**VII SIMPOSIO DE DISEÑO E INGENIERÍA ASISTIDA POR COMPUTADORA, BIOMECÁNICA Y MACATRÓNICA**

**Viabilidad de soluciones 4.0 en empresas metal mecánicas de Cuba**

**Feasibility of 4.0 solutions in metal-mechanical companies in Cuba.**

1 - Jorge Ernesto García Correa1. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba. E-mail: jogcorrea@uclv.cu

2 - Norge Isaias Coello Machado2. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba. E-mail: norgec@uclv.edu.cu

3 - Ricardo Alfonso Blanco3. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba. E-mail: ralfonso@uclv.edu.cu

4 - Elke Glistau4.Institute of Logistics and Material Handling Systems, Otto von Guericke University, Germany. E-mail: elke.glistau@ovgu.de

5 - Rommy Alejandro Pérez León5. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba. E-mail: ropleon@uclv.cu

6 - Osvaldo Andrés Pérez Boullón6. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba. E-mail: opboullon@uclv.cu

**Resumen:** Este artículo analiza la implementación de la Industria 4.0 en el contexto global y cubano mediante una revisión bibliográfica de tecnologías claves como IoT, IA, Big Data y robótica. Se evalúa la viabilidad de aplicar soluciones 4.0, incluso parcialmente, en empresas metal-mecánicas de la región central de Cuba. Los resultados destacan la necesidad de una estrategia integral que combine inversión tecnológica, capacitación de personal, políticas públicas, proyectos piloto y colaboraciones internacionales. Estos esfuerzos buscan superar limitaciones como infraestructura digital insuficiente y la escasez de recursos, factores que restringen el acceso a equipos y software avanzados. El estudio propone un enfoque gradual para lograr una transición sostenible hacia la Industria 4.0 en Cuba.

**Palabras Clave:** Industria 4.0, Cuba, Metal-mecánica, Tecnologías disruptivas, Sostenibilidad.

***Abstract:*** *This article examines the implementation of Industry 4.0 in global and Cuban contexts through a bibliographic review of key technologies such as IoT, AI, Big Data, and robotics. It assesses the feasibility of partially applying 4.0 solutions in metal-mechanical companies in central Cuba. Findings emphasize the need for a comprehensive strategy integrating technological investment, workforce training, public policies, pilot projects, and international collaborations. These initiatives aim to address challenges like inadequate digital infrastructure, and the resource scarcity, which hinder access to advanced equipment and software. The study advocates a phased approach to achieve a sustainable transition to Industry 4.0 in Cuba.*

***Keywords:*** *Industry 4.0, Cuba, Metal-mechanical, Disruptive technologies, Sustainability.*

1. **Introducción**

La Cuarta Revolución Industrial (Industria 4.0) ha transformado los paradigmas productivos globales mediante la integración de tecnologías disruptivas. Estas innovaciones prometen eficiencia, sostenibilidad y competitividad; sin embargo, su implementación en economías en desarrollo enfrenta desafíos estructurales únicos. Cuba, en particular, presenta un escenario crítico: pese a los esfuerzos por modernizar su base industrial, persisten limitaciones en infraestructura digital, acceso a recursos tecnológicos y restricciones derivadas del bloqueo económico, factores que amplían la brecha tecnológica en sectores estratégicos como el metal-mecánico.

Este artículo analiza la viabilidad de aplicar soluciones 4.0 incluso de forma parcial en empresas metal-mecánicas de la región central de Cuba. Partiendo de una revisión bibliográfica de alcance global y estudios de caso locales, se identifican tres barreras centrales:

1. La insuficiente conectividad y digitalización de procesos,
2. La escasez de capital humano capacitado en tecnologías 4.0,
3. Las dificultades para adquirir equipos y software avanzados debido a sanciones internacionales.

Frente a este contexto, se propone una estrategia integral basada en cinco pilares: inversión tecnológica focalizada, formación especializada, políticas públicas adaptativas, proyectos piloto escalables y colaboraciones internacionales. La hipótesis central sostiene que, pese a las restricciones, un enfoque gradual y selectivo puede impulsar una transición sostenible hacia la Industria 4.0, priorizando soluciones de bajo costo y alto impacto inmediato.

1. **Estado del Arte en Industria 4.0**

La Industria 4.0 (I4.0) representa la cuarta gran revolución industrial, caracterizada por la fusión del mundo físico y digital en entornos productivos. Esta transformación se sustenta en tecnologías disruptivas priorizadas por actores logístico-industriales (DHL, 2024), pero su comprensión exige contextualizarla dentro de la evolución histórica industrial:

* 1ª Revolución Industrial (1760-1840): Mecanización mediante energía hidráulica y de vapor, dando origen a la producción fabril. Marcó la transición de la manufactura artesanal a sistemas mecanizados (Rifkin, 2011).
* 2ª Revolución Industrial (1870-1914): Introducción de la electricidad y la producción en masa, con hitos como la cadena de montaje de Ford. Permitió la estandarización y escalabilidad industrial (Ford, 1922; Hounshell, 1984).
* 3ª Revolución Industrial (1960-actualidad): Automatización mediante electrónica, TI y sistemas robóticos. La computarización optimizó procesos, pero mantuvo arquitecturas centralizadas (Schwab, 2016).
* 4ª Revolución Industrial (I4.0): Surge de la convergencia de sistemas ciber físicos (CPS), habilitando fábricas inteligentes con toma de decisiones descentralizada. Supera la automatización mediante interconexión total y análisis cognitivo (Kagermann et al., 2013; Hermann et al., 2016).

La I4.0 se opera según DHL Trend Radar 2024 con las siguientes tecnologías disruptivas priorizadas por actores logístico-industriales:

1. Inteligencia Artificial (IA) & Machine Learning (ML): Sistemas que analizan datos masivos para predecir eventos, optimizar rutas y automatizar decisiones.
2. Internet de las Cosas (IoT): Red de sensores conectados que monitorean activos en tiempo real.
3. Robótica Avanzada: Robots autónomos o colaborativos que trabajan junto a humanos.
4. Blockchain: Registro digital descentralizado y seguro.
5. Realidad Aumentada/Virtual (AR/VR): Superposición de información digital en el mundo físico (AR) o entornos inmersivos (VR).
6. Big Data & Analytics: Procesamiento de grandes volúmenes de datos para extraer patrones.
7. Computación en la Nube (Cloud): Almacenamiento y procesamiento remoto de datos.
8. Ciberseguridad Avanzada: Protección de sistemas operativos y datos frente a ataques.
9. Gemelos Digitales (Digital Twins): Réplica virtual de un proceso, producto o instalación física.
10. Impresión 3D/Manufactura Aditiva: Fabricación de piezas capa por capa, bajo demanda.
11. Sistemas de Trazabilidad Avanzada: Tecnologías (RFID, QR, GPS) que rastrean productos desde origen a destino.
12. Automatización de Procesos Robóticos (RPA): Software que automatiza tareas repetitivas.
13. 5G y Conectividad Avanzada: Redes ultrarrápidas y de baja latencia.
	1. **Brecha de Implementación en la Industria Metalmecánica Cubana**

Si bien la Industria 4.0 ofrece ventajas transformadoras, su adopción en la industria metalmecánica cubana enfrenta desafíos estructurales que amplían la brecha tecnológica. Estos obstáculos se categorizan en:

1. Infraestructura Digital Insuficiente:
* Conectividad limitada: Baja penetración de banda ancha industrial y redes IoT (<5% de fábricas con infraestructura IoT operativa), agravada por restricciones de acceso a internet de alto rendimiento y alta latencia (ONEI, 2023).
* Energía inestable: Frecuentes interrupciones eléctricas imposibilitan la operación continua de sistemas automatizados y centros de datos locales (PCC, 2021).
1. Capacidades Tecnológicas Obsoletas:
* Parque tecnológico envejecido: >70% de máquinas-herramienta superan los 20 años de antigüedad, con baja interoperabilidad y nula compatibilidad con sensórica avanzada (MINEM, 2022).
* Falta de equipos de frontera: Escasez de Cobots, impresoras 3D metálicas y sistemas de simulación digital inaccesibles por costos y bloqueos comerciales (Torres, 2023).
1. Limitaciones en Capital Humano:
* Brecha de competencias digitales: Insuficiente formación en data science, ciberseguridad industrial y gestión de CPS en programas técnicos y universitarios (MES, 2023).
* Fuga de talento: Migración de ingenieros y técnicos especializados hacia sectores no productivos o al exterior (~15% anual en perfiles TIC, según (ONEI, 2022)).
1. Restricciones Económicas y Logísticas:
* Financiamiento limitado: Inversión en I+D industrial <0.5% del PIB (vs. 2.4% en Alemania o 3.1% en Corea del Sur), con dificultad para adquirir tecnologías clave por sanciones financieras (CEPAL, 2023).
* Cadena de suministro frágil: Dependencia de importaciones para componentes electrónicos, sensores y hardware especializado, con plazos de entrega prolongados (≥12 meses) (Álvarez, 2022).
1. Desafíos Organizacionales y Normativos:
* Resistencia al cambio cultural: Predominio de modelos jerárquicos centralizados vs. la descentralización que exige I4.0 (García & Fernández, 2024).
* Marco regulatorio inadaptado: Ausencia de normas nacionales para ciberseguridad industrial, interoperabilidad de sistemas y protección de datos en entornos OT (Jurídico, 2023).

La I4.0 trasciende la mera digitalización, constituyendo un paradigma sistémico donde tecnologías disruptivas interactúan para crear ecosistemas productivos inteligentes, resilientes y centrados en valor (Lasi et al., 2014). Su implementación requiere superar retos técnicos y organizativos con potencial para revolucionar la manufactura [...] No obstante, en Cuba, especialmente en el estratégico sector metalmecánico, la transición hacia la cuarta revolución industrial enfrenta una brecha multidimensional (tecnológica, humana, económica y regulatoria). Superarla requerirá:

* Estrategias escalonadas: Priorizar digitalización básica (sensores de bajo costo, SCADA) antes de soluciones avanzadas (IA, gemelos digitales).
* Alianzas internacionales selectivas: Cooperación Sur-Sur para transferencia tecnológica adaptada a restricciones locales.
* Políticas industriales integradas: Inversión en infraestructura digital + formación de capacidades técnicas + marco jurídico habilitante.

La metalmecánica cubana necesita un modelo de I4.0 contextualizado que maximice recursos escasos mediante innovación frugal y sostenibilidad operativa (Pérez & González, 2023).

1. **La Industria 4.0 en las Empresas Metalmecánicas de Cuba**

Recapitulando, la I4.0, caracterizada por la integración de tecnologías avanzadas, está transformando los procesos productivos a nivel global, sin embargo, en el sector metalmecánico de Cuba, su implementación enfrenta un escenario dual: mientras a nivel global estas tecnologías revolucionan la eficiencia y la conectividad, en Cuba su adopción se ve limitada por factores multifacéticos.

En el contexto cubano, las empresas metal mecánicas han mostrado interés en adoptar tecnologías de la Industria 4.0, pero su avance ha sido lento y desigual. Las limitaciones en la infraestructura tecnológica donde la obsolescencia de maquinarias y la falta de acceso a sistemas IoT dificultan la integración de soluciones digitales, la escasez de recursos y las restricciones impuestas por el bloqueo económico limitan la importación de componente necesarios para el desarrollo de este sector y las licencias para el uso de softwares especializados teniendo que hacerse de ellos por terceros países, colaboraciones o donaciones lo que encarece los proyectos de modernización, reduciendo la capacidad de inversión en tecnologías disruptivas y priorizando las necesidades básicas de mantenimiento. A pesar de ello, existen iniciativas puntuales que buscan incorporar soluciones 4.0 para mejorar la eficiencia y la calidad de los procesos productivos.

Uno de los principales obstáculos es la conectividad debido al limitado acceso a internet de alta velocidad, lo que dificulta la implementación de sistemas IoT, la comunicación en tiempo real y el uso de plataformas en la nube; además, se requiere de la capacitación del personal en habilidades digitales debido a la migración de talento hacia sectores más lucrativos, como MIPYMES, el turismo y trabajos por cuenta propia; así como la migración hacia el extranjero que agrava la carencia de especialistas lo que se traduce a inversiones en formación y desarrollo de competencias.

A pesar de estos desafíos, algunas empresas han comenzado a explorar la automatización de algunos procesos y el uso de softwares especializados para la gestión de la producción. En el caso de la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, proyectos colaboración con instituciones académicas y centros de investigación extranjeros han permitido la introducción de tecnologías como la impresión 3D, el control numérico computarizado (CNC) y máquinas de corte por láser a escala reducida para la creación de un Taller de Fabricación Digital de uso personal (FABLAB).

Empresas como CICLOS MINERVA, con referencia en la elaboración de los estantes paletizados han asimilado soluciones 4.0 lo que le permite lograr una mayor productividad en su fabricación y alcanzar una calidad superior a la actual debido al reordenamiento del área de trabajo y la obtención de una nueva línea de producción desde China que presenta de manera consecutiva las actividades de troquelado de los agujeros que asimilaran las pestañas dobladas y las clavijas de seguridad, la conformación del perfil mediante laminado y el corte al final de la línea; en comparación, con la utilizada en 2008 con la que se ha venido fabricando estos productos, con una tecnología propia, donde se han aprovechado equipos de uso general en la industria metalmecánica y otros adaptados a esa producción.

A continuación, se muestra en la tabla 1 de las nuevas tecnologías empleadas en la I4.0 en el sector metalmecánico de Cuba, su estado de aplicación y su nivel de prioridad en aplicación.

En conclusión, mientras la Industria 4.0 avanza a pasos agigantados en otras partes del mundo, en Cuba su adopción en el sector metal mecánico sigue en una fase incipiente. Se requiere una estrategia integral que incluya inversión en infraestructura, formación de capital humano y cooperación internacional para superar las barreras actuales y aprovechar las oportunidades que ofrece esta revolución industrial.

Tabla 1: Tabla: Adopción en Cuba, Uso Actual y Prioridades Futuras.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Tecnología** | **Uso Actual en Cuba (Sector Metal-Mecánico)** | **¿Debería Utilizarse Más? (Por qué y Prioridad)** |
| Robótica Avanzada | Muy limitado. Robots industriales obsoletos en fábricas estatales (ej. antigua planta soviética en Cienfuegos). Casi nula robótica colaborativa. | Alta prioridad: Automatizar soldadura, pintura o manejo de materiales pesados. Reduce riesgos laborales y compensa escasez de mano de obra calificada. |
| IoT (Sensores Industriales) | Emergente. Sensores básicos en termoeléctricas para monitoreo térmico. Escaso en maquinaria de taller. Falta integración. | Prioridad máxima: Monitoreo en tiempo real de vibraciones, temperatura y desgaste en máquinas-herramienta. Evita paradas por fallos y optimiza mantenimiento. |
| Impresión 3D/Aditiva | Pionero en reparaciones. CIDEM (Univ. La Habana) imprime piezas de repuesto para bombas o sellos. FABLAB (Univ. Las Villas). No escala industrial. | Alta prioridad: Fabricar repuestos complejos no disponibles (ej. turbinas, boquillas). Reduce dependencia de importaciones y tiempos de espera (clave para industria en bloqueo). |
| Gemelos Digitales | Inexistente. No hay modelos virtuales de equipos o líneas de producción. | Media prioridad (futuro): Simular desgaste de herramientas o flujos de producción. Requiere antes IoT y datos (aún no viable). |
| Big Data & Analytics | Incipiente. Datos de producción manuales en hojas de cálculo. Sin análisis predictivo de rendimiento o calidad. | Alta prioridad: Predecir fallos en maquinaria histórica, optimizar consumo energético de hornos o compresores, y reducir mermas por defectos. |
| Sistemas Ciber-Físicos (CPS) | Aislados. Controles CNC básicos sin integración con redes. Automatización en islas (ej. corte), no sistémica. | Media prioridad: Integrar máquinas para coordinación autónoma (ej. celda de mecanizado). Mejoraría productividad, pero requiere inversión fuerte. |
| Realidad Aumentada (AR) | Experimentos académicos. Uso puntual en formación técnica (ej. visualizar ensamblajes). Nulo en mantenimiento industrial. | Baja prioridad: Guiar reparaciones complejas superponiendo instrucciones. Útil, pero requiere ancho de banda y gafes costosas (limitante en Cuba). |
| Ciberseguridad Industrial | Desatendida. Sistemas OT (Operational Technology) vulnerables en plantas estatales. Sin protocolos para máquinas conectadas. | Alta prioridad: Proteger infraestructura crítica (ej. centrales eléctricas) de ciberataques. Esencial si se avanza en IoT/CPS. |
| Trazabilidad Avanzada | Manual. Registro en papel de lotes de producción. Sin RFID/Blockchain para piezas o materiales. | Media prioridad: Trazar origen de aceros o calidad de fundiciones. Combatir desvíos de materiales escasos. Simple QR sería un avance. |
| Drones (Inspección) | Nulo en metal-mecánica para inspeccionar altos hornos, silos o estructuras. | Media prioridad: Inspeccionar zonas peligrosas (calderas, cubilotes) evitando riesgos humanos. Bajo costo relativo y alto impacto en seguridad. |

1. **Conclusiones**

Aunque existen desafíos significativos, la Industria 4.0 ofrece una oportunidad única para modernizar el sector metal mecánico en Cuba. Su adopción requiere un enfoque estratégico que combine inversión en tecnología, capacitación del personal y políticas públicas de apoyo. La integración de estas tecnologías no solo mejoraría la competitividad de las empresas cubanas, sino que también sentaría las bases para un desarrollo industrial más sostenible en el futuro por lo que es preciso fomentar la investigación, el desarrollo y la colaboración entre el sector académico, empresarial y gubernamental para acelerar la transición hacia la misma.

1. **Referencias bibliográficas**

Referencias Internacionales

1. DHL. (2024). DHL Trend Radar 2024: Navigating the Future of Logistics. <https://www.dhl.com/content/dam/dhl/global/dhl-trend-research/pdfs/dhl-trend-radar-2024.pdf>
2. Ford, H. (1922). My life and work. Doubleday. <https://archive.org/details/mylifework00ford>
3. Hermann, M., Pentek, T. y Otto, B. (2016). Design principles for Industrie 4.0 scenarios. 49th Hawaii International Conference on System Sciences. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.488>
4. Kagermann, H., Wahlster, W. y Helbig, J. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0. Acatech. <https://www.din.de/resource/blob/76902/e8cac883f42bf28536e7e8165993f1fd/recommendations-for-implementing-industry-4-0-data.pdf>
5. Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T. y Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. Business & Information Systems Engineering, “6” (4), 239–242. <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>
6. Lee, J., Bagheri, B. y Kao, H.-A. (2015). A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. \*Manufacturing Letters, “3”, 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
7. Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. Journal of Industrial Information Integration, “6”, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>
8. Rifkin, J. (2011). The third industrial revolution: How lateral power is transforming energy, the economy, and the world. Palgrave Macmillan.
9. Schwab, K. (2016). The fourth industrial revolution. World Economic Forum. <https://www3.weforum.org/docs/WEF_The_Fourth_Industrial_Revolution.pdf>
10. Stock, T. y Seliger, G. (2016). Opportunities of sustainable manufacturing in Industry 4.0. Procedia CIRP, “40”, 536–541. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.129>
11. Tao, F., Zhang, M., Liu, Y. y Nee, A. Y. C. (2018). Digital twin in industry: State-of-the-art. IEEE Transactions on Industrial Informatics, “15” (4), 2405–2415. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>
12. Zuehlke, D. (2010). SmartFactory—Towards a factory-of-things. Annual Reviews in Control, “34” (1), 129–138. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2010.02.008>

Referencias Cubanas

1. Alvarez, M. (2022). Logística industrial en Cuba: desafíos para la automatización. Revista Ingeniería Industrial, “41” (3), 45–58.
2. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2023). Inversión en ciencia y tecnología en América Latina y el Caribe.
3. García, L. y Fernández, R. (2024). Cultura organizacional en la industria estatal cubana: barreras para la innovación digital [Informe técnico no publicado]. Ministerio de Industrias.
4. Grupo Jurídico del Ministerio de Justicia. (2023). Diagnóstico del marco normativo cubano para la transformación digital industrial.
5. Ministerio de Educación Superior (MES). (2023). Plan nacional de formación técnica en tecnologías 4.0.
6. Ministerio de Industrias (MINEM). (2022). Informe anual del parque tecnológico metalmecánico.
7. Oficina Nacional de Estadística e Información (ONEI). (2023). Anuario Estadístico de Cuba 2023.
8. Partido Comunista de Cuba (PCC). (2021). Lineamientos para el desarrollo energético nacional.
9. Pérez, J. y González, A. (2023). Modelos de Industria 4.0 para países en desarrollo: lecciones para Cuba. Revista Cubana de Ingeniería, “12” (1), 22–35.
10. Torres, E. (2023). Acceso a tecnologías 4.0 en Cuba: impacto del bloqueo económico. Revista Cubana de Economía, “45” (2), 67–82.