Negotium
Revista Científica Electrónica de Negocios / Scientific e-journal of Human Sciences /
Depósito Legal PPX200502ZU1935 / Depósito Legal Electrónico ZU2021000155/ ISSN 1856-1810 / e-ISSN: 2790-6183/ Edited by Fundación Unamuno / Venezuela.
Cortes, Jenifer; Martínez, Jenny; Medina, Andrés; Salas, José. (2026)
AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL PARA OPTIMIZAR EL PROCESO PRODUCTIVO EN LA EMPRESA METALES ESTRUCTURALES.
www.revistanegotium.com núm 63 (Año 21) Abril Pág 14-24

AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL PARA OPTIMIZAR EL PROCESO PRODUCTIVO EN LA EMPRESA METALES ESTRUCTURALES

INDUSTRIAL AUTOMATION TO OPTIMIZE THE PRODUCTION PROCESS IN THE COMPANY METALES ESTRUCTURALES






Cortes, Jenifer Martínez, Jenny Medina, Andrés Salas, José

RESUMEN
Este estudio tuvo como objetivo diseñar una propuesta metodológica de automatización industrial, basada en una revisión sistemática de la literatura, para optimizar el proceso productivo de la empresa Metales Estructurales en Bogotá, Colombia. Para esto se aplicó un enfoque cualitativo de tipo reflexivo-propositivo, basado en una revisión estructurada de investigaciones sobre automatización. Los resultados evidencian la necesidad de establecer un marco metodológico previo, que permita medir el nivel de preparación de la empresa para implementar un proceso de automatización. Se concluye que un marco analítico facilita la construcción de metodologías contextualizadas y alineadas a las capacidades organizacionales.
Palabras clave: Automatización industrial, Metodología, Industria 4.0, Productividad, Colombia.

ABSTRACT
The objective of this study was to design a methodological proposal for industrial automation, based on a systematic literature review, to optimize the production process at Metales Estructurales in Bogotá, Colombia. To this end, a reflective-propositional qualitative approach was applied, based on a structured review of research on automation. The results highlight the need to establish a preliminary methodological framework that allows for measuring the company's readiness to implement an automation process. It is concluded that an analytical framework facilitates the development of methodologies that are contextualized and aligned with organizational capabilities.
Keywords: Industrial automation, Methodology, Industry 4.0, Productivity, Colombia.
Fecha de recepción: 30-10-2025
Fecha de aprobación: 01-04-2026
Fecha de publicación online: 01-04-2026
DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.20500391

[1] Colombia, Ingeniera Industrial, Universidad ECCI, correo electrónico: Jenifferj.cortest@ecci.edu.co, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-0804-0507
[2] Colombia, Ingeniera Industrial correo electrónico: Jennyp.martinezg@ecci.edu.co, ORCID: https://orcid.org/0009-0007-8928-5733
[3] Colombia, Ingeniería Mecánica. Especialista en Gerencia de Mantenimiento. Maestría en Ingeniería Doctorando en Ingeniería. Profesor de Posgrados Fundación Universitaria Cafam (UNICAFAM) Correo electrónico: andres.medinag@unicafam.edu.co Orcid: https://orcid.org/0009-0000-8571-6953
[4] Colombia, Ing. Mecánico e Industrial. Maestría en Gerencia de Mantenimiento. Doctorado en Ciencias de la Educación. Profesor, Facultad de Ingeniería, Fundación Universitaria Cafam - Universidad ECCI Correo electrónico: jsalash@ecci.edu.co Orcid:https://orcid.org/0000-0002-6601-2720

INTRODUCCIÓN

En el contexto industrial actual, en donde la competitividad y la optimización de los procesos son elementos de importancia, especialmente para empresas del sector metalmecánico y metalúrgico, la automatización de los procesos de manufactura ha surgido como una opción atractiva. Según la International Federation of Robotics (2024), el crecimiento en la implementación de soluciones como la automatización refleja el interés de las empresas en contar con procesos estables y precisos, impulsados además por la necesidad de responder a los mercados cada vez más competitivos.

Por su parte, en América Latina, la automatización avanzada posiblemente de una forma más limitada, esto tiene que ver con la baja inversión en innovación y la falta de competencias técnicas y en digitalización. Para Espíndola y Suárez (2023), la brecha tecnológica afecta la competitividad regional, aun cuando países de la región como Brasil, Chile y México han logrado avances en la adopción de soluciones de automatización en sectores como metalmecánico y el automotriz. Esta tendencia coincide con análisis que resaltan la necesidad de vincular la transformación digital con la sostenibilidad industrial (OECD et al., 2024).

En Colombia, la industria metalmecánica es una parte activa del desarrollo económico por su aporte a la infraestructura, la construcción y la fabricación de componentes metálicos. Sin embargo, muchas de estas empresas aún operan con maquinaria más tradicional, procesos manuales y niveles bajos de integración tecnológica, lo que limita su competitividad (Mendoza et al., 2024). Estas condiciones limitan la estandarización de procesos, control de calidad y la gestión eficiente del tiempo y del espacio productivo (Nieves, 2022).

La empresa Metales Estructurales en Bogotá, Colombia, es un caso de estudio de esta situación en particular. Su actividad principal es la fabricación de juntas metálicas para pavimentos y estructuras de concreto. Dentro del proceso de producción se abarcan etapas como el corte láser, troquelado, soldadura, armado, pintura y control de calidad. Sin embargo, y el motivo por el que se seleccionó esta empresa como caso de estudio, responde a la identificación de limitaciones en su dinámica productiva, tales como dependencia de tareas manuales y ausencia de mecanismos automatizados. Estas condiciones generan cuellos de botella y menor eficiencia operativa.

Desde esa perspectiva, la presente investigación se orienta a responder la siguiente pregunta: ¿De qué manera el diseño de una propuesta metodológica de automatización industrial, basada en la literatura científica actual, permitirá optimizar el proceso productivo en la empresa Metales Estructurales? Con el objetivo de

Diseñar una propuesta metodológica de automatización industrial, basada en una revisión sistemática de la literatura, para optimizar el proceso productivo de la empresa Metales Estructurales en Bogotá, Colombia.

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

La automatización puede entenderse como un proceso de integración entre tecnología, el control y conocimiento técnico orientado a mejorar el rendimiento de las empresas y además ayuda a adaptarse a las exigencias de competitividad del mercado (International Federation of Robotics, 2024). En el sector metalmecánico, la automatización se relaciona con la capacidad de ejecutar operaciones complejas con métodos que no son los tradicionales (Carmona et al., 2025). Para autores como Mendoza-Galvis et al (2024), la automatización es una innovación que permite aumentar la productividad, reduce la variabilidad de los resultados y a mayor uniformidad en la fabricación de componentes metálicos. En conjunto, estas aproximaciones coinciden que la automatización es un habilitador de la eficiencia y la estandarización industrial.

En el contexto de esta investigación, la productividad resulta un indicador que puede medir la capacidad que tiene una empresa para generar valor a partir de los recursos disponibles (Martínez, 2023). La productividad refleja los resultados integrados de factores como la planificación, la eficiencia operativa y la gestión del desempeño industrial (International Federation of Robotics, 2024). Para autores como Martínez (2023) la productividad es un componente de la competitividad y se asocia con factores como la innovación, calidad del producto y la sostenibilidad de los procesos. Es decir, la productividad además de entregar un resultado cuantitativo refleja el desempeño sistémico de la organización.

Por otro lado, un tema relevante en el contexto de esta investigación es la Industria 4.0, a esta se le reconoce como la integración de las tecnologías digitales en los esquemas de producción, donde las máquinas y sistemas informáticos se comunican entre sí con el objetivo de optimizar el diseño (Xu et al., 2018). Para autores como Javaid et al (2022) la industria 4.0 combina automatización, inteligencia artificial y el análisis de datos para lograr procesos más flexibles y adaptativos. En este modelo se encuentran los sistemas ciberfísicos (CPS), se caracterizan por vincular el entorno físico de producción con el digital por medio del uso de sensores y redes de comunicación (Rani et al., 2024). Con este enfoque se refuerza la transición hacia esquemas productivos interconectados y basados en información en tiempo real.

Dentro de los avances más importantes en la industria 4.0 se encuentran los gemelos digitales, autores como Qi y Tao (2018) los definen como modelos virtuales

que reflejan en tiempo real el comportamiento de un sistema físico, permitiendo anticipar fallas y simular diversos escenarios de mejora de previo a implementarlos. En el sector metalmecánico, Zhang et al. (2024) indican que este método permite monitorear los procesos con mayor exactitud al integrar el análisis predictivo con la gestión industrial. En síntesis, en el marco de esta investigación, los gemelos digitales se consideran como una herramienta estratégica que apoya la toma de decisiones a partir de la réplica digital de un sistema físico. Esta herramienta permite la simulación de escenarios de automatización para evaluar los impactos y reducir la incertidumbre.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de la presente investigación se emplea un enfoque cualitativo de tipo proyectivo, orientado a analizar críticamente los enfoques, métodos y criterios en las metodologías de automatización industrial y a partir de ello formular una propuesta metodológica para el análisis de un proceso de automatización industrial para la empresa Metales Estructurales en Bogotá, Colombia. Con este tipo de enfoque se busca hacer una interpretación reflexiva y generar propuestas de soluciones basadas en evidencia científica (Olmos et al., 2022).

Para el desarrollo de esta investigación se hace una revisión estructurada, cuyo propósito es la identificación de enfoques y buenas prácticas que pueden ser aplicados a la empresa Metales Estructurales. De acuerdo con Braun y Clarke (2022), este tipo de revisiones estructuradas permite analizar sistemáticamente aportes teóricos y metodológicos, facilitando la formulación de nuevos esquemas.

Para la búsqueda de la información se utilizaron bases de datos académicas como Scopus, SciELO, RedALyC y Google Scholar. La estrategia de búsqueda fue definida mediante ecuaciones que combinaban operadores booleanos AND y OR utilizando términos clave en español y en inglés como “industrial automation” AND “process automation”, AND “automatización”, “gestión tecnológica”, entre otros.

En cuanto a los criterios de inclusión se tomó en cuenta publicaciones comprendidas en los períodos de 2020-2025, en español y en inglés, que abordaran temas de automatización industrial, reingeniería de procesos, productividad y gestión tecnológica. Adicionalmente, se priorizaron investigaciones revisadas por pares y publicaciones de alto nivel. Por otro lado, se excluyeron las publicaciones con fecha de publicación anterior al 2020, además se excluyeron documentos que no revisados por pares, blogs y textos sin validación.

Con las investigaciones seleccionadas se realizó una matriz de síntesis, siguiendo las recomendaciones de Ide y Beddoe (2023), esta matriz funcionó como base para

la elaboración de la propuesta técnica. En síntesis, la revisión bibliográfica cumplió un papel que va más hacia la construcción del estado del arte, su propósito fue de servir como base analítica para la construcción de una propuesta metodológica.

RESULTADOS

A partir de la revisión bibliográfica realizada, se logró organizar los hallazgos en categorías temáticas a partir de los enfoques y metodologías relacionadas con automatización. En el cuadro 1 se sintetizan los principales hallazgos de la revisión bibliográfica con los autores y hallazgos clave, agrupados según enfoque.

Cuadro 1. Síntesis hallazgos revisión bibliográfica

Categoría	Contribución clave	Autores
Automatización y desempeño técnico	Evalúan el impacto de implementar la automatización en variables como la precisión, control de calidad.	Carmona et al. (2025)
	Los autores plantean un sistema mecatrónico integrado para la automatización, optimizando la eficiencia energética y la sincronización de procesos.	Ahmed et al. (2025)
	A partir del uso de automatización destacan mejoras en la productividad y seguridad en el sector acero- estructural.	Elhouar y Terreno (2022)
	Este documento presenta las tendencias globales de la robótica industrial y además muestra el crecimiento de la automatización	International Federation of Robotics (2024)
Productividad y eficiencia operativa	La investigación desarrolla una relación entre la automatización, la productividad y la eficiencia.	Nieves Pimiento (2022)
	Propone estándares de métodos y tiempos para mejorar el rendimiento.	Mendoza-Galvis et al. (2024)
	La investigación desarrolla un enfoque basado en datos para optimizar procesos mediante el uso de aprendizaje automático	Hayes (2024)
Industria 4.0	La investigación profundiza en la relación entre automatización, la inteligencia artificial y el análisis de datos en el sector de manufactura.	Javaid et al. (2022)
	Los investigadores indican que la industria 4.0 representa la integración de manufactura y tecnologías digitales adaptativas.	Xu et al. (2018)
Gemelos digitales	Los autores plantean a los gemelos digitales son modelos que replican condiciones para ayudar a la toma de decisiones.	Qi & Tao (2019)
Metodologías para la	La investigación desarrolla un método que permite evaluar el nivel de madurez de las empresas y la automatización en la aplicación de procesos productivos.	Hetmanczyk (2024)

planificación de automatización	Propone un marco referencial para medir el nivel de preparación y las posibles barreras de las empresas para la adopción de la industria 4.0.	Govindan et al. (2023)
	Sistematiza diversas dimensiones como la organizativa, cultural y tecnológicas para la creación de modelos de preparación para implementar la automatización	Antony (2023)
	Integra los conceptos de preparación y madurez y establece una metodología que contempla el diagnóstico y despliegue.	Abadi et al. (2025)
	Aporta un esquema técnico para las fases de diseño de procesos de automatización.	Folgado et al. (2024)
	Diseña un modelo de evaluación adaptable al diagnóstico previo de una automatización de una organización.	Azevedo & Santiago (2019)

Fuente: Elaboración propia a partir de autores (2025).

Como se puede ver, a partir del cuadro 1 de síntesis, las investigaciones encontradas coinciden en que la automatización permite a las empresas mejorar la precisión, calidad del producto y además de la estabilidad de los procesos. Autores como Carmona et al. (2025) plantean como la automatización aplicada en estructuras metálicas permite la reducción de errores y los tiempos de improductividad.

Por otro lado, en cuanto a la productividad, se encuentran investigaciones que profundizan en la relación de la automatización y la gestión del rendimiento. Por ejemplo, Nieves Pimiento (2022) plantea que la automatización contribuye a mejorar los índices de productividad. Por su parte, autores como Mendoza-Galvis et al. (2024) dan estándares que permiten establecer parámetros comparables para medir la eficiencia en el sector metalmecánico.

De igual forma, los estudios de industria 4.0 plantean la importancia de la digitalización para avanzar de modelos productivos más tradicionales a modelos más modernos. La convergencia entre la inteligencia artificial, análisis de datos y el control automatizado son ejes de la manufactura inteligente (Javaid et al., 2022). Por otro lado, Xu et al. (2018) plantean que la interconectividad permite procesos más flexibles y la implementación de decisiones en tiempo real. En una línea similar se planeta el uso de gemelos digitales, Qi y Tao (2019) en su investigación hablan de como estos permiten replicar los modelos físicos, permitiendo analizar escenarios, anticipar fallas y validar estrategias antes de su implementación real.

La revisión bibliografía mostró investigaciones relacionadas con metodologías para la planificación de automatización. Hetmanczyk (2024) plantea un modelo de seis dimensiones que permite evaluar a las empresas antes de implementar procesos de automatización. Por su parte, Abadi et al. (2025) plantean una metodología que combina el diagnóstico organizacional y el despliegue de automatizaciones.

Folgado et al. (2024) dan esquemas técnicos que pueden ser aplicables en las fases iniciales del diseño de la automatización. Por último, Azevedo y Santiago (2019) proveen un modelo de evaluación que permite diagnosticar la madurez organizacional de previo a la introducción de nuevas tecnologías.

DISCUSIÓN

Tomando en cuenta los hallazgos de la revisión bibliográfica es notable que la automatización industrial requiere un proceso previo de diagnóstico y planificación que permita la consideración de factores técnicos y organizacionales. A diferencia de enfoque estructurados en la adopción de tecnologías, los estudios muestran coincidencia en la necesidad de estructurar metodologías previas que orienten el proceso de automatización.

En el caso de estudio de Metales Estructurales, esto implica el desarrollo de un modelo metodológico que permita orientar el proceso de automatización. Autores como Hetmanczyk (2024) y Govindan et al. (2023) enfatizan que es importante de previo a definir cualquier estrategia de automatización evaluar los niveles de madurez tecnológica y capacidad organizacional. Por otro lado, se requiere aplicar un enfoque integral que permita incorporar variables como la madurez tecnológica de la empresa, la disposición humana y estructural de la organización (Antony, 2023).

En una primera fase se propone el desarrollo de una fase de diagnóstico, que permita el levantamiento cualitativo de los procesos actuales mediante la observación, aplicación de entrevistas semiestructuradas y registro del flujo productivo actual. Este diagnóstico va a permitir la identificación de puntos críticos en el proceso y además la relación o dependencia entre las etapas. (Carmona et al., 2025). A diferencia de diagnósticos descriptivos, siguiendo las recomendaciones de Braun y Clarke (2022), esta etapa requiere interpretar los datos a partir de la identificación de patrones que permitan formular propuestas de mejora funcionales.

En la segunda fase, se plantea el desarrollo de una evaluación y priorización. Se plantea el uso del modelo de ponderación de factores, con este método se asigna un valor relativo a criterios de evaluación como lo pueden ser: el tiempo de operación, la criticidad, costo de automatización y el impacto en la calidad (Govindan et al., 2023). Frente a este tipo de enfoques, este tipo de evaluación permite hacer una jerarquización de las alternativas y establecer un orden lógico de intervención (Azevedo & Santiago, 2019). De igual manera, para la evaluación hacer una combinación de variables estratégicas y operativas permite que la evaluación sea más equilibrada y alineada a los principios de eficiencia y sostenibilidad descritos por autores como Mendoza-Galvis et al. (2024).

Por último, otra de las fases que se proponen es la de rediseño, es decir a partir de la integración de los hallazgos de las fases anteriores se estarían formulando recomendaciones técnicas específicas. Para esta etapa según lo mostrado a partir de la revisión bibliográfica se sugiere la utilización de simulaciones del flujo productivo (Folgado et al., 2024) y en algunos casos se pueden implementar gemelos digitales (Qi & Tao, 2019). Estas herramientas permiten evaluar de forma virtual el impacto de posibles decisiones sobre rendimiento, capacidad de respuesta y la sostenibilidad operativa, reduciendo el margen de error en la ejecución.

La implementación de estas tres fases permitirá determinar el mejor camino para la empresa y hace que la toma de decisiones de implementar un proceso de automatización se haga a partir de un análisis estructurado, basado en modelos ya implementados. Con el fin de representar el proceso propuesta en esta investigación en la ilustración 1, se puede visualizar cada una de las etapas y en concordancia los autores que apoyan estos planteamientos:

Ilustración 1. Diagrama de la propuesta de modelo de automatización industrial.



Fuente: Elaboración propia a partir de los autores. (2025)

CONCLUSIÓN

Los hallazgos permiten concluir que la implementación de un marco analítico y propositivo permite orientar metodológicamente el desarrollo de propuestas de automatización. Facilitando así, procesos de toma de decisión más estructurados y contextualizados. La integración de investigaciones desarrolladas por otros autores y el análisis de metodologías aplicadas en casos de estudio facilita el diseño de metodologías ajustadas a la realidad. Esto permite evaluar el nivel de preparación, evitando la toma de decisiones apresuradas.

La revisión bibliográfica además permitió reconocer que la automatización no es un proceso donde solo se implementa la tecnología. Debe ver como un proceso de comprensión sistemática, que requiere un entendimiento de la madurez tecnológica, el estado de la estructura organizacional y la disposición del personal ante los posibles cambios. En resumen, la presente investigación permitió demostrar que el análisis de la literatura puede traducirse en un instrumento práctico, útil en el diagnóstico de condiciones organizacionales y en el apoyo de la toma de decisiones.

FINANCIAMIENTO

Este trabajo fue financiado.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflictos de intereses financieros ni personales que puedan influir inapropiadamente en el desarrollo de este artículo.

REFERENCIAS

Abadi, A., Abadi, C., & Abadi, M. (2025). Bridging the gap between Industry 4.0 readiness and maturity assessment models. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications,* 16(2), 445–456. https://doi.org/10.14569/IJACSA.2025.0160245

Ahmed, M., Khaled, M., Ali, A., Mostafa, A., Mohamed, M., Ahmed, O., & Khalil, O. (2025). Automating hot-rolling: Designing an integrated mechatronics system for enhanced efficiency in sheet metal production. *arXiv preprint.* https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.05798

Antony, J. (2023). Conceptualizing Industry 4.0 readiness model dimensions. *The TQM Journal, 35*(6), 1403–1419. https://doi.org/10.1108/TQM-06-2021-0180

Azevedo, A., & Santiago, S. B. (2019). Design of an assessment Industry 4.0 maturity model: An application to a manufacturing company. *Networked and Electronic Business Systems, 4*(1), 59–68. https://doi.org/10.46254/NA04.20190059

Braun, V., & Clarke, V. (2022). Thematic analysis: A practical guide. *Qualitative Research in Psychology, 19*(3), 424–445. https://doi.org/10.1080/26895269.2022.2129597

Carmona, L. E., Zambrano, A. C., & Barba, K. J. (2025). Análisis del impacto de la automatización en la producción de estructuras metálicas. *Revista Científica Multidisciplinar G-Nerando, 6*(2), 2011–2033. https://doi.org/10.60100/rcmg.v6i2.773

Elhouar, S., & Terreno, S. (2022). Leveraging advances in automation to benefit the construction industry in the structural steel sector. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1218*(1), 012008. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1218/1/012008

Espíndola, E., & Suárez, J. I. (2023). *Automatización e inclusión laboral en América Latina: impactos potenciales, vulnerabilidades y propuestas de política pública.* (Documentos de proyectos LC/TS.2023/112). *CEPAL*. https://hdl.handle.net/11362/68574

Folgado, F. J., Rodríguez, A., Llorente, R., & García, L. (2024). Review of Industry 4.0 from the perspective of automation and supervision architectures. *Electronics, 13(*4), 782. https://doi.org/10.3390/electronics13040782

Govindan, K., et al. (2023). A framework to measure readiness and barriers for Industry 4.0 implementation. *Electronic Commerce Research and Applications, 61,* 101249. https://doi.org/10.1016/j.elerap.2023.101249

Hayes, R. (2024). Data-driven approaches to industrial process optimization. *Australian Journal of Engineering and Production Technology, 5(3).* https://www.australiansciencejournals.com/production/article/view/1897

Hetmanczyk, M. P. (2024). A method for evaluating the maturity level of production process automation in the context of digital transformation—Polish case study. *Applied Sciences, 14(11), 4380*. https://doi.org/10.3390/app14114380

Ide, Yayoi & Beddoe, Liz. (2023). Challenging perspectives: Reflexivity as a critical approach to qualitative social work research. *Qualitative Social Work. 23.* 147332502311735. 10.1177/14733250231173522.

International Federation of Robotics. (2024). *World Robotics 2024: Industrial Robots. Executive Summary.* Frankfurt: IFR.https://ifr.org/img/worldrobotics/Executive_Summary_WR_2024_Industrial_Robots.pdf

Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., & Suman, R. (2022). An integrated outlook of cyber–physical systems for manufacturing: Future trends and challenges. *Green Technology and Sustainability, 2(1), 100001*. https://doi.org/10.1016/j.grets.2022.100001

Mendoza-Galvis, D. J., Vega-Molina, A. L., Pumarejo-Sánchez, J., & Zambrano, C. M. (2024). Sector metalmecánico: una propuesta de diseño de estándares de métodos y tiempos. *Ingeniería Solidaria, 18*(2), 1–18. https://doi.org/10.15649/2346030X.3529

Nieves Pimiento, N. (2022). Economic impact of automation in maintenance processes for the manufacturing industry in Colombia. *Ingeniería Solidaria, 18(*2), 1–18. https://doi.org/10.16925/2357-6014.2022.02.05

OECD, CEPAL, & CAF. (2024). *Perspectivas económicas de América Latina 2024: Financiando el desarrollo sostenible. OECD Publishing.* https://doi.org/10.1787/25aed2f5-es

Olmos-Vega, F. M., Stalmeijer, R. E., & Dolmans, D. H. (2022). Reflexivity in qualitative research: A framework for understanding and practice. *Medical Teacher, 44*(4), 378–385. https://doi.org/10.1080/0142159X.2022.2057287

Qi, Q., & Tao, F. (2018). Digital twin and big data towards smart manufacturing and Industry 4.0: 360-degree comparison. *IEEE Access, 6,* 3585–3593. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2793265

Rani, S., Kataria, A., Kumar, S., & Karar, V. (2025). A new generation cyber-physical system: A comprehensive review from security perspective. *Computers & Security, 148,* 104095. https://doi.org/10.1016/j.cose.2024.104095

Xu, L. D., Xu, E. L., & Li, L. (2018). Industry 4.0: State of the art and future trends. *International Journal of Production Research, 56*(8), 2941–2962. https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806

Zhang, Y., Wang, C., Xu, W., Zhang, X., Ren, K., Wang, S., & Hua, Q. (2024). Laser cutting of titanium alloy plates: A review of processing, microstructure and mechanical properties. *Metals, 14*(10), 1152. https://doi.org/10.3390/met14101152