2) transformación digital, y (3) los siete clústeres tecnológicos; dentro de cada bloque se usaron sinónimos combinados con OR.

Ecuación en Scopus (TITLE-ABS-KEY), 535 resultados:

TITLE-ABS-KEY (("product development" OR "new product development" OR "product lifecycle") AND ("digital transformation" OR "Industry 4.0" OR "digitalization") AND ("IoT" OR "internet of things" OR "big data" OR "artificial intelligence" OR "cloud computing" OR "additive manufacturing" OR "3D printing" OR "digital twin" OR "augmented reality" OR "cybersecurity" OR "robotics")) AND PUBYEAR > 2020

Ecuación en ScienceDirect (campo Title/abstract/keywords, acotada por el límite de conectores del buscador a IoT, IA, Impresión 3D y Gemelos Digitales), 5057 resultados:

("product development" OR "new product development") AND ("digital transformation" OR "Industry 4.0") AND ("IoT" OR "artificial intelligence" OR "3D printing" OR "digital twin")

Se restringió a artículos de 2021-2026, en inglés o español. No fue necesario ampliar a SpringerLink (contemplada inicialmente) dado el volumen ya suficiente obtenido.

Criterios de elegibilidad

La Tabla 1 presenta los criterios de inclusión y exclusión aplicados; el incumplimiento de al menos uno determinó el descarte del estudio.

Tabla 1. Criterios de elegibilidad

Criterio	Inclusión	Exclusión
Periodo de publicación	2021 – 2026	Publicaciones anteriores a 2021
Tipo de documento	Artículos de investigación originales, empíricos o de estudio de caso	Revisiones de literatura, capítulos de libro, tesis, editoriales o actas cortas
Disponibilidad	Acceso Abierto (Open Access)	Acceso restringido (Paywall) o sin texto completo disponible
Idioma	Inglés y Español	Cualquier otro idioma
Enfoque temático (Población/Contexto)	Procesos de desarrollo de productos, diseño de productos o ciclo de vida del producto	Transformación digital en otras áreas (marketing, RR. HH., finanzas puras)
Enfoque temático (Intervención)	Aplicación explícita de al menos uno de los siete clústeres tecnológicos	Artículos sobre digitalización genérica sin especificar tecnología o clúster

Proceso de selección de estudios

El proceso siguió las fases de PRISMA 2020: identificación, cribado, evaluación de texto completo e inclusión final (detalle completo en la Tabla 2 y la Figura 1). De 5592 registros identificados, 114 informes (100 ScienceDirect + 14 Scopus) fueron evaluados en texto completo; 82 fueron incluidos y 32 excluidos.

Tabla 2. Registros evaluados e incluidos (estado actual del proceso)

Fase	Nº
Registros identificados en ScienceDirect	5057
Registros identificados en Scopus	535
Total de registros identificados	5592
Registros duplicados eliminados (estimado)	80
Registros cribados (título y resumen)	5512
Registros excluidos en cribado (estimado)	5398
Informes evaluados en texto completo	114
— Procedentes de ScienceDirect	100
— Procedentes de Scopus	14
Estudios incluidos (elegibles)	82
Estudios excluidos en texto completo	32

La Tabla 3 desagrega los motivos de exclusión: la mayoría (25 de 32) corresponde al Criterio 2 (revisiones o propuestas conceptuales sin validación empírica).

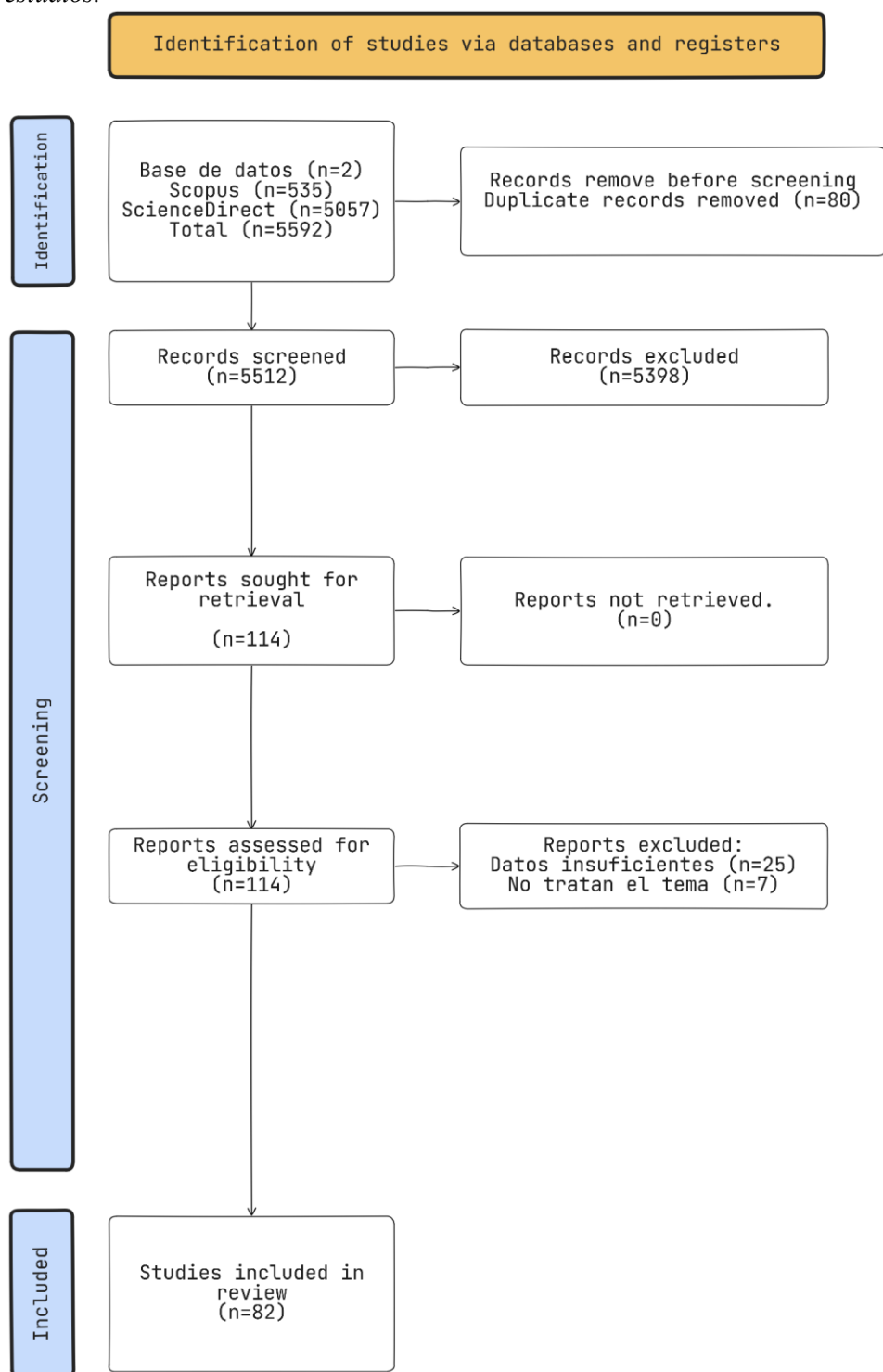
Tabla 3. Motivos de exclusión por criterio incumplido

Motivo de exclusión (criterio incumplido)	Nº de estudios
Criterio 2 — Tipo de documento (mayoritariamente revisiones de literatura, propuestas conceptuales/teóricas o estudios sin validación empírica)	25
Criterio 3 — Contexto (aplicación ajena al desarrollo, diseño o ciclo de vida del producto)	4
Criterio 4 — Intervención (no aplica explícitamente ninguno de los clústeres tecnológicos definidos)	4

Para efectos del diagrama de flujo PRISMA (Figura 1), los motivos anteriores se agrupan en dos categorías: “Datos insuficientes” (equivalente al Criterio 2, n=25) y “No tratan el tema” (equivalente a los Criterios 3 y 4 combinados, n=7).

La Figura 1 resume el proceso completo de selección mediante el diagrama de flujo PRISMA 2020.

Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA 2020 del proceso de identificación, cribado y selección de estudios.



Instrumento de extracción de datos

Se empleó una matriz bibliográfica en Excel con 20 campos: identificación (código, autor, año, título, revista, país, base de datos, DOI), caracterización (tipo de estudio, clúster tecnológico, fase del ciclo de vida, muestra/contexto, metodología), y síntesis (beneficios, desafíos, hallazgos clave, cita representativa, nivel de relevancia y estado de elegibilidad).

Consideraciones éticas y limitaciones

Al ser un estudio documental, no involucra sujetos humanos. Limitaciones: (i) búsqueda restringida a Scopus y ScienceDirect; (ii) posible exclusión de estudios bajo modelos de suscripción; (iii) fuerte concentración editorial (Procedia CIRP) y geográfica (Alemania), con riesgo de sesgo de publicación; y (iv) dependencia de la calidad y transparencia con que cada estudio primario reportó su evidencia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Selección y características generales de los estudios

Del corpus final de 82 estudios (ver proceso completo en Tablas 2 y 3 y Figura 1), 69 (84.1%) fueron clasificados con relevancia alta y 13 (15.9%) con relevancia media. Predominan los estudios de caso — industriales, técnicos o experimentales— (56 de 82, 68.3%), consistente con el Criterio 2 que exigió evidencia empírica original.

Cabe señalar que dos estudios incluidos (Seegrün et al., 2023; Oliveira-Dias et al., 2022) combinan una revisión de literatura con un componente de estudio de caso o encuesta empírica propios; se optó por mantenerlos en la síntesis dado que aportan datos primarios propios más allá de la revisión, aunque se recomienda una verificación adicional de este criterio en una futura actualización de la revisión.

La Tabla 4 identifica los 82 estudios mediante un código interno (apellido del primer autor + año), su clúster y fase del ciclo de vida abordada, para facilitar su ubicación en el resto de esta sección; la referencia completa de cada uno está en la Lista de Referencias.

Tabla 4. Estudios incluidos en la síntesis (n=82)

Código	Autor(es) y año	Título (abreviado)	Revista	Clúster(es)	Fase
LOP- 2023	Ahumada- Tello & Evans (2023)	Human Factors, Innovation and Technology, and Cluster Strategies	Procedia CIRP	IA, Blockchain	Ideación / Diseño
ALE- 2023	Alexopoulos et al. (2023)	An industrial data-spaces framework for resilient manufacturing value...	Procedia CIRP	Cloud	Logística / Manufactura
RÖH- 2023	Arnemann et al. (2023)	Information Model to Return Data of Digital Twins into Product Design	Procedia CIRP	Gemelo Digital	Diseño / Ciclo de vida
PFA- 2026	Augustino Doan et al. (2026)	Framework selection for simulation-driven, web-based digital twins	Procedia CIRP	Gemelo Digital	Operación / Diseño
BAR- 2021	Barata & Da Cunha (2021)	Augmented product information: crafting physical-digital transparency...	Int. J. Adv. Manuf. Technol.	IoT, Cloud, Gemelo Digital/AR-VR	Uso, Operación y Mantenimiento / Fin de...
STO- 2022	Bertoni et al. (2022)	Digital Twins of Operational Scenarios in Mining for Design of Electr...	Procedia CIRP	Gemelo Digital	Operación / Diseño de Producto

LIC- 2024	Burggräf et al. (2024)	Towards Digital Twin Driven Planning	Procedia CIRP	Gemelo Digital	Planificación / Fábrica
BIE- 2021	Czwick & Anderl (2021)	Conceptual Use Cases for Integrating Artificial Intelligence into Cyb...	Procedia CIRP	Big Data/IA	Desarrollo / Producto-Servicio
WUR- 2021	De Almeida et al. (2021)	Innovative Framework to manage New Product Development (NPD) Integrat...	Procedia CIRP	Fab. Aditiva	Ideación / Prototipado
KRA- 2021	De Oliveira Hansen et al. (2021)	Design and development of Automation Equipment based on Digital Twin	Procedia CIRP	Gemelo Digital	Diseño y Comisionamiento
KAU- 2026	Disselkamp et al. (2026)	Sketch2Factory: Roadmap for AI-Driven Sketch-to-3D Model Pipeline	Procedia CIRP	Gemelo Digital	Ideación / Diseño
HEN- 2025	Enarevba & Haapala (2025)	Sustainability assessment of industrial hemp enabled by Industry 4.0	Procedia CIRP	IoT, IA	Manufactura / Sostenibilidad
ZHO- 2025	Escobedo et al. (2025)	Towards an Intelligent Digital Machine Twin for CAM Process	Procedia CIRP	Gemelo Digital	Manufactura / CAM

BIE- 2021	Gaha et al. (2021)	Towards the implementation of the Digital Twin in CMM inspection	Procedia	Gemelo Digital	Pruebas / Calidad
KUG- 2023	Göllner et al. (2023)	Guidelines for providing digital twins	Procedia CIRP	Gemelo Digital	Manufactura / Gestión de activos
HAM- 2025	Hamlaoui et al. (2025)	Digital Twin for Field Data Management: Design of a platform to promo...	Procedia CIRP	IoT	Operación / Pruebas
HAM- 2026	Hamlaoui et al. (2026)	Digital Twin for Field Data Management: Text-Based Descripti...	Procedia CIRP	Gemelo Digital	Desarrollo / Pruebas
MÜL- 2024	Hidalgo-Crespo et al. (2024)	Design platform concept for product-as-a-Service by electrical EEE	Procedia CIRP	Gemelo Digital	Ciclo de Vida
HEI- 2024	Himmelstoss et al. (2024)	Digital Twins and Software Services: Leveraging Product Data for Digi...	Procedia CIRP	Cloud	Desarrollo / Producto-Servicio
REU- 2023	Himmelstoß et al. (2023)	Designing Smart Services for a Component	Procedia CIRP	Gemelo Digital	Servicios / Ciclo de vida

		Manufacturer Based on			
		Digita...			
KLA-2026	Huang et al. (2026)	Toward an XR-Based Scalable Modular CIRP Design Framework for Smart PSS	Gemelo Digital	Diseño / Producto-Servicio	
JAG-2021	Jaguschi et al. (2021)	Digital thread in shipbuilding as a CIRP prerequisite for the digital twin	Gemelo Digital	Diseño / Producción	
ZHI-2022	Zhi et al. (2022)	A modeling method of complex assembly based on digital twin	Gemelo Digital/AR-VR	Prototipado / Ensamblaje	
SCH-2024	Kattenstroth et al. (2024)	Challenges in the implementation of CIRP simulation models for the digital...	Gemelo Digital	Diseño / Manufactura	
KAU-2026	Kausler et al. (2026)	AI-Driven Product-Production-CoDesign through digital manufacturing c...	Big Data/IA	Diseño del producto / Planificación de...	
HOF-2025	Kovacevic et al. (2025)	Augmented Reality to Visualize Digital Twins for Remote Final Accepta...	Gemelo Digital/AR-VR	Pruebas / Aceptación final	

KUG- 2021	Kugler et al. (2021)	Method for the Procedia generation of use case related views for Digital Twins	Gemelo Digital	Operación / Diseño
MÖL- 2021	Kuhn & Lucke (2021)	Supporting the Digital Transformation: A Low-Threshold Approach	IoT, IA	Operación / Mantenimiento
PFA- 2021	Langlotz et al. (2021)	Unification of lean production and Industry 4.0	Automatización, IA	Producción / Manufactura
MAU- 2022	Langlotz et al. (2022)	Concept of hybrid modeled digital twins and its application for produ...	Big Data/IA	Producción
THU- 2024	Leirmo (2024)	Digital Twins for Industry 5.0: Unlocking the Human Potential	Gemelo Digital	Manufactura
KAU- 2024	Lick et al. (2024)	Digital Factory Twin: A Practitioner-Driven Approach for Integrating...	Gemelo Digital	Manufactura / Producción
LIC- 2024	Lick et al. (2024)	Guiding The Transformation To A CIRP	Gemelo Digital	Operación / Estrategia

		Digital Factory Twin: Towards An Ente...			
LIU- 2023	Liu et al. (2023)	Leveraging digital Comput. Ind. IoT, IA capabilities toward a Eng. circular economy		Fin de vida / Logística	
SCH- 2021	Martikkala et al. (2021)	Trends for Low Cost Procedia and Open Source IoT Manuf. Solutions Development	Gemelo Digital	Desarrollo / Manufactura	
ANG- 2023	Mediavilla et al. (2023)	Asset administration Procedia shell-based engineering CIRP change management proces...	Gemelo Digital/AR-VR	Diseño / Ingeniería de Cambios	
WAC- 2026	Meyer & Jochem (2026)	Derivation of key Procedia success factors for the CIRP use of digital twins in pro...	Gemelo Digital	Operación y Cadena de Valor	
EIC- 2024	Molter et al. (2024)	Development of a Procedia characterization and CIRP modeling method for Digital Twi...	Gemelo Digital	Diseño / Manufactura	
NAM- 2024	Nambiar et al. (2024)	Automation in Procedia Unstructured CIRP Production Environments Using Isaac Sim: A...	Gemelo Digital	Manufactura / Producción	

ZHU-2021	Nick et al. (2021)	Industry 4.0 readiness in manufacturing: Company Compass 2.0	Procedia Manuf.	Gemelo Digital	Planificación Manufactura	/
OLI-2022	Oliveira-Dias et al. (2022)	The link between information and digital technologies of I4.0 and agi...	Comput. Ind. Eng.	Gemelo Digital	Planificación Estrategia	/
SEN-2023	P. Senna et al. (2023)	Development of a digital maturity model for Industry 4.0 based on the...	Comput. Ind. Eng.	Big Data/IA	Planificación Estrategia	/
PER-2024	Peretz-Andersson et al. (2024)	Artificial intelligence implementation in manufacturing SMEs: A resou...	Int. J. Manage.	Big Data/IA	Planificación Estratégica	
HOF-2025	Permin et al. (2025)	Success Factors for Value Creation in CIRP Industry 4.0	Procedia	Gemelo Digital	Estrategia Operación	/
PIC-2025	Pickel et al. (2025)	A survey on the utilization of CIRP ontologies for decision-making in indu...	Procedia	Big Data/IA	Diseño / Toma de decisiones	
PLA-2023	Plantec et al. (2023)	Big data as an exploration trigger or problem-solving patch: Design a...	Technovation	Big Data/IA	Desarrollo de producto Industrializac...	/

REU- 2024	Pronk et al. (2024)	What-if considerations in digital twinning: an autorarchic approach	Procedia CIRP	Gemelo Digital	Diseño Manufactura	/
PUS- 2022	Puschel et al. (2022)	Unblackboxing Things—A Taxonomy Clusters of Nont...	Smart IEEE Trans. IoT Multilayer Eng. and Manage.		Ideación / Diseño	
WAG- 2021	Rahatulain et al. (2021)	Relationship dependencies between factors affecting new product d...	Procedia CIRP	IoT, IA	Ideación Prototipado	/
JAU- 2021	Rasor et al. (2021)	Towards collaborative life cycle specification of digital twin	Procedia CIRP	Gemelo Digital	Ciclo de vida completo	
LAM- 2026	Recker et al. (2026)	LaMAS4PD - A Multi-Agent LLM Approach for Ontology-Driven Structural...	Procedia CIRP	IA (LLM/Agentes)	Desarrollo / Diseño	
MAR- 2025	Reichenstein et al. (2025)	Role-based manufacturing systems: A concept towards intelligent produ...	Procedia CIRP	IA, Automatización	Producción Manufactura	/
RES- 2021	Resman et al. (2021)	Methodology for planning smart factory	Procedia CIRP	Gemelo Digital	Manufactura Planificación	/

REU- 2023	Reuter et al. (2023)	Adaptive inspection planning using a digital twin for quality assuran...	Procedia CIRP	Big Data/IA	Pruebas / Aseguramiento de Calidad
REU- 2026	Reuther et al. (2026)	A Digital Twin Framework for CIRP Programmable Logic Controllers in Indust...	Procedia CIRP	Gemelo Digital/AR-VR	Diseño de manufactura / Comisionamiento...
SCH- 2023	Roehm et al. (2023)	Development of an Information Model for Simulation Data Management in...	Procedia CIRP	Gemelo Digital	Desarrollo / Ingeniería
OST- 2026	Rohde & Stechert (2026)	Integrating Autonomous 3D Printing and VR Digital Twins for Engineeri...	Procedia CIRP	Fab. Aditiva	Diseño / Manufactura
RÖH- 2021	Röhm et al. (2021)	Approach of simulation data management for the application of the dig...	Procedia CIRP	IoT	Pruebas / Uso y Retroalimentación
SCH- 2022	Röhm & Anderl (2022)	Simulation Data Management in the Digital Twin (SDM- DT)	Procedia CIRP	Gemelo Digital	Desarrollo / Diseño

KÜH- 2021	Sallati & Schützer (2021)	Development of smart products for elders within the Industry 4.0	Procedia CIRP	Gemelo Digital	Ideación / Diseño
NAU- 2024	Sarfraz et al. (2024)	Navigating Circular Economy and Digitalisation	Procedia CIRP	Gemelo Digital	Estrategia / Ciclo de vida
WIE- 2023	Schabany et al. (2023)	Development of a Maturity Assessment Model for Digital Twins in Batte...	Procedia CIRP	Gemelo Digital	Manufactura
SCH- 2025	Schuchter et al. (2025)	Application of artificial intelligence in model-based systems enginee...	Procedia CIRP	Big Data/IA	Diseño / Ingeniería de sistemas
WAG- 2021	Schuh et al. (2021)	Effects of Digital Twin Simulation Modelling on a Flexible and Fluid...	Procedia CIRP	Gemelo Digital	Manufactura / Producción
SEN- 2023	Seegrün et al. (2023)	Sustainable product lifecycle management with Digital Twins	Procedia CIRP	Gemelo Digital	Ciclo de Vida / Sostenibilidad
SIN- 2021	Singh et al. (2021)	Advancing digital twin implementation: a toolbox for modelling and si...	Procedia CIRP	Gemelo Digital	Uso, Operación y Mantenimiento

ALV- 2021	Sjarov et al. (2021)	Towards "Design for Procedia Interoperability" in the context of Systems Engin...	Gemelo Digital	Diseño / Ingeniería
DAM- 2023	Slot et al. (2023)	Versatile information provisioning in a CIRP configure-to-order process	Gemelo Digital	Diseño / Ciclo de vida
SME- 2023	Smeets et al. (2023)	Digital twins for Adv. Eng. automotive Inform. development: Two wheelers application	Gemelo Digital, Big Data/IA	Desarrollo del producto / Ideación
KRO- 2022	Spaltini et al. (2022)	Defining the Roadmap towards Industry 4.0: CIRP The 6Ps Maturity Model	Big Data/IA	Planificación / Estrategia
SCH- 2023	Stetter et al. (2023)	Geometric and kinetic digital twin of a body- in-white assembly system	Gemelo Digital	Diseño / Montaje
TUS- 2021	Turkyilmaz et al. (2021)	Industry 4.0: Challenges and opportunities for Kazakhstan SMEs	Automatización, IA	Planificación / Estrategia
HOL- 2021	Uhlmann et al. (2021)	Holistic Concept Towards a Reference CIRP	Big Data/IA	Operación / Mantenimiento

			Architecture Model for			
			Predictiv...			
CIA- 2025	Vitti et al. (2025)	Industry 4.0 technologies in support of circular Economy: A 10R-based...	Comput. Ind. Fab. Aditiva Eng.		Ciclo de Vida	
BER- 2021	Vogt et al. (2021)	Production in the loop - the interoperability of CIRP digital twins	Procedia	Gemelo Digital	Operación / Producción	
ZIN- 2021	Wang et al. (2021)	Integration of model based engineering into the digital twin	Procedia	Gemelo Digital	Desarrollo / Diseño	
KRA- 2026	Wawer et al. (2026)	Harmonization of digital shadows to CIRP develop a data space for additive...	Procedia	Cloud	Diseño / Manufactura	
MIE- 2024	Wehking et al. (2024)	Sustainable Product Lifecycle Management - Implementation of a DT	Procedia	Gemelo Digital	Ciclo de Vida	
KRA- 2025	Werrel et al. (2025)	Examination of the Utilization of Phase Data for Design	Procedia	Big Data/IA	Uso / Diseño	

XIA- 2021	Xia et al. (2021)	A digital twin to train J. deep reinforcement learning agent for smart m...	Manuf. Gemelo Digital, Manufactura Robótica, Big Data/IA	/
INT- 2025	Yan et al. (2025)	Integrating Digital Procedia Twins and Extended CIRP Reality for Smart PSS Design	Gemelo Digital Diseño / Servicios	
ZHU- 2025	Zhu et al. (2025)	A knowledge graph- based operational data CIRP representation method of dig...	Big Data/IA Manufactura Producción	/

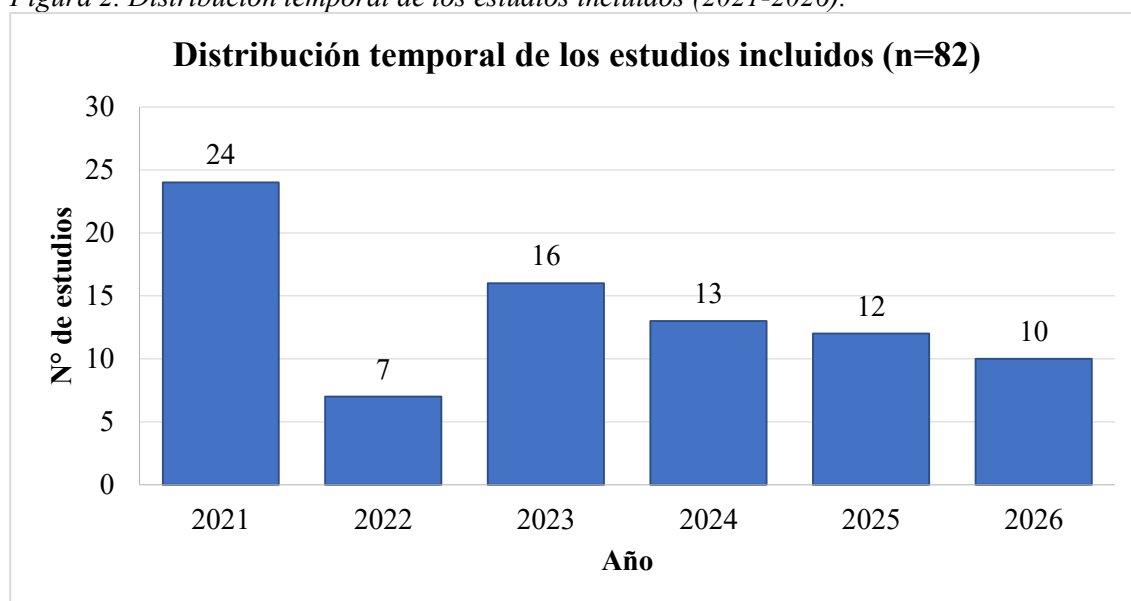
Distribución temporal de la producción científica

La Tabla 5 y la Figura 2 muestran un pico en 2021 (29.3%), año de consolidación de la agenda de Industria 4.0 tras la pandemia, y una producción luego estable entre 2023 y 2026, lo que sugiere un campo de investigación activo y consolidado más que una tendencia emergente.

Tabla 5. Distribución temporal de los estudios incluidos (2021-2026)

Año	Nº de estudios (%)
2021	24 (29.3%)
2022	7 (8.5%)
2023	16 (19.5%)
2024	13 (15.9%)
2025	12 (14.6%)
2026	10 (12.2%)
Total	82 (100%)

Figura 2. Distribución temporal de los estudios incluidos (2021-2026).



Distribución geográfica y editorial

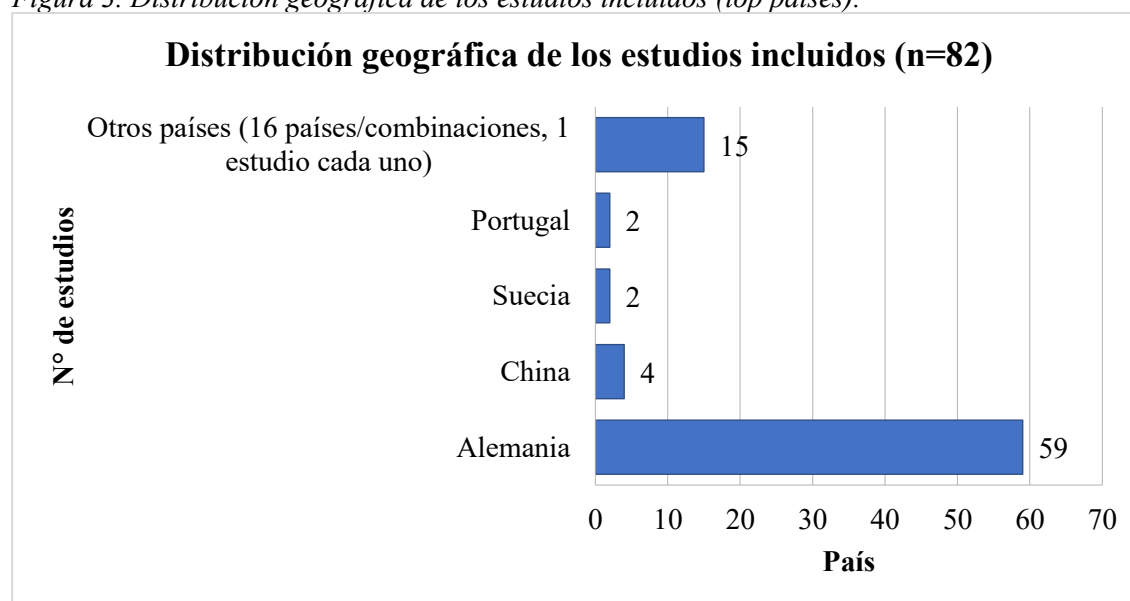
La Tabla 6 y la Figura 3 evidencian una marcada concentración geográfica (72.0% en Alemania) y editorial (84.1% en *Procedia CIRP*, revista de actas de la CIRP con fuerte tradición en ingeniería de manufactura europea), consistente con el liderazgo de grupos alemanes vinculados al Fraunhofer-Gesellschaft y universidades técnicas (TU Berlin, TU Darmstadt, RWTH Aachen). Esto representa una

limitación relevante para la generalización de los hallazgos a otros contextos, detallada en las limitaciones del estudio.

Tabla 6. Distribución geográfica de los estudios incluidos

País del estudio	Nº de estudios
Alemania	59
China	4
Suecia	2
Portugal	2
Otros (12 países, 1 estudio cada uno: Grecia/Alemania, Polonia, México, Kazajistán, Italia/Reino Unido, Eslovenia, Arabia Saudita/Reino Unido, Portugal/Reino Unido, España, Países Bajos, Francia, Estados Unidos, Alemania/Singapur)	15
Total	82

Figura 3. Distribución geográfica de los estudios incluidos (top países).



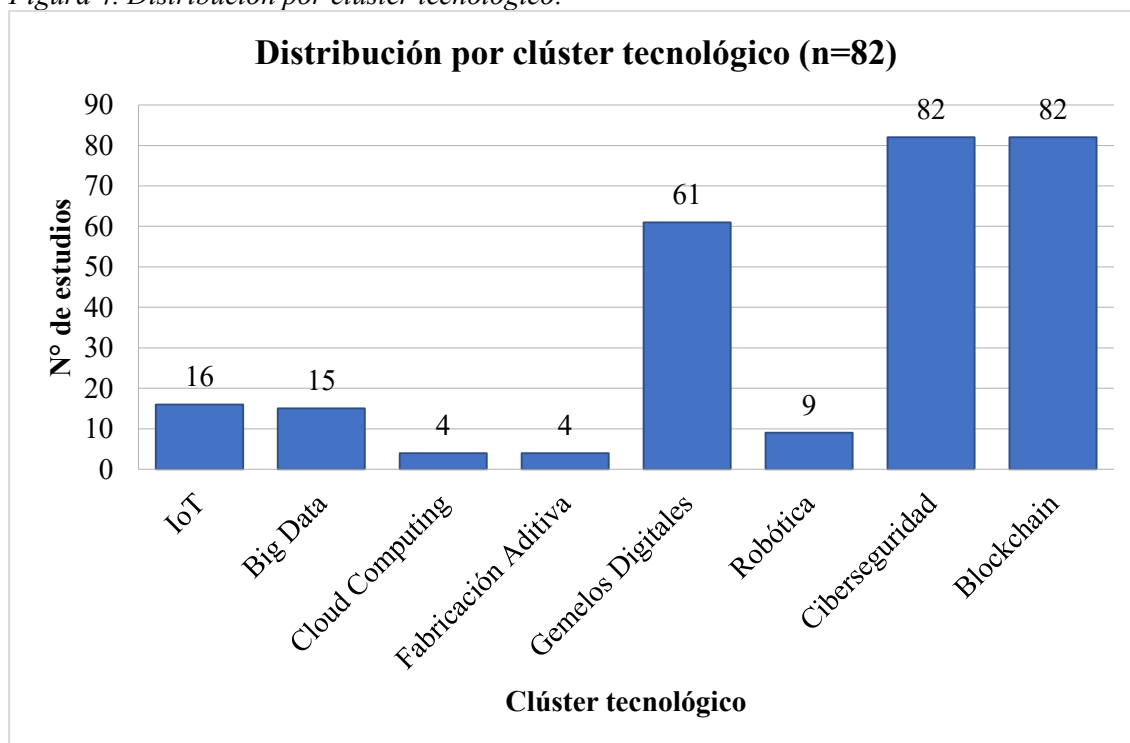
Distribución por clúster tecnológico (PI1)

En respuesta a PI1, la Tabla 7 y la Figura 4 muestran el dominio del clúster Gemelos Digitales/Realidad Extendida (74.4%), seguido de IoT/IIoT (19.5%) y Big Data e IA (18.3%); Ciberseguridad y Blockchain apenas alcanza el 1.2% (Ahumada-Tello & Evans, 2023). Varios estudios combinan clústeres —Xia et al. (2021) integran Gemelo Digital, Robótica y Aprendizaje por Refuerzo Profundo; Smeets et al. (2023) combinan Gemelo Digital con Machine Learning—, lo que sugiere que el Gemelo Digital funciona como plataforma de integración sobre la cual se articulan las demás tecnologías.

Tabla 7. Distribución por clúster tecnológico

Clúster tecnológico	Nº de estudios (%)*
Gemelos Digitales y Realidad Extendida (AR/VR)	61 (74.4%)
Internet de las Cosas (IoT/IIoT)	16 (19.5%)
Big Data e Inteligencia Artificial	15 (18.3%)
Robótica Avanzada y Automatización	9 (11.0%)
Cloud Computing	4 (4.9%)
Fabricación Aditiva	4 (4.9%)
Ciberseguridad y Blockchain	1 (1.2%)

Figura 4. Distribución por clúster tecnológico.



**Un mismo estudio puede reportar más de un clúster tecnológico; los porcentajes se calculan sobre el total de 82 estudios incluidos y no suman 100%.*

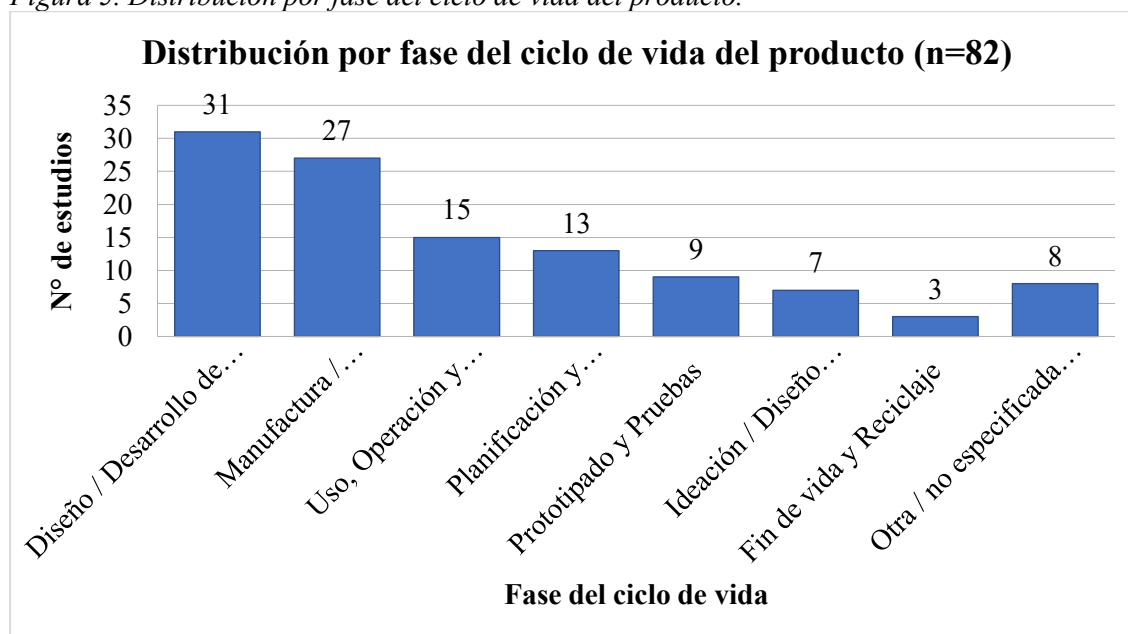
Distribución por fase del ciclo de vida del producto (PI1)

La Tabla 8 y la Figura 5 muestran que Diseño/Desarrollo (37.8%) y Manufactura/Producción (32.9%) concentran más de dos tercios de la evidencia, mientras que Fin de vida/Reciclaje es la menos estudiada (3.7%) —un vacío relevante dado que la sostenibilidad es un eje declarado de la Industria 4.0 (Vitti et al., 2025). Esto sugiere que la transformación digital avanza de forma desigual: se prioriza optimizar procesos ya establecidos (diseño, producción) antes que explorar nuevas oportunidades (ideación) o cerrar sosteniblemente el ciclo (reciclaje).

Tabla 8. Distribución por fase del ciclo de vida del producto

Fase del ciclo de vida del producto	Nº de estudios (%)*
Diseño / Desarrollo de producto	31 (37.8%)
Manufactura / Producción	27 (32.9%)
Uso, operación y mantenimiento	15 (18.3%)
Planificación y estrategia	13 (15.9%)
Prototipado y pruebas	9 (11.0%)
Ideación / diseño conceptual	7 (8.5%)
Fin de vida y reciclaje	3 (3.7%)
Otra / no especificada claramente	8 (9.8%)

Figura 5. Distribución por fase del ciclo de vida del producto.



*Un mismo estudio puede abarcar más de una fase del ciclo de vida; los porcentajes se calculan sobre el total de 82 estudios incluidos y no suman 100%.

Beneficios e impactos reportados (PI2)

La segunda pregunta de investigación (PI2) indagó los impactos reportados al integrar estos clústeres. Los beneficios se agrupan en tres categorías: (a) reducción de tiempos y esfuerzo manual —Kausler et al. (2026) reportan hasta 98% menos esfuerzo manual en gestión de cambios PLM mediante Machine Learning, y Xia et al. (2021) logran políticas de programación robótica cercanas al óptimo sin arriesgar el sistema físico mediante Aprendizaje por Refuerzo Profundo—; (b) mejora de trazabilidad, como la estrategia de "transparencia por diseño" de Barata y Da Cunha (2021) con IoT, nube y realidad aumentada; y (c) generación de conocimiento objetivo para decisiones de diseño, como el gemelo digital de Smeets et al. (2023), que clasifica escenarios de uso del cliente con 96.6% de precisión, y la taxonomía empírica de productos inteligentes de Püschel et al. (2022).

Barreras y desafíos metodológicos (PI3)

La tercera pregunta (PI3) identifica barreras técnicas, organizacionales y económicas. Entre las técnicas: la sincronización en tiempo real entre gemelo físico y virtual en condiciones transitorias (Smeets et al., 2023) y el balance exploración-explotación en aprendizaje por refuerzo (Xia et al., 2021). Entre las organizacionales, Plantec et al. (2023) encuentran —contraintuitivamente— que las empresas automotrices usan la IA como "parche" en fases finales del desarrollo, no desde la concepción, por falta de un proceso dedicado. Entre las económicas, Kausler et al. (2026) muestran que, pese a retornos excepcionales desde el tercer año, la inversión inicial en IA es considerablemente mayor que la automatización basada en reglas —barrera especialmente relevante para PYMES. En conjunto, estas barreras son tanto tecnológicas como organizacionales y financieras.

Discusión integradora

En conjunto, la evidencia confirma que el Gemelo Digital funciona como infraestructura central del paradigma PLM digital, integrando datos de IoT, IA y robótica; esto explica la representación marginal de Cloud Computing, Fabricación Aditiva y, sobre todo, Ciberseguridad/Blockchain, probablemente estudiados como componentes habilitantes antes que como objetos de estudio independientes —una línea de investigación futura relevante. Asimismo, la concentración en Diseño/Desarrollo y Manufactura frente al abandono de Ideación y Fin de vida sugiere una "digitalización incremental" de procesos ya estructurados, más que una transformación disruptiva, consistente con la literatura de Industria 4.0.

La fuerte concentración geográfica (72% Alemania) y editorial (84% Procedia CIRP) refleja el liderazgo alemán en investigación aplicada de Industria 4.0, pero limita la generalización a contextos con distinta infraestructura digital y estructura empresarial —como el latinoamericano, predominantemente de PYMES—, lo que constituye una oportunidad clara para investigación empírica situada en la región. Finalmente, los hallazgos de beneficios (PI2) y barreras (PI3) sugieren que la integración exitosa depende menos de la disponibilidad tecnológica —ya madura, según los casos reales revisados (BMW, industria automotriz, manufactura de vidrio)— y más de factores organizacionales: procesos dedicados, disposición a asumir inversión con retorno diferido, y capacidad de redefinir roles a lo largo de la cadena de valor.

CONCLUSIONES

Esta revisión sistemática analizó 82 estudios empíricos para responder tres preguntas de investigación sobre la integración de los siete clústeres tecnológicos de la transformación digital en el desarrollo de productos.

- Respecto a PI1 “¿De qué manera se están aplicando los siete clústeres tecnológicos en las distintas fases del desarrollo de productos (ideación, diseño, prototipado, pruebas y lanzamiento)?”, los hallazgos muestran que el Gemelo Digital y la Realidad Extendida se consolidan como el clúster dominante (74.4% de los estudios) y como plataforma de integración de las demás tecnologías, concentrado principalmente en las fases de Diseño/Desarrollo (37.8%) y Manufactura/Producción (32.9%), mientras que Ideación y Fin de vida permanecen notoriamente rezagadas.

- Respecto a PI2 “¿Qué impacto (reducción de tiempos, optimización de costos, mejora de calidad) reporta la literatura empírica al integrar estos clústeres?”, la evidencia confirma beneficios concretos y medibles —reducciones de hasta 98% en esfuerzo manual de ingeniería (Kausler et al., 2026), políticas de control robótico cercanas al óptimo (Xia et al., 2021) y clasificación de escenarios de uso con más de 96% de precisión (Smeets et al., 2023)— que sustentan el valor práctico de estas tecnologías.
- Respecto a PI3 “¿Cuáles son las principales barreras o desafíos metodológicos para la adopción de estas tecnologías en el ciclo de vida del producto?”, las barreras identificadas trascienden lo técnico: la adopción exitosa depende de procesos organizacionales dedicados y de la disposición a asumir costos de inversión inicial con retorno diferido (Plantec et al., 2023; Kausler et al., 2026).

La principal novedad científica de este trabajo es integrar, bajo un mismo marco de ciclo de vida del producto, evidencia dispersa sobre siete clústeres tecnológicos que la literatura previa suele abordar de forma aislada, ofreciendo así una síntesis que ubica al Gemelo Digital como eje articulador y evidencia vacíos claros en Ciberseguridad/Blockchain, Cloud Computing y la fase de fin de vida del producto.

Este estudio presenta limitaciones que abren líneas de investigación futura: la búsqueda se restringió a Scopus y ScienceDirect, con una fuerte concentración geográfica (72% Alemania) y editorial (84% Procedia CIRP) que limita la generalización de los hallazgos.

Se recomienda que futuras revisiones amplíen la búsqueda a otras bases de datos (SpringerLink, Web of Science), incorporen estudios de contextos industriales emergentes —incluido el latinoamericano, con predominio de PYMES— y profundicen en las fases de ideación y fin de vida del producto, así como en los clústeres de Ciberseguridad, Blockchain y Cloud Computing, actualmente subrepresentados en la literatura empírica disponible.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahumada-Tello, E., & Evans, R. (2023). Human Factors, Innovation and Technology, and Cluster Strategies. *Procedia CIRP*, 119, 176-181. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.03.090>
- Alexopoulos, K., Weber, M., Trautner, T., Manns, M., Nikolakis, N., Weigold, M., & Engel, B. (2023). An industrial data-spaces framework for resilient manufacturing value chains. *Procedia CIRP*, 116, 299-304. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.051>
- Ante, L. (2021). Digital twin technology for smart manufacturing and industry 4.0: A bibliometric analysis of the intellectual structure of the research discourse. *Manufacturing Letters*, 27, 96-102. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2021.01.003>
- Arnemann, L., Winter, S., Quernheim, N., Grieser, P., Anderl, R., & Schleich, B. (2023). Information Model to Return Data of Digital Twins into Product Design. *Procedia CIRP*, 116, 173-178. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.030>
- Augustino Doan, A. M., Sarikaya, E., & Weigold, M. (2026). Framework selection for simulation-driven, web-based digital twins. *Procedia CIRP*, 138, 210-215. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2026.01.037>
- Barata, J., & Da Cunha, P. R. (2021). Augmented product information: crafting physical-digital transparency strategies in the materials supply chain. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112(7-8), 2109-2121. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06446-9>
- Bertoni, A., Machchhar, R. J., Larsson, T., & Frank, B. (2022). Digital Twins of Operational Scenarios in Mining for Design of Electromobility. *Procedia CIRP*, 109, 532-537. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.290>
- Burggräf, P., Adlon, T., & Schäfer, N. (2024). Towards Digital Twin Driven Factory Planning. *Procedia CIRP*, 126, 248-253. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.08.334>
- Czwick, C., & Anderl, R. (2021). Conceptual Use Cases for Integrating Artificial Intelligence into Cyber-Physical Twins. *Procedia CIRP*, 104, 1901-1906. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.321>



- De Almeida, J. F., Amaral, D. C., & Coelho, R. T. (2021). Innovative Framework to manage New Product Development (NPD) Integrating Additive Manufacturing. *Procedia CIRP*, 103, 128-133. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.10.020>
- De Oliveira Hansen, J. P., Da Silva, E. R., Bilberg, A., & Bro, C. (2021). Design and development of Automation Equipment based on Digital Twin. *Procedia CIRP*, 104, 1167-1172. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.196>
- Disselkamp, J.-P., Haji Mustaq Lakadkutta, A. M., Seidenberg, T., Kattenstroth, F., Lick, J., Hovemann, A., & Dumitrescu, R. (2026). Sketch2Factory: Roadmap for AI-Driven Sketch-to-3D Model Pipeline. *Procedia CIRP*, 142, 998-1003. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2026.05.382>
- Enarevba, D. R., & Haapala, K. R. (2025). Sustainability assessment of industrial hemp enabled by Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 135, 261-266. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2025.01.054>
- Escobedo, L. R., Straßburger, S., & Bär, T. (2025). Towards an Intelligent Digital Machine Twin for CAM Process. *Procedia CIRP*, 134, 669-674. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2025.03.065>
- Gaha, R., Durupt, A., & Eynard, B. (2021). Towards the implementation of the Digital Twin in CMM inspection. *Procedia Manufacturing*, 54, 216-221. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.07.033>
- Göllner, D., Dzienus, S., Rasor, R., Anacker, D.-I. H., & Dumitrescu, P. D.-I. R. (2023). Guidelines for providing digital twins. *Procedia CIRP*, 120, 1433-1438. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.09.189>
- Hamlaoui, R., Orimi, A. G., Donia, R., Backe, C., Briken, V., & Lachmayer, R. (2025). Digital Twin for Field Data Management: Design of a platform to promote FAIR principles and ensure data reusability. *Procedia CIRP*, 136, 165-170. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2025.08.030>
- Hamlaoui, R., Orimi, A. G., Abravan, F., Stauss, T., Rosemann, D., Wawer, M. L., Wurst, J., & Lachmayer, R. (2026). Digital Twin for Field Data Management: Text-Based Scenario Descriptions. *Procedia CIRP*, 142, 121-126. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2026.05.234>
- Hidalgo-Crespo, J., Riel, A., Sakao, T., & Duflou, J. R. (2024). Design platform concept for product-as-a-Service by electrical EEE. *Procedia CIRP*, 130, 1176-1181. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.10.224>

- Himmelstoss, H., Hall, R., Vojanec, B., Thieme, P., & Bauernhansl, T. (2024). Digital Twins and Software Services: Leveraging Product Data for Digital Transformation. *Procedia CIRP*, 128, 472-477. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.03.029>
- Himmelstoß, H., Hall, R., Thieme, P., & Bauernhansl, T. (2023). Designing Smart Services for a Component Manufacturer Based on Digital Twins. *Procedia CIRP*, 119, 950-956. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.03.139>
- Huang, C., Zhang, Y., & Geng, X. (2026). Toward an XR-Based Scalable Modular Design Framework for Smart PSS. *Procedia CIRP*, 142, 914-919. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2026.05.368>
- Jagus, K., Sender, J., Jericho, D., & Flügge, W. (2021). Digital thread in shipbuilding as a prerequisite for the digital twin. *Procedia CIRP*, 104, 318-323. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.054>
- Kattenstroth, F., Disselkamp, J.-P., Lick, J., & Dumitrescu, R. (2024). Challenges in the implementation of simulation models for the digital factory twin. *Procedia CIRP*, 128, 442-447. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.07.052>
- Kausler, J., Jacob, A., & May, M. C. (2026). AI-Driven Product-Production-CoDesign through digital manufacturing change management in PLM systems. *Procedia CIRP*, 142, 410-415. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2026.05.283>
- Kovacevic, N., Schulte, S. N., & Stark, R. (2025). Augmented Reality to Visualize Digital Twins for Remote Final Acceptance. *Procedia CIRP*, 136, 715-721. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2025.08.122>
- Kugler, S., Kern, A., & Anderl, R. (2021). Method for the generation of use case related views for Digital Twins. *Procedia CIRP*, 104, 1896-1900. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.320>
- Kuhn, C., & Lucke, D. (2021). Supporting the Digital Transformation: A Low-Threshold Approach. *Procedia CIRP*, 104, 647-652. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.109>
- Langlotz, P., Siedler, C., & Aurich, J. C. (2021). Unification of lean production and Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 99, 15-20. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.003>
- Langlotz, P., Klar, M., Yi, L., Hussong, M., Sousa, F. J., & Aurich, J. C. (2022). Concept of hybrid modeled digital twins and its application for production. *Procedia CIRP*, 112, 549-554. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.09.098>



- Leirimo, T. L. (2024). Digital Twins for Industry 5.0: Unlocking the Human Potential. *Procedia CIRP*, 130, 761-766. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.10.161>
- Lick, J., Disselkamp, J.-P., Kattenstroth, F., Trienens, M., Rasor, R., Kühn, A., & Dumitrescu, R. (2024). Digital Factory Twin: A Practitioner-Driven Approach for Integrating Digital Twins in Manufacturing. *Procedia CIRP*, 128, 603-608. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.03.038>
- Lick, J., Weller, J., Brock, J., Pathak, S., Disselkamp, J.-P., Kühn, A., & Dumitrescu, R. (2024). Guiding The Transformation To A Digital Factory Twin: Towards An Enterprise-Architecture-Management-based Approach With The Help Of A Capability Map. *Procedia CIRP*, 130, 736-742. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.10.157>
- Liu, M., Fang, S., Dong, H., & Xu, C. (2021). Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 346-361. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.017>
- Liu, L., Song, W., & Liu, Y. (2023). Leveraging digital capabilities toward a circular economy. *Computers & Industrial Eng*, 178, 109113. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109113>
- Lo, C. K., Chen, C. H., & Zhong, R. Y. (2021). A review of digital twin in product design and development. *Advanced Engineering Informatics*, 48, Article 101297. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101297>
- Lou, S., Hu, Z., Zhang, Y., Feng, Y., Zhou, M., & Lv, C. (2025). Human-cyber-physical system for Industry 5.0: A review from a human-centric perspective. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 22, 494-511. <https://doi.org/10.1109/TASE.2024.3360476>
- Martikkala, A., David, J., Lobov, A., Lanz, M., & Ituarte, I. F. (2021). Trends for Low Cost and Open Source IoT Solutions Development. *Procedia Manufacturing*, 55, 298-305. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.10.042>
- Mediavilla, M. A., Lagnese, M., Pomp, A., & Meisen, T. (2023). Asset administration shell-based engineering change management process: Challenges and ways forward. *Procedia CIRP*, 120, 1010-1015. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.09.116>
- Meyer, M., & Jochem, R. (2026). Derivation of key success factors for the use of digital twins in production networks. *Procedia CIRP*, 138, 126-131. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2026.01.023>

- Molter, J., Zimmer, S., Margies, L., Karkowski, M., & Müller, R. (2024). Development of a characterization and modeling method for Digital Twin design in production systems. *Procedia CIRP*, 126, 763-768. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.08.325>
- Nambiar, S., Jonsson, M., & Tarkian, M. (2024). Automation in Unstructured Production Environments Using Isaac Sim: A Flexible Framework for Dynamic Robot Adaptability. *Procedia CIRP*, 130, 837-846. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.10.173>
- Nick, G., Kovács, T., Kő, A., & Kádár, B. (2021). Industry 4.0 readiness in manufacturing: Company Compass 2.0. *Procedia Manufacturing*, 54, 39-44. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.07.007>
- Oliveira-Dias, D., Maqueira-Marín, J. M., & Moyano-Fuentes, J. (2022). The link between information and digital technologies of I4.0 and agile supply chain. *Computers & Industrial Eng*, 167, 108000. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108000>
- P. Senna, P., Barros, A. C., Bonnin Roca, J., & Azevedo, A. (2023). Development of a digital maturity model for Industry 4.0 based on the technology-organization-environment framework. *Computers & Industrial Engineering*, 185, 109645. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109645>
- Peretz-Andersson, E., Tabares, S., Mikalef, P., & Parida, V. (2024). Artificial intelligence implementation in manufacturing SMEs: A resource orchestration approach. *International Journal of Information Management*, 77, 102781. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2024.102781>
- Permin, E., Castillo, L., Sarin, S., Lossie, K., Grunert, D., Schmitt, R. H., & Wohlgemuth, C. (2025). Success Factors for Value Creation in Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 134, 175-180. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2025.03.034>
- Pickel, J., Goetz, S., & Wartzack, S. (2025). A survey on the utilization of ontologies for decision-making in industrial product development. *Procedia CIRP*, 136, 659-664. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2025.08.113>
- Plantec, Q., Deval, M.-A., Hooge, S., & Weil, B. (2023). Big data as an exploration trigger or problem-solving patch: Design and integration of AI-embedded systems in the automotive industry. *Technovation*, 124, 102763. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2023.102763>
- Pronk, L., Damgrave, R., & Lutters, E. (2024). What-if considerations in digital twinning: an autorarchic approach. *Procedia CIRP*, 128, 454-459. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.03.026>

- Puschel, L. C., Roglinger, M., & Brandt, R. (2022). Unblackboxing Smart Things—A Multilayer Taxonomy and Clusters of Nontechnical Smart Thing Characteristics. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 69(5): 2129-2143(5), 2129-2143. <https://doi.org/10.1109/TEM.2020.2988981>
- Rahatulain, A., Qureshi, T. N., Maffei, A., & Onori, M. (2021). Relationship and dependencies between factors affecting new product development (NPD). *Procedia CIRP*, 100, 367-372. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.086>
- Rasor, R., Göllner, D., Bernijazov, R., Kaiser, L., & Dumitrescu, R. (2021). Towards collaborative life cycle specification of digital twin. *Procedia CIRP*, 98, 229-234. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.035>
- Recker, J., Hensen, F., Keuper, A., & Schuh, G. (2026). LaMAS4PD - A Multi-Agent LLM Approach for Ontology-Driven Structural Engineering Data. *Procedia CIRP*, 142, 274-279. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2026.05.260>
- Reichenstein, T., Weilacher, A., Albayrak, B. E., Werthmann, L., Sindel, T., Schneider, A., Krüger, J. H., Gutwald, B., Barth, M., & Franke, J. (2025). Role-based manufacturing systems: A concept towards intelligent production. *Procedia CIRP*, 134, 837-842. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2025.02.187>
- Resman, M., Turk, M., & Heraković, N. (2021). Methodology for planning smart factory. *Procedia CIRP*, 97, 401-406. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.258>
- Reuter, L., Denkena, B., & Wichmann, M. (2023). Adaptive inspection planning using a digital twin for quality assurance. *Procedia CIRP*, 120, 3-8. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.08.002>
- Reuther, A., Plesker, C., Bassauer, D., & Schleich, B. (2026). A Digital Twin Framework for Programmable Logic Controllers in Industrial Automation Systems. *Procedia CIRP*, 139, 446-452. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2025.08.193>
- Roehm, B., Anderl, R., & Schleich, B. (2023). Development of an Information Model for Simulation Data Management in the Digital Twin. *Procedia CIRP*, 119, 681-686. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.03.120>

- Rohde, H.-P., & Stechert, C. (2026). Integrating Autonomous 3D Printing and VR Digital Twins for Engineering Education. *Procedia CIRP*, 142, 884-889. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2026.05.363>
- Röhm, B., Emich, B., & Anderl, R. (2021). Approach of simulation data management for the application of the digital simulation twin. *Procedia CIRP*, 100, 421-426. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.098>
- Röhm, B., & Anderl, R. (2022). Simulation Data Management in the Digital Twin (SDM-DT). *Procedia CIRP*, 105, 847-850. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.140>
- Sallati, C., & Schützer, K. (2021). Development of smart products for elders within the Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 100, 810-815. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.039>
- Sarfraz, S., Sherif, Z., Alshammari, S., & Salonitis, K. (2024). Navigating Circular Economy and Digitalisation. *Procedia CIRP*, 130, 1055-1062. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.10.206>
- Schabany, D., Hülsmann, T.-H., & Schmetz, A. (2023). Development of a Maturity Assessment Model for Digital Twins in Battery Cell Manufacturing. *Procedia CIRP*, 120, 946-951. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.09.105>
- Schuchter, T., Saft, P., Stetter, R., Pfeil, M., Höpken, W., Till, M., & Rudolph, S. (2025). Application of artificial intelligence in model-based systems engineering of automated production systems. *Procedia CIRP*, 136, 61-66. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2025.08.013>
- Schuh, G., Bergweiler, G., Chougule, M. V., & Fiedler, F. (2021). Effects of Digital Twin Simulation Modelling on a Flexible and Fluid Production System. *Procedia CIRP*, 104, 768-773. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.129>
- Seegrün, A., Kruschke, T., Mügge, J., Hardinghaus, L., Knauf, T., Riedelsheimer, T., & Lindow, K. (2023). Sustainable product lifecycle management with Digital Twins. *Procedia CIRP*, 119, 776-781. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.03.124>
- Singh, S., Weeber, M., & Birke, K.-P. (2021). Advancing digital twin implementation: a toolbox for modelling and simulation. *Procedia CIRP*, 99, 567-572. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.078>

- Sjarov, M., Kißkalt, D., Lechler, T., Selmaier, A., & Franke, J. (2021). Towards "Design for Interoperability" in the context of Systems Engineering. *Procedia CIRP*, 96, 145-150. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.067>
- Slot, M., Navis, E., Damgrave, R., & Lutters, E. (2023). Versatile information provisioning in a configure-to-order process. *Procedia CIRP*, 120, 1469-1474. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.09.195>
- Smeets, J., Öztürk, K., & Liebich, R. (2023). Digital twins for automotive development: Two wheelers application. *Advanced Engineering Informatics*, 56, 101982. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.101982>
- Spaltini, M., Acerbi, F., Pinzone, M., Gusmeroli, S., & Taisch, M. (2022). Defining the Roadmap towards Industry 4.0: The 6Ps Maturity Model. *Procedia CIRP*, 105, 631-636. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.105>
- Stetter, R., Grüble, T., & Till, M. (2023). Geometric and kinetic digital twin of a body-in-white assembly system. *Procedia CIRP*, 119, 109-114. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.12.001>
- Turkyilmaz, A., Dikhanbayeva, D., Suleiman, Z., Shaikholla, S., & Shehab, E. (2021). Industry 4.0: Challenges and opportunities for Kazakhstan SMEs. *Procedia CIRP*, 96, 213-218. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.077>
- Uhlmann, E., Polte, J., & Koutrakis, N.-S. (2021). Holistic Concept Towards a Reference Architecture Model for Predictive Maintenance. *Procedia CIRP*, 104, 1430-1433. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.241>
- Vitti, M., Padovano, A., & Facchini, F. (2025). Industry 4.0 technologies in support of circular Economy: A 10R-based integration framework. *Computers & Industrial Engineering*, 185, 111350. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2025.111350>
- Vogt, A., Schmidt, P. H., Mayer, S., & Stark, R. (2021). Production in the loop - the interoperability of digital twins. *Procedia CIRP*, 99, 561-566. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.077>
- Wang, Y., Steinbach, T., Klein, J., & Anderl, R. (2021). Integration of model based system engineering into the digital twin. *Procedia CIRP*, 100, 19-24. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.003>

- Wang, L., Liu, Z., Liu, A., & Tao, F. (2021). Artificial intelligence in product lifecycle management. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114, 771-796.
<https://doi.org/10.1007/s00170-021-06882-1>
- Wawer, M. L., Rahn, F., Wurst, J., Kirchner, E., & Lachmayer, R. (2026). Harmonization of digital shadows to develop a data space for additive manufacturing. *Procedia CIRP*, 142, 1046-1051.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2026.05.390>
- Wehking, S., Seegrün, A., Riedelsheimer, T., & Lindow, K. (2024). Sustainable Product Lifecycle Management - Implementation of a DT. *Procedia CIRP*, 125, 30-35.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.08.006>
- Werrel, M., Wagner, M., Klar, M., & Aurich, J. C. (2025). Examination of the Utilization of Use Phase Data for PSS Design. *Procedia CIRP*, 136, 260-265. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2025.08.046>
- Xia, K., Sacco, C., Kirkpatrick, M., Saidy, C., Nguyen, L., Kircaliali, A., & Harik, R. (2021). A digital twin to train deep reinforcement learning agent for smart manufacturing plants: Environment, interfaces and intelligence. *Journal of Manufacturing Systems*, N/A (in press), 210-230.
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.012>
- Yan, Z., Larsson, T., Haoqiang, W., & Chunjun, H. (2025). Integrating Digital Twins and Extended Reality for Smart PSS Design. *Procedia CIRP*, 136, 707-714.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2025.08.121>
- Zhi, J., Yang, J., Zhu, C., Liu, S., Anwer, N., & Cao, Y. (2022). A modeling method of complex assembly based on digital twin. *Procedia CIRP*, 114, 79-87.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.10.035>
- Zhu, Y., Cheng, Y., Qi, Q., & Tao, F. (2025). A knowledge graph-based operational data representation method of digital twin shop-floor towards smart manufacturing. *Procedia CIRP*, 134, 861-866.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2025.02.211>