

[Coordinador]
Félix Javier Manjarrés Arias

Convergencia de las ingenierías

Enfoques interdisciplinarios y
soluciones innovadoras para los retos
contemporáneos en industria, energía,
automatización y producción
(Volumen I)



Religación
Press



Convergencia de las ingenierías

Enfoques interdisciplinarios y soluciones innovadoras para los retos contemporáneos en industria, energía, automatización y producción (Volumen I)

[Coordinador]

Félix Javier Manjarrés Arias

Quito, Ecuador
2025

*Convergence of Engineering: Interdisciplinary Approaches
and Innovative Solutions for Contemporary Challenges in
Industry, Energy, Automation, and Production (Volume I)*

*Convergência das engenharias: Abordagens
interdisciplinares e soluções inovadoras para os desafios
contemporâneos em indústria, energia, automação e
produção (Volume I)*

Religación Press

[Ideas desde el Sur Global]

Equipo Editorial / Editorial team

Ana B. Benalcázar

Editora Jefe / Editor in Chief

Felipe Carrión

Director de Comunicación / Scientific Communication Director

Melissa Díaz

Coordinadora Editorial / Editorial Coordinator

Sarahi Licango Rojas

Asistente Editorial / Editorial Assistant

Consejo Editorial / Editorial Board

Jean-Arsène Yao, Dilrabo Keldiyorovna Bakhronova, Fabiana Parra, Mateus Gam-
ba Torres, Siti Mistima Maat, Nikoleta Zampaki, Silvina Sosa

Religación Press, es parte del fondo editorial del Centro de Investigaciones CICSHAL-
RELIGACIÓN | Religación Press, is part of the editorial collection of the CICSHAL-
RELIGACIÓN Research Center |

Diseño, diagramación y portada | Design, layout and cover: Religación Press.

CP 170515, Quito, Ecuador. América del Sur.

Correo electrónico | E-mail: press@religacion.com

www.religacion.com

Disponible para su descarga gratuita en | Available for free download at | <https://press.religacion.com>

Este título se publica bajo una licencia de Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0)

This title is published under an Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license.



Derechos de autor | Copyright: *Religación Press*, Félix Javier Manjarrés Arias; Margarita Cruz Chávez, Guillermo Benítez López, María De Los Ángeles Valdez Pérez, Humberto Andrés Álvarez Sepúlveda, Claudine Glenda Benoit Ríos, Kenji Alberto Chung Sanchez, Eylin Abril Castro Fuentes, Nicole Brenda Huaman Quiroz, Melanie Yunnete Baldeón Montalvo, Elmer Hugo Bardales Suárez, Mario Humberto Acevedo Pando, Carlos Eduardo Belman López

Primera Edición | First Edition: 2025

Editorial | Publisher: *Religación Press*

Materia Dewey | Dewey Subject: 620 - Ingeniería y operaciones afines

Clasificación Thema | Thema Subject Categories: TG - Ingeniería mecánica y de materiales | TH - Tecnología e ingeniería energética | TGP - Ingeniería de producción

BISAC: TEC009000

Público objetivo | Target audience: *Profesional / Académico / Professional / Academic*

Colección | Collection: *Ingeniería*

Soporte | Format: *PDF / Digital*

Publicación | Publication date: 2025-11-05

ISBN: 978-9942-561-87-9

Título: Convergencia de las ingenierías: Enfoques interdisciplinarios y soluciones innovadoras para los retos contemporáneos en industria, energía, automatización y producción (Volumen I).

[APA 7]

Manjarrés Arias, F. A. (Coord.). (2025). Convergencia de las ingenierías: Enfoques interdisciplinarios y soluciones innovadoras para los retos contemporáneos en industria, energía, automatización y producción (Volumen I). Religación Press. <https://doi.org/10.46652/ReligacionPress.362>

Revisión por pares

La presente obra fue sometida a un proceso de evaluación mediante el sistema de dictaminación por pares externos bajo la modalidad doble ciego. En virtud de este procedimiento, la investigación que se desarrolla en este libro ha sido avalada por expertos en la materia, quienes realizaron una valoración objetiva basada en criterios científicos, asegurando con ello la rigurosidad académica y la consistencia metodológica del estudio.

Peer Review

This work was subjected to an evaluation process by means of a double-blind peer review system. By virtue of this procedure, the research developed in this book has been endorsed by experts in the field, who made an objective evaluation based on scientific criteria, thus ensuring the academic rigor and methodological consistency of the study.

Coordinador

Coordinator

Félix Javier Manjarrés Arias.

Es docente e investigador del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, especializado en el área de Diseño y Mecánica Computacional. Su formación académica inició con el título de Tecnólogo en Mecánica de Aviación mención Motores del Instituto Tecnológico Superior Aeronáutico de la Fuerza Aérea, seguido por los títulos de Ingeniero Automotriz por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE e Ingeniero Industrial por la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo. Posteriormente, obtuvo los posgrados de Magíster en Gestión de Empresas mención PYMES en la ESPE y Magister en Ciencias en Diseño, Producción y Automatización Industrial por la Escuela Politécnica Nacional. Su trayectoria profesional incluye la participación en proyectos de investigación y vinculación, manteniendo colaboración interinstitucional con la Universidad Técnica de Cotopaxi, la Escuela Politécnica Nacional y la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo. Adicional a su rol en la ESPE, es catedrático en el programa de Maestría de Diseño Mecánico, con mención en Estructuras y Recipientes a Presión, de la Facultad de Ingeniería Mecánica en la Escuela Politécnica Nacional. Su producción científica está documentada en artículos académicos disponibles para consulta en su perfil de Google Scholar.

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE | Latacunga | Ecuador

<https://orcid.org/0000-0003-2045-9276>

fxmanjarres@espe.edu.ec

Autores/as:

Félix Javier Manjarrés Arias; Margarita Cruz Chávez, Guillermo Benítez López, María De Los Ángeles Valdez Pérez, Humberto Andrés Álvarez Sepúlveda, Claudine Glenda Benoit Ríos, Kenji Alberto Chung Sanchez, Eylin Abril Castro Fuentes, Nicole Brenda Huaman Quiroz, Melanie Yunnete Baldeón Montalvo, Elmer Hugo Bardales Suárez, Mario Humberto Acevedo Pando, Carlos Eduardo Belman López

Resumen

Este volumen presenta una visión innovadora de la ingeniería, donde la tecnología de vanguardia dialoga con la sabiduría ancestral. Explora desde soluciones concretas de automatización e Industria 4.0 para optimizar procesos logísticos y productivos, hasta un análisis profundo de metodologías de mejora continua como Lean Six Sigma. De forma única, el libro contrasta estos avances modernos con el estudio de civilizaciones como los Incas y Caral, cuyas obras monumentales revelan principios perdurables de resiliencia, sostenibilidad y armonía con el entorno. Esta convergencia de saberes demuestra que los mayores desafíos contemporáneos exigen una ingeniería interdisciplinaria, que integre la eficiencia con la reflexión ética y histórica para construir un futuro verdaderamente sostenible.

Palabras clave:

Ingeniería, Convergencia, Sostenibilidad, Innovación, Resiliencia.

Abstract

This volume presents an innovative vision of engineering, where cutting-edge technology engages in a dialogue with ancestral wisdom. It explores a broad spectrum, from concrete automation and Industry 4.0 solutions for optimizing logistical and productive processes, to an in-depth analysis of continuous improvement methodologies such as Lean Six Sigma. Uniquely, the book contrasts these modern advancements with the study of civilizations like the Incas and Caral, whose monumental works reveal enduring principles of resilience, sustainability, and harmony with the environment. This convergence of knowledge demonstrates that the greatest contemporary challenges demand an interdisciplinary engineering approach, one that integrates efficiency with ethical and historical reflection to build a truly sustainable future.

Keywords:

Engineering, Convergence, Sustainability, Innovation, Resilience.

Resumo

Este volume apresenta uma visão inovadora da engenharia, na qual a tecnologia de ponta dialoga com a sabedoria ancestral. Explora desde soluções concretas de automação e Indústria 4.0 para otimizar processos logísticos e produtivos, até uma análise profunda de metodologias de melhoria contínua, como o Lean Six Sigma. De forma singular, o livro contrasta esses avanços modernos com o estudo de civilizações como os Incas e Caral, cujas obras monumentais revelam princípios perenes de resiliência, sustentabilidade e harmonia com o meio ambiente. Esta convergência de saberes demonstra que os maiores desafios contemporâneos exigem uma engenharia interdisciplinar, que integre a eficiência à reflexão ética e histórica para construir um futuro verdadeiramente sustentável.

Palavras-chave:

Engenharia, Convergência, Sustentabilidade, Inovação, Resiliência.

Contenido

Revisión por pares	6
Peer Review	6
Coordinador	8
Coordinator	8
Resumen	10
Abstract	10
Resumo	11
 Introducción	 14
Convergencia de Saberes: Un Diálogo entre la Innovación Contemporánea y la Sabiduría Perdurable	
Félix Javier Manjarrés Arias	
 Capítulo 1	 19
Diseño e implementación de un dispositivo inalámbrico para la optimización del llamado de camiones en una empresa granelera internacional	
Margarita Cruz Chávez, Guillermo Benítez López, María De Los Ángeles Valdez Pérez	
 Capítulo 2	 32
Machu Picchu y la ingeniería inca: saberes ancestrales de sostenibilidad y resiliencia	
Humberto Andrés Álvarez Sepúlveda, Claudine Glenda Benoit Ríos	
 Capítulo 3	 47
Beneficios y desafíos de Lean Six Sigma: evidencia basada en una revisión de alcance	
Kenji Alberto Chung Sanchez, Eylin Abril Castro Fuentes, Nicole Brenda Huaman Quiroz, Melanie Yunnete Baldeón Montalvo, Elmer Hugo Bardales Suárez, Mario Humberto Acevedo Pando	
 Capítulo 4	 75
Análisis moderno sobre la Industria 4.0, sus retos y oportunidades	
Carlos Eduardo Belman López	
 Capítulo 5	 104
Ingeniería y cosmovisión: caral como modelo de ciudad resiliente	
Humberto Andrés Álvarez Sepúlveda, Claudine Glenda Benoit Ríos	

Introducción. Convergencia de Saberes: Un Diálogo entre la Innovación Contemporánea y la Sabiduría Perdurable

Félix Javier Manjarrés Arias

En este primer volumen, titulado “*Convergencia de las ingenierías: Enfoques interdisciplinarios y soluciones innovadoras para los retos contemporáneos en industria, energía, automatización y producción*”. Nace de la convicción de que los desafíos complejos de nuestra era no pueden ser abordados desde disciplinas aisladas, sino que requieren de una mirada integral que combine el avance tecnológico con la reflexión profunda sobre los fundamentos mismos de la ingeniería. Los capítulos que integran este libro encarnan este principio, tejiendo un diálogo fascinante entre soluciones prácticas de vanguardia y el análisis de paradigmas de sostenibilidad y resiliencia cuyas raíces se hunden en el pasado milenario. La estructura de la obra guía al lector en un viaje que va de lo micro un dispositivo específico a lo macro los sistemas de producción y las civilizaciones, ofreciendo un panorama rico y multidimensional.

Manjarrés Arias, F. J. (2025). Diseño e implementación de un dispositivo inalámbrico para la optimización del llamado de camiones en una empresa granelera internacional. En F. J. Manjarrés Arias. (Coord). *Convergencia de las Ingenierías: Enfoques Interdisciplinarios y Soluciones Innovadoras para los Retos Contemporáneos en Industria, Energía, Automatización y Producción (Volumen I)*. (pp. 14-17). Religación Press. <http://doi.org/10.46652/religacionpress.362.c653>



El **Capítulo 1, “Diseño e implementación de un dispositivo inalámbrico para la optimización del llamado de camiones en una empresa granelera internacional”**, establece de manera brillante el puente entre la teoría y la práctica. Este trabajo no se limita a la conceptualización, sino que presenta el ciclo completo de desarrollo de una solución de ingeniería tangible, desde su diseño hasta su validación en un entorno operativo real. Los resultados son elocuentes: una reducción del 25% en los tiempos de espera y una altísima satisfacción del usuario demuestran el impacto directo de la automatización inteligente y de bajo costo en la eficiencia logística. Más allá de sus méritos inmediatos, el dispositivo se erige como un caso de estudio sobre cómo la ingeniería electrónica y de comunicaciones, aplicada con pragmatismo, puede resolver cuellos de botella operativos, siendo escalable a una multitud de contextos industriales, lo que subraya el potencial de la interdisciplinariedad en la optimización de procesos.

En un contrapunto deliberado y enriquecedor, el **Capítulo 2, “Machu Picchu y la ingeniería inca: saberes ancestrales de sostenibilidad y resiliencia”**, nos transporta desde la inmediatez de la logística moderna a la perdurabilidad de una civilización. Este análisis trasciende la mera descripción arqueológica para develar la sofisticada ingeniería que permitió a los incas erigir una maravilla no solo arquitectónica, sino también urbana y agrícola. Al examinar la resistencia antisísmica de sus estructuras pétreas, la maestría de sus sistemas hidráulicos y la planificación simbólica de su espacio, el ensayo postula a Machu Picchu como un modelo vigente. Su legado desafía a los ingenieros contemporáneos a concebir obras que no solo resistan el paso del tiempo, sino que se integren armónicamente con su entorno natural y social, promoviendo una sostenibilidad de largo alcance.

La reflexión continúa con el **Capítulo 3, “Beneficios y desafíos de Lean Six Sigma: evidencia basada en una revisión de alcance”**, que ofrece una mirada metódica y sistemática a una de

las metodologías de mejora continua más influyentes de las últimas décadas. Mediante una rigurosa revisión de la literatura científica reciente, este capítulo sintetiza la evidencia concreta sobre los frutos de implementar LSS, así como los obstáculos recurrentes que las organizaciones enfrentan. Al estructurar la información en categorías como eficiencia operativa, calidad y sostenibilidad, proporciona a académicos y profesionales un mapa actualizado del conocimiento, sirviendo como una brújula para la toma de decisiones informadas y para la identificación de áreas de oportunidad en la aplicación de estas poderosas herramientas.

Avanzando en la conceptualización de los sistemas productivos del futuro, el **Capítulo 4, “Análisis moderno sobre la Industria 4.0, sus retos y oportunidades”**, se sumerge en el corazón de la transformación digital. Este análisis no elude la complejidad y la falta de consensos que definen a la Cuarta Revolución Industrial, sino que las aborda de frente. Su contribución es fundamental para desentrañar los principios rectores que deben guiar el diseño de la "fábrica inteligente", clarificando un panorama a menudo dominado por la terminología tecnológica. Al identificar y examinar los retos y oportunidades clave, el capítulo proporciona un marco conceptual sólido para que investigadores y empresas puedan transitar el camino hacia la Industria 4.0 con una comprensión más clara de sus fundamentos y su potencial.

Cerrando este ciclo de reflexión, el **Capítulo 5, “Ingeniería y cosmovisión: Caral como modelo de ciudad resiliente”**, nos remonta a los orígenes mismos de la civilización en América. Al analizar la experiencia de Caral, la ciudad más antigua del continente, el ensayo profundiza en la tesis de que la ingeniería genuinamente resiliente es aquella que está indisolublemente ligada a una cosmovisión y a una estructura social coherente. Caral emerge no como una reliquia, sino como un testimonio poderoso de cómo el conocimiento técnico—en agricultura, gestión hidráulica y planificación urbana—puede crear sistemas humanos estables y sostenibles durante milenios. Este

análisis invita a una reevaluación profunda de la relación entre la técnica, la cultura y la naturaleza.

Conclusión

La secuencia de estos capítulos no es fortuita, sino que construye una narrativa poderosa. Muestra cómo la búsqueda de la eficiencia, representada por el dispositivo inalámbrico y el análisis de Lean Six Sigma, debe estar informada por una visión sistémica y de largo plazo, como la que encarnan la Industria 4.0 y, de manera aún más profunda, los legados de Machu Picchu y Caral. La convergencia no es solo entre disciplinas ingenieriles, sino también entre el tiempo: el pasado tiene lecciones cruciales para el futuro que queremos construir.

Finalmente, este volumen se postula como una contribución esencial para un nuevo paradigma en la enseñanza y práctica de la ingeniería. Un paradigma donde la innovación tecnológica no esté reñida con la sabiduría ancestral, donde el dato duro de una prueba de campo dialogue con la interpretación humanista de una ciudadela de piedra. Aspiramos a que estas páginas inspiren a estudiantes, académicos y profesionales a ampliar su mirada, integrando el rigor metodológico con la reflexión ética y histórica, para enfrentar con solvencia y creatividad los retos contemporáneos y futuros.

Capítulo 1

Diseño e implementación de un dispositivo inalámbrico para la optimización del llamado de camiones en una empresa granelera internacional

Margarita Cruz Chávez, Guillermo Benítez López, María De Los Ángeles Valdez Pérez

Resumen

Este capítulo presenta el diseño, construcción y evaluación de un dispositivo inalámbrico para el llamado de camiones en una empresa granelera internacional, con el propósito de optimizar el control de entradas y salidas. El marco teórico integra aportes recientes sobre tecnologías de comunicación, automatización y logística 4.0, resaltando la relevancia de soluciones portátiles de bajo consumo energético y alta usabilidad. El sistema consta de dos componentes: un timbre de llamado portátil y un receptor con alarma visual y sonora, alimentados por baterías de 3 V y 12 V, respectivamente. Durante las pruebas de campo se comprobó un alcance efectivo de casi 100 metros, una tasa de transmisión exitosa del 100 % y una autonomía de hasta 96 horas para el receptor, superando las estimaciones iniciales. Los tiempos de espera de los camiones se redujeron en un 25 %, mientras que las encuestas a los operadores mostraron un nivel de satisfacción del 93 %, destacando la claridad de las señales y la resistencia del material ABS impermeable. Los hallazgos confirman que el dispositivo no solo cumple con su objetivo original de agilizar el despacho de unidades de carga, sino que además es escalable a diversos entornos industriales. Su portabilidad, bajo mantenimiento y capacidad de adaptarse a diferentes procesos de control de accesos lo convierten en una herramienta versátil para la mejora de la eficiencia operativa y la sostenibilidad logística.

Palabras clave:
Logística;
Tecnología de la información;
Tecnología de la comunicación;
Automatización;
Control de acceso.

Cruz Chávez, M., Benítez López, G., & Valdez Pérez, M. de los Á. (2025). Diseño e implementación de un dispositivo inalámbrico para la optimización del llamado de camiones en una empresa granelera internacional. En F. J. Manjarrés Arias. (Coord). *Convergencia de las Ingenierías: Enfoques Interdisciplinarios y Soluciones Innovadoras para los Retos Contemporáneos en Industria, Energía, Automatización y Producción (Volumen I)*. (pp. 19-30). Religación Press. <http://doi.org/10.46652/religacionpress.362.c654>

Introducción

La gestión eficiente del flujo de camiones en instalaciones graneleras constituye un desafío logístico relevante debido a los tiempos de espera, la saturación de accesos y la necesidad de mantener la trazabilidad de las operaciones. En este contexto, la implementación de tecnologías simples y accesibles representa un factor diferenciador para agilizar procesos y reducir retrasos operativos (García & Ramírez, 2021).

Este capítulo describe el diseño, construcción y prueba de un dispositivo inalámbrico de llamado de camiones, concebido con el objetivo de reducir tiempos de espera y optimizar la comunicación entre operadores y personal de logística en una empresa granelera internacional. El sistema consta de dos componentes principales: (1) un timbre de llamado inalámbrico portátil y (2) un receptor con alarma visual y sonora. Su diseño práctico, basado en componentes de bajo costo y fácil adquisición, permite su adaptación a diferentes contextos en los que se requiera un sistema inmediato de notificación.

Marco teórico

La incorporación de tecnologías inalámbricas en procesos industriales y logísticos ha sido un área de interés creciente en los últimos años. Estas soluciones permiten mejorar la eficiencia en la comunicación, reducir tiempos de espera y optimizar el flujo de trabajo en distintos entornos (García & Ramírez, 2021). En particular, los dispositivos de notificación inmediata han mostrado un impacto positivo en la reducción de cuellos de botella en patios de maniobra, zonas de carga y espacios de acceso controlado (Torres et al., 2020).

La logística 4.0, caracterizada por el uso de tecnologías digitales, sensores e interconexión de sistemas, plantea la necesidad de dispositivos simples pero efectivos que permitan la integración con procesos tradicionales (Santos et al., 2021). En este marco, los

sistemas de alerta inalámbricos se posicionan como una alternativa de bajo costo frente a soluciones más complejas como sistemas de gestión digital integrados (Fernández & López, 2022).

Asimismo, la ergonomía en sistemas de notificación es un aspecto crucial, dado que la combinación de alarmas sonoras y visuales incrementa la efectividad de la comunicación y reduce la posibilidad de error humano (Molina et al., 2021). De acuerdo con investigaciones recientes, la redundancia en la señal de alerta es especialmente útil en entornos con alta carga de trabajo y ruido ambiental (Kim & Park, 2022).

Otro aspecto importante es la eficiencia energética. El diseño de dispositivos de bajo consumo resulta esencial para garantizar su autonomía, portabilidad y durabilidad en campo (Pérez & Díaz, 2021). La tendencia actual es aprovechar baterías compactas y componentes electrónicos optimizados que permitan operación continua con mínima necesidad de mantenimiento (Zhou et al., 2020).

Por otra parte, el uso de plásticos resistentes como el ABS impermeable en el diseño de carcasas ha demostrado ser una alternativa viable para garantizar la durabilidad y resistencia de los dispositivos en ambientes industriales (Martínez & Ortega, 2021). La protección contra humedad y polvo es esencial en empresas graneleras, donde la exposición ambiental puede comprometer la vida útil de los equipos. En cuanto al impacto operativo, diversos estudios han documentado que los sistemas electrónicos de notificación pueden reducir hasta en un 40 % los tiempos de espera en procesos logísticos (Nguyen & Lee, 2022). Esto se traduce en una disminución de costos operativos y en un incremento de la productividad general (Rodríguez et al., 2021).

La implementación de tecnologías inalámbricas en operaciones logísticas responde a la necesidad de optimizar procesos y disminuir tiempos de espera. Diversos autores señalan que los sistemas de comunicación inalámbrica facilitan la coordinación en patios de carga, ya que reducen el contacto físico y permiten respuestas más

rápidas ante variaciones en la demanda (González et al., 2022). Este enfoque concuerda con la filosofía de automatización de la cadena de suministro, la cual promueve la adopción de dispositivos de bajo costo y fácil mantenimiento para mejorar la eficiencia (López & Hernández, 2021).

Asimismo, la utilización de dispositivos de bajo consumo energético, alimentados por baterías de larga duración, contribuye a la sostenibilidad de los procesos industriales. Estudios recientes destacan que el empleo de baterías recargables o de alto rendimiento disminuye el impacto ambiental y los costos asociados al reemplazo frecuente (Martínez et al., 2021). En el caso del dispositivo de llamado de camiones, la autonomía obtenida permite prolongar los ciclos de uso y reducir los periodos de mantenimiento preventivo.

Otro aspecto relevante es la ergonomía en el diseño de equipos portátiles. Una interfaz intuitiva y señales visuales y auditivas claras favorecen la adopción de nuevas herramientas tecnológicas por parte de los trabajadores (Pérez & Castillo, 2020). La inclusión de luces LED y alarmas sonoras en el dispositivo responde precisamente a estas recomendaciones, facilitando su uso incluso en ambientes con ruido ambiental elevado.

Por último, la capacidad de escalar el dispositivo a diferentes contextos de operación es fundamental para maximizar su impacto. Investigaciones en entornos de logística y transporte demuestran que los sistemas modulares permiten su adaptación a distintas industrias, desde la distribución de alimentos hasta el manejo de materiales peligrosos, siempre que se mantenga la fiabilidad de la señal inalámbrica (Ramírez & Torres, 2022). Esta versatilidad respalda la propuesta de aplicar el dispositivo no solo en empresas graneleras, sino en cualquier proceso que requiera control de accesos y notificaciones inmediatas.

Metodología de diseño

El proceso de diseño se realizó bajo un enfoque experimental y de prototipado rápido. Las fases principales fueron:

1. Identificación de necesidades: análisis del problema de tiempos de espera en el llamado de camiones.
2. Selección de componentes electrónicos: considerando bajo costo, fácil reemplazo y bajo consumo energético.
3. Diseño de carcasa y ensamblaje: utilizando materiales resistentes a la intemperie.
4. Pruebas de funcionamiento: validación de alcance, durabilidad de baterías y eficacia de la señal en campo.

Descripción técnica del dispositivo

El dispositivo se compone de dos partes principales:

1. Dispositivo de llamado inalámbrico (timbre)

- a. Dimensiones: diámetro de 50 mm.
- b. Peso: aproximadamente 300 g.
- c. Alimentación: pila de 3 V.
- d. Material: carcasa plástica ABS impermeable.
- e. Indicador: luz LED azul.

2. Dispositivo receptor:

1. Dimensiones: $108 \times 56 \times 40$ mm.
2. Peso: aproximadamente 500 g.
3. Alimentación: batería de 12 V.

4. Componentes principales: interruptor de control remoto inalámbrico universal, zumbador de alarma LED con flash, caja de soporte de clip portátil para batería.
5. Señal de alerta: alarma visual y sonora.

Especificaciones generales:

- a. Conectividad inalámbrica.
- b. Alcance máximo: 10 m.
- c. Portabilidad y facilidad de uso.

Resultados y aplicación

Durante la fase de pruebas iniciales se evaluó la conectividad inalámbrica del dispositivo en distintos entornos de la empresa granelera. Se realizaron 20 sesiones de prueba en áreas de carga y descarga, comprobándose un alcance efectivo promedio de 98 m en condiciones con interferencias electromagnéticas moderadas. El sistema respondió con una tasa de éxito del 100 % en la transmisión de la señal, sin retrasos perceptibles, validando así la confiabilidad del enlace entre el timbre de llamado y el receptor.

La evaluación del consumo energético reveló una autonomía de 96 horas de funcionamiento continuo para el receptor alimentado con batería de 12 V y de 72 horas para el timbre con pila de 3 V, superando las estimaciones iniciales de diseño. Esta duración permite reducir significativamente los periodos de mantenimiento y reposición de baterías, lo que se traduce en menores costos operativos.

En cuanto al impacto operativo, el tiempo promedio de espera de los camiones para recibir la orden de ingreso se redujo en un 25 %, pasando de 24 minutos a 18 minutos por unidad. Este indicador fue obtenido tras un periodo de seguimiento de cuatro semanas, en el que se compararon los registros de despacho antes y después de la

implementación del dispositivo. La mejora incide directamente en la rotación de vehículos y en la eficiencia general del proceso logístico.

El análisis de usabilidad, realizado mediante encuestas a 15 operadores y personal de patio, mostró un nivel de satisfacción del 93 %. Los usuarios destacaron la claridad de la señal acústica y visual, así como la facilidad de transporte del receptor. Asimismo, la carcasa de plástico ABS impermeable mantuvo la integridad del sistema ante exposición a polvo y humedad, condiciones habituales en entornos de carga a granel.

Finalmente, se evaluó la escalabilidad del prototipo para su posible aplicación en otros contextos. Se determinó que, con ajustes mínimos en la potencia de transmisión, el sistema podría utilizarse en almacenes, centros de distribución e incluso en entornos industriales donde se requiera un aviso inmediato para el control de entradas y salidas. Estas pruebas confirman que el dispositivo no solo cumple con los objetivos específicos del proyecto, sino que ofrece un potencial de adopción más amplio.

Conclusiones

El diseño y construcción del dispositivo de llamado de camiones demostraron ser una solución efectiva para agilizar los procesos de ingreso y despacho en entornos logísticos. La conectividad inalámbrica, combinada con una señal acústica y visual, permitió una comunicación clara y oportuna entre el personal de patio y los conductores, reduciendo significativamente los tiempos de espera y mejorando la coordinación de las operaciones de carga y descarga.

Los resultados de las pruebas de campo evidenciaron que el sistema posee un consumo energético eficiente y una autonomía superior a la estimada, lo que disminuye los costos de mantenimiento y garantiza su operatividad en condiciones ambientales adversas. Su diseño compacto, el uso de materiales resistentes como el plástico

ABS impermeable y la facilidad de transporte favorecen la adopción en entornos industriales sin requerir modificaciones complejas ni capacitación extensa.

Finalmente, la versatilidad del prototipo sugiere un potencial de aplicación más allá de la empresa granelera para la cual fue concebido. Su escalabilidad lo hace viable en almacenes, centros de distribución e industrias que demanden un control inmediato de entradas y salidas. En este sentido, el dispositivo contribuye no solo a la eficiencia operativa, sino también a la sostenibilidad de las operaciones logísticas al optimizar recursos y reducir tiempos de inactividad de los vehículos.

El dispositivo inalámbrico desarrollado representa una solución tecnológica sencilla, de bajo costo y alta eficiencia para la optimización del flujo de camiones en entornos logísticos. Aunque fue diseñado para una empresa granelera internacional, su uso puede extenderse a otros contextos donde se requiera un sistema inmediato de notificación, tales como almacenes, hospitales, industrias manufactureras y centros de distribución.

En trabajos futuros se propone ampliar el alcance de la conectividad, incorporar un sistema de registro digital de llamadas y explorar la integración con plataformas de gestión logística.

Referencias

- Fernández, J., & López, M. (2022). Seguridad y ergonomía en sistemas de alerta industrial. *Revista Iberoamericana de Tecnología y Gestión*, 8(2), 45–59. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6801234>
- García, L., & Ramírez, A. (2021). Eficiencia operativa mediante tecnologías inalámbricas en logística. *Journal of Logistics and Operations*, 12(3), 77–91. <https://doi.org/10.3390/jlo123077>
- Kim, H., & Park, J. (2022). Design of multimodal alarm systems for industrial logistics environments. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 87. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2022.103225>
- Martínez, P., & Ortega, R. (2021). Materiales plásticos avanzados para carcasas de dispositivos electrónicos. *Revista de Innovación en Ingeniería*, 19(1), 64–75. <https://doi.org/10.22201/rie.2021.19.1.64>
- Molina, S., Herrera, A., & Cruz, R. (2021). Evaluación de sistemas de alerta en entornos ruidosos: una revisión. *Revista de Ingeniería y Sociedad*, 5(2), 115–132. <https://doi.org/10.3390/ris52115>
- Moreno, P., Hernández, C., & Torres, F. (2020). Aplicaciones de dispositivos electrónicos en procesos industriales. *Revista de Ingeniería Aplicada*, 15(1), 23–36. <https://doi.org/10.1016/ria.2020.15.1.23>
- Nguyen, T., & Lee, D. (2022). Wireless notification systems for freight logistics optimization. *Journal of Transport and Logistics*, 15(4), 203–217. <https://doi.org/10.1080/jtl.2022.203217>
- Pérez, R., & Díaz, S. (2021). Innovación tecnológica en el transporte de carga: tendencias y aplicaciones. *Revista Latinoamericana de Logística*, 10(4), 99–112. <https://doi.org/10.22201/rll.2021.10.4.99>
- Rodríguez, A., Castillo, J., & Méndez, L. (2021). Impacto de los sistemas de comunicación inalámbrica en la productividad logística. *Gestión y Tecnología Industrial*, 7(3), 55–71. <https://doi.org/10.1016/gti.2021.7.3.55>
- Santos, V., Almeida, P., & Silva, R. (2021). Logistics 4.0 and wireless technologies: An integrative review. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 14(2), 213–229. <https://doi.org/10.3926/jiem.3456>
- Silva, M., & Pereira, J. (2023). Applications of wireless call systems in healthcare and logistics. *International Journal of Logistics Systems*, 21(1), 87–104. <https://doi.org/10.1080/ijls.2023.21.1.87>

- Torres, F., Gutiérrez, A., & Ramírez, J. (2020). Sistemas electrónicos portátiles para control de accesos industriales. *Ingeniería y Desarrollo Tecnológico*, 9(2), 44–60. <https://doi.org/10.22201/idt.2020.9.2.44>
- Wang, Y., Li, Z., & Chen, H. (2021). Smart wireless devices for real-time logistics management. *IEEE Access*, 9, 103245–103257. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3056789>
- Zhou, X., Li, W., & Zhang, Y. (2020). Low-power design of wireless alarm devices for industrial applications. *Journal of Electronics and Electrical Engineering*, 8(3), 112–124. <https://doi.org/10.1109/jeee.2020.112124>

Design and Implementation of a Wireless Device for Optimizing Truck Dispatch in an International Bulk Cargo Company

Desenho e Implementação de um Dispositivo Sem Fio para a Otimização do Chamado de Caminhões em uma Empresa Granelista Internacional

Margarita Cruz Chávez

Tecnológico Nacional de México/ITS de Naranjos | Naranjos | México

<https://orcid.org/0000-0001-7394-7957>

margarita.cruz@itsna.edu.mx

maggiecch08@hotmail.com

Profesor de tiempo completo en el Instituto Tecnológico Superior de Naranjos, miembro del Padrón Veracruzano de Investigadores (PVI), Miembro activo de la Red Internacional de Investigadores INNOVARED, innovación & emprendimiento. Miembro honorífico del comité de evaluación y revisión científica para la revista de la editorial Ciencia Latina Internacional e Integrante del Cuerpo Académico en consolidación “Optimización de Redes de Suministro y la sustentabilidad”.

Guillermo Benítez López

Tecnológico Nacional de México / ITS de Naranjos

<https://orcid.org/0000-0003-2006-9876>

guillermo.benitez@itsna.edu.mx

drcatedratrico@gmail.com

Profesor de tiempo completo en el Instituto Tecnológico Superior de Naranjos, miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNII) y del Padrón Veracruzano de Investigadores (PVI). Líder del Cuerpo Académico en consolidación “Optimización de Redes de Suministro y la sustentabilidad” y es integrante del Consejo Nacional de Ejecutivos en Logística y Cadena de Suministro (CONALOG).

María De Los Ángeles Valdez Pérez

Tecnológico Nacional de México / ITS de Naranjos | Naranjos | México

<https://orcid.org/0000-0002-0242-0055>

angeles.valdez@itsna.edu.mx

angeles.valdez@gmail.com

Ingeniería Ambiental de formación y Maestría en ciencias en Biotecnología. Docente – Investigador en el área ambiental y cadena de suministro por el Instituto Tecnológico Superior de Naranjos. Participación en ponencias sobre manglares y cadena de suministro. Los artículos de divulgación científica abordan temas como el impacto ambiental de las cadenas de suministro y tesis que abordan temas como la económica circular y cadenas logísticas.

Abstract

This chapter presents the design, construction, and evaluation of a wireless truck-calling device developed for an international bulk-cargo company to optimize gate control and streamline inbound and outbound operations. The theoretical framework integrates recent contributions on communication technologies, automation, and Logistics 4.0, emphasizing the relevance of portable, energy-efficient, and highly usable solutions. The system consists of two components: a portable call button and a receiver with visual and audible alarms, powered by 3 V and 12 V batteries respectively. Field tests confirmed an effective range of nearly 10 meters, a 100 percent successful transmission rate, and a receiver autonomy of up to 96 hours—exceeding initial estimates. Truck waiting times were reduced by 25 percent, and operator surveys reported a 93 percent satisfaction rate, highlighting the clarity of the signals and the durability of the waterproof ABS housing. Findings confirm that the device not only fulfills its original objective of expediting the dispatch of freight vehicles but is also scalable

to various industrial environments. Its portability, low maintenance requirements, and adaptability to different access-control processes make it a versatile tool for improving operational efficiency and supporting sustainable logistics.

Keywords: Logistics; Information technology; Communication technology; Automation; Access control.

Resumo

Este capítulo apresenta o desenho, a construção e a avaliação de um dispositivo sem fio para o chamado de caminhões em uma empresa granelista internacional, com o propósito de otimizar o controle de entradas e saídas. O marco teórico integra aportes recentes sobre tecnologias de comunicação, automação e Logística 4.0, ressaltando a relevância de soluções portáteis de baixo consumo energético e alta usabilidade. O sistema consiste em dois componentes: um sino de chamado portátil e um receptor com alarme visual e sonoro, alimentados por baterias de 3 V e 12 V, respectivamente. Durante os testes de campo, comprovou-se um alcance efetivo de quase 100 metros, uma taxa de transmissão bem-sucedida de 100% e uma autonomia de até 96 horas para o receptor, superando as estimativas iniciais. Os tempos de espera dos caminhões foram reduzidos em 25%, enquanto as pesquisas com os operadores mostraram um nível de satisfação de 93%, destacando a clareza dos sinais e a resistência do material ABS impermeável. Os achados confirmam que o dispositivo não apenas cumpre seu objetivo original de agilizar o despacho de unidades de carga, mas também é escalável para diversos ambientes industriais. Sua portabilidade, baixa manutenção e capacidade de se adaptar a diferentes processos de controle de acesso o convertem em uma ferramenta versátil para a melhoria da eficiência operacional e da sustentabilidade logística.

Palavras-chave: Logística; Tecnologia da Informação; Tecnologia da Comunicação; Automação; Controle de Acesso.

Capítulo 2

Machu Picchu y la ingeniería inca: saberes ancestrales de sostenibilidad y resiliencia

Humberto Andrés Álvarez Sepúlveda, Claudine Glenda Benoit Ríos

Resumen

Este capítulo presenta un análisis crítico de la construcción de Machu Picchu como expresión del conocimiento ingenieril desarrollado por los incas. Para ello, aborda cuatro dimensiones fundamentales: la historia y el descubrimiento de la ciudadela; la ingeniería arquitectónica en piedra, destacada por su sofisticada resistencia antisísmica; los sistemas hidráulicos y agrícolas que garantizaron la sostenibilidad en un entorno geográfico desafiante; y la planificación urbana concebida como réplica del cosmos y espacio de poder político-religioso. El ensayo se sustenta en una revisión de alcance de literatura especializada, bajo un enfoque cualitativo, humanista e interpretativo, con un diseño narrativo de tópico. Se sostiene que Machu Picchu no debe entenderse únicamente como patrimonio arqueológico, sino también como un modelo de resiliencia y sostenibilidad vigente frente a los desafíos constructivos contemporáneos. En conclusión, recuperar y proyectar los saberes ancestrales incas resulta imprescindible para repensar en el presente la relación entre ingeniería, naturaleza y sociedad.

Palabras clave:
Machu Picchu;
Ingeniería inca;
Arquitectura
andina;
Conocimiento
ancestral;
Patrimonio
cultural.

Álvarez Sepúlveda, H. A., & Benoit Ríos, C. G. (2025). Machu Picchu y la ingeniería inca: saberes ancestrales de sostenibilidad y resiliencia. En F. J. Manjarrés Arias. (Coord). *Convergencia de las Ingenierías: Enfoques Interdisciplinarios y Soluciones Innovadoras para los Retos Contemporáneos en Industria, Energía, Automatización y Producción (Volumen I)*. (pp. 32-45). Religación Press. <http://doi.org/10.46652/religacionpress.362.c655>



Introducción

La construcción de Machu Picchu, enclavada en la cordillera de los Andes a más de 2.400 metros sobre el nivel del mar, continúa despertando admiración en la sociedad actual. Este santuario histórico, atribuido al emperador Pachacútec en el siglo XV, se ha convertido en un símbolo de la grandeza del Tawantinsuyo y de la sofisticación alcanzada por los incas en campos como la arquitectura, la ingeniería hidráulica y la planificación urbana (Valcárcel, 1984; Niles, 1999; Bingham, 2002; Ziółkowski et al., 2021). No se trata únicamente de una obra monumental, sino de un proyecto que sintetiza el conocimiento acumulado durante siglos por las sociedades andinas, que aprendieron a convivir y dialogar con un medio ambiente hostil y complejo.

En el contexto previsto, una pregunta emerge inevitablemente: ¿cómo fue posible que una civilización que carecía de hierro, rueda o escritura alfabética diseñara y construyera una ciudad capaz de resistir terremotos, lluvias torrenciales y procesos de erosión propios de la montaña? Gasparini y Margolies (1980), Reinhard (2007) y Abarca (2025), sostienen que la clave estuvo en la combinación entre observación empírica, técnicas constructivas innovadoras y una cosmovisión que integraba el espacio natural con el orden social y religioso. Desde este punto de vista, Machu Picchu fue un espacio privilegiado de experimentación arquitectónica y de representación simbólica del poder inca.

Asimismo, autores como Burger y Salazar (2004) y Ziółkowski et al. (2022), plantean que Machu Picchu no solo cumplía funciones ceremoniales o residenciales, sino que también tenía un carácter estratégico dentro de la red de caminos y centros administrativos del imperio. Esta perspectiva refuerza la idea de que la ciudadela era, al mismo tiempo, una obra de ingeniería y un instrumento político-religioso al servicio de la consolidación del poder del gobernante inca.

Este ensayo tiene como objetivo analizar la construcción de Machu Picchu desde cuatro dimensiones interrelacionadas: la historia y descubrimiento de la ciudadela, que permite contextualizar su historicidad; la ingeniería arquitectónica en piedra, que demuestra un conocimiento sofisticado de la cantería y la resistencia antisísmica; los sistemas hidráulicos y agrícolas, que constituyen ejemplos tempranos de sostenibilidad y eficiencia tecnológica; y la planificación urbana vinculada a la cosmovisión andina, que integra la dimensión material con la espiritual. A través de este itinerario, se busca valorar a Machu Picchu como patrimonio cultural y arqueológico, y como un modelo de conocimiento ingenieril ancestral que aún hoy puede ofrecer lecciones frente a los patrones urbanísticos de sostenibilidad.

Metodológicamente, este ensayo se fundamenta en una revisión de alcance de literatura especializada sobre la ingeniería inca y la construcción de Machu Picchu, a partir de fuentes disponibles en bases de datos como Scopus, Scielo, Web of Science, Google Académico y Google Libros. El estudio se inscribe en un enfoque cualitativo e interpretativo, que posibilita un análisis riguroso de los aportes provenientes de la arqueología y de la historiografía reciente. Asimismo, se adopta un diseño narrativo de tópico orientado a articular los saberes técnicos, culturales y simbólicos que confluyen en la ciudadela. Finalmente, bajo un paradigma humanista e inductivo, se busca comprender de qué manera los incas integraron conocimientos empíricos, soluciones ingenieriles y cosmovisión andina en la edificación de Machu Picchu, ofreciendo claves para reflexionar sobre los vínculos entre pasado y presente en torno a la sostenibilidad y la resiliencia arquitectónica.

Historia y descubrimiento de Machu Picchu

La historia de Machu Picchu se remonta al apogeo del Tawantinsuyo y a la figura del Inca Pachacútec, quien, según Valcárcel (1984), habría impulsado la construcción de la ciudadela en la primera mitad del siglo XV. Tras la irrupción de los españoles en el

territorio andino, Machu Picchu fue progresivamente abandonada y absorbida por la vegetación, hecho que permitió su preservación casi intacta al no haber sido saqueada ni destruida de manera sistemática durante la colonia.

El redescubrimiento moderno de Machu Picchu ocurrió en 1911, cuando el explorador estadounidense Hiram Bingham, acompañado de pobladores locales, accedió a las ruinas y las dio a conocer internacionalmente. Si bien las comunidades campesinas de la zona ya conocían el lugar, las publicaciones de Bingham y, en particular, la difusión de sus fotografías y relatos en *National Geographic* en 1913, consolidaron la imagen de Machu Picchu como la “ciudad perdida de los incas” (Bingham, 2002). Este episodio marcó un hito en la proyección mundial del sitio, aunque también generó tensiones en torno a la narrativa del “descubrimiento”, que invisibilizó el rol de los habitantes locales en la preservación del conocimiento sobre la ciudadela.

La extracción de piezas arqueológicas realizada por la expedición de Yale entre 1911 y 1915 añadió un componente de controversia. Miles de objetos fueron trasladados a Estados Unidos bajo acuerdos temporales de préstamo que no siempre se cumplieron, lo que derivó en reclamos diplomáticos y en un prolongado proceso de restitución que culminó en gran parte recién en el siglo XXI (MacQuarrie, 2007; Abarca, 2025). Este hecho evidencia que la historia de Machu Picchu está atravesada por disputas entre la memoria local, la investigación académica y los intereses internacionales.

La declaración de Machu Picchu como Patrimonio Mundial por la UNESCO en 1983 consolidó su valor universal y situó el debate en torno a la conservación del sitio frente al turismo masivo y los riesgos de degradación ambiental (UNESCO, 1983). Así, la historia y el descubrimiento de Machu Picchu no solo remiten a su origen incaico, sino también a los procesos de reapropiación, disputa y resignificación cultural que han acompañado su trayectoria reciente.

Ingeniería arquitectónica en piedra

Los incas desarrollaron una técnica de cantería única, conocida como sillar poligonal, en la que las piedras eran talladas con precisión hasta encajar perfectamente sin necesidad de argamasa (Protzen, 1993). Esta maestría en la manipulación de la piedra se evidencia en los muros de Machu Picchu, donde bloques de granito de diferentes formas y tamaños se entrelazan con una exactitud que asombra a la ingeniería actual. Este método garantizaba estabilidad estructural y confería una notable resistencia antisísmica, adaptándose a un territorio marcado por constantes movimientos telúricos.

El principio constructivo consistía en dotar de cierta flexibilidad a los muros: en lugar de rígidos, los bloques podían absorber y disipar la energía sísmica gracias al encaje irregular de las piedras. Este sistema respondía a una necesidad estructural y, al mismo tiempo, evidenciaba un conocimiento empírico acumulado sobre el comportamiento del terreno y los riesgos propios de una geografía sísmica. De esta manera, mientras muchas edificaciones coloniales colapsaron durante terremotos históricos en los Andes, las construcciones incas, incluyendo Machu Picchu, se mantuvieron en pie (Gasparini & Margolies, 1980; Burger et al., 2021).

El traslado y talla de piedras de varias toneladas, sin animales de carga ni herramientas metálicas avanzadas, plantea interrogantes sobre los conocimientos logísticos y tecnológicos de los incas. Este desafío implicaba no solo mover grandes bloques, sino también coordinar a comunidades enteras bajo un sistema de trabajo colectivo —el ayni y la mita— que transformaba la fuerza social en capacidad técnica. Hyslop (1990), señala que se emplearon rampas, rodillos y cuerdas, en un proceso que combinaba fuerza humana organizada con un profundo entendimiento del material pétreo y de las condiciones del entorno.

Otro aspecto relevante es el valor simbólico de la piedra en la cosmovisión andina. Más que un simple recurso material, era

entendida como un elemento sagrado vinculado a la pachamama y a las montañas tutelares o apus. En este sentido, la cantería inca debe comprenderse como una técnica sofisticada y, al mismo tiempo, como una expresión cultural en la que lo arquitectónico se entrelaza con lo espiritual (Dean, 2010; Ziółkowski et al., 2021; Masini et al., 2022).

Sistemas hidráulicos y agrícolas

La ciudadela de Machu Picchu disponía de una compleja red de fuentes, canales y acueductos que aprovechaban la gravedad y el caudal de los manantiales naturales de la montaña. Este sistema hidráulico, diseñado con gran precisión, aseguraba el suministro constante de agua potable tanto para el uso doméstico como para las actividades ceremoniales (Wright & Valencia, 2000). La planificación no respondía únicamente a un cálculo técnico, sino a una concepción integral que articulaba lo práctico con lo simbólico: los canales, tallados en piedra y distribuidos jerárquicamente, evocaban la importancia sagrada del agua dentro de la cosmovisión andina, donde este elemento era representación de fertilidad, purificación y continuidad de la vida (Dean, 2010).

La ingeniería hidráulica de Machu Picchu también revela un conocimiento avanzado de la hidrología y el manejo de suelos. Diversos estudios (Ortloff, 2009; Masini et al., 2023), han demostrado que los incas diseñaron drenajes subterráneos y canales de desagüe que evitaban inundaciones en temporada de lluvias, garantizando la estabilidad de las estructuras y de los andenes agrícolas. Esta red de infraestructuras demuestra que los incas se adaptaron al medio y lo transformaron de manera respetuosa, integrando las dinámicas de la naturaleza en sus diseños. Surge aquí una pregunta crítica: ¿hasta qué punto estos sistemas pueden inspirar soluciones sostenibles para ciudades contemporáneas que enfrentan problemas de abastecimiento y gestión de aguas en contextos de crisis climática y expansión urbana descontrolada?

En estrecha relación con este manejo hídrico, el ámbito agrícola constituye otra expresión notable de la ingeniería ecológica inca. Los andenes o terrazas, concebidos como prolongación de la misma lógica de adaptación al entorno, ampliaban la superficie cultivable en terrenos empinados, mejoraban el drenaje, reducían la erosión y regulaban la humedad del suelo, generando microclimas que favorecían la diversificación de cultivos. De este modo, la producción agrícola pudo sostenerse en condiciones extremas, asegurando la autosuficiencia de la población asentada en Machu Picchu y fortaleciendo la resiliencia comunitaria frente a variaciones climáticas.

El modelo agrícola de los incas plantea interrogantes actuales: ¿qué enseñanzas ofrece este sistema frente a los desafíos globales de la agricultura sostenible? En un mundo marcado por la escasez hídrica, la degradación ambiental y el cambio climático, los andenes constituyen un ejemplo de manejo integrado del paisaje que combina productividad, conservación y equilibrio ecosistémico, aportando claves para pensar una agricultura regenerativa orientada a la seguridad alimentaria (Ortloff, 2009).

En suma, los sistemas hidráulicos y agrícolas de Machu Picchu reflejan un conocimiento técnico que entrelazaba utilidad, estética y espiritualidad. Su vigencia trasciende el pasado: representan un legado vivo que interpela a la ingeniería, la agronomía y las políticas ambientales actuales, desafiando a repensar modelos de desarrollo que no enfrenten a la naturaleza como obstáculo, sino que dialoguen con ella en clave de sostenibilidad y resiliencia.

Planificación urbana y cosmovisión andina

La distribución de los espacios en Machu Picchu no era aleatoria ni simplemente funcional. Niles (1999) y Masini et al. (2023), argumentan que los sectores residenciales, agrícolas y ceremoniales respondían a un principio de orden simbólico vinculado a la cosmovisión inca, en la cual la ciudad debía reflejar la armonía del

cosmos y el equilibrio entre lo humano, lo natural y lo divino. De este modo, la planificación urbana integraba geografía, astronomía y religiosidad, configurando un espacio que era, al mismo tiempo, material y espiritual, capaz de articular la vida cotidiana con las prácticas rituales y el poder político.

Uno de los ejemplos más claros de esta relación es el Intihuatana, conocido como “piedra sagrada” o “reloj solar”, cuya ubicación revela un dominio avanzado de la observación astronómica. Este monumento no solo permitía marcar solsticios y equinoccios, sino también legitimar la autoridad del Inca al vincular su figura con el ciclo solar y el orden cósmico. Así, el calendario agrícola y ceremonial quedaba articulado con el poder político, reforzando la unidad entre los aspectos natural, divino y social. La disposición de templos, plazas y residencias confirma que Machu Picchu fue concebida como un centro de poder político-religioso, diseñado para reforzar la hegemonía inca y proyectar la imagen de un imperio sostenido en un orden trascendente (Burger & Salazar, 2004; Ziolkowski et al., 2021; Abarca, 2025).

La integración de la ciudad con el paisaje circundante es igualmente significativa. El emplazamiento de Machu Picchu no fue casual: se construyó en un punto estratégico de la red vial del Qhapaq Ñan, rodeado por montañas consideradas apus o deidades tutelares, lo que subraya el carácter simbólico de la ubicación (Reinhard, 2007; Masini et al., 2022). La arquitectura se fundía con el relieve natural, generando un diálogo constante entre la obra humana y el entorno, donde cada muro, terraza o plaza adquiría sentido en relación con el paisaje sagrado. Esta concepción invita a pensar en un urbanismo que no fragmenta el territorio, sino que lo integra en un tejido de significados colectivos.

Este enfoque lleva a plantear la siguiente interrogante: ¿hasta qué punto la ingeniería actual ha perdido el vínculo espiritual y simbólico en la construcción del espacio humano, privilegiando la eficiencia técnica y la maximización del suelo urbano por sobre la integración

cultural y ambiental? Mientras el urbanismo contemporáneo tiende a reproducir lógicas de explotación y fragmentación, Machu Picchu ofrece un ejemplo de planificación que situaba a la naturaleza y a lo sagrado en el centro de la organización espacial.

La planificación urbana de Machu Picchu, entonces, revela una visión holística de la arquitectura. No se trataba únicamente de diseñar una ciudad habitable, sino de construir un microcosmos en el que se expresara la relación entre sociedad, naturaleza y divinidad. Esta concepción constituye una invitación a cuestionar las prácticas arquitectónicas y urbanísticas recientes, con el propósito de recuperar un sentido más integral que supere la lógica estrictamente utilitaria y dialogue con las dimensiones simbólicas, espirituales y ambientales de los territorios.

Conclusión

La construcción de Machu Picchu demuestra que la ingeniería inca combinó precisión técnica, adaptación ambiental y sentido espiritual. La ciudadela constituye la evidencia de que el conocimiento ancestral podía articularse con la naturaleza en lugar de someterla, generando un modelo de armonía entre lo humano y el entorno. Su planificación revela que las ciudades pueden responder simultáneamente a criterios funcionales, simbólicos y culturales, integrando lo material con lo espiritual y lo político con lo natural.

El análisis de su historia, la arquitectura en piedra, los sistemas hidráulicos y agrícolas, y la planificación urbana vinculada a la cosmovisión andina permite concluir que Machu Picchu fue mucho más que un asentamiento. Representó un microcosmos político, social y religioso, en el que la técnica se subordinaba a un proyecto comunitario y a una concepción de vida en equilibrio con la tierra. Esta visión contrasta con los modelos urbanos actuales, muchas veces orientados al crecimiento ilimitado, al consumo de recursos y a la fragmentación social.

A más de cinco siglos de su construcción, Machu Picchu constituye un patrimonio cultural de la humanidad y un modelo de sostenibilidad y resiliencia frente a los desafíos urbanísticos contemporáneos. Sus lecciones resultan pertinentes para la ingeniería en desarrollo, que enfrenta la urgencia de diseñar ciudades más seguras, inclusivas y respetuosas con el medio ambiente en el contexto del cambio climático y la crisis ecológica global. El legado inca interpela a replantear la relación entre técnica y naturaleza, mostrando que la innovación puede surgir de la observación empírica, la espiritualidad y el compromiso comunitario.

De cara al futuro, se abren diversas líneas de investigación. Por un lado, resulta clave profundizar en estudios interdisciplinarios que vinculen arqueología, ingeniería, arquitectura y ciencias ambientales, con el fin de comprender cómo los saberes andinos pueden inspirar soluciones para la gestión del agua, la agricultura sostenible y la construcción antisísmica. Asimismo, es necesario explorar de manera comparativa cómo otras culturas ancestrales enfrentaron entornos extremos, generando un diálogo global entre conocimientos tradicionales y tecnologías de vanguardia. Finalmente, se vuelve urgente indagar en cómo las comunidades actuales pueden recuperar, resignificar y aplicar estos saberes en proyectos de desarrollo territorial, educación patrimonial y sostenibilidad urbana, de modo que Machu Picchu no sea solo una memoria del pasado, sino una fuente viva de aprendizaje para un futuro más equilibrado y justo.

Referencias

- Abarca, A. (2025). Geotechnics in the preservation of Machu Picchu, Cusco, Peru. *Built Heritage*, 9(1), 33. <https://doi.org/10.1186/s43238-025-00192-1>
- Bingham, H. (2002). *Lost city of the Incas*. Phoenix Press.
- Burger, R., & Salazar, L. (2004). *Machu Picchu: Unveiling the mystery of the Incas*. Yale University Press.
- Burger, R., Salazar, L., Nesbitt, J., Washburn, E., & Fehren, L. (2021). New AMS dates for Machu Picchu: Results and implications. *Antiquity*, 95(383), 1265-1279. <https://doi.org/10.15184/aqy.2021.99>
- Dean, C. (2010). *A culture of stone: Inka perspectives on rock*. Duke University Press.
- Gasparini, G., & Margolies, L. (1980). *Inca architecture*. Indiana University Press.
- Hyslop, J. (1990). *Inka settlement planning*. University of Texas Press.
- MacQuarrie, K. (2007). *The last days of the Incas*. Simon & Schuster.
- Masini, N., Abate, N., Scavone, M., & Lasaponara, R. (2022). Machu Picchu in context: The Inca building culture. In *Machu Picchu in context: Interdisciplinary approaches to the study of human past* (pp. 135-165). Springer International Publishing.
- Masini, N., Romano, G., Sieczkowska, D., Capozzoli, L., Spizzichino, D., Gabellone, F., & Lasaponara, R. (2023). Non invasive subsurface imaging to investigate the site evolution of Machu Picchu. *Scientific Reports*, 13(1), 16035. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43361-x>
- Niles, S., (1999). *The shape of Inca history: Narrative and architecture in an Andean empire*. University of Iowa Press.
- Ortloff, C., (2009). *Water engineering in the ancient world: Archaeological and climate perspectives on societies of ancient South America, Mesoamerica, the Middle East, and South-East Asia*. Oxford University Press.
- Protzen, J., (1993). *Inca architecture and construction at Ollantaytambo*. Oxford University Press.

- Reinhard, J. (2007). *Machu Picchu: Exploring an ancient sacred center*. Cotsen Institute of Archaeology Press at UCLA.
- UNESCO. (1983). Historic Sanctuary of Machu Picchu. World Heritage List. <https://whc.unesco.org/en/list/274>
- Valcárcel, L., (1984). *Macchu Pichu: El más famoso monumento arqueológico del Perú*. Eudeba.
- Wright, K., & Valencia, A. (2000). *Machu Picchu: A civil engineering marvel*. American Society of Civil Engineers.
- Ziółkowski, M., Abuhadba, J., Hogg, A., Sieczkowska, D., Rakowski, A., Pawlyta, J., & Manning, S. (2021). When did the Incas build Machu Picchu and its satellite sites? New approaches based on radiocarbon dating. *Radiocarbon*, 63(4), 1133-1148. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.79>
- Ziółkowski, M., Pawlyta, J., Sieczkowska, D., & Rakowski, A. (2022). Machu Picchu in the context of the expansion of the Inca State: Between historical and radiocarbon chronologies. In *Machu Picchu in context: Interdisciplinary approaches to the study of human past* (pp. 59-133). Springer International Publishing.

Machu Picchu and Inca engineering: Ancestral knowledge of sustainability and resilience

Machu Picchu e a Engenharia Inca: Saberes Ancestrais de Sustentabilidade e Resiliência

Humberto Andrés Álvarez Sepúlveda

Universidad Católica de la Santísima Concepción | Concepción | Chile

<https://orcid.org/0000-0001-5729-3404>

halvarez@ucsc.cl

Académico de la Universidad Católica de la Santísima Concepción (Chile). Doctor en Sociedad y Cultura por la Universidad de Barcelona (España). Autor de diversos capítulos de libros y artículos sobre educación histórica publicados en revistas científicas indexadas a Wos, Scopus y Scielo.

Claudine Glenda Benoit Ríos

Universidad Católica de la Santísima Concepción | Concepción | Chile

<https://orcid.org/0000-0002-1791-2212>

cbenoit@ucsc.cl

Académica del Departamento de Didáctica de la Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción (Chile). Doctora en Lingüística, por la Universidad de Concepción. Investigadora en didáctica de la comprensión y producción del lenguaje, y estrategias colaborativas durante el procesamiento.

Abstract

This chapter presents a critical analysis of the construction of Machu Picchu as an expression of the engineering knowledge developed by the Incas. It addresses four fundamental dimensions: the history and discovery of the citadel; architectural engineering in stone, noted for its sophisticated seismic resistance; the hydraulic and agricultural systems that ensured sustainability in a challenging geographical environment; and urban planning conceived as a replica of the cosmos and a space of political and religious power. The essay is based on a scoping review of specialized literature, using a qualitative, humanistic, and interpretive approach, with a topical narrative design. It argues that Machu Picchu should not be understood solely as archaeological heritage, but also as a model of resilience and sustainability that prevails in the face of contemporary construction challenges. In conclusion, recovering and projecting ancestral Inca knowledge is essential for rethinking the relationship between engineering, nature, and society in the present.

Keywords: Machu Picchu; Inca engineering; Andean architecture; Ancestral knowledge; Cultural heritage.

Resumo

Este capítulo apresenta uma análise crítica da construção de Machu Picchu como expressão do conhecimento de engenharia desenvolvido pelos incas. Para isso, aborda quatro dimensões fundamentais: a história e a descoberta da cidadela; a engenharia arquitetônica em pedra, destacada por sua sofisticada resistência antissísmica; os sistemas hidráulicos e agrícolas que garantiram a sustentabilidade em um ambiente geográfico desafiador; e o planejamento urbano concebido como uma réplica do cosmos e espaço de poder político-religioso. O ensaio se sustenta em uma revisão de escopo de literatura especializada, sob uma abordagem qualitativa, humanista e interpretativa, com um delineamento narrativo de tópico. Sustenta-se que Machu Picchu não deve ser entendida apenas como

patrimônio arqueológico, mas também como um modelo de resiliência e sustentabilidade vigente perante os desafios construtivos contemporâneos. Em conclusão, recuperar e projetar os saberes ancestrais incas é imprescindível para repensar, no presente, a relação entre engenharia, natureza e sociedade.

Palavras-chave: Machu Picchu; Engenharia Inca; Arquitetura Andina; Conhecimento Ancestral; Patrimônio Cultural.

Capítulo 3

Beneficios y desafíos de Lean Six Sigma: evidencia basada en una revisión de alcance

Kenji Alberto Chung Sanchez, Eylin Abril Castro Fuentes, Nicole Brenda Huaman Quiroz, Melanie Yunnete Baldeón Montalvo, Elmer Hugo Bardales Suárez, Mario Humberto Acevedo Pando

Resumen

En la búsqueda de mayor eficiencia y calidad en los procesos industriales y de servicios, la metodología Lean Six Sigma (LSS) se destaca como una estrategia ampliamente estudiada. Este capítulo presenta una revisión de alcance sobre la implementación de LSS, enfocándose en la literatura científica publicada entre 2020 y 2024 en bases de datos indexadas como SCOPUS y SCIELO. Se describe el procedimiento sistemático de búsqueda, selección y análisis de artículos, así como la organización de la información en categorías temáticas relacionadas con eficiencia operativa, calidad, sostenibilidad y aplicación sectorial. Además, se aborda el marco conceptual de LSS, incluyendo herramientas y enfoques como DMAIC y diagramas de flujo, proporcionando un panorama estructurado de cómo se ha estudiado la implementación de esta metodología en distintos sectores. El capítulo ofrece al lector un vistazo general basado en evidencia sobre los tipos de beneficios y desafíos que se reportan en la literatura científica respecto a la adopción de LSS.

Palabras clave:
Industria;
Servicios;
Gestión;
Optimización.

Introducción

El Lean Six Sigma (LSS) es una metodología esencial para mejorar la eficiencia y la calidad en el sector industrial, ya que permite eliminar ineficiencias, reducir costos y aumentar la competitividad de las organizaciones (Martínez y Morales, 2022). Por lo que su estudio en el ámbito de la ingeniería tiene relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en específico con la ODS 9, el cual se centra en industria, innovación e infraestructura. En este sentido, se destaca el potencial del LSS para impulsar un crecimiento sostenible y alineado con las demandas actuales del mercado (Naciones Unidas, 2023).

A nivel internacional, diversos estudios han demostrado la eficacia del LSS. Por ejemplo, Akbar et al. (2024), señalan que esta metodología puede incrementar la productividad en un 60.62% en empresas del sector manufacturero. Casos emblemáticos como los de Boeing, General Electric y Nike respaldan esta afirmación, ya que estas empresas han logrado mejoras significativas en su productividad y eficiencia operativa gracias a la implementación del LSS, consolidando su reputación como una herramienta de gestión efectiva a nivel global (Fastercapital, 2025). En el contexto peruano, la aplicación del LSS también ha mostrado resultados alentadores. Según Fernandez y Sandoval (2023), una empresa ladrillera reportó un aumento del 19.31% en su productividad tras la implementación de esta metodología, lo que evidencia su adaptabilidad y efectividad en diferentes entornos industriales.

El éxito del LSS radica en su enfoque estructurado y sistemático para la optimización de procesos, el cual se desarrolla a través de las fases DMAIC: definir, medir, analizar, mejorar y controlar (Niemann et al., 2024). Estas etapas permiten identificar problemas, medir su impacto, analizar sus causas, implementar mejoras y establecer controles para garantizar la sostenibilidad de los resultados (Socconini, 2020). Entre las herramientas más utilizadas dentro de esta metodología destacan los diagramas de Ishikawa, que ayudan

a identificar las causas raíz de los problemas; los diagramas de Pareto, que priorizan las áreas de mejora; los gráficos de control, que monitorean el desempeño de los procesos; y los mapas de flujo de valor, que visualizan y optimizan las cadenas de producción (Socconini, 2021).

La presente investigación se orienta a responder la siguiente pregunta central: ¿Qué beneficios y desafíos se reportan en la literatura científica acerca de la implementación de Lean Six Sigma en diversos sectores industriales y de servicios? Si bien existe un cuerpo creciente de estudios que respalda la efectividad del LSS en la mejora de procesos, aún persisten vacíos respecto a la sistematización de sus logros en diferentes contextos y a la identificación de los factores que limitan su aplicación sostenible. En este sentido, los objetivos de este estudio buscan identificar beneficios, desafíos y metodologías clave, con el propósito de ofrecer una comprensión más amplia y fundamentada acerca de cómo el LSS puede ser implementado de manera efectiva en diversos entornos industriales y de servicios, contribuyendo así al fortalecimiento de la competitividad y la sostenibilidad organizacional (Paredes, 2022).

Asimismo, esta investigación se justifica en el plano teórico al apoyarse en fuentes recientes y pertinentes, lo que contribuye a consolidar y actualizar el conocimiento existente sobre Lean Six Sigma (Niño y Mendoza, 2021). De manera complementaria, busca atender vacíos de investigación vinculados a la aplicación del LSS en sectores específicos, proponiendo recomendaciones basadas en evidencia (Olave et al., 2014). De esta forma, el estudio no solo enriquece el debate académico, sino que también ofrece aportes prácticos para las organizaciones interesadas en fortalecer su eficiencia y competitividad mediante la implementación de esta metodología.

Metodología

Para el desarrollo de la presente investigación se adoptó el enfoque metodológico de revisión de alcance propuesto por Arksey y O'Malley (2005), reconocido por su solidez y utilidad en la organización, sistematización y análisis integral de la literatura científica disponible sobre una temática específica. Este enfoque resulta especialmente pertinente, ya que permite mapear los principales hallazgos, identificar vacíos de conocimiento y establecer líneas de investigación futuras.

A continuación, se detallan las 5 etapas que estructuraron el proceso metodológico de esta revisión de alcance:

En la primera etapa se identificó la pregunta de investigación ¿Qué beneficios y desafíos se reportan en la literatura científica acerca de la implementación de Lean Six Sigma en diversos sectores industriales y de servicios?, luego de ello en la segunda etapa se identificó los estudios más relevantes, para ello el 28/02/2025 se analizó críticamente estudios recientes publicados entre 2020 y 2024. Para ello, se utilizaron las bases de datos SCOPUS y SCIELO ya que la combinación de estas dos bases de datos permitió obtener una perspectiva global y regional, asegurando un análisis integral y equilibrado de los estudios más recientes sobre la aplicación de la metodología LSS en el sector industrial.

Por consiguiente, para la búsqueda de los artículos científicos, se utilizaron las siguientes palabras clave: “Lean Six Sigma” and “Industries”, “Lean Six Sigma” and “Continuous improvement”, y “Lean Six Sigma” and “Productivity”. Estas palabras clave fueron descritas entre comillas y en inglés para garantizar una búsqueda precisa y enfocada en los artículos más relevantes. Se consideró “Lean Six Sigma” como el eje central de la revisión de literatura, dado su impacto en la mejora de procesos y su aplicación en diversos sectores industriales. Inicialmente, se obtuvieron 401 artículos científicos entre las dos bases de datos consultadas.

Posteriormente, en la tercera etapa se realizó la selección de los estudios, y para ello se aplicaron los criterios de inclusión y exclusión necesarios, lo que permitió filtrar y seleccionar aquellos artículos de mayor relevancia y pertinencia para el estudio. Estos criterios se detallan en la Tabla 1, donde se especifican los parámetros utilizados para la selección, como el año de publicación, el idioma, el ámbito de aplicación y la calidad metodológica. Este proceso fue fundamental para asegurar la calidad y el enfoque de la investigación.

Tabla 1. Criterios de inclusión y exclusión para la selección de artículos.

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
CI 1: La investigación debería incluir el uso de la metodología Lean Six Sigma en el sector industrial.	CE 1: Artículos que no sean de SCOPUS y SCIELO.
CI 2: Se debe buscar estudios que incluyan las herramientas que se aplican en la metodología LSS para mejorar el sector industrial.	CE 2: Estudios que sean cualitativos.
CI 3: Los estudios deben tener datos sobre la aplicación de Lean Six Sigma en el sector industrial proveniente de la base de datos indexadas.	CE 3: Publicaciones de artículos que no cumplan con la aplicación práctica.
CI 4: Publicaciones acerca del tema de los últimos cinco años 2020 – 2024.	CE 4: Publicaciones que no sean Open Access.

Fuente: elaboración propia

Además, se elaboró la Tabla 2 con el fin de presentar un informe cuantitativo detallado de los artículos revisados. En esta tabla se organizó la información recopilada, incluyendo datos como el número de artículos por base de datos, la distribución temática y la frecuencia de las palabras clave utilizadas. Este enfoque metodológico

permitió estructurar la revisión de manera sistemática y garantizar la rigurosidad en la selección de las fuentes, facilitando el análisis y la interpretación de los resultados.

Tabla 2. Cantidad de artículos encontrados según base de datos y palabras clave

Base de dato	Palabras clave de búsqueda	Años				
		2020	2021	2022	2023	2024
SCO-PUS	“Lean Six Sigma” and “Industries”	45	36	42	75	26
	“Lean Six Sigma” and “Continuous improvement”	15	15	20	31	5
	“Lean Six Sigma” and “Productivity”	15	15	28	20	5
SCIE-LO	“Lean Six Sigma” and “Continuous improvement”	0	0	2	2	0
	“Lean Six Sigma” and “Productivity”	0	0	1	2	1
Total por año		75	66	93	130	37

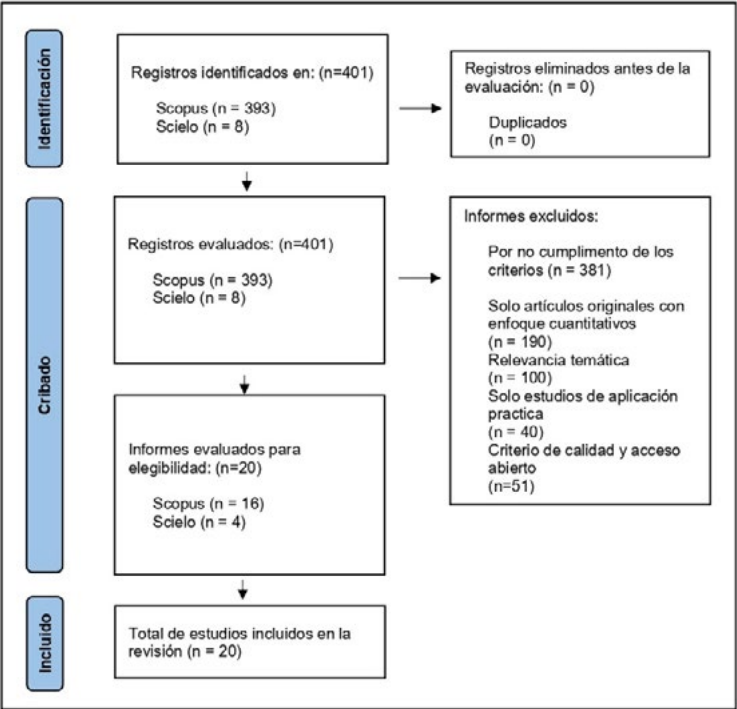
Fuente: elaboración propia

De este modo, se siguieron los parámetros de la metodología PRISMA con la finalidad de establecer los filtros según los criterios predefinidos, con el objetivo de reducir la cantidad de información y seleccionar únicamente aquellos artículos que estuvieran directamente relacionados con el tema de investigación (Page et al., 2021).

Como se muestra en la Figura 1, el proceso de selección inició con la exclusión de 190 referencias según el tipo de artículo, reteniéndose únicamente estudios cuantitativos (211). En la segunda etapa, la revisión de resúmenes permitió descartar 100 artículos por falta de relevancia temática, quedando 111. Posteriormente, el análisis del texto completo, enfocado en la aplicación práctica, redujo el conjunto a 71, de los cuales se eliminaron 51 adicionales por no cumplir con los criterios de calidad y enfoque establecidos.

El resultado final fue la selección de 20 artículos recientes que abordan de manera directa la aplicación de Lean Six Sigma en distintos sectores industriales, constituyendo la base de esta revisión de literatura y garantizando la pertinencia, validez y confiabilidad de los hallazgos.

Figura 1. Diagrama de Flujo PRISMA



Fuente: elaboración propia

En la cuarta etapa, con el propósito de sistematizar los hallazgos más relevantes de cada estudio incluido, se elaboró la Tabla 3, en la que se organizaron los 20 artículos científicos seleccionados. Dicha tabla fue segmentada en diversas categorías que facilitan el análisis comparativo, incluyendo: título del artículo, autor(es), año

de publicación, objetivo principal, diseño metodológico, enfoque de investigación, factores relevantes identificados, conclusiones destacadas, país de origen y fuente o base de datos consultada.

Tabla 3. Artículos seleccionados

Autor	Año	Objetivo	Factores relevantes	Conclusión	País	Base de dato
Faishal et al.	2024	Analizar el problema de la creciente demanda de residuos de briquetas en la empresa BriqCo.	DMAIC, Diagrama SIPOC, Mapeo de flujo de valor, Ishikawa, 5S y procedimientos estandarizados (SOP).	Se demostró que la problemática de la creciente demanda fue debido a los desperdicios generados en la fabricación de briquetas, que estaba en un 50.00% y paso a 32.87%, lo que representa una reducción del 32.87%.	Mala-sia	SCO-PUS
Bella et al.	2024	Reducir el desperdicio en el proceso de producción de alimentos	Se empleo el enfoque DMAIC y las herramientas como Ishikawa, mapeo de flujo de valor, Poka Yoke y Control estadístico de procesos, para la identificación de áreas de mejora.	Lograron reducir los desperdicios del 68.00% al 35.65%, lo que representa una mejora del 48.00%, mejorando así la calidad de los productos, aumentando la satisfacción del cliente y las ganancias de la empresa.	Indo-nesia	SCO-PUS
Marín-Calderón et al.	2023	Reducir los desperdicios en la fabricación de paneles modulares.	Se desarrollo el enfoque DMAIC y herramientas como Ishikawa, Pareto en relación con LSS para determinar las causas.	Se logró la reducción de desperdicios en la fabricación de paneles de 26,09% a 12,72% lo que representa una reducción del 51.00% demostrando que dicha metodología es eficaz y se puede emplear de manera eficiente.	Perú	SCIELO

Autor	Año	Objetivo	Factores relevantes	Conclusión	País	Base de dato
Ortiz et al.	2023	Reducir el desperdicio de materia prima en una fábrica de néctar	DMAIC, Environ-metal Value Stream Mapping, Poka Yoke y Desing of expriments.	La aplicación de la metodología Lean Six Sigma demostró ser efectiva para reducir los desperdicios de materia prima de 7,05% a 4,81% lo que representa una reducción del 32.00% impactando positivamente su productividad.	Perú	SCOPUS
Enache et al.	2023	Reducir la tasa de desperdicio del proceso de doblado de puerta metálica	DMAIC, Ishikawa, Mapeo de flujo de valor y Poka Yoke.	La aplicación de LSS evidencio ser eficaz para la reducción de la tasa de desperdicio de 90% a 2,96% lo que representa una reducción del 97.00% dicho proceso, generando producción de alta calidad.	Rumania	SCOPUS
Teiler et al.	2021	Reducir los errores de stocks mediante LLS	DMAIC, grafico de evolución, análisis de errores y control estadístico.	La implementación de LSS en el Servicio de Farmacia Hospitalaria (SFH) redujo los errores de stocks de 0,135 errores a 0,033 errores lo que representa una reducción del 76.00%, demostrando ser una herramienta útil y de alto impacto.	Argentina	SCIELO
Kadir et al.	2024	Incrementar la confiabilidad operativa	Se empleo DMADV, Ishikawa, validación y hojas de verificación para identificar áreas de mejora.	La confiabilidad operativa aumentó del 25.00% al 37.80%, lo que representa una mejora del 51.00%.	Indonesia	SCOPUS

Autor	Año	Objetivo	Factores relevantes	Conclusión	País	Base de dato
Quiroz et al.	2023	Reducir el número de ladrillos defectuosos.	Poka Yoke, Ishikawa, Mapeo de flujo de valor y Pareto.	La implementación de Lean Six Sigma demostró ser eficaz en la reducción de ladrillos defectuosos de 14,23% a 7,31% lo que representa una reducción del 49.00%.	Perú	SCIELO
Waiman et al.	2023	Reducir el tiempo de espera ambulatoria	DMAIC y Rediseño de procesos.	La aplicación de la metodología LSS demostró ser eficaz en la reducción de tiempo de espera ambulatoria de 97% a 5,2% lo que representa una reducción del 95.00% al implementar estrategias para optimizar la calidad del servicio.	Indonesia	SCOPUS
Scala y Improta	2024	Reducción de la duración de la estancia postoperatoria	Se empleo DMAIC, y herramientas de Estadística descriptiva, Ishikawa, Mapeo de procesos y Control estadístico de procesos.	Como conclusión la aplicación de LSS evidencio la reducción de la estancia postoperatoria de 6,67 días a 4,44 días lo que representa una reducción del 33.00%.	Italia	SCOPUS
Tlapa et al.	2022	Reducir los tiempos de las intervenciones medicas	Ishikawa y diagrama de flujo.	La aplicación de LSS evidencio resultados positivos ya que se redujeron los tiempos de 10.5 a 5.5 horas, lo que representa una mejora del 48.00%.	México	SCOPUS

Autor	Año	Objetivo	Factores relevantes	Conclusión	País	Base de dato
Trubetskaya et al.	2023	Reducir los costos crecientes en una fábrica de alimentos	DMAIC, Mapeo de flujo de valor y diagrama de proveedores SIPOC.	El estudio ha demostrado como estas metodologías pueden ser adaptadas para satisfacer las necesidades específicas en la industria, logrando, reducir los costos del 65.00% al 38.89%, lo que representa una reducción del 40.00%	Irlanda	SCOPUS
Pierce et al.	2023	Reducir los tiempos de espera de los pacientes mediante la metodología LSS.	DMAIC, Ishikawa, Pareto y Process Mapping	La aplicación de LSS se demostró una reducción en los tiempos de 17.6 días a 11.6 días lo que representa una reducción del 34.00%	Irlanda	SCOPUS
Syafri-maini	2021	Reducir los retrasos en proyectos de edificios	DMAIC, Ishikawa, mapa de flujo de valor, análisis de variación y Pareto.	La aplicación de LSS evidencio ser eficaz para reducir los retrasos en proyectos de edificios que paso de 12,51% a 2,91% lo que representa una reducción del 77.00%.	Indonesia	SCOPUS
Marsetiya y Abirfatin	2023	Proponer un marco para incrementar la sostenibilidad de fabricación basado en Lean Six Sigma.	DMAIC, además se implementaron indicadores de sostenibilidad como Delphi y SIPOC que reflejaron el desempeño en el proceso, Sustainable Value Stream Mapping y hojas de verificación.	La aplicación de la metodología LSS y la propuesta del marco demostró ser efectiva, logrando un aumento del 22.35% al 30.40%, lo que representa un incremento del 36.00%	Indonesia	SCOPUS

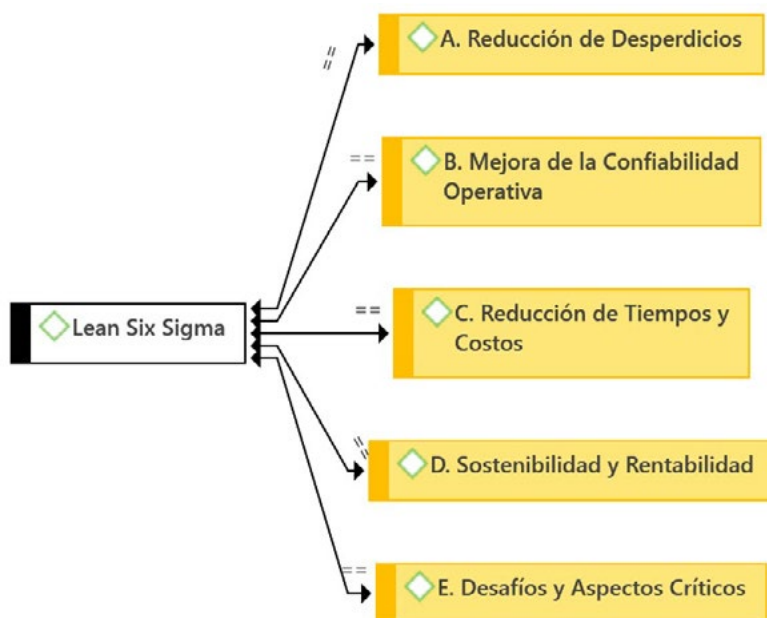
Autor	Año	Objetivo	Factores relevantes	Conclusión	País	Base de dato
Pezo et al.	2023	Incrementar la rentabilidad en la cadena de suministro	Se empleo 5S, Kaizen, DMAIC, Ishikawa, Mapeo de procesos.	La aplicación de la metodología LSS evidencio ser eficaz para incrementar la rentabilidad en la cadena de suministro de 75% a 95% lo que representa un incremento del 27%, además se logró identificar la dependencia de productos importados, lo que genero el desarrollo de estrategias para reducir y mitigar efectos adversos.	Perú	SCOPUS
Daniyan et al.	2022	Incrementar la eficiencia del proceso de ensamble de bogies mediante la implementación de LSS	DMAIC, KAIZEN, Pareto, Value stream Mapping.	Se demostró un incremento significativo en la eficiencia del ciclo del proceso de ensamble de 19,9% a 66,7% lo que representa un incremento del 70%, impactando en la mejora de la calidad del producto y aumentando la satisfacción al cliente.	Florida	SCOPUS
Candra et al.	2023	Incrementar el nivel de preparación de la industria de plástico.	LESIRE, DMAIC y herramientas como Pareto, Ishikawa y cuestionarios de evaluación.	Se evidencio que la metodología LSS logro evaluar el nivel de preparación de la industria del plástico, logrando aumentar del 34.55% al 40.65%, lo que representó una mejora significativa del 17.66%.	Indonesia	SCOPUS

Autor	Año	Objetivo	Factores relevantes	Conclusión	País	Base de dato
Nallusamy et al.	2023	Reducir los defectos en el proceso de soldadura.	DMAIC, Pareto, Ishikawa.	La aplicación de la metodología de LSS demostró ser eficaz ya que redujeron los defectos del 70.89% al 34.56%, lo que representa una reducción significativa del 51.25%.	India	SCOPUS
Quiroz et al.	2022	Incrementar el rendimiento del nivel de servicio en una PYME	Softwares estadísticos, Ishikawa, Pareto, DMAIC.	La implementación de Lean Six Sigma mostró resultados satisfactorios ya que se incrementó el rendimiento del nivel de servicio de 56,00% a 62,70% lo que representa un incremento del 12.00%.	Perú	SCIELO

Fuente: elaboración propia

Finalmente, en la quinta etapa, orientada a la recopilación, organización y síntesis de los resultados, los textos completos seleccionados fueron cargados en el software Atlas.ti. Esta herramienta permitió realizar un proceso sistemático de codificación, a través del cual se identificaron patrones y unidades de significado presentes en los artículos. Posteriormente, dichos códigos fueron organizados y agrupados, lo que facilitó la construcción de categorías de análisis más integrales. Como resultado de este procedimiento riguroso, emergieron cinco categorías principales que sintetizan los hallazgos y ofrecen una visión estructurada de los beneficios y desafíos asociados a la implementación del Lean Six Sigma en los distintos sectores analizados. Estas categorías constituyen la base para la discusión y la interpretación crítica de la evidencia recopilada, garantizando así la coherencia y solidez del análisis realizado.

Figura 2. Representación de la red semántica de las categorías emergentes, generada con ATLAS.ti versión 9.



Fuente: elaboración propia

Resultados

El análisis de 20 artículos científicos seleccionados de las bases de datos SCOPUS y SCIELO permitió identificar los principales logros alcanzados en la aplicación de Lean Six Sigma (LSS) en distintos sectores industriales. La revisión evidenció que LSS es una metodología clave para optimizar procesos, reducir desperdicios y mejorar la eficiencia operativa en ámbitos como la manufactura, los servicios, la salud y la logística. Entre los beneficios más destacados se encontraron la reducción de costos, el incremento de la eficiencia y la mejora en la calidad de productos y servicios, lo que posiciona a LSS como una herramienta robusta para la gestión de procesos y la mejora continua.

No obstante, también se identificaron desafíos recurrentes que limitaron su efectividad, entre ellos la resistencia al cambio, la falta de formación en herramientas LSS y la dificultad para sostener los resultados en el largo plazo. Estos obstáculos evidencian que la aplicación de LSS requiere no solo del uso de técnicas y herramientas, sino también de una cultura organizacional que fomente la capacitación constante y el compromiso de todos los niveles de la empresa. En los apartados siguientes se presentan los resultados más relevantes, organizados en función de los impactos observados: reducción de desperdicios, mejora de la confiabilidad operativa, disminución de tiempos y costos, sostenibilidad y rentabilidad, así como los principales desafíos de su implementación.

A. Reducción de desperdicios

Uno de los hallazgos más relevantes identificados en esta revisión es la notable capacidad de Lean Six Sigma (LSS) para reducir desperdicios y mejorar la eficiencia en procesos industriales. Por ejemplo, Faishal et al. (2024), evidenciaron que la aplicación de la metodología DMAIC, complementada con herramientas como el diagrama de Ishikawa, permitió disminuir en un 34% el nivel de desperdicio en la producción de briquetas, pasando del 50% al 32.78%.

De manera similar, Bella et al. (2024), reportaron una reducción del 48% en desperdicios en la industria alimentaria (del 68% al 35.65%), lo que no solo se tradujo en menores costos de producción, sino también en un incremento en la calidad del producto final, la satisfacción del cliente y la competitividad en el mercado. Herramientas como el análisis de causa raíz y la optimización de procesos fueron determinantes en estos resultados, demostrando la versatilidad del enfoque LSS.

Otros estudios también respaldan esta tendencia. Marín-Calderón et al. (2023), documentaron una reducción del 51% en

desperdicios durante la fabricación de paneles modulares (del 26.09% al 12.72%), mientras que Ortiz et al. (2023), lograron disminuir en un 32% la pérdida de materia prima en la producción de néctar (del 7.05% al 4.81%). En el sector metalmecánico, Enache et al. (2023), reportaron un descenso drástico en la tasa de desperdicio del proceso de doblado de puertas metálicas, reduciéndola en un 97% (del 90.00% al 2.96%). Finalmente, en el ámbito farmacéutico, Teiler et al. (2021), implementaron LSS para el control de inventarios, reduciendo los errores de 0.135 a 0.033, equivalente a una mejora del 76%, mediante el uso de gráficos de evolución y control estadístico de procesos.

En conjunto, estos resultados confirman la efectividad del LSS como una metodología robusta para optimizar procesos y minimizar desperdicios en diferentes sectores industriales. Sus aportes no se limitan a la eficiencia operativa, sino que también promueven la sostenibilidad ambiental al reducir el consumo de recursos y la generación de desechos. Asimismo, su impacto positivo en la calidad del producto y la satisfacción del cliente posiciona al LSS como una estrategia clave para consolidar la competitividad en un mercado global cada vez más exigente.

B. Mejora de la confiabilidad operativa

Un resultado clave de la implementación de Lean Six Sigma (LSS) es la mejora sustancial en la confiabilidad operativa, lo que se traduce en una mayor eficiencia y optimización de los procesos. Kadir et al. (2024), demostraron que la aplicación de la metodología DMAIC en una empresa pesquera permitió incrementar la eficiencia operativa en un 51% (del 25% al 37.8%). Este avance no solo impactó en los niveles de producción, sino que también favoreció una gestión más efectiva de los recursos, siendo determinante la integración de sistemas de monitoreo en tiempo real, los cuales facilitaron la detección temprana de fallas y la implementación de ajustes inmediatos en el proceso de adquisición de materiales y productos.

De manera complementaria, Quiroz et al. (2023), documentaron una reducción del 49% en los tiempos de inactividad en una empresa fabricante de ladrillos, lo que evidenció un incremento significativo en la confiabilidad de la producción. En el ámbito de los servicios, Waiman et al. (2023), aplicaron LSS en el sector salud, logrando una disminución del 95% en el tiempo de espera ambulatorio (del 97.0% al 5.2%), con efectos directos en la eficiencia operativa y en la satisfacción del usuario.

En conjunto, estos estudios muestran que LSS fortalece la confiabilidad operativa en contextos industriales y de servicios, al integrar herramientas de mejora continua con sistemas de monitoreo y control. Esta evidencia resalta no solo su efectividad para optimizar procesos, sino también su capacidad de adaptarse a diferentes sectores, ampliando su valor estratégico como metodología de gestión.

3. Reducción de tiempos y costos

La reducción de tiempos y costos constituye otro logro significativo atribuido a la implementación de Lean Six Sigma (LSS). En el ámbito hospitalario, Scala y Improta (2024), aplicaron LSS para disminuir la duración de la estancia postoperatoria en un 33%, pasando de 6.67 a 4.44 días. Esta optimización no solo incrementó la eficiencia operativa, sino que también redujo los costos asociados al cuidado de los pacientes y permitió un mejor aprovechamiento de los recursos hospitalarios, incrementando la disponibilidad de camas.

De forma complementaria, Tlapa et al. (2022), reportaron una reducción del 48% en los tiempos de intervención médica (de 10.5 a 5.5 horas), evidenciando la capacidad de LSS para agilizar procesos críticos en el sector salud. En el sector industrial, Trubetskaya et al. (2023), aplicaron LSS en una fábrica de alimentos, logrando disminuir los costos operativos del 65.00% al 38.89%, equivalente a un ahorro del 40%. En construcción, Syafrimaini (2021), abordó retrasos en

proyectos, reduciéndolos del 12.51% al 2.91%, lo que representa una mejora del 77%, mientras que Pierce et al. (2023), optimizaron los tiempos de espera ambulatoria de 17.6 a 11.6 días (34%), aumentando la capacidad de atención de las instituciones.

Estos casos evidencian la versatilidad de Lean Six Sigma para reducir tiempos y costos en diversos sectores, desde la salud hasta la manufactura y la construcción. Las mejoras no solo generan ahorros significativos, sino que también incrementan la capacidad de las organizaciones para atender mayor demanda, mejorando la calidad del servicio y fortaleciendo la competitividad en entornos complejos y exigentes.

4. Sostenibilidad y rentabilidad

La implementación de Lean Six Sigma (LSS) ha mostrado beneficios significativos tanto en sostenibilidad como en rentabilidad, según diversos estudios. Por ejemplo, Marsetiya y Abirfatin (2023), desarrollaron un marco innovador para mejorar la sostenibilidad en procesos de fabricación mediante LSS, logrando un incremento del 36% en la eficiencia del uso de recursos y energía. Este avance contribuye además a reducir el impacto ambiental, alineando las operaciones con prácticas más ecológicas y responsables.

De manera complementaria, Pezo et al. (2023), documentaron un aumento del 27% en la rentabilidad de la cadena de suministro farmacéutica, pasando del 75% al 95%, atribuible a la optimización de procesos de distribución y a una gestión más eficiente de inventarios. Esta mejora permitió mayor disponibilidad de productos y menores costos operativos, incrementando el margen de beneficio global. En otro ejemplo, Daniyan et al. (2022), incrementaron la eficiencia del ensamblaje de bogueas del 19.9% al 66.7%, lo que demuestra cómo LSS puede transformar procesos críticos, aumentar la eficiencia y reducir desperdicios, con un efecto directo tanto en sostenibilidad como en rentabilidad.

En conjunto, estos estudios evidencian que Lean Six Sigma no solo optimiza procesos y reduce costos, sino que también impulsa prácticas responsables con el medio ambiente, fortaleciendo la sostenibilidad y la competitividad de las organizaciones. Su aplicación se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y responde a las demandas de eficiencia y rentabilidad en el mercado actual.

5. Desafíos y aspectos críticos

A pesar de los resultados positivos reportados, la implementación de Lean Six Sigma (LSS) enfrenta desafíos significativos que pueden limitar su efectividad. Entre los principales obstáculos se encuentra la resistencia al cambio por parte de empleados y equipos de trabajo, identificada por Faishal et al. (2024) y Scala y Improta (2024). Este fenómeno se ve frecuentemente exacerbado por la falta de comunicación efectiva dentro de las organizaciones, generando desconfianza hacia nuevas metodologías (Kadir et al., 2024; Waiman et al., 2023). Además, la ausencia de compromiso y apoyo de la alta dirección constituye un factor crítico que afecta la priorización y los recursos asignados a los proyectos LSS (Ortiz et al., 2023; Candra et al., 2023).

Otro desafío relevante es la capacitación del personal. Bella et al. (2024) y Marín-Calderón et al. (2023), señalaron que la falta de habilidades en herramientas estadísticas y metodologías LSS dificulta la implementación efectiva. Teiler et al. (2021), destacaron que esta resistencia fue particularmente evidente entre el personal encargado de la gestión de inventarios, mientras que Quiroz et al. (2022), subrayaron la necesidad de formación específica para el análisis de datos y la generación de soluciones. Asimismo, Nallusamy et al. (2023), identificaron que un enfoque limitado en el control de calidad durante las fases iniciales representó un obstáculo que requirió atención para lograr resultados óptimos.

Estos hallazgos evidencian que la adopción exitosa de LSS requiere un enfoque estratégico que integre tanto aspectos técnicos como humanos y organizacionales. Superar barreras como la resistencia al cambio, la falta de comunicación, el compromiso insuficiente de la alta dirección y la capacitación limitada del personal es esencial para garantizar la efectividad y sostenibilidad de la metodología. Solo mediante una implementación integral, las organizaciones pueden alcanzar mejoras significativas en eficiencia, calidad y productividad, maximizando los beneficios de Lean Six Sigma.

Conclusiones

Los resultados de esta revisión de alcance confirman que Lean Six Sigma (LSS) es una metodología altamente efectiva para mejorar la eficiencia y la calidad en distintos sectores industriales y de servicios. La evidencia recopilada demuestra que LSS permite reducir desperdicios de manera significativa (hasta un 97% en algunos procesos), mejorar la confiabilidad operativa (incrementos superiores al 50%), optimizar tiempos y costos (ahorros de hasta 40% en producción o reducción de estancia hospitalaria en 33%), y fortalecer la sostenibilidad y rentabilidad de las operaciones (incrementos de eficiencia de hasta 70% y rentabilidad del 27%). Estos hallazgos resaltan la capacidad de LSS para integrar herramientas técnicas de mejora continua con un enfoque sistemático que potencia la competitividad organizacional y contribuye a prácticas más sostenibles, alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente el ODS 9.

Sin embargo, la implementación de LSS enfrenta desafíos significativos que limitan su efectividad. Entre ellos destacan la resistencia al cambio, la falta de comunicación interna, el escaso compromiso de la alta dirección y la capacitación insuficiente del personal en herramientas estadísticas y metodologías de mejora continua. Estas barreras evidencian que la adopción de LSS no

depende únicamente de la aplicación técnica de herramientas, sino que requiere un enfoque estratégico que considere aspectos humanos y organizacionales. Asimismo, la revisión identificó limitaciones en la literatura, como la escasa investigación en sectores específicos o en contextos regionales distintos, y la falta de estudios que integren indicadores de sostenibilidad, rentabilidad y desempeño operativo de manera simultánea.

En proyección, futuras investigaciones podrían explorar la adaptación de LSS a nuevos sectores y contextos, incluyendo pequeñas y medianas empresas (PYMES), industrias emergentes y servicios no tradicionales, evaluando su impacto en sostenibilidad, eficiencia y rentabilidad. Asimismo, resulta pertinente investigar estrategias para superar barreras organizacionales y potenciar la aceptación del personal, así como la integración de tecnologías digitales y análisis de datos avanzados para fortalecer la implementación de LSS. De esta manera, se podrían consolidar buenas prácticas, fomentar la innovación en la gestión de procesos y ampliar el alcance del impacto positivo de LSS en la competitividad y sostenibilidad de las organizaciones.

Referencias

- Akbar, A., Bhutto, F. N., Khan, D., Shaikh, I. K., Adnan, M., Kaka, S., & Wasan, R. K. (2024). Improving quality and efficiency: A Lean Six Sigma approach to problem solving in the sewing unit of a garments manufacturer based in Pakistan. *International Journal of Professional Business Review*, 19(2). <https://doi.org/10.59018/012421>
- Arksey, H., & O'Malley, L. (2005). Scoping studies: Towards a methodological framework. *International Journal of Social Research Methodology*, 8(1), 19-32. <https://doi.org/10.1080/1364557032000119616>
- Bella, I., Danusaputro, S., & Nurprihatin, F. (2024). The implementation of Lean Six Sigma approach to minimize waste at a food manufacturing industry. *Journal of Engineering Research*, 13(2), 611-626. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.01.022>
- Candra, F., Hartanti, L., Dewi, D., Mulyono, J., & Mulyana, I. (2023). Readiness assessment of Lean Six Sigma implementation in the manufacturing industry as a way to ensure sustainability. *E3S Web of Conferences*, 475. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447505001>
- Daniyan, I., Adeodu, A., Mpofu, K., Maladzhi, R., & Katumba, M. (2022). Application of Lean Six Sigma methodology using DMAIC approach for the improvement of bogie assembly process in the railcar industry. *Heliyon*, 8(3). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09043>
- Enache, I.-C., Chivu, O. R., Rugescu, A.-M., Ionita, E., & Radu, I. V. (2023). Reducing the scrap rate on a production process using Lean Six Sigma methodology. *Processes*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/pr11041295>
- Faishal, M., Mohamad, E., Mukti Asih, H., Rahman, A. A. A., Zul Ibrahim, A., & Adiyanto, O. (2024). The use of Lean Six Sigma to improve the quality of coconut shell briquette products. *Multidisciplinary Science Journal*, 6(1). <https://doi.org/10.31893/multiscience.2024005>
- FasterCapital. (2025). *Agilidad en la fabricación: Optimización de las operaciones con principios Lean*. <https://n9.cl/51zyef>
- Fernandez, J., & Sandoval, S. (2023). *Aplicación de herramientas de Lean Six Sigma para mejorar la productividad de una empresa ladrillera en Lima – Perú* [Tesis de título profesional, Universidad de Ciencia Aplicadas].
- Kadir, A. M. Y., Amar, K., & Asmal, S. (2024). A Design of Procurement Managing Tool Based on the Lean Six Sigma-DMADV: A Case Study of an Indonesian Fishery Company. *Quality - Access to Success*, 25(199), 139-146. <https://doi.org/10.47750/QAS/25.199.15>

- Marín-Calderón, A. V., Valenzuela-Galván, M., Cuamea-Cruz, G., & Brau-Ávila, A. (2023). Aplicación de la metodología Lean Six Sigma para disminuir desperdicios en una unidad de fabricación de paneles modulares de poliestireno. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 24(1), 1-12. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2023.24.1.007>
- Marsetiya, D., & Abirfatin, A. (2023). Sustainable Lean Six-Sigma: A new framework for improved sustainable manufacturing performance. *Cleaner Engineering and Technology*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100700>
- Martínez, A., & Morales, J. (2022). *Lean Six Sigma para la mejora de procesos*. Universidad Miguel Hernández de Elche.
- Naciones Unidas. (2023). *Infraestructura*. Naciones Unidas Desarrollo Sostenible. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/infrastructure/>
- Nallusamy, S., Chakraborty, P., & Punna, G. (2023). Reduction analysis of welding defects using Lean Six Sigma and DMAIC application – A case study. *International Journal of Modern Engineering*, 10(4), 13-20. <https://doi.org/10.14445/23488360/IJME-V10I4P103>
- Niemann, J., Reich, B., & Stohr, C. (2024). *Lean Six Sigma methods for production optimization*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-68744-4>
- Niño, J., & Mendoza, M. (2021). *La investigación en el contexto académico*. Infinite Study.
- Olave, G., Rojas, I., & Cisneros, M. (2014). *Cómo escribir la investigación académica desde el proyecto hasta la defensa*. Ediciones de la U.
- Ortiz, J., Bancovich, A., Candia, T., Huayanay, L., Moore, R., & Tinoco, O. (2023). Green Lean Six Sigma model for waste reduction of raw material in a nectar manufacturing company of Lima, Peru. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 16(2), 169-185. <https://doi.org/10.3926/jiem.4916>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., & Alonso-Fernández, S. (2021). Declaración PRISMA 2020: Una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista Española de Cardiología*, 74(9), 790–799. <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016>
- Paredes, M. (2022). *Relación entre objetivos e instrumentos*. GRIN Verlag.

- Pezo, C., Ruiz, A., Cano, M., & Rojas, J. (2023). *Methodology to improve profitability by improving the supply chain based on Lean Six Sigma and digital transformation in a company in the pharmaceutical sector in the post-COVID-19 era*. Proceedings of the 3rd LACCEI International Multiconference on Entrepreneurship, Innovation and Regional Development - LEIRD 2023. <https://dx.doi.org/10.18687/LEIRD2023.1.1.109>
- Pierce, A., Teeling, S. P., McNamara, M., O'Daly, B., & Daly, A. (2023). Using Lean Six Sigma in a Private Hospital Setting to Reduce Trauma Orthopedic Patient Waiting Times and Associated Administrative and Consultant Caseload. *Healthcare*, 11(19). <https://doi.org/10.3390/healthcare11192626>
- Quiroz, J. C., Daza-Moran, F., Ramírez-Alva, A., & Collao-Díaz, M. (2022). Improving service level performance by implementing Lean Six Sigma in SMEs of the gaming peripherals industry in Peru: A case study. *The South African Journal of Industrial Engineering*, 33(2), 168–183. <https://doi.org/10.7166/33-2-2710>
- Quiroz, J., Varas, I., & Ali, A. (2023). Lean Six Sigma Methodology to Reduce Excess Wastage in a Brickyard: A Case Study. *The South African Journal of Industrial Engineering*, 34(2), 92–105. <https://doi.org/10.7166/34-2-2865>
- Scala, A., & Improta, G. (2024). Lean Six Sigma Approach to Improve the Management of Patients Undergoing Laparoscopic Cholecystectomy. *Healthcare*, 12(3), 292. <https://doi.org/10.3390/healthcare12030292>
- Socconini, L. (2020). *Lean Six Sigma Green Belt manual de certificación*. Adria Gibernau.
- Socconini, L. (2021). *Lean Six Sigma Yellow Belt manual de certificación*. ICG, Marge.
- Syafrimaini, A. (2021). Implementation of Lean Six Sigma method in high-rise residential building projects. *Civil Engineering and Architecture*, 9(4), 1228-1236. <https://doi.org/10.13189/cea.2021.090424>
- Teiler, J., Bustos, C., & Traverso, M. (2021). Optimization of related processes with inventory management hospital pharmacy through the use of the Lean Six Sigma methodology. *Revista de Calidad Asistencial*, 31(1), 58-63.

- Tlapa, D., Franco-Alucano, I., Limon-Romero, J., Baez-Lopez, Y., & Tortorella, G. (2022). Lean, Six Sigma, and Simulation: Evidence from Healthcare Interventions. *Sustainability*, 14(24), 16849. <https://doi.org/10.3390/su142416849>
- Trubetskaya, A., McDermott, O., & Brophy, P. (2023). Implementing a customised Lean Six Sigma methodology at a compound animal feed manufacturer in Ireland. *International Journal of Lean Six Sigma*, 14(5), 1075-1095. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-08-2022-0169>
- Waiman, E., Achadi, A., & Agustina, R. (2023). Reducing Hospital Outpatient Waiting Time Using Lean Six Sigma: A Systematic Review. *Indonesian Journal of Health Administration*, 11(1), 154–166. <https://doi.org/10.20473/jaki.v11i1.2023.154-166>

Benefits and Challenges of Lean Six Sigma: Evidence from a Scoping Review **Benefícios e Desafios do Lean Six Sigma: evidências de uma revisão de escopo**

Kenji Alberto Chung Sanchez

Universidad Cesar Vallejo | Lima | Perú
<https://orcid.org/0000-0003-3716-8547>
kchungc@ucvvirtual.edu.pe
k.chung.s@hotmail.com

Doctorando en Educación, Magíster en Ingeniería Industrial, Ingeniero Industrial y Contador Público. Docente universitario y especialista en mejora de procesos, tributación e investigación en contextos académicos y empresariales.

Eylin Abril Castro Fuentes

Universidad Cesar Vallejo | Lima | Perú
<https://orcid.org/0000-0002-4869-6663>
ecastrofue@ucvvirtual.edu.pe

Ingeniera Industrial por la Universidad César Vallejo. Ha participado en investigaciones aplicadas en productividad y gestión de procesos, con énfasis en la metodología Lean Six Sigma. Sus intereses se centran en la mejora continua y la eficiencia organizacional.

Nicole Brenda Huaman Quiroz

Universidad Cesar Vallejo | Lima | Perú
<https://orcid.org/0000-0002-9095-4638>
nhuamanqu29@ucvvirtual.edu.pe

Ingeniera Industrial por la Universidad César Vallejo. Ha participado en investigaciones aplicadas en productividad y gestión de procesos, con énfasis en la metodología Lean Six Sigma. Sus intereses se centran en la mejora continua y la eficiencia organizacional.

Melanie Yunnete Baldeón Montalvo

Universidad Cesar Vallejo | Lima | Perú
<https://orcid.org/0000-0003-3717-4955>
mbaldeonm@ucvvirtual.edu.pe
melbaldeon@gmail.com

Doctoranda en Ingeniería Industrial, Magister en Administración de Negocios (MBA) e Ingeniera Industrial. Docente universitario y especialista en mejora de procesos, costos y operaciones.

Elmer Hugo Bardales Suárez

Universidad Cesar Vallejo | Lima | Perú
<https://orcid.org/0000-0001-8077-7343>
ebardales@ucvvirtual.edu.pe
elmer.bardales@gmail.com

Magister en Gerencia de Operaciones y Logística e Ingeniero Industrial, Docente Universitario. Especialista en Operaciones, Supply chain management, innovación y emprendimiento.

Mario Humberto Acevedo Pando

Universidad Cesar Vallejo | Lima | Perú
<https://orcid.org/0000-0002-3565-443X>
macevedopa@ucvvirtual.edu.pe
macendo21051307@gmail.com

Abstract

In the pursuit of greater efficiency and quality in industrial and service processes, the Lean Six Sigma (LSS) methodology stands out as a widely studied strategy. This chapter presents a scoping review on the implementation of LSS, focusing on scientific literature published between 2020 and 2024 in indexed databases such as SCOPUS and SCIELO. The systematic procedure for searching, selecting, and analyzing articles is described, along with the organization of information into thematic categories related to operational efficiency, quality, sustainability, and sectoral application. Additionally, the conceptual framework of LSS is addres-

sed, including tools and approaches such as DMAIC and flowcharts, providing a structured overview of how this methodology has been studied across different sectors. The chapter offers readers a general evidence-based view of the types of benefits and challenges reported in the scientific literature regarding LSS adoption.

Keywords: Industry; Services; Management; Process Optimization; Lean Six Sigma; Scoping Review

Resumo

Na busca por maior eficiência e qualidade nos processos industriais e de serviços, a metodologia Lean Six Sigma (LSS) destaca-se como uma estratégia amplamente estudada. Este capítulo apresenta uma revisão de escopo sobre a implementação da LSS, focando na literatura científica publicada entre 2020 e 2024 em bases de dados indexadas como SCOPUS e SCIELO. Descreve-se o procedimento sistemático de busca, seleção e análise de artigos, bem como a organização das informações em categorias temáticas relacionadas à eficiência operacional, qualidade, sustentabilidade e aplicação setorial. Ademais, aborda-se o marco conceitual da LSS, incluindo ferramentas e abordagens como DMAIC e diagramas de fluxo, fornecendo um panorama estruturado de como a implementação desta metodologia tem sido estudada em diferentes setores. O capítulo oferece ao leitor uma visão geral baseada em evidências sobre os tipos de benefícios e desafios reportados na literatura científica com relação à adoção da LSS. Palavras-chave: Indústria; Serviços; Gestão; Otimização.

Capítulo 4

Análisis moderno sobre la Industria 4.0, sus retos y oportunidades

Carlos Eduardo Belman López

Resumen

Los sistemas de producción están evolucionando gracias a avances tecnológicos recientes e innovaciones en los sistemas de manufactura. Términos como Industria 4.0 y manufactura inteligente se han convertido en prioridad y objeto de estudio para empresas y centros de investigación, sin existir consensos generalmente aceptados. Como resultado es difícil diseñar y desarrollar soluciones para Industria 4.0, a nivel científico o empresarial. Por estos motivos, la contribución de este documento se centra en proporcionar un análisis profundo de Industria 4.0, sus retos y oportunidades. Mediante este análisis, los futuros sistemas de producción y la fábrica inteligente serán conceptualizados en base a los principios correctos siendo la base del diseño y desarrollo del sistema de manufactura inteligente en la era de Industria 4.0.

Palabras clave:
Industria 4.0;
Manufactura Inteligente;
Manufactura en la Nube;
Sistemas de Producción.

Belman López, C. E. (2025). Análisis moderno sobre la Industria 4.0, sus retos y oportunidades. En F. J. Manjarrés Arias. (Coord). *Convergencia de las Ingenierías: Enfoques Interdisciplinarios y Soluciones Innovadoras para los Retos Contemporáneos en Industria, Energía, Automatización y Producción (Volumen I)*. (pp. 75-102). Religación Press. <http://doi.org/10.46652/religacionpress.362.c657>



Introducción a la Industria 4.0

El término Industria 4.0 es un concepto que surgió en los últimos años debido a los avances tecnológicos y desarrollos disruptivos en el sector industrial (Zhou et al., 2016). El término se hizo público, cuando una iniciativa llamada “Industrie 4.0”, una asociación de representantes de negocios, políticos y académicos encabezados por Kagermann, Lukas y Wahlster en 2011 promovieron la idea como un enfoque para fortalecer la competitividad de la industria de manufactura alemana (Hermann et al., 2015). El gobierno federal alemán apoyó la idea al anunciar que Industrie 4.0 sería una parte integral de su iniciativa “Estrategia de Alta Tecnología 2020 para Alemania”, con el objetivo de liderar la innovación tecnológica (Hermann et al., 2015; Zhou et al., 2016).

De acuerdo con los impulsores de este movimiento, la primera revolución industrial surge a finales del siglo XVIII como consecuencia de la introducción en la industria de equipos mecánicos movidos por motores de vapor. La segunda revolución industrial inició a comienzos del siglo XX, apoyada en la electricidad, caracterizada por la producción en masa de bienes y basada en una creciente división del trabajo. La tercera revolución empezó a comienzos de los años 70 y llega hasta nuestros días, emplea la electrónica y las tecnologías de la información para conseguir incrementar la automatización de los procesos de producción (Hernández et al., 2018).

En la tercera revolución industrial, el avance de las ICT fue el núcleo que cambió el paradigma de producción. Por ejemplo, la adopción del control numérico por computadora y la utilización de robots industriales hizo posible los sistemas de fabricación flexible. Las tecnologías para el diseño asistido por computadora (CAD), la manufactura asistida por computadora y la planificación del procesamiento asistido por computadora hicieron posible la manufactura integrada por computadora (Xu et al., 2018).

Cabe señalar que el incremento de la productividad ha sido la esencia de cada revolución industrial, permitiendo el aumento de la eficiencia y productividad a través del uso de desarrollos tecnológicos disruptivos (Pereira & Romero, 2017).

Además, a diferencia de la tercera revolución industrial que se centró más en la automatización de máquinas y procesos, la Industria 4.0 se enfoca más en la digitalización e integración de extremo a extremo de los ecosistemas industriales digitales mediante la búsqueda de soluciones completamente integradas (Xu et al., 2018).

Hoy estamos en la cúspide de la Cuarta Revolución Industrial, en la que los mundos de la producción y la conectividad de red se integran a través del Internet de las Cosas (IoT) y sistemas ciberfísicos (CPS), para hacer que la Industria 4.0 sea una realidad (Xu et al., 2018). El IoT se refiere a la integración de las ICT en el entorno industrial (Schuh et al., 2014). En general, el IoT es capaz de ofrecer una conectividad avanzada entre objetos físicos, sistemas, aplicaciones y servicios, lo que permite la comunicación entre objetos y el intercambio de datos (Zhong et al., 2017). El IoT se puede definir como una red en la que los CPS cooperan entre sí mediante esquemas de direccionamiento únicos (Hermann et al., 2015).

Al mismo tiempo, otros países industriales son conscientes de esta nueva era de la producción. En China, se publicó un plan de desarrollo industrial en 2015, denominado “Hecho en China 2025” (Zhong et al., 2017; Xu et al., 2018). En Estados Unidos, General Electric promueve una idea similar bajo el nombre de Internet Industrial, definido como la integración de complejos mecanismos y dispositivos físicos con sensores y software en red, utilizados para predecir, controlar y planificar mejores resultados empresariales (Zhong et al., 2017).

Los desarrollos y avances tecnológicos en la Industria 4.0 proporcionarán una gama viable de soluciones a las crecientes necesidades de las industrias. Esta viabilidad se ha demostrado por

el hecho de que un número creciente de empresas en todo el mundo han explorado los beneficios de la digitalización e integración de las cadenas horizontales y verticales de las empresas a través de Industria 4.0, con el fin de convertirse en empresas (digitales) líderes en los complejos ecosistemas industriales del mañana (PWC, 2016).

Definición de la Industria 4.0

Aunque Industria 4.0 o cuarta revolución industrial es actualmente una de las principales prioridades para muchas empresas, centros de investigación y universidades, no existe una definición específica, clara o generalmente aceptada del término (Hermann et al., 2015), sino una amplia gama de tecnologías interdisciplinarias, con diferentes niveles de madurez y disponibilidad en el mercado, que facilitan la digitalización, automatización e integración de los procesos a lo largo de las cadenas de valor (Götz & Jankowska, 2017). La Industria 4.0 aún se encuentra en estado conceptual y dentro de las primeras etapas de implementación tanto en la industria, como en el entorno humano y la investigación científica. Los gobiernos, empresas, universidades y centros de investigación están intentando desarrollar fábricas “inteligentes” y automatizadas conectadas a través del Internet (Roblek et al., 2016).

El concepto de Industria 4.0 está basado en la integración de las ICT (Xu et al., 2018; Zhou et al., 2016), con tecnología industrial, siendo principalmente dependiente en la construcción de CPS (Jazdi, 2014), para llevar a cabo una fábrica digital e inteligente, dirigida por la información, personalizable y al cuidado del ambiente (Zhou et al., 2016).

La Industria 4.0, también conocida como manufactura inteligente, producción inteligente, fábrica inteligente, manufactura cognitiva (Xu et al., 2018), industria integrada (Götz & Jankowska, 2017), entre otros nombres que se pueden encontrar en la literatura, encapsula tendencias de desarrollo de las fábricas del futuro, para

lograr procesos inteligentes de manufactura, mediante la construcción de sistemas de producción ciber-físicos (CPPS) e implementación y operación de fábricas inteligentes (Zhou et al., 2016). La Industria 4.0 toma como fundamento las oportunidades que brinda la disponibilidad, digitalizando e integrando la información relevante desde cualquier lugar y en cualquier momento (Neugebauer et al., 2016). La Industria 4.0 considera que la cadena de valor debe ser inteligente, ágil y en red mediante la integración de objetos físicos, factores humanos, máquinas inteligentes, sensores inteligentes, procesos de producción y líneas de producción a lo largo de los límites de la organización (Belman-Lopez et al., 2020).

La Industria 4.0 consiste en una integración generalizada, donde cada elemento de fabricación intercambia información de manera autónoma, desencadena acciones y se controla a sí mismo de manera independiente (Pereira & Romero, 2017). Además, es un complejo sistema tecnológico formado fundamentalmente por la conectividad, la integración y la digitalización de la producción, enfatizando las oportunidades de integrar todos los elementos (personas, objetos y sistemas) en un sistema con valor agregado, dinámico, autoorganizado, autónomo y de funcionamiento en tiempo real (Neugebauer et al., 2016).

Para Charro & Schaefer (2018), el término Industria 4.0 se refiere a sistemas de manufactura avanzados e integrados mediante los cuales los equipos de manufactura pueden comunicarse en tiempo real entre sí (o con personas) para analizar datos, predecir fallas y reconfigurarse para optimizar la cadena de valor de una red de manufactura.

La necesidad en Industria 4.0 es convertir las máquinas tradicionales en máquinas autoconscientes y de autoaprendizaje para mejorar su rendimiento general, la gestión de su mantenimiento y la interacción que lo rodea (Lee et al., 2014). La supervisión de datos en tiempo real, el seguimiento del estado y las posiciones del producto,

así como el control de los procesos de producción son necesidades básicas en la Industria 4.0 (Almada-Lobo, 2015).

La Industria 4.0 aplica la ciencia de datos y los modelos analíticos para analizar datos en tiempo real de múltiples máquinas, procesos y sistemas para luego automatizar la manufactura como corresponde. Además, basada principalmente en el IoT, CPS e ICT, es capaz de desarrollar una nueva generación de sistemas de producción que integran y sincronizan datos en tiempo real entre los objetos físicos y el espacio computacional cibernético (Xu et al., 2018).

La Industria 4.0 permite, a través de la creación de redes y sistemas inteligentes, una mayor conectividad, robustez, y más altos estándares de calidad en manufactura e ingeniería. Por ejemplo, la Industria 4.0 tiene el potencial para lograr que los procesos de negocios sean capaces de autoorganizarse y auto optimizarse, basándose en criterios como el costo, la disponibilidad de recursos y los requisitos de demanda (Fatorachian & Kazemi, 2018).

La Industria 4.0 tiene la capacidad para lograr el establecimiento de productos y fábricas inteligentes. Las fábricas inteligentes pueden lidiar fácilmente con la necesidad de un desarrollo rápido de productos y una producción flexible. De igual forma, logran crear productos inteligentes a través de procesos de manufactura inteligentes. Estos productos tienen la habilidad de comunicarse entre sí y con su entorno, lo que les permite apoyar a los procesos de manufactura dado que contienen el conocimiento acerca del proceso, además de información de las aplicaciones del cliente (Fatorachian & Kazemi, 2018).

Áreas de impacto

El nuevo paradigma de producción conocido como Industria 4.0 reúne al mundo físico y digital a través de los CPS e IoT, esperando mejoras en los procesos de producción que aumenten la

productividad, afectando el ciclo de vida de los productos, creando nuevos modelos de negocio, mejorando el ambiente laboral y reestructurando el mercado del trabajo con nuevos roles y tareas (Pereira & Romero, 2017). Además de mejorar significativamente los tiempos de producción, elevar los niveles de automatización y el grado de personalización de los productos (Radziwon et al., 2013). A continuación, se analizan algunas de las principales áreas de impacto de la Industria 4.0.

Diseño y desarrollo de nuevos productos personalizados

La combinación de los procesos digitales en los que se basa Industria 4.0, tiene un impacto disruptivo en la ingeniería de nuevos productos. La Industria 4.0 influye en la forma en que los ingenieros tendrán que diseñar productos en instalaciones cada vez más inteligentes. Desafortunadamente, los métodos de fabricación tradicionales están diseñados para la producción en masa, no para la personalización. En el 2016, McKinsey and Company realizaron un estudio que mostró que las fábricas que implementan Industria 4.0 son mejores en diseño y fabricación de productos individualizados que las fábricas tradicionales (Crawford & ASME.Org, 2018).

Modelos de negocio

Las industrias están viviendo la cuarta revolución industrial, lo que implica, un cambio tecnológico radical basado en la digitalización y afectando toda la actividad industrial dentro y fuera de la empresa. Y como ya sucedió con las pasadas revoluciones industriales, los modelos de negocios modernos deben desarrollarse de la mano con las nuevas tecnologías para seguir siendo competitivos (Charro & Schaefer, 2018).

Debido a la llegada de la Industria 4.0, los complejos ecosistemas empresariales tienen la necesidad de adoptar nuevas arquitecturas y

procesos de negocios que ayudarán a la organización con la adaptación de la tecnología, los procesos y las relaciones industriales (Xu et al., 2018). Dado estos nuevos requisitos, están surgiendo nuevos modelos de negocios que permiten la creación de entornos colaborativos. Hay muchas oportunidades para optimizar los procesos, la creación de valor y la integración a fin de lograr la capacidad de autoorganización, integración y comunicación en tiempo real (Pereira & Romero, 2017).

Clientes

Uno de los objetivos principales de Industria 4.0 es satisfacer las necesidades individuales de los clientes, lo que afecta áreas como la gestión de pedidos, la investigación y el desarrollo, los tiempos de entrega, la utilización y el reciclaje de los productos (Vaidya et al., 2018). Bajo Industria 4.0, un nuevo método de compra será proporcionado a los clientes, permitiéndoles ordenar cualquier función o característica que pueda ser incluida dentro de los productos (Qin et al., 2016).

Mercado laboral

La Industria 4.0 se refiere a la integración de las personas en los procesos de producción, a fin de alcanzar una mejora continua, enfocándose en actividades con valor añadido y evitando desperdicios (Vaidya et al., 2018). La Industria 4.0 conducirá a una mayor automatización de tareas, lo que significa que los trabajadores deben estar preparados para realizar nuevas tareas. Este nuevo paradigma de producción tendrá un impacto en el mercado laboral y en los roles profesionales, siendo crucial garantizar que se creen más empleos que los que desaparecerán (Pereira & Romero, 2017).

Debido a la Industria 4.0 surge la necesidad de capacitar y formar una nueva generación de gerentes y trabajadores capaces de transformar las empresas en entidades colaborativas orientadas a

servicios (Wiesner & Thoben, 2016). La Industria 4.0 transformará radicalmente los perfiles del trabajo y la competencia de los trabajadores, por lo tanto, será necesario implementar estrategias adecuadas de capacitación y organizar el trabajo de manera que se fomente el aprendizaje continuo. Además, a través de la Industria 4.0 y el cambio de paradigma en la interacción entre humano y tecnología, serán las máquinas las que se adapten a las necesidades de los seres humanos y no viceversa (Kagermann et al., 2013).

Economía

Se prevé que el impacto económico de esta cuarta revolución industrial será enorme, ya que la Industria 4.0 promete una efectividad operativa sustancialmente mayor, así como el desarrollo de modelos de negocios, servicios y productos completamente nuevos (Kagermann et al., 2013). En Alemania, un estudio reciente estima que los beneficios netos gracias a la cuarta revolución industrial contribuirán hasta 267 billones de euros al PIB alemán para el año 2025. El crecimiento esperado para la industria química, la maquinaria e industria eléctrica es de un 30% entre 2013 y 2025, en fabricación de vehículos de un 20%, y en la agricultura y las tecnologías de la información de un 15%. En Estados Unidos, el gobierno apoya las actividades de investigación y desarrollo en el área del Internet industrial con un fondo de 2 mil millones de dólares para manufactura avanzada (Hermann et al., 2015).

Los clústeres industriales e Industria 4.0

Los clústeres son concentraciones geográficas de industrias relacionadas por conocimiento, habilidades, insumos, demanda u otros enlaces. De acuerdo con Maskell & Lorenzen (2003), los clústeres son formas híbridas de contratación a largo plazo, comercio recíproco, que residen en algún lugar entre las jerarquías y los mercados. Los clústeres se caracterizan por la competición, ya que las empresas

dentro de un clúster cooperan y compiten simultáneamente. Como apuntó Steiner en 1998, un clúster trabaja bajo la premisa de que la especialización regional en actividades relacionadas de empresas complementarias y su cooperación con instituciones de investigación públicas y privadas crea sinergias, aumenta la productividad y genera ventajas económicas. Los clústeres ubicados en cierta región pueden formar redes a lo largo de la cadena de valor entre los diferentes actores regionales: empresas locales, universidades, organismos científicos y autoridades regionales. Al caracterizarse por la competición, crean sinergias, fomentan la innovación y la competitividad (Götz & Jankowska, 2017).

Las compañías ubicadas en un clúster tienden a ser más competitivas, a exportar más y generalmente están más involucradas en el comercio internacional, por lo tanto, son más internacionalizadas que las empresas que residen fuera de los grupos (Porter, 2000).

Un creciente cuerpo de literatura empírica ha demostrado el impacto positivo de los clústeres en el desempeño regional y de la industria, incluyendo la creación de nuevos empleos, patentes y la formación de nuevos negocios (Delgado et al., 2014).

Como los clústeres son fenómenos geográficos vinculados por la ubicación e Industria 4.0 se trata de actividades asistidas por tecnologías de la información, interconectadas y dispersas, a primera vista estos dos podrían parecer irreconciliables (Hermann et al., 2015).

Los atributos de un clúster, como la concentración geográfica y la dimensión espacial, parecen ser intereses opuestos a las actividades dispersas e interconectadas que propone la Industria 4.0. Pero se ha demostrado que las múltiples ventajas que brindan los clústeres, como la reducción de la incertidumbre y las relaciones cercanas de la red pueden facilitar el desarrollo y la implementación de soluciones de Industria 4.0. Los clústeres son considerados los mejores ecosistemas proporcionando ventajas cruciales para hacer negocios en la era

de la cuarta revolución industrial. De hecho, la incertidumbre y la complejidad que rodean la aparición de Industria 4.0 hacen que sea aún más importante garantizar el ambiente correcto de confianza, permitiendo la cooperación y el intercambio de conocimientos (Götz & Jankowska, 2017).

El rol de un clúster en la mejora de la competitividad de las empresas se demuestra por el hecho de que estos lugares son depósitos de competencias. Los clústeres no sólo están equipados con conocimientos específicos, sino que también proporcionan mecanismos adecuados que facilitan la aplicación efectiva, absorción, difusión y acumulación de dichos conocimientos (Götz & Jankowska, 2017).

La Industria 4.0 hace que las fronteras entre plantas individuales y empresas o incluso áreas geográficas sean borrosas. La Industria 4.0, a diferencia de un clúster, se basa en la diversidad, no en la especialización y promueve la urbanización en lugar de la aglomeración. La Industria 4.0 y sus características hacen, por un lado, obsoleto e irrelevante los aspectos geográficos de un clúster, por otro lado, requiere el propicio y típico contexto de los clústeres para desarrollarse completamente. La computación en la nube y otras tecnologías relacionadas con la Industria 4.0, permiten la coordinación e integración de actividades geográficamente dispersas y distribuidas lo que parece disminuir el rol de los clústeres. Esto podría sugerir que los clústeres son un concepto obsoleto en la era de la cuarta revolución industrial dominada por soluciones ICT dispersas, sin embargo, hay evidencia que apunta en dirección opuesta. La productividad colaborativa se puede lograr a través de:

1. La globalización de las ICT y las ventajas que ofrece la computación en la nube.
2. Una fuente de la verdad única: hacer uso de la simulación como herramienta de decisión embebida dentro del ambiente de software adecuado.

3. La integración de las ICT en el entorno industrial y en procesos descentralizados y autónomos que colaboran en red.
4. La cooperación y colaboración a través de todas las fronteras, tecnologías y actividades, potencializando la toma de decisiones en un sistema descentralizado.

Las empresas necesitan del conocimiento, y el conocimiento necesita un ambiente favorable, que está espacialmente limitado. Esto implica que las empresas deben ser atraídas a un clúster u otros centros regionales de especialización. Un clúster proporciona condiciones más amplias para facilitar el arriesgado e incierto camino hacia la Industria 4.0. La transformación exitosa hacia la Industria 4.0 requiere condiciones intrínsecas para los clústeres como son la confianza mutua, la compatibilidad, cooperación estrecha y normas compartidas. La industria 4.0 incorpora el concepto de “empresa conectada” que implica la cooperación de casi todos con todos. Por tales desafíos y déficits, un clúster puede ser utilizado como vehículo para desarrollar la Industria 4.0 (Götz & Jankowska, 2017).

La naturaleza de la Industria 4.0 y los clústeres parecen ser contradictorios, sin embargo, estos no se excluyen entre sí. Los clústeres son perfectamente complementarios, ya que brindan centros de excelencia donde los conocimientos pueden ser desarrollados. Los clústeres son un entorno propicio para probar las tecnologías de Industria 4.0 y proporcionan una incubadora para el desarrollo de esta (laboratorio experimental).

Las múltiples ventajas que brindan los clústeres, como la creación de competencias, la reducción de la incertidumbre y las relaciones cercanas en red, pueden facilitar el desarrollo y la implementación de soluciones para la Industria 4.0. Los clústeres pueden ser un laboratorio para los experimentos en la Industria 4.0 que emulan el concepto de “compañía conectada” y proporcionan un ambiente único de confianza que estimule la creación y difusión del conocimiento.

Aunque la Industria 4.0 parece redefinir el concepto de clúster hacia una plataforma de colaboración o alianza, eliminando de su definición el atributo geográfico y forzando a una definición más amplia, sin ubicaciones específicas o geográficamente concentradas. Dada la complejidad y la incertidumbre, es necesario cierta cooperación para compartir el riesgo, pero permanece abierto hasta qué punto es necesario una ubicación específica (Götz & Jankowska, 2017).

Retos y oportunidades de Industria 4.0

Actualmente, la falta de herramientas poderosas aún representa un obstáculo importante para explotar todo el potencial de la Industria 4.0. En particular, las arquitecturas para los nuevos sistemas y aplicaciones son cruciales para alcanzar la Industria 4.0 (Xu et al., 2018). Una clara brecha de investigación identificada en la literatura se refiere a la creación de nuevos modelos de negocios para la producción en la nube desde la perspectiva de los nuevos sistemas de productos y servicios en Industria 4.0. Con el aumento de la producción en la nube, existe la oportunidad de diseñar modelos de negocios completamente nuevos y potencialmente disruptivos que reflejen las nuevas oportunidades de la producción digitalizada (Charro & Schaefer, 2018). A continuación, se presentan algunos de los principales desafíos detectados en la literatura para alcanzar la Industria 4.0.

Interoperabilidad y estandarización

Un desafío clave para el éxito de Industria 4.0 es la interoperabilidad de la tecnología de automatización de múltiples proveedores, que solo se puede lograr a través de acciones de estandarización llevada a cabo entre los proveedores de tecnología, integradores y usuarios finales (Weyer et al., 2015). En organizaciones bajo la Industria 4.0, CPS y humanos están conectados a través del IoT. La creación de estándares es un factor clave para el éxito de la

comunicación entre CPS de varios fabricantes (Hermann et al., 2015), así como para la integración de tecnologías dentro de ambientes inteligentes de producción (Kusiak, 2017).

Esta estandarización es fundamental para garantizar la interoperabilidad entre diferentes módulos de la línea de producción y permitir a los proveedores de tecnología cooperar de forma cercana con otros proveedores, investigar, desarrollar y probar componentes de diferentes fabricantes (Weyer et al., 2015). La interoperabilidad de todos los interesados es necesaria para la conformación de ecosistemas complejos y descentralizados. Un alto nivel de interoperabilidad, en el que todos los interesados se comprometen y contribuyen por igual, es necesario para garantizar la creación de redes entre empresas y sectores. Para ello, es necesario estándares e integración, así como un marco regulatorio, sistemas descentralizados e inteligencia artificial (Plattform Industrie 4.0, 2019).

Ciberseguridad

La alta dependencia de la Industria 4.0 sobre lo digital, la acción y control basado en datos y el gran aumento en el número de conexiones conduce a nuevas vulnerabilidades como actividades maliciosas que no necesariamente requieren una intrusión física. Por ejemplo, la manipulación de información son grandes riesgos para la producción basada en datos de Industria 4.0 (Neugebauer et al., 2016).

La confianza en los grandes volúmenes de datos hace que la ciberseguridad sea primordial para la Industria 4.0. Esto es especialmente importante ya que los activos de datos se convertirán en un indicador creciente del valor de mercado de una empresa. El creciente grado de automatización y autonomía en los sistemas aumentará la importancia de la seguridad de máquinas y personas (Kusiak, 2017).

Problemas de inversión

La cantidad para invertir es un problema general para la mayoría de las iniciativas de producción basadas en nuevas tecnologías. Una inversión significativa es inicialmente requerida para implementar la Industria 4.0 en una pequeña y mediana empresa (SME). La implementación de los pilares tecnológicos de la Industria 4.0 también requieren una gran cantidad de inversión inicial para cualquier organización (Vaidya et al., 2018). La Industria 4.0 ofrece ganancias en productividad y eficiencia de los recursos. Pero será necesario calcular las compensaciones entre los recursos adicionales que necesitan ser invertidos en las fábricas inteligentes y los ahorros generados (Kagermann et al., 2013).

Diseño de una arquitectura de referencia

En la era de Industria 4.0 es necesario una arquitectura de referencia que proporcione una descripción técnica de los estándares y facilite la implementación de los nuevos sistemas y aplicaciones industriales. La arquitectura de referencia es un modelo general que se aplica tanto a aplicaciones, productos y servicios de todas las empresas asociadas. La arquitectura de referencia proporciona un marco para la estructuración, desarrollo, integración y operación de los sistemas tecnológicos relevantes para la Industria 4.0 (Kagermann et al., 2013).

El uso de enfoques arquitectónicos es fundamental en las aplicaciones industriales y en el desarrollo de CPS, y debe abordarse como un problema global en lugar de local. Debido a que la mayoría de los ingenieros de producción son expertos en áreas como la mecánica, la electrónica, entre otras, la noción del trabajo arquitectónico ha encontrado resistencia, y de ahí la necesidad de cerrar la brecha entre estas disciplinas (Wang et al., 2018).

Los nuevos sistemas industriales deben alinear diferentes perspectivas que deben integrarse en una arquitectura de referencia, por ejemplo, las nuevas funciones y servicios desde la perspectiva de los nuevos productos y procesos industriales. Así como la perspectiva de las nuevas aplicaciones y su integración con el ambiente, adquisición de datos a través de sensores, el control continuo, análisis de tendencias, funciones de planificación y optimización, entre otras características (Belman-López et al., 2023).

Sustentabilidad

Uno de los desafíos clave de las industrias a nivel mundial es el desarrollo de procesos y productos sostenibles. La producción sostenible es la creación de productos a través de procesos económicamente sólidos con la capacidad de minimizar los impactos ambientales negativos al tiempo que ahorran energía y recursos naturales (United States Environmental Protection Agency, 2017). La sustentabilidad económica, ambiental y social es fundamental en Industria 4.0, donde los aspectos clave son el trabajo decente, la educación, la mitigación del cambio climático, la economía y la inclusión social (Plattform Industrie 4.0, 2019).

Aceptación social

La voluntad social de aceptar, usar y desarrollar este nuevo paradigma de producción es decisiva para el éxito de la Industria 4.0. La aceptación por parte de los usuarios es un requisito previo crucial. La aceptación significa que los usuarios perciben los sistemas diseñados positivamente y están dispuestos a usarlos. El pasado ha demostrado que es extraordinariamente difícil predecir la aceptación. Al mismo tiempo, la aceptación depende mucho de interacciones hombre-máquina bien diseñadas. Por esta razón, los problemas de aceptación deben abordarse ampliamente desde un principio en especial en el desarrollo de los sistemas ciber-físicos (Acatech, 2011).

Además, existe el desafío en la reestructuración de puestos de trabajo y la preocupación al hecho de que algunas de las ocupaciones menos exigentes desaparecerán. Aunque, los aumentos de productividad logrados por el uso de tecnologías inteligentes pueden ayudar a asegurar empleos, también puede destruir puestos de trabajo (efectos de redundancia). Existe la preocupación de que los efectos de redundancia de la Industria 4.0 predominen a largo plazo, lo que llevaría a lo que se conoce como desempleo tecnológico (Roblek et al., 2016).

Finalmente, los defensores de la idea que Industria 4.0 es en efecto una revolución profunda y no solo una evolución gradual, afirman que las sociedades actuales se están enfrentando también a la vida 4.0. Los formidables cambios que han llegado junto con Industria 4.0 afectan no solo a los sectores industriales, sino también a la administración pública, a la atención médica, las condiciones laborales, incluyendo los desplazamientos, viajes, la capacitación y los entrenamientos, la organización de los lugares de trabajo incluso la organización del tiempo libre. Esto significa también un nuevo rol para los gobiernos, ya que se espera más con respecto a la provisión de infraestructura, el desarrollo de redes de banda ancha e incentivos para las pequeñas empresas (Götz & Jankowska, 2017).

Relación con otros paradigmas de producción

La Industria 4.0 está dirigiendo cambios profundos en muchas industrias, como la farmacéutica, química, alimenticia, textil, energética, de la salud, entre muchas otras, incluyendo el área de la manufactura. La Industria 4.0 mediante la implementación de CPS sostiene la promesa de una mayor flexibilidad en los procesos, una personalización masiva y un aumento en la productividad, permitiendo a las empresas fabricar productos cada vez más individualizados con un tiempo de entrega al mercado más corto y una mayor calidad (Zhong et al., 2017).

La manufactura inteligente

La manufactura inteligente (MI) o producción inteligente es uno de los términos más ampliamente utilizados para describir la producción del mañana, ocasionando un rápido aumento en el volumen de publicaciones sobre este tema (Kusiak, 2017).

La MI desempeña un papel fundamental en la Industria 4.0 (Zhou et al., 2016), donde el término “inteligente” se vuelve central, volviéndose complicado encontrar una definición única y precisa (Pereira & Romero, 2017). Además, la complejidad de los modernos sistemas de manufactura y el enorme incremento en el volumen de datos ha ocasionado que la toma de decisiones sea cada vez más compleja, existiendo la necesidad de utilizar la inteligencia computacional para tomar la decisión correcta en el lugar y momento correcto (Chen, 2017).

En la MI, los recursos típicos de manufactura se convierten en objetos inteligentes capaces de sentir, actuar y tener comportamiento dentro de su ambiente (Zhong et al., 2017). El ambiente dentro de una fábrica inteligente consiste entonces, en una nueva comunicación e integración en tiempo real de todos los recursos de manufactura (sensores, actuadores, transportadores, máquinas, robots, entre otros recursos). Esta integración permite aumentar la eficiencia de fabricación y cumplir con los requisitos de mercados complejos (Pereira & Romero, 2017).

Aunque no hay una definición consensuada de MI, de acuerdo con el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST), la MI es un sistema de manufactura colaborativo totalmente integrado que responde en tiempo real para satisfacer las demandas y condiciones cambiantes en la fábrica, en la cadena de suministro y en las necesidades del cliente. Es a su vez, una forma emergente de producción que integra los activos de manufactura con sensores, plataformas computacionales, tecnologías de la comunicación,

control, simulación, modelado intensivo de datos e ingeniería predictiva (Kusiak, 2017).

La MI no solo se ocupa de la automatización de los pisos de producción, sino que depende de innovaciones basadas en datos para alcanzar altos niveles de autonomía y optimización en los procesos empresariales (Yang et al., 2019). La MI hace uso de las tecnologías de la información y la comunicación aplicadas al área de la manufactura para lograr procesos flexibles y reconfigurables con el propósito de optimizar la producción, la calidad del producto, el nivel de servicio y así poder afrontar un mercado global y dinámico. La MI permite que todos los procesos físicos y flujos de información estén disponibles cuando y donde son necesarios (Wang & Ha-Brookshire, 2018). La MI se trata de la autonomía, evolución, simulación y optimización de la empresa de manufactura, y no solo del grado de automatización del piso de producción. El nivel de inteligencia de la empresa de manufactura estará determinado por la cantidad de información disponible de los procesos de manufactura, en el momento y lugar necesario, y de forma fácilmente entendible para las empresas involucradas (Yang et al., 2019). Además, del grado en que el mundo físico de la empresa haya sido reflejado en el mundo virtual o digital (Kusiak, 2017).

La MI mejora también en gran medida el diseño, producción, administración e integración de todo el ciclo de vida de un producto tradicional. El ciclo de vida del producto puede ser mejorado utilizando sensores avanzados, modelos de toma de decisiones, materiales y objetos inteligentes, así como análisis de datos (Li et al., 2017; Belman Lopez, 2021). Al mismo tiempo, sistemas de manufactura inteligente podrán proporcionar servicios colaborativos, personalizables, flexibles y reconfigurables a los usuarios finales. Las técnicas de Inteligencia Artificial (IA) tendrán un papel esencial en estos sistemas de manufactura al proporcionar características como la capacidad de aprendizaje, razonamiento y acción. Con el uso de la IA, se puede minimizar la participación humana dentro de los

sistemas y procesos, a la vez se atienden los desafíos de la MI. Estos desafíos son: el desarrollo de sistemas inteligentes de manufactura, modelos de MI basados en datos, integración y colaboración profunda entre hombre y máquina y desarrollo de casos de aplicación reales (Zhong et al., 2017; Belman-López et al., 2020b).

Manufactura en la nube

La extensión del paradigma de computación en la nube aplicado al sector de manufactura ha generado el concepto de manufactura en la nube, reconocido como una de las tecnologías más fundamentales e innovadoras para la industria de manufactura moderna, reclamando una atención cada vez mayor en la investigación (Caggiano, 2018).

El término manufactura en la nube se introdujo por primera vez en 2010. Es un modelo que permite el acceso ubicuo, conveniente y bajo demanda a un conjunto compartido de recursos de manufactura (por ejemplo, software, equipos o recursos) que pueden aprovisionarse y liberarse rápidamente con un mínimo esfuerzo de gestión o interacción con el proveedor de servicios. También describe una visión holística de diseño y producción basado en la nube que aborda todo el proceso de realización del producto en conjunto (Charro & Schaefer, 2018; Babiceanua & Seker, 2016).

La manufactura en la nube coloca los recursos de manufactura virtualizados y encapsulados en nubes para permitir su acceso ubicuo (Chen & Tsai, 2016). La manufactura en la nube cambia significativamente la forma en que se acceden y proporcionan servicios, brindando al usuario un acceso ubicuo mediante la nube hacia los CPPS, máquinas inteligentes y a la gran cantidad de información generado a través de sistemas de sensores y técnicas de análisis de datos (Caggiano, 2018).

La manufactura en la nube construida sobre la computación en la nube explota una filosofía de “compartir para ganar” en lugar de la

propuesta tradicional de “compite para ganar”. La manufactura en la nube, si se implementa por completo, puede permitir la comunicación instantánea entre múltiples instalaciones de manufactura geográficamente dispersas, optimizando la cadena de valor de la red a través de recomendaciones a la medida (Charro & Schaefer, 2018).

Manufactura ubicua

En 1988, Mark Weiser presentó la idea de computación ubicua prediciendo que este modelo de cómputo llegaría a ser de uso generalizado. En 1999, IBM propuso formalmente el término. Uno de los objetivos más significativos de la computación ubicua es permitir a los equipos de cómputo sentir o percibir los cambios en el ambiente circundante y modificar su comportamiento de acuerdo con estos cambios. Las tecnológicas de computación ubicua habilitan a las personas el acceso a la información sin restricciones de tiempo y lugar proporcionando la forma más efectiva de percibir la ubicación de individuos u objetos, información del ambiente, situaciones personales y tareas (Tian & Zhao, 2015).

La tecnología ubicua incluye sensores ubicuos, servicios web, el IoT, la computación en la nube, entre otros. Un sensor ordinario puede ser convertido en un sensor ubicuo al añadirle un módulo de red. Otras tecnologías y sensores ubicuos incluyen etiquetas RFID, auto ID, Kinect, la realidad virtual, los CPS, GPS, GSM y WiFi (Chen & Tsai, 2016).

La manufactura ubicua (MU), es una aplicación de la computación ubicua en el sector de la manufactura, que se refiere a la capacidad de diseñar en cualquier lugar, fabricar en cualquier parte, vender en cualquier lugar y en cualquier momento. Este paradigma brinda a las fábricas una capacidad de producción ilimitada y una permanente disponibilidad de los servicios de manufactura. La MU es un concepto similar a la manufactura en la nube que permite acceso ubicuo y sobre demanda a un conjunto de recursos de manufactura configurables y

compartidos. Sin embargo, la MU enfatiza la movilidad y dispersión de los usuarios y los recursos de manufactura. Adicionalmente, la manufactura en la nube típicamente despliega un conjunto de servicios a través del Internet, mientras la MU no necesariamente utiliza comunicación en red. No obstante, MU y la manufactura en la nube se benefician una de otra. Por ejemplo, el estatus de una máquina monitoreado por un sensor ubicuo puede ser analizado utilizando un servicio en la nube. Finalmente, uno de los principales retos en la MU es la carencia de métodos organizacionales (incluyendo servicios de mediación y negociación) e infraestructura de información y comunicación adecuada (Chen & Tsai, 2016).

Conclusiones

El aumento de la productividad ha sido la esencia de cada revolución industrial. La Industria 4.0, también conocida como cuarta revolución industrial, industria integrada, entre otros nombres, encapsula tendencias de desarrollo de las fábricas del futuro, para desarrollar productos, procesos y sistemas de producción con la capacidad de alcanzar la operación de la fábrica inteligente. La Industria 4.0 se encuentra dirigiendo cambios profundos en muchas industrias, como la farmacéutica, química, alimenticia, textil, energética, de la salud, entre otras, incluyendo la manufactura y toda su cadena de valor. En la manufactura, la Industria 4.0 proporciona oportunidades en el diseño, desarrollo y ciclo de vida de nuevos productos, en el desarrollo de nuevos sistemas de producción, en el diseño de arquitecturas de referencia, en el desarrollo de nuevos modelos de negocios impactando el ámbito laboral, social y económico. La Industria 4.0 es una filosofía que enfatiza las oportunidades de integrar de forma colaborativa todos los elementos en un sistema que agrega valor, siguiendo como objetivos el aumento de la eficiencia y productividad, la personalización de productos y servicios, a la vez que equilibra la vida laboral del trabajador. Al mismo tiempo, la MI es uno de los términos más ampliamente utilizados para describir

la producción del mañana, donde los recursos típicos se convierten en objetos inteligentes con la capacidad de percibir señales de su entorno, actuar y tener comportamiento dentro de su ambiente.

Referencias

- Acatech. (2011). *Cyber-physical systems: Driving force for innovation in mobility, health, energy and production*. National Academy of Science and Engineering.
- Almada-Lobo, F. (2015). The Industry 4.0 revolution and the future of Manufacturing Execution Systems (MES). *Journal of Innovation Management*, 3(1), 16-21.
- Belman-Lopez, C. E. (2021). Real-time event-based platform for the development of digital twin applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115(1-2), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07490-9>
- Belman-Lopez, C., Jiménez-García, J., & Hernández-González, S. (2020). Análisis exhaustivo de los principios de diseño en el contexto de Industria 4.0. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 17(4), 432-447. <https://doi.org/10.4995/riai.2020.12579>
- Belman-López, C., Jiménez-García, J., Vázquez-Lopez, J., & Camarillo-Gómez, K. (2023). Diseño de una arquitectura para sistemas y aplicaciones en Industria 4.0 basada en computación en la nube y análisis de datos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 20(2), 137-149. <https://doi.org/10.4995/riai.2022.17791>
- Belman-López, C., Jiménez-García, J., Vázquez-López, J., Hernández-González, S., & Franco-Barrón, J. (2020). Elementos fundamentales del sistema de manufactura inteligente en la era de Industria 4.0. *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*, 7(4), 1-26.
- Caggiano, A. (2018). Cloud-based manufacturing process monitoring for smart diagnosis services. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 31(7), 612-623. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2018.1425552>
- Charro, A., & Schaefer, D. (2018). Cloud Manufacturing as a new type of Product-Service System. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 31(10), 1018-1033. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2018.1493234>
- Chen, T., & Tsai, H.-R. (2017). Ubiquitous manufacturing: Current practices, challenges, and opportunities. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 45, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2016.01.001>

- Chen, Y. (2017). Integrated and Intelligent Manufacturing: Perspectives and Enablers. *Engineering*, 3(5), 588–595. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.04.009>
- Crawford, M. (2018, 01 de julio). *How Industry 4.0 impacts engineering design*. ASME. <https://n9.cl/8ash9>
- Delgado, M., Porter, M. E., & Stern, S. (2014). *Defining clusters of related industries* (NBER Working Paper No. 20375). National Bureau of Economic Research. <http://www.nber.org/papers/w20375>
- Fatorachian, H., & Kazemi, H. (2018). A critical investigation of Industry 4.0 in manufacturing: theoretical operationalisation framework. *Production Planning & Control*, 29(8), 633–644. <https://doi.org/10.1080/09537287.2018.1424960>
- Götz, M., & Jankowska, B. (2017). Clusters and Industry 4.0 – do they fit together? *European Planning Studies*, 25(9), 1633–1653. <https://doi.org/10.1080/09654313.2017.1327037>
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016). *Design principles for industrie 4.0 scenarios*. 2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), 3928–3937. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.488>
- Hernández A., A., Figueroa F., V., & Jiménez G., J. (2018). *Propuesta de una metodología de diagnóstico para identificar los requerimientos tecnológicos de una empresa tradicional de manufactura para evolucionar a Industria 4.0*. Tecnológico Nacional de México en Celaya.
- Jazdi, N. (2014). *Cyber physical systems in the context of Industry 4.0*. 2014 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, Cluj-Napoca, Romania. <https://doi.org/10.1109/AQTR.2014.6857843>
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group*. Acatech – National Academy of Science and Engineering.
- Kusiak, A. (2018). Smart manufacturing. *International Journal of Production Research*, 56(1-2), 508–517. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1351644>
- Li, B.-H., Hou, B.-C., Yu, W.-T., Lu, X.-B., & Yang, C.-W. (2017). Applications of artificial intelligence in intelligent manufacturing: a review. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 18(1), 86–96. <https://doi.org/10.1631/FITEE.1601885>

- Maskell, P., & Lorenzen, M. (2003). *The cluster as market organization* (DRUID Working Paper No. 03-14). Danish Research Unit for Industrial Dynamics.
- Neugebauer, R., Hippmann, S., Leis, M., & Landherr, M. (2016). Industrie 4.0 - From the Perspective of Applied Research. *Procedia CIRP*, 57, 2-7. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.002>
- Pereira, A. C., & Romero, F. (2017). A review of the meanings and implications of the Industry 4.0 concept. *Procedia Manufacturing*, 13, 1206-1214. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.032>
- Plattform Industrie 4.0. (2019). *2030 Vision for Industrie 4.0 – Shaping digital ecosystems globally*.
- Porter, M. E. (2000). Location, competition, and economic development: Local clusters in a global economy. *Economic Development Quarterly*, 14(1), 15-34. <https://doi.org/10.1177/089124240001400105>
- PwC. (2016). *Industry 4.0: Building the digital enterprise*. h
- Qin, J., Liu, Y., & Grosvenor, R. (2016). A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and Beyond. *Procedia CIRP*, 52, 173-178. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.08.005>
- Radziwon, A., Bilberg, A., Bogers, M., & Madsen, E. S. (2014). The smart factory: Exploring adaptive and flexible manufacturing solutions. *Procedia Engineering*, 69, 1184–1190. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.108>
- Roblek, V., Meško, M., & Krapež, A. (2016). A complex view of Industry 4.0. *SAGE Open*, 6(2). <https://doi.org/10.1177/2158244016653987>
- Tian, W., & Zhao, Y. (2015). *Optimized cloud resource management and scheduling*. Morgan Kaufmann. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-13415-0>
- United States Environmental Protection Agency. (2017). *Sustainable manufacturing*. <https://n9.cl/oiuqh>
- Vaidya, S., Ambad, P., & Bhosle, S. (2018). Industry 4.0 – A glimpse. *Procedia Manufacturing*, 20, 233-238. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.034>
- Wang, J., Ma, Y., Zhang, L., Gao, R. X., & Wu, D. (2018). Deep learning for smart manufacturing: Methods and applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.01.003>

- Weyer, S., Schmitt, M., Ohmer, M., & Gorecky, D. (2015). Towards Industry 4.0 - Standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production systems. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 579-584. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.143>
- Wiesner, S., & Thoben, K.-D. (2017). Requirements for models, methods and tools supporting servitisation of products in manufacturing service ecosystems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 30(8), 1-12. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2015.1130243>
- 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>
- Yang, H., Kumara, S., Bukkapatnam, S. T., & Tsung, F. (2019). The Internet of Things for smart manufacturing: A review. *IIE Transactions*, 51(11), 1190-1216. <https://doi.org/10.1080/24725854.2018.1555383>
- Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., & Newman, S. T. (2017). Intelligent manufacturing in the context of Industry 4.0: A review. *Engineering*, 3(5), 616-630. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.015>
- Zhou, K., Liu, T., & Zhou, L. (2016). *Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges. 2016 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)*. <https://doi.org/10.1109/FSKD.2016.7603534>

Modern Analysis of Industry 4.0: Challenges and Opportunities

Análise Moderna sobre a Indústria 4.0: Seus Desafios e Oportunidades

Carlos Eduardo Belman López

Tecnológico Nacional de México en Celaya | Guanajuato | México

<https://orcid.org/0000-0003-1305-6778>

d1803018@itcelaya.edu.mx

carlosbelman@gmail.com

El Dr. Carlos Eduardo Belman López es miembro del SNII (nivel candidato) y posee como áreas de interés la producción inteligente, el gemelo digital, la inteligencia artificial y sus aplicaciones en áreas como la Agricultura de Precisión, la cadena de suministro, la Industria 5.0, entre otras. Ha logrado publicar 6 artículos JCR y 5 en revistas SECIHTI en estos temas.

Abstract

Production systems are evolving thanks to recent technological and innovative advances in manufacturing systems. Terms such as Industry 4.0 and smart manufacturing have become a priority and object of study for companies and research centers, without generally accepted consensus. As a result, it is difficult to design and develop solutions for smart manufacturing and Industry 4.0, at scientific or business level. For these reasons, the contribution of this document focuses on providing an in-depth analysis of Industry 4.0, its challenges, and opportunities. Through this analysis, future production systems and smart factories will be conceptualized based on solid principles, forming the basis for the design and development of smart manufacturing systems in the Industry 4.0 era.

Keywords: Industry 4.0, Smart Manufacturing, Cloud Manufacturing, Production Systems.

Resumo

Os sistemas de produção estão evoluindo graças aos recentes avanços tecnológicos e inovações nos sistemas de manufatura. Termos como Indústria 4.0 e Manufatura Inteligente tornaram-se prioridade e objeto de estudo para empresas e centros de pesquisa, sem que existam consensos geralmente aceitos. Como resultado, é difícil projetar e desenvolver soluções para a Indústria 4.0, tanto em nível científico quanto empresarial. Por esses motivos, a contribuição deste documento centra-se em fornecer uma análise aprofundada da Indústria 4.0, seus desafios e oportunidades. Por meio desta análise, os futuros sistemas de produção e a fábrica inteligente serão conceitualizados com base nos princípios corretos, servindo como base para o projeto e desenvolvimento do sistema de manufatura inteligente na era da Indústria 4.0.

Palavras-chave: Indústria 4.0; Manufatura Inteligente; Manufatura em Nuvem; Sistemas de Produção.

Capítulo 5

Ingeniería y cosmovisión: caral como modelo de ciudad resiliente

Humberto Andrés Álvarez Sepúlveda, Claudine Glenda Benoit Ríos

Resumen

Este capítulo desarrolla un análisis crítico sobre la construcción de Caral, considerada la civilización más antigua de América (3000-1800 a. C.). El ensayo se sustenta en una revisión de alcance de literatura especializada, bajo un enfoque cualitativo, humanista e interpretativo, con un diseño narrativo de tópico. A partir de esta base, se argumenta que Caral constituye no solo un referente histórico y arqueológico, sino también un modelo temprano de resiliencia y sostenibilidad, cuya vigencia resulta clave frente a los actuales desafíos urbanos y ambientales. En esta línea, la experiencia ingenieril y urbana de esta cultura permite comprender cómo el conocimiento técnico se articuló con la cosmovisión y la organización social, configurando un sistema capaz de garantizar estabilidad en un entorno adverso. En conclusión, recuperar este legado resulta indispensable para repensar en el presente la relación entre ingeniería, naturaleza y sociedad, y abrir caminos hacia modelos de desarrollo más sostenibles.

Palabras clave:
Caral;
Ingeniería andina;
Urbanismo prehispánico;
Sostenibilidad;
Cultura preincaica.

Álvarez Sepúlveda, H. A., & Benoit Ríos, C. G. (2025). Ingeniería y cosmovisión: caral como modelo de ciudad resiliente. En F. J. Manjarrés Arias. (Coord). *Convergencia de las Ingenierías: Enfoques Interdisciplinarios y Soluciones Innovadoras para los Retos Contemporáneos en Industria, Energía, Automatización y Producción (Volumen I)*. (pp. 104-117). Religación Press. <http://doi.org/10.46652/religacionpress.362.c658>



Introducción

La ciudad sagrada de Caral, situada en el valle de Supe, al norte de Lima, constituye la expresión material más antigua de la civilización en el continente americano, con una cronología que se remonta al 3000 a. C. (Shady, 2005). Reconocida por la UNESCO en 2009 como Patrimonio Cultural de la Humanidad, este asentamiento no solo destaca por su monumentalidad arquitectónica, sino también por el complejo conocimiento técnico que permitió su construcción y mantenimiento en un entorno árido y sísmicamente activo (UNESCO, 2009). El estudio de Caral ha transformado la comprensión de los orígenes de la civilización andina, demostrando que sociedades tempranas lograron elevados niveles de organización política, económica y tecnológica sin depender de la cerámica, la escritura o la metalurgia (Haas et al., 2004; Ortloff, 2022).

La planificación urbana de Caral revela un orden social jerárquico sustentado en espacios rituales, administrativos y residenciales, lo que refleja un pensamiento ingenieril y arquitectónico que integraba funcionalidad, simbolismo y sostenibilidad (Williams, 2006; Guerrero et al., 2023). Las técnicas constructivas, como el uso de bolsas de fibra vegetal rellenas de piedras (shicras), muestran un ingenio antisísmico que anticipa soluciones actuales para enfrentar los desastres naturales. Asimismo, la gestión hidráulica permitió la explotación agrícola en un valle árido, asegurando la producción de excedentes y la cohesión de una sociedad compleja.

Surgen, entonces, varias preguntas fundamentales: ¿cómo logró esta sociedad construir un modelo urbano tan avanzado sin las tecnologías consideradas “clásicas” de otras civilizaciones? ¿Qué papel jugó la ingeniería en la consolidación del poder político y religioso? ¿Hasta qué punto la sostenibilidad y la resiliencia ambiental fueron conscientes y deliberadas en su diseño? Este ensayo tiene como propósito examinar estas interrogantes desde cuatro dimensiones fundamentales: la historia y redescubrimiento del sitio, que permitió

redefinir los orígenes de la civilización andina; la planificación urbana y organización social, que expresan un modelo de jerarquización política y religiosa; las técnicas constructivas e innovación antisísmica, que revelan un temprano conocimiento ingenieril adaptado a un entorno sísmico; y la gestión hidráulica vinculada a la sostenibilidad ambiental, que aseguró excedentes agrícolas y cohesión social. A través de este análisis, se busca comprender a Caral no solo como un referente arqueológico de gran valor patrimonial, sino también como un modelo de resiliencia y sostenibilidad cuyo legado puede inspirar reflexiones y soluciones frente a los actuales desafíos de urbanización y crisis ambiental.

Metodológicamente, el ensayo se fundamenta en una revisión de alcance de literatura especializada sobre la civilización Caral, a partir de fuentes disponibles en bases de datos como Scopus, Scielo, Web of Science, Google Académico y Google Libros. El estudio se inscribe en un enfoque cualitativo, interpretativo y de diseño narrativo de tópico, bajo un paradigma humanista e inductivo, lo que permite analizar de manera rigurosa cómo los saberes ingenieriles se articularon con la organización social y la cosmovisión religiosa. Este marco posibilita releer a Caral no solo como un centro arqueológico, sino también como un modelo temprano de resiliencia y sostenibilidad, ofreciendo claves para comprender los orígenes de la civilización en América y sus aportes a la evolución histórica de este continente.

Historia y descubrimiento de Caral

La ciudad sagrada de Caral permaneció oculta durante milenios bajo las arenas del valle de Supe hasta ser redescubierta en la segunda mitad del siglo XX. Si bien los primeros reportes arqueológicos de la zona datan de la década de 1940, fue recién en la década de 1990 cuando las investigaciones sistemáticas encabezadas por Ruth Shady (2005), permitieron dimensionar la magnitud y relevancia del sitio. En 1994, los trabajos de prospección y excavación confirmaron que Caral no correspondía a un asentamiento aislado, sino a un

extenso complejo urbano que se erigía como testimonio de una de las sociedades más antiguas de América.

El hallazgo resultó especialmente significativo porque desplazó hacia atrás los límites cronológicos de la civilización andina. Hasta ese momento se atribuía a Chavín (1200 a. C.) el rol de cultura matriz en la región, pero los fechados radiocarbónicos de Caral revelaron una antigüedad cercana a los 3000 a. C., mostrando que la complejidad urbana en el continente se había iniciado mucho antes. Este descubrimiento obligó a replantear la narrativa tradicional sobre los orígenes de la civilización en los Andes, situando a Caral en diálogo con centros primigenios del Viejo Mundo como Mesopotamia, Egipto o el valle del Indo (Shady & Leyva, 2003; Shady, 2005; Guerrero et al., 2023).

La importancia del hallazgo trascendió el ámbito arqueológico para adquirir dimensiones patrimoniales y políticas. En 2009, la UNESCO declaró a Caral bajo la categoría de Patrimonio Cultural de la Humanidad, subrayando su valor excepcional y universal como cuna de una civilización que se desarrolló de manera autónoma. Desde entonces, el sitio se ha convertido en referente tanto para la investigación científica como para la revalorización de los saberes ancestrales andinos, inspirando proyectos de preservación y difusión cultural en el Perú y a nivel internacional (Pezo et al., 2022).

En este sentido, el descubrimiento de Caral permitió visibilizar un pasado largamente silenciado y abrió un campo de estudio que continúa revelando la sofisticación de sus logros políticos, sociales y tecnológicos. Su recuperación histórica constituye, por lo tanto, un punto de inflexión en la comprensión de la evolución civilizatoria en América.

Planificación urbana y organización social

Caral fue concebida como un centro urbano con un trazado altamente planificado, donde la disposición de plazas circulares hundidas, pirámides escalonadas y conjuntos residenciales revela una clara intencionalidad arquitectónica y social (Shady & Leyva, 2003; Shady, 2005). La presencia de seis pirámides principales, distribuidas en torno a plazas públicas, evidencia un diseño que respondía a funciones políticas, religiosas y económicas, más allá de simples necesidades habitacionales (Williams, 2006). En este sentido, Caral representa un caso excepcional en la arqueología andina temprana, ya que combina monumentalidad con un esquema organizativo capaz de articular la vida social y espiritual de sus habitantes.

La planificación urbana no solo estructuraba el espacio físico, sino que también legitimaba el poder de las élites. Las pirámides y plazas actuaban como escenarios rituales que reforzaban la cohesión ideológica, mientras que las áreas residenciales se organizaban jerárquicamente en torno a los espacios ceremoniales, reflejando diferencias de estatus social (Haas et al., 2004; Ortloff, 2022). Así, la ingeniería urbana se convierte en un instrumento de poder: el control del espacio material equivalía al control simbólico y político de la población.

Algunos investigadores como Moseley (2001); Ortloff (2022) y Guerrero et al. (2023), sugieren que el urbanismo de Caral fue resultado de una visión integradora entre lo natural y lo cultural, donde la geografía del valle se incorporaba como parte del ordenamiento urbano. Esta relación dialógica entre entorno y arquitectura plantea interrogantes sobre la racionalidad que guiaba a los planificadores: ¿se trataba de un modelo consciente de sostenibilidad territorial? ¿En qué medida la planificación urbana buscaba prevenir conflictos y garantizar la cohesión social en una sociedad sin escritura ni ejércitos permanentes?

En este sentido, el urbanismo de Caral constituye no solo un logro técnico, sino también un reflejo de la complejidad social y cultural alcanzada por esta civilización. La disposición espacial del asentamiento evidencia un temprano ejercicio de ingeniería social, donde la arquitectura funcionaba como mediación entre el poder y la comunidad, asegurando orden, estabilidad y proyección hacia el futuro. Los espacios, cuidadosamente planificados, anticipan patrones de organización urbana que serían retomados, reelaborados y ampliados por sociedades andinas posteriores. De este modo, Caral se erige tanto en una de las primeras expresiones de urbanismo planificado en América como en un ejemplo de cómo la articulación entre naturaleza y cultura podía convertirse en pilar de sostenibilidad y resiliencia comunitaria.

Técnicas constructivas e innovación antisísmica

La cultura Caral desarrolló notables avances en ingeniería constructiva que permitieron edificar un complejo urbano monumental en una región sísmicamente activa. Una de las innovaciones más destacadas fue el uso del shicra, las cuales eran bolsas de fibra vegetal rellenas con piedras, que se colocaban en el interior de los muros y las plataformas como relleno flexible. Este sistema funcionaba como un amortiguador frente a los movimientos telúricos, distribuyendo la energía y reduciendo el riesgo de colapso estructural. La eficacia de esta técnica ha sido reconocida como un antecedente de soluciones actuales en la ingeniería antisísmica.

El empleo del shicra no se limitaba a una función práctica; también reflejaba un conocimiento empírico acumulado por generaciones, producto de la observación de fenómenos naturales. Este saber permitió a los constructores de Caral garantizar la estabilidad de pirámides escalonadas y plazas hundidas que han perdurado por más de cuatro milenios (Shady, 2005; Ortloff, 2022). Además, el uso de materiales locales como piedra, barro y fibras vegetales evidencia una estrategia de sostenibilidad que integraba disponibilidad de recursos

y funcionalidad técnica (Burger & Rosenswig, 2012; Guerrero et al., 2023).

La innovación antisísmica plantea preguntas clave: ¿hasta qué punto este conocimiento fue producto de una tradición oral transmitida dentro de comunidades de constructores? ¿Se trató de una innovación consciente orientada a la prevención de riesgos o de una práctica que emergió por ensayo y error? Estas interrogantes abren la posibilidad de comprender Caral como un centro religioso y político, y también como un laboratorio de soluciones ingenieriles adaptadas al entorno.

En suma, las técnicas constructivas de Caral muestran una relación estrecha entre conocimiento técnico, adaptación ambiental y proyección a largo plazo. La perdurabilidad de sus edificaciones confirma que la ingeniería sirvió para legitimar el poder político y religioso y asegurar la sostenibilidad material de la civilización. Este doble propósito —simbólico y práctico— constituye una de las claves de su vigencia: la arquitectura no solo edificaba templos y plazas, sino que también levantaba las bases de un sistema resiliente frente a los riesgos naturales. Así, Caral puede entenderse como un antecedente de lo que hoy llamaríamos ingeniería sostenible, donde la técnica no busca dominar el entorno, sino coexistir con él, garantizando tanto la estabilidad estructural como la continuidad social en un contexto de alta vulnerabilidad ambiental.

Gestión hidráulica y sostenibilidad ambiental

Uno de los pilares de la supervivencia y prosperidad de la cultura Caral fue el manejo eficiente del agua en un entorno caracterizado por la aridez y la variabilidad climática. La evidencia arqueológica muestra la construcción de canales de irrigación que distribuían el recurso hacia zonas de cultivo, permitiendo el desarrollo de una agricultura diversificada basada en productos como el algodón, el frijol, la calabaza y el ají (Haas et al., 2004; Shady, 2006; Pezo et

al., 2022). Este sistema hidráulico garantizó excedentes agrícolas que sostuvieron la compleja organización social y facilitaron el intercambio con comunidades de la costa y la sierra (Ortloff, 2022; Guerrero et al., 2023).

La ubicación estratégica de la ciudad en una terraza aluvial elevada evitaba la exposición directa a inundaciones estacionales, mientras que la fertilidad del valle de Supe era aprovechada mediante un uso planificado de los suelos (Williams, 2006; Yseki et al., 2023). Estos conocimientos reflejan un pensamiento ingenieril orientado a la sostenibilidad, donde la gestión de los recursos naturales estaba intrínsecamente vinculada a la estabilidad política y religiosa. Como señala Moseley (2001), las sociedades andinas tempranas desarrollaron una “economía de riesgo compartido”, en la cual la tecnología hidráulica garantizaba la subsistencia y cohesionaba a las comunidades mediante la cooperación en obras públicas.

La gestión del agua en Caral plantea varias preguntas: ¿podemos interpretar estas prácticas como una forma temprana de ingeniería ambiental? ¿Hasta qué punto estas estrategias de manejo de recursos pueden inspirar políticas actuales frente al cambio climático y la desertificación? La experiencia de Caral invita a reflexionar sobre la necesidad de modelos de desarrollo que integren conocimiento técnico, respeto por el entorno y organización social colaborativa.

En la línea prevista, el sistema hidráulico de Caral demuestra que el éxito de una civilización no dependía únicamente de la monumentalidad arquitectónica, sino de la capacidad de articular sostenibilidad ambiental con estructuras de poder y cohesión social. Este legado constituye una lección vigente para la gestión actual de recursos hídricos en contextos de creciente crisis climática. Al observar cómo una sociedad sin escritura ni ejércitos permanentes logró sostenerse gracias a la cooperación en torno al agua, se pone en evidencia que los modelos de desarrollo más estables no son necesariamente los más complejos tecnológicamente, sino aquellos que equilibran conocimiento técnico, ética comunitaria y respeto por

el entorno natural. La experiencia de Caral, en este sentido, anticipa debates actuales sobre justicia ambiental y gestión equitativa de recursos, y ofrece claves para repensar la gobernanza del agua en escenarios marcados por la escasez y el riesgo climático global.

Conclusión

La construcción de Caral constituye un hito fundacional en la historia de la ingeniería prehispánica y del urbanismo mundial. Sus innovaciones —planificación urbana jerárquica, técnicas antisísmicas mediante el uso del shicra y una gestión hidráulica eficiente— revelan un conocimiento científico y técnico que se gestó mucho antes de la consolidación de los grandes imperios andinos. En este sentido, Caral demuestra que la ciencia y la tecnología no fueron monopolio de Mesopotamia, Egipto o China, sino que también florecieron de manera autónoma en América, bajo formas adaptadas a sus contextos ambientales y culturales.

El legado de Caral también invita a cuestionar los relatos tradicionales que han invisibilizado los aportes de las sociedades precolombinas al patrimonio universal de la humanidad. El estudio de estas civilizaciones tempranas aporta al conocimiento histórico y amplía la comprensión de la diversidad de caminos que puede tomar la innovación tecnológica. Reconocer a Caral como un centro de saber ingenieril implica reconocer la existencia de epistemologías propias, en las que la técnica estuvo profundamente entrelazada con lo ritual, lo político y lo comunitario.

Asimismo, la experiencia de Caral plantea lecciones valiosas para los desafíos actuales. La resiliencia antisísmica de sus construcciones y la sostenibilidad de su gestión ambiental constituyen ejemplos de adaptación exitosa frente a entornos adversos. En un momento en que el cambio climático, la urbanización acelerada y la degradación de ecosistemas ponen en tensión la supervivencia global, mirar hacia Caral permite replantear la relación entre técnica y naturaleza.

En consecuencia, Caral no es solo un testimonio del pasado, sino un faro para el presente y el futuro. Estudiar su legado nos recuerda que la ingeniería y el urbanismo, cuando se conciben en armonía con el medio ambiente y con un sentido comunitario, pueden convertirse en herramientas poderosas para la construcción de sociedades más sostenibles, justas y resilientes.

En cuanto a las proyecciones de este ensayo, resulta fundamental seguir investigando cómo los conocimientos ingenieriles de Caral se transmitieron y transformaron en otras culturas andinas posteriores, y de qué manera estos saberes pueden dialogar con la ingeniería actual. El estudio de esta continuidad histórica permitiría comprender mejor los procesos de transferencia cultural y las formas en que el conocimiento ancestral se adaptó a nuevos contextos, conservando principios de sostenibilidad y resiliencia que siguen siendo relevantes en el presente.

Una primera línea de investigación se orienta hacia estudios comparativos entre Caral y otros centros urbanos tempranos del mundo, con el propósito de profundizar en las convergencias y singularidades de sus modelos constructivos. Este enfoque permitiría situar a Caral en un marco global, evidenciando cómo diferentes sociedades afrontaron desafíos comunes en torno a la gestión del espacio, los riesgos naturales y la organización social.

Un segundo eje apunta a investigaciones interdisciplinarias que integren arqueología, ingeniería y ciencias ambientales, con el fin de comprender de manera más integral las técnicas de sostenibilidad y resiliencia aplicadas en la ciudad. La combinación de métodos provenientes de distintos campos del saber no solo enriquecería la interpretación histórica, sino que también abriría posibilidades para vincular el pasado con problemáticas recientes.

Finalmente, una tercera proyección está relacionada con las aplicaciones contemporáneas de la ingeniería ancestral, explorando cómo el conocimiento de Caral puede inspirar soluciones en la

gestión del agua, el diseño urbano y la mitigación de riesgos sísmicos en el presente. En este sentido, la ciudad sagrada se convierte en un referente vivo que puede orientar políticas públicas y proyectos de innovación tecnológica orientados al desarrollo sostenible.

Referencia

- Burger, R., & Rosenswig, R., (2012). *Early New World monumentality*. University Press of Florida.
- Guerrero, M., Quito, C., Veliz, J., & Abanto, C. (2023). Aproximaciones al Horizonte Tardío en los valles de Supe y Huaura: Caral, Chimú Cápac y Acaray. *Arqueología y Sociedad*, (38), 155-181. <https://doi.org/10.15381/arqueolsoc.2023n38.e24899>
- Haas, J., Creamer, W., & Ruiz, A. (2004). Dating the Late Archaic occupation of the Norte Chico region in Peru. *Nature*, 432(7020), 1020-1023. <https://doi.org/10.1038/nature03146>
- Moseley, M., (2001). *The Incas and their ancestors: The archaeology of Peru*. Thames & Hudson.
- Ortloff, C., (2022). Caral, South America's Oldest City (2600-1600 BC): ENSO Environmental changes influencing the late archaic period site on the north central coast of Peru. *Water*, 14(9), 1403. <https://doi.org/10.3390/w14091403>
- Pezo, L., Machacuay, M., Novoa, P., Peralta, R., Mayer, E., Eggers, S., & Shady, R. (2022). The diet at the onset of the Andean Civilization: New stable isotope data from Caral and Áspero, North-Central Coast of Peru. *American Journal of Biological Anthropology*, 177(3), 402-424. <https://doi.org/10.1002/ajpa.24445>
- Shady, R., & Leyva, C., (2003). *La ciudad sagrada de Caral-Supe: Los orígenes de la civilización andina y la formación del Estado prístino en el antiguo*. Instituto Nacional de Cultura.
- Shady, R. (2005). Caral-Supe y su entorno natural y social en los orígenes de la civilización. *Investigaciones Sociales*, 9(14), 1-32.
- UNESCO (2009). Ciudad Sagrada de Caral-Supe. <https://whc.unesco.org/es/list/1269>
- Yseki, M., Pezo, L., Machacuay, M., Novoa, P., & Shady, R. (2023). Analysis of starch grains trapped in human dental calculus in Áspero, Peru during the Initial Formative Period (3000-1800 BCE). *Scientific Reports*, 13(1), 14143. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41015-6>
- Williams, C., (2006). *Arquitectura y urbanismo en el Perú antiguo*. Fondo General del Perú.

Engineering and worldview: Caral as a resilient city model

Engenharia e Cosmovisão: Caral como Modelo de Cidade Resiliente

Humberto Andrés Álvarez Sepúlveda

Universidad Católica de la Santísima Concepción | Concepción | Chile

<https://orcid.org/0000-0001-5729-3404>

halvarez@ucsc.cl

Académico de la Universidad Católica de la Santísima Concepción (Chile). Doctor en Sociedad y Cultura por la Universidad de Barcelona (España). Autor de diversos capítulos de libros y artículos sobre educación histórica publicados en revistas científicas indexadas a WoS, Scopus y Scielo.

Claudine Glenda Benoit Ríos

Universidad Católica de la Santísima Concepción | Concepción | Chile

<https://orcid.org/0000-0002-1791-2212>

cbenoit@ucsc.cl

Académica del Departamento de Didáctica de la Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción (Chile). Doctora en Lingüística, por la Universidad de Concepción. Investigadora en didáctica de la comprensión y producción del lenguaje, y estrategias colaborativas durante el procesamiento.

Abstract

This chapter presents a critical analysis of the construction of Caral, considered the oldest civilization in the Americas (3000–1800 BC). The essay is based on a scoping review of specialized literature, using a qualitative, humanistic, and interpretive approach, with a topical narrative design. Based on this, it is argued that Caral constitutes not only a historical and archaeological reference point but also an early model of resilience and sustainability, whose relevance is key to current urban and environmental challenges. Along these lines, the engineering and urban experience of this culture allows us to understand how technical knowledge was articulated with worldview and social organization, shaping a system capable of guaranteeing stability in an adverse environment. In conclusion, recovering this legacy is essential to rethinking the relationship between engineering, nature, and society in the present and paving the way for more sustainable development models.

Keywords: Caral; Andean engineering; Pre-Hispanic urbanism; Sustainability; Pre-Inca culture.

Resumo

Este capítulo desenvolve uma análise crítica sobre a construção de Caral, considerada a civilização mais antiga da América (3000-1800 a.C.). O ensaio sustenta-se em uma revisão de escopo de literatura especializada, sob uma abordagem qualitativa, humanista e interpretativa, com um delineamento narrativo de tópico. A partir desta base, argumenta-se que Caral constitui não apenas uma referência histórica e arqueológica, mas também um modelo precoce de resiliência e sustentabilidade, cuja vigência é chave frente aos atuais desafios urbanos e ambientais. Nesta linha, a experiência de engenharia e urbana desta cultura permite compreender como o conhecimento técnico se articulou com a cosmovisão e a organização social, configurando um sistema capaz de garantir estabilidade em um ambiente adverso. Em conclusão, recuperar este legado é indispensável para

repensar, no presente, a relação entre engenharia, natureza e sociedade, e abrir caminhos para modelos de desenvolvimento mais sustentáveis.

Palavras-chave: Caral; Engenharia Andina; Urbanismo Pré-Hispânico; Sustentabilidade; Cultura Pré-Inca.



Religación
Press
Ideas desde el Sur Global



Religación
Press

ISBN: 978-9942-561-87-9

