

# Integración de pilares de la Industria 4.0 en parques de bioenergía de la industria azucarera

Marlen Lorenzo-Maiquez\*, Raúl Sabadí-Díaz

Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA)  
Vía Blanca, No. 804 y Carretera Central. La Habana. Cuba

\* [marlen.lorenzo@icidca.azcuba.cu](mailto:marlen.lorenzo@icidca.azcuba.cu)

## RESUMEN

**Introducción.** Un parque de bioenergía, en la industria azucarera, es un complejo productivo que permite generar diferentes formas de energía. La Industria 4.0 se refiere a la digitalización e interconexión sostenible de procesos industriales optimizados. La integración de los conceptos de la Industria 4.0 en un parque de bioenergía azucarero puede transformarlo de un complejo tradicional en una Biorrefinería Inteligente.

**Objetivo.** Analizar los elementos de la Industria 4.0 que puedan favorecer la sostenibilidad de los parques de bioenergía en la industria de derivados de la caña en Cuba.

**Materiales y métodos.** Se realiza un análisis de los elementos de la Industria 4.0, que puedan ser considerados para su integración en un parque de bioenergía y se proponen cuáles deben integrarlo.

**Resultados y discusión.** La Industria 4.0 implica una nueva manera de producir, mediante la adopción de tecnologías enfocadas en la interconectividad, la automatización y los datos en tiempo real. La implementación de sus nueve pilares en los parques bioenergéticos puede acometerse paulatinamente, con el uso de la automatización existente, los recursos humanos altamente calificados y un financiamiento que permita ejecutar los objetivos después de un diagnóstico técnico–económico.

**Conclusiones.** La implementación de la Industria 4.0 en un parque bioenergético requiere de financiamiento que permita la transición digital requerida. Un parque bioenergético inteligente garantiza la máxima eficiencia operativa en armonía con el medioambiente.

**Palabras clave.** Industria 4.0, central 4.0, biorefinería inteligente, bioenergía, parques de bioenergía, parques bioenergéticos, industria azucarera, industria de los derivados, caña de azúcar, parques azucareros de bioenergía, economía circular.

## ABSTRACT

**Introduction.** A bioenergy park in the sugar industry is a production complex that generates different forms of energy. Industry 4.0 refers to the digitalization and sustainable interconnection of optimized industrial processes. Integrating Industry 4.0 concepts into a sugar bioenergy park can transform it from a traditional complex into a Smart Biorefinery.

**Objective.** To analyze the elements of Industry 4.0 that can promote the sustainability of bioenergy parks in Cuba's sugarcane derivatives industry.

**Materials and methods.** An analysis was conducted of the Industry 4.0 elements that could be considered for integration into a bioenergy park, and a proposal was made regarding which elements should be included.

**Results and discussion.** Industry 4.0 implies a new way of producing through the adoption of technologies focused on interconnectivity, automation, and real-time data. The implementation of its nine pillars in bioenergy parks could be undertaken gradually using existing automation, highly qualified human resources, and financing that allows for the achievement of the objectives following a technical and economic assessment.

**Conclusions.** Implementing Industry 4.0 in a bioenergy park requires financing that enables the necessary digital transition. A smart bioenergy park guarantees maximum operational efficiency in harmony with the environment.

**Keywords.** Industry 4.0, bioenergy, sugarcane, circular economy.

## INTRODUCCIÓN

Un parque de bioenergía es un sistema industrial, que aprovecha residuos para generar energía; en la industria azucarera es un complejo productivo que permite generar diferentes formas de energía (calor, electricidad, combustibles, etc.), a partir de fuentes renovables (1). Generalmente, es un central azucarero con otras plantas industriales vinculadas, como destilerías de alcohol y plantas de generación de biogás. En Cuba se considera, de todos los escenarios posibles, por ser los más factibles desde el punto de vista técnico-económico: la obtención de energía eléctrica, mediante el bagazo; la producción de biogás para generar energía eléctrica o para la cocción de alimentos y la obtención de alcohol absoluto como biocombustible.

La Industria 4.0 se refiere a la digitalización e interconexión de procesos industriales, que permite la integración horizontal y vertical, mediante la conexión de toda la cadena de valor y optimizar los procesos de forma sostenible (2). La sostenibilidad es posible ya que estas tecnologías pueden ayudar a reducir emisiones y mejorar la eficiencia energética, con energía gestionada inteligentemente.

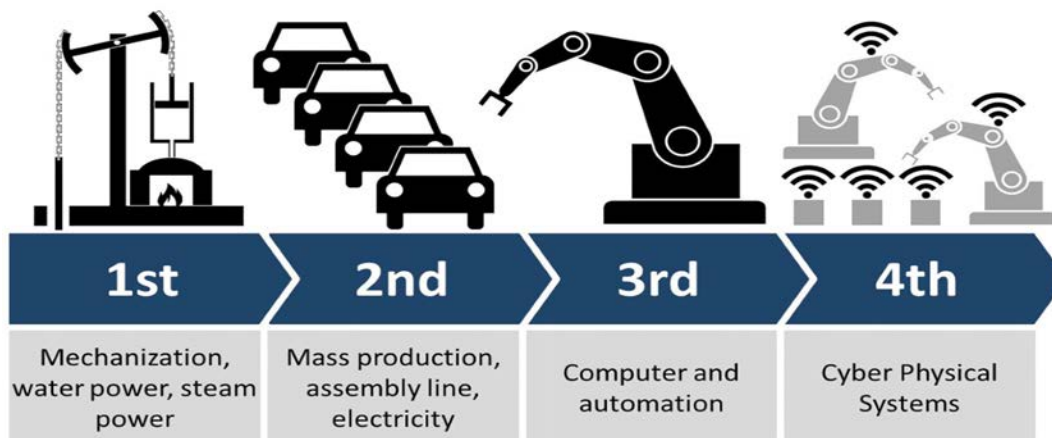
La integración de los conceptos de la Industria 4.0 en un parque azucarero de bioenergía puede transformar un complejo tradicional en una Biorrefinería Inteligente o Central 4.0 y maximizar su eficiencia, sostenibilidad y rentabilidad.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se revisaron los aspectos esenciales del concepto de Industria 4.0, también se revisaron aspectos sobre los parques de bioenergía en la agroindustria de la caña de azúcar. Se analizó como incorporar esos elementos de Industria 4.0 en estos parques de bioenergía, para mejorar su eficiencia como biorrefinerías de energía con conceptos de economía circular.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El concepto de Industria 4.0, creado por Klaus Schwab (2), refiere una nueva manera de producir, mediante la adopción de tecnologías 4.0; es decir, de soluciones enfocadas en la interconectividad, la automatización y los datos en tiempo real. La propuesta sostiene la innovación productiva en esta etapa y se caracteriza por la fusión de tecnologías y la desintegración de las fronteras entre las esferas física, digital y biológica. Esta cuarta etapa de la revolución industrial está marcada por avances tecnológicos emergentes en una serie de campos, que incluyen: robótica, inteligencia artificial, cadena de bloques, nanotecnología, computación cuántica, biotecnología, internet de las cosas, impresión 3D y vehículos autónomos (3). No solo abarca la producción de bienes y/o servicios de la empresa, sino toda la cadena de valor, dado que reconfigura tanto los procesos de elaboración y las prestaciones de productos, como la gestión empresarial, las relaciones entre clientes y proveedores; y, en un sentido más amplio, los modelos de negocios (figura 1).



**Figura 1.** Desarrollo industrial en el tiempo (4).

Las oportunidades de crecimiento y productividad son sumamente atractivas; pero, también es cierto, que todo esto implica un mundo virtualmente infinito y en constante expansión de nuevas tecnologías: un nuevo sensor, un nuevo software analítico o una nueva máquina herramienta. El panorama de la Industria 4.0 cambia de un día para otro y se debe estar preparado para adaptarse, ágilmente, a las novedades cambiantes (3-5, 6).

Para lograr la transformación a una industria 4.0, existen nueve pilares que la caracterizan:

1. Big data e Inteligencia artificial

El llamado Internet del comportamiento consiste en la captura, recopilación y análisis de una gran cantidad de datos de diferentes fuentes, para apoyar los procesos de toma de decisiones; a través del cruzado de datos históricos y actuales de softwares con algoritmos basados en la Inteligencia artificial y en el Aprendizaje automático pueden detectarse patrones de comportamiento predictivos.

2. Robots autónomos

Podrán interactuar entre sí y con las personas y aprender de estas interacciones.

3. Simulaciones

El uso de sistemas de simulación se extiende a todos los procesos de producción, para procesar datos recopilados en tiempo real en modelos virtuales, con el fin de probar y optimizar máquinas, productos y procesos y anticipar problemas antes de que ocurran.

4. Integración de los sistemas de información

La integración de datos y sistemas a lo largo de toda la cadena de valor garantiza que todos los departamentos y funciones de la empresa formen parte de un único sistema integrado.

5. Internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés)

Es el conjunto de tecnologías y sensores que permitirán que los objetos de la fábrica tanto los dispositivos como los productos terminados se comuniquen e interactúen entre sí y con las personas, a través de la red. De esta forma, el análisis de datos y la toma de decisiones se descentralizan y posibilitan respuestas en tiempo real.

6. Ciberseguridad

Con el aumento de la conectividad entre dispositivos aumentará la necesidad de proteger los sistemas de producción de la fábrica y la red de TI de posibles amenazas, a través de programas de ciberseguridad.

7. Nube (Cloud)

Utilización de aplicaciones basadas en la nube, que incluye aplicaciones para el control y la gestión de la producción.

8. Fabricación aditiva

La impresión 3D se utiliza para producir lotes de productos altamente personalizados.

#### 9. Realidad aumentada

Son sistemas que, a través de dispositivos móviles: de visión (por ejemplo, lentes de proyección en la retina), de escucha (auriculares) o manipulación (guantes), agregan información multimedia a la realidad percibida por las personas. Estas tecnologías se utilizarán para proporcionar información en tiempo real, para mejorar los procesos de trabajo y la toma de decisiones.

¿Qué elementos se pueden aplicar, de la Industria 4.0, en un parque bioenergético de la industria azucarera? Es necesario tener en cuenta varios factores, por ejemplo (7, 8):

- bien o servicio que tu empresa provee: energía limpia, de fuentes renovables,
- modelo de negocios que adopta,
- grado de automatización de procesos: se requiere de un alto nivel de automatización y de que todos los datos generados sean analizados de forma predictiva, para poder tomar las acciones anticipatorias a cambios que puedan afectar la producción y su entrega a los clientes,
- adaptación de la producción a las necesidades del personal de la empresa,
- nivel de interacción que existe entre proveedores y clientes.

Los beneficios de adaptar una empresa a la Industria 4.0 son:

- mejora la productividad y eficiencia en el uso de recursos,
- genera información útil para la toma de decisiones en tiempo real y la planificación a mediano y largo plazo,
- permite la creación de nuevos productos y servicios que mejoren la experiencia de los usuarios, a partir de esta información recolectada,
- integra de manera eficiente a todos los actores que intervienen en el proceso de fabricación.

Los pilares de la Industria 4.0 en un parque bioenergético pueden implementarse como se muestra:

#### 1. Internet de las cosas (IoT) y Sensores inteligentes

Constituyen la columna vertebral de la transformación. Se debe partir de la integración de todo el sistema, con la verificación de la calidad de la caña semilla en el momento de la siembra y el control en el campo, durante todo el tiempo del cultivo, hasta el momento del corte. Para eso se puede implementar la agricultura de precisión, con una red de sensores inteligentes en el terreno, que informen de los nutrientes y la humedad existentes en el suelo, para optimizar el cultivo de caña; y drones con cámaras multiespectrales, que monitorizan el estado de la caña; e, incluso, que detecten a tiempo posibles enfermedades. Esto permite riego, fertilización y cosecha optimizados, que aseguren la mejor materia prima para el proceso.

En las plantas de producción se prevé el uso de sensores en tiempo real, que monitoricen las variables fundamentales del proceso en cada etapa, por ejemplo:

- molienda: temperatura del agua de imbibición, presión en los molinos, flotación de las mazas,
- generación de vapor: flujo de bagazo hacia las calderas, temperatura y presión, composición de los gases de combustión; y en la producción de energía, algoritmos predictivos, para gestionar la combustión del bagazo. Control de la calidad, flujo y temperatura del agua a la caldera y de vapor a las turbinas,
- generación eléctrica: eficiencia de las turbinas, vibraciones, temperatura del aceite y velocidad de rotación,
- fermentación y destilación: pH, temperatura, concentración de azúcares y etanol,

- alcohol absoluto: temperatura en diversas partes del proceso, control lógico secuencial de los tamices moleculares y densidad, como medida del grado alcohólico del alcohol producido,
- biogás: composición de las vinazas mediante análisis en línea, temperatura de los reactores, flujos de entrada de vinazas y de salida de biogás y análisis de su composición.

## 2. Big data y Análisis de datos

Consiste en el procesamiento, con el uso de la inteligencia artificial, de esta gran cantidad de datos generados. Se puede apreciar su utilidad en:

- mantenimiento predictivo: en lugar de cambiar una pieza cada cierto tiempo establecido, los algoritmos analizan las vibraciones y temperatura de una turbina para predecir cuándo fallará. Esto reduce el tiempo de inactividad y los costos de reparación;
- optimización de procesos: los modelos analíticos pueden encontrar la combinación perfecta de parámetros (relación bagazo/aire, temperatura de fermentación, etc.) para maximizar la producción de energía o etanol y minimizar el consumo de recursos y las emisiones;
- logística inteligente: analiza datos de tráfico, clima y estado de la cosecha para optimizar las rutas de los camiones que transportan la caña y, así, reducir el tiempo y el combustible.

## 3. Inteligencia artificial (IA) y aprendizaje automático

Lleva el análisis un paso más allá, hacia la toma de decisiones autónomas:

- control autónomo de calderas: un sistema de IA puede ajustar en tiempo real la alimentación de bagazo y el aire de combustión, para mantener la máxima eficiencia, incluso con variaciones en la humedad del bagazo;
- predicción de cosecha: modelos que relacionan datos históricos, climáticos y de sensores para predecir, con gran exactitud, el volumen y la calidad de la caña que llegará a la fábrica y, así, permitir una planificación óptima de la molienda y la generación de energía;
- detección de anomalías: la IA puede identificar patrones sutiles que indican el inicio de un problema (una fermentación lenta, una fuga incipiente), antes de que se conviertan en una parada costosa.

## 4. Gemelo digital (Digital twin)

Es uno de los conceptos más potentes para un parque de bioenergía, constituye una réplica virtual y en tiempo real de todo el complejo (desde el campo hasta la subestación eléctrica, desde la destilería hasta el cliente de combustible verde). Por ejemplo, los operadores pueden simular escenarios en el gemelo digital: ¿Qué pasa si se aumenta un 10 % la producción de etanol? ¿Cómo afecta a la generación eléctrica? ¿Cuál es el impacto de recibir caña con un 5 % más de fibra? Esto permite tomar decisiones y conocer, anticipadamente, las consecuencias sin arriesgar la planta física.

## 5. Realidad aumentada (RA) y realidad virtual (RV)

Su utilización se aprecia en la capacitación del personal y en el diseño y planificación de la producción. Un técnico novato puede usar gafas de RA para ver instrucciones superpuestas sobre una válvula real, o un experto remoto puede guiar a un operario local y marcar componentes en su campo de visión. Usar RA para “caminar” por una nueva planta de tratamiento de vinazas antes de que se construya, permitiría identificar potenciales problemas de diseño.

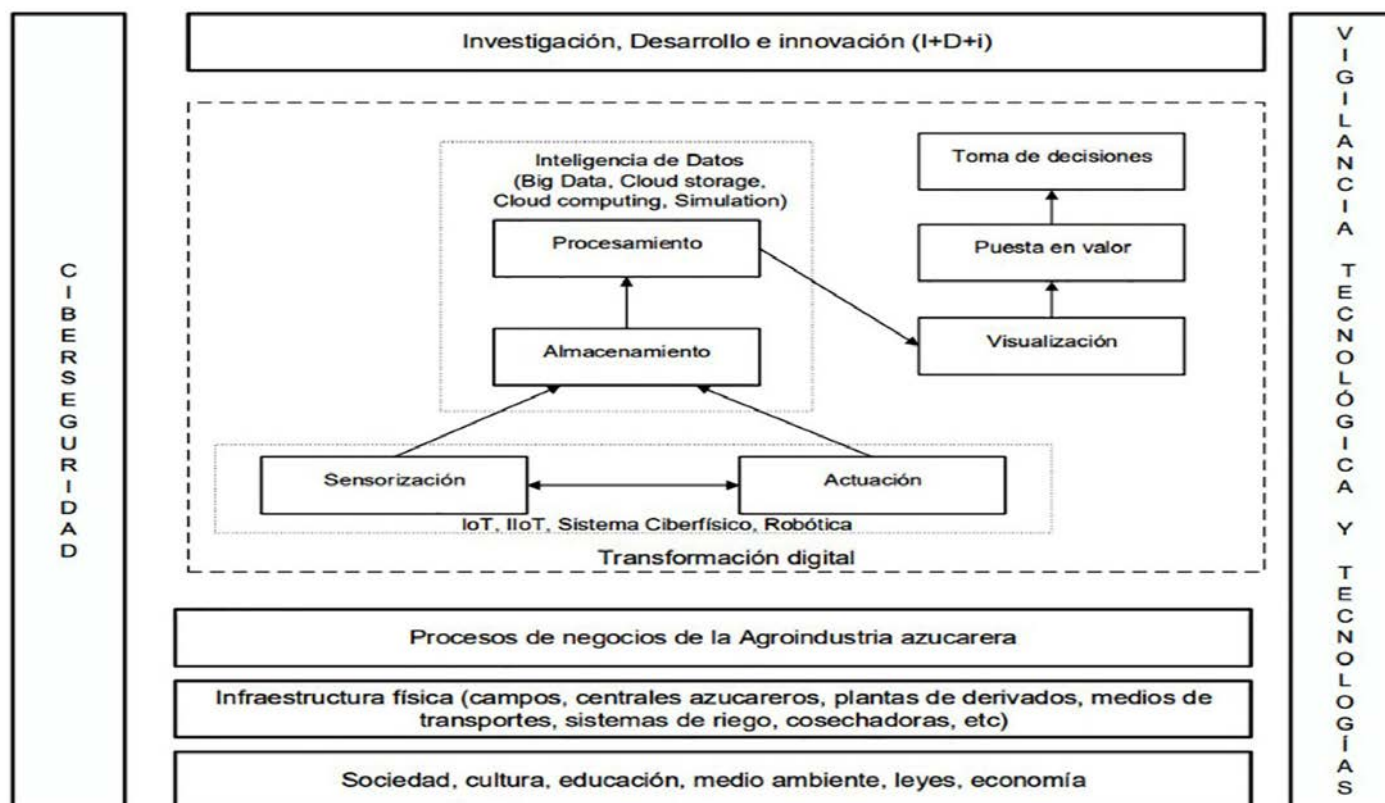
## 6. Ciberseguridad industrial

Con tanta conectividad, proteger la infraestructura crítica es primordial. Se necesitan “cortafuegos” (firewalls) y protocolos de seguridad robustos para evitar ciberataques, que podrían detener la producción o dañar equipos. Mientras mayor cantidad de datos sea procesada en la nube, mayor seguridad se requiere para proteger la información, su análisis y para tomar de decisiones.

## 7. Integración horizontal y vertical (cadena de valor conectada)

- Integración vertical: se pueden conectar todos los niveles del parque, como la gestión empresarial (ERP, por sus siglas en inglés), el control de procesos (MES, por sus siglas en inglés) y la planta física (sensores/actuadores). Por ejemplo, la orden de producir más etanol en el ERP se traduce, automáticamente, en ajustes en los sistemas de control.
- Integración horizontal: se puede conectar el parque con sus proveedores (agricultores, fabricantes de equipos) y clientes (la red eléctrica, distribuidores de combustibles). Por ejemplo, el parque puede vender electricidad de forma dinámica a la red cuando el precio sea alto y ajustar, automáticamente, su propia generación.

En la figura 2 se representa el modelo propuesto.



**Figura 2.** Modelo propuesto para la transición a la Industria 4.0 (elaboración propia).

Los beneficios que se obtienen de la utilización de una Industria 4.0 en un parque bioenergético son:

- máxima eficiencia: optimización de recursos (agua, bagazo, combustibles),
- sostenibilidad: reducción de emisiones y residuos,
- confianza y disponibilidad: menos paradas por roturas y mantenimiento no planificado,
- flexibilidad: capacidad de adaptarse a cambios en la materia prima y en el mercado,
- nuevos modelos de negocio: venta de servicios de energía gestionada, datos analíticos para agricultores, etc.

En resumen, la Industria 4.0 permite que un parque azucarero de bioenergía deje de ser un conjunto de plantas que funcionan de forma semindependiente, para convertirse en un ecosistema

ciberfísico integrado, inteligente y que puede optimizarse a sí mismo. Es una manifestación concreta y avanzada para la transición digital en el ámbito industrial, aunque no es el único resultado posible de esta, pero sí el más relevante para su contexto industrial específico. Son conceptos simbióticos: sin transición digital no hay base para la Industria 4.0, y la Industria 4.0 es la forma más sofisticada que puede tomar esta transición en el sector industrial. La Industria 4.0 aprovecha los cimientos de la transición digital para crear una fábrica inteligente e interconectada; por lo que, para lograr la Industria 4.0, primero se debe pasar por una sólida transición digital.

Implementar la Industria 4.0 es el objetivo estratégico final: convertir el parque bioenergético en un ecosistema inteligente. Para llegar a eso, la empresa debe emprender, inevitablemente, una transición digital robusta, que sienta las bases de datos, conectividad y cultura necesarios; todo ello implica inversiones para mejorar la tecnología, porque las mediciones inteligentes y análisis avanzados de la información obtenida no pueden garantizar los resultados esperados si no se sustentan sobre una tecnología que la soporte y sea capaz de realizar los cambios propuestos en el tiempo esperado. Además de garantizar una continua capacitación del personal, para que sea capaz de asimilar esta nueva forma de trabajar; pues, indudablemente, se requiere de un nivel superior de conocimientos.

Sin duda, lo expresado hasta aquí parece algo demasiado futurista e ideal, sobre todo para la agroindustria cubana de la caña; pero es bueno conocer el alcance y beneficios de la Industria 4.0 y comenzar a dar pasos para, paulatinamente, avanzar en ese propósito. Por ello, se sugieren algunas recomendaciones prácticas para lograr el objetivo de implementar elementos de la Industria 4.0:

- avanzar en la transición digital del sector, evaluar situación actual y definir objetivos por etapas de desarrollo (9, 10);
- realizar un diagnóstico técnico - económico: identificar las áreas con mayor potencial de mejora, cuantificar el ahorro/ganancia posible y elaborar un proyecto de desarrollo e innovación;
- buscar alianzas estratégicas: aliarse con universidades, centros de investigación y empresas de automatización. Esto fortalece la propuesta y demuestra capacidades de implementación;
- acercarse a financistas: presentar el proyecto como una inversión estratégica en sostenibilidad y resiliencia, que generará beneficios económicos, sociales y ambientales.

## CONCLUSIONES

1. La Industria 4.0 dotaría al parque de bioenergía de beneficios económicos, sociales y ambientales, que garantizarían la máxima eficiencia operativa en armonía con el medioambiente.
2. La implementación en Cuba de la Industria 4.0 en un parque de bioenergía es algo distante aún, pero se debe conocer su alcance e iniciar el camino en ese sentido.
3. Se recomienda diagnosticar el estado actual de los sistemas de recolección de datos y automática en la industria, para establecer un programa de acciones para un primer parque de bioenergía cubano

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se desarrolló con el auspicio del proyecto nacional PN 3602 LH 002-059 (ICIDCA: 613), "Parques bio-energéticos en la agroindustria cubana de la caña de azúcar: una propuesta de modelo", del PNCTI02 "Desarrollo de la Agroindustria de la Caña de Azúcar" (DACA).

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. Sabadí, R. (2023). Diversificación de la industria azucarera y bioeconomía circular: las rutas de la energía. ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar Vol.57, No.1. La Habana.
2. Schwab, K. (2016). La cuarta revolución industrial. Editorial Debate (ISBN 8499926940, 9788499926940). <https://economyapoliticafeunam.wordpress.com/wp-content/uploads/2020/05/klaus-schwab.la-4c2b0-rev.-industrial-2.pdf>. Consultado diciembre 2025.
3. Ricardo Cabrera, H.; *et al.* (2020). Ideas y conceptos básicos para la comprensión de las industrias 4.0. *Revista Universidad y Sociedad*, 12(4), 8-15. <http://scielo.sld.cu/pdf/rus/v12n4/2218-3620-rus-12-04-8.pdf>.
4. Wikipedia. Cuarta Revolución Industrial. (2025). Consultado en diciembre 2025. [https://es.wikipedia.org/wiki/Cuarta\\_Revoluci%C3%B3n\\_Industrial](https://es.wikipedia.org/wiki/Cuarta_Revoluci%C3%B3n_Industrial).
5. Belgada, K.; El Abbadi, L. (2025). Exploring Industry 4.0 and 5.0 Technologies: A Systematic Review of Emerging Transitions and Applications. [https://www.researchgate.net/publication/397360524\\_Exploring\\_Industry\\_40\\_and\\_50\\_Technologies\\_a\\_Systematic\\_Review\\_of\\_Emerging\\_Transitions\\_and\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/397360524_Exploring_Industry_40_and_50_Technologies_a_Systematic_Review_of_Emerging_Transitions_and_Applications).
6. Fogaça, D. R., Grijalvo, M., & Sacomano Neto, M. (2025). What Are Industry 4.0 and Industry 5.0 All About? An Integrative Institutional Model for the New Industrial Paradigms. *Administrative Sciences*, 15(4), 118. <https://doi.org/10.3390/admsci15040118>.
7. Hassoun A *et al.* (2022). Exploring the role of green and Industry 4.0 technologies in achieving sustainable development goals in food sectors. *Food Res Int.* 2022 Dec;162(Pt B):112068. doi: 10.1016/j.foodres.2022.112068. Epub 2022 Oct 20. PMID: 36461323. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963996922011267?via%3Dihub>.
8. Cámara V. La aportación de la industria 4.0 al sector de la energía y la transición energética. <https://ticnegocios.camaravalencia.com/servicios/tendencias/la-aportacion-la-industria-4.0-al-sector-la-energia/>. Consultado en diciembre 2025.
9. Zemsania Global Group. (2022). 5 pasos para abordar la Transición Digital. Consultado en diciembre 2025. <https://zemsaniaglobalgroup.com/5-pasos-para-abordar-la-transformacion-digital/>
10. Puig, M.Y. (2021). De la informatización de la sociedad a la transformación digital de Cuba. Presidencia y Gobierno de Cuba. <https://www.presidencia.gob.cu/es/noticias/de-la-informatizacion-de-la-sociedad-a-la-transformacion-digital-en-cuba/>.