

Tendencia T08

Monitoreo y control en tiempo real (IoT, sensores, sistemas ciber físicos)

Código	T08
Categoría	Tecnológica
Criterio C2 – Riesgo de desplazamiento ocupacional	3 – Medio: reduce controles manuales periódicos e inspecciones físicas en múltiples procesos. Los perfiles no desaparecen, pero requieren reconversión hacia monitoreo digital e interpretación de datos. Impacto transversal de reconversión, medio.
Procesos transversales afectados	Producción, Logística de entrada y salida, Gestión de la producción y planificación, Mantenimiento industrial, Control de calidad, Gestión de residuos y Gestión de personas y SSO
Nivel de madurez	4 – Tendencia madura con asimetría sectorial: SCADA/sensores industriales consolidados; IIoT integrado con IA en expansión acelerada; Sistemas Ciber Físicos (CPS) con adopción diferenciada según sector y tamaño

Definición operativa

El monitoreo y control en tiempo real refiere a la capacidad de los sistemas productivos de capturar, transmitir, procesar y actuar sobre datos del estado físico de los procesos —equipos, materiales, condiciones ambientales, personas— de forma continua y con latencias mínimas, sin depender de ciclos de medición periódicos ni de registro manual. **Esta tendencia constituye la infraestructura de datos que habilita la mayoría de las demás tendencias tecnológicas analizadas:** sin monitoreo en tiempo real, no hay mantenimiento predictivo, ni control de calidad automatizado, ni gemelos digitales operativos, ni sistemas agénticos de decisión.

La tendencia se articula en tres capas tecnológicas interdependientes:

- Sensores e IIoT (Internet Industrial de las Cosas): dispositivos físicos embebidos en equipos, líneas de producción, activos logísticos y entornos de planta que capturan variables físicas —vibración, temperatura, presión, corriente eléctrica, flujo, posición, composición química, imagen— y las transmiten a plataformas de análisis mediante protocolos industriales (OPC-UA, MQTT, Modbus) o redes privadas (5G industrial, LoRaWAN). El número de dispositivos IoT conectados globalmente alcanzó 18-19 mil

millones en 2024-2025 y podría superar 40 mil millones en 2034 [1].

- Plataformas de control y analítica de borde y nube (edge-cloud): infraestructura de cómputo que procesa los datos capturados por sensores con diferentes niveles de latencia: el cómputo en el borde (edge computing) permite análisis y respuesta local en microsegundos a milisegundos para aplicaciones de control en tiempo crítico; las plataformas cloud proveen capacidad de almacenamiento masivo y analítica flota-amplia. Las arquitecturas híbridas edge-cloud son el estándar emergente para aplicaciones de manufactura inteligente [2].
- Sistemas Ciberfísicos (CPS – Cyber-Physical Systems): sistemas que integran cómputo, redes de comunicación y procesos físicos en bucles de retroalimentación continua: los sensores capturan el estado físico, los algoritmos procesan esos datos y los actuadores intervienen sobre el proceso físico en tiempo real, cerrando el bucle. Los CPS son la expresión más completa del monitoreo con control: no solo observan sino que actúan. El mercado global de CPS alcanzó USD 137,4 mil millones en 2024, con proyección de crecimiento a CAGR del 14,5% hasta 2032 [3].

El IIoT como infraestructura habilitante del conjunto de la transformación digital manufacturera

El IIoT es la capa de datos sobre la que se construyen todas las demás transformaciones digitales de la manufactura. Sin sensores que capturen el estado real del proceso en tiempo real, no hay mantenimiento predictivo ni control de calidad automatizado. Sin datos de proceso continuos, los gemelos digitales son simulaciones desconectadas de la realidad. Sin visibilidad de planta en tiempo real, los sistemas agénticos no tienen el contexto necesario para tomar decisiones autónomas. El IIoT es, en este sentido, la infraestructura fundamental de la fábrica inteligente, de la misma manera en que la electricidad fue la infraestructura de la fábrica del siglo XX.

Nivel de madurez

La tendencia alcanza madurez de nivel 4 con asimetría interna: los sistemas SCADA y la sensorización básica son nivel 5 en sectores líderes (automotriz, farmacéutica, petroquímica); el IIoT integrado con IA y analítica en tiempo real es nivel 3-4; los CPS completos con bucles de retroalimentación autónomos son nivel 3. Los indicadores son:

- Mercado IIoT de escala: el mercado global IIoT alcanzó USD 289 mil millones en 2024 (IMARC Group), con proyección de USD 847 mil millones para 2033 (CAGR 12,7%). El mercado IoT en manufactura específicamente fue valorado en USD 58,7 mil millones en 2024, con proyección de USD 172,8 mil millones para 2034 [1][4].

- Adopción empresarial masiva: el 86% de los fabricantes encuestados considera que las iniciativas de fábrica inteligente serán su principal ventaja competitiva en los próximos tres años. Deloitte (Smart Manufacturing Survey 2025) documenta que el 48% de los encuestados ya tiene un programa de manufactura inteligente en pleno funcionamiento (full deployment) [5].
- Mercado de mantenimiento predictivo en expansión: el mercado de mantenimiento predictivo creció de USD 10,93 mil millones (2024) con proyección a USD 70,73 mil millones para 2032 (CAGR 26,5%). El 95% de las organizaciones que adoptan mantenimiento predictivo reporta ROI positivo; el 27% alcanza amortización completa en 12 meses [6].
- Convergencia IT/OT documentada: la integración de sistemas de Tecnología de la Información (IT) con Tecnología Operacional (OT) —SCADA, PLCs, sistemas de control industrial— es la base de la plataforma IIoT. La nueva arquitectura de referencia CISA CPG 2.0 (diciembre 2025) unificó por primera vez los objetivos de seguridad IT, IoT y OT bajo seis funciones, reconociendo la convergencia operacional que el IIoT crea [7].

En el Anexo A4.8 se presentan las evidencias empíricas a nivel internacional que justifican el nivel de madurez asignado, incluyendo casos industriales demostrativos.

Factores impulsores

Operativos y de eficiencia

- Costo del tiempo de inactividad no planificado: la eliminación de paradas no planificadas mediante monitoreo predictivo se traduce en ahorros cuantificables. En sectores de proceso continuo (química, petroquímica, siderúrgica), el impacto es aún mayor por los costos de reinicio y pérdida de producto [6].
- Presión sobre la Efectividad Global del Equipo (Overall Equipment Efficiency - OEE): la OEE es la métrica central de productividad manufacturera. En 2025, los fabricantes líderes han pasado de medir el OEE en reportes periódicos a monitorear en tiempo real mediante dashboards alimentados por sensores IoT, que identifican automáticamente las causas raíz de desviaciones de disponibilidad, rendimiento y calidad [9].
- Optimización energética y sostenibilidad: los sensores de consumo energético en tiempo real permiten identificar y eliminar desperdicios en el uso de energía —que puede representar el 20-40% de los costos totales de manufactura en sectores

intensivos en uso de energía—. La integración de IIoT con sistemas de gestión energética (ISO 50001) y el reporte de emisiones Scope, se convierte en un imperativo regulatorio y de competitividad.

Tecnologías habilitantes

- Caída de costos de sensores y conectividad: el costo de los sensores industriales ha caído drásticamente en la última década, mientras que la conectividad mediante redes privadas 5G, LoRaWAN y Wi-Fi 6E provee el ancho de banda y la latencia necesarios para aplicaciones críticas en tiempo real. Esta caída de costos democratiza el acceso al monitoreo en tiempo real para pymes.
- Edge computing y arquitecturas híbridas edge-cloud: resuelve los problemas de latencia de las arquitecturas puramente cloud, habilitando respuestas de control en microsegundos para aplicaciones de seguridad y calidad en tiempo crítico. Las arquitecturas híbridas edge-cloud son el estándar emergente para sistemas IIoT industriales [2].
- Integración con IA y modelos de machine learning (ML): permite pasar del monitoreo descriptivo (¿qué está pasando?) al monitoreo predictivo (¿qué va a pasar?) y prescriptivo (¿qué se debe hacer?). Los modelos de ML aprenden los patrones normales de operación de cada equipo y detectan anomalías con hasta un 90% de precisión, semanas antes de la falla grave [6].

Regulatorios y de seguridad

- Regulaciones de seguridad industrial y SSO: los sensores de monitoreo de condiciones de trabajo —gases tóxicos, temperatura extrema, exposición a ruido, proximidad a equipos peligrosos— forman parte de los sistemas de gestión de SSO bajo marcos normativos ISO 45001, creando obligaciones que impulsan la adopción de IIoT en ambientes industriales de alta peligrosidad.
- Ciberseguridad como restricción y habilitador: la convergencia IT/OT expande la superficie de ataque. El costo promedio de cada brecha de seguridad en manufactura alcanzó USD 4,97 millones en 2024. La ciberseguridad ha devenido en un factor impulsor de inversión en arquitecturas IIoT seguras, pero también es una barrera [7][8].

Análisis prospectivo

Escenario de corto plazo (0-2 años)

El período inmediato estará marcado por la consolidación de los despliegues IIoT ya en curso en grandes manufactureras y la aceleración de la adopción en empresas medianas, impulsada por la caída continua de costos de hardware y la disponibilidad de plataformas cloud/edge de bajo costo. El principal foco de inversión será la integración de datos de sensores con plataformas de IA para mantenimiento predictivo y control de calidad en tiempo real. La ciberseguridad IIoT/OT emergerá como la inversión prioritaria paralela, dado el incremento documentado de ataques con consecuencias físicas.

El desafío operativo central del período es la gestión del volumen de datos generado: la explosión de sensores conectados crea necesidades de gobernanza, filtrado y selección de datos que exceden las capacidades actuales de muchas organizaciones manufactureras.

Escenario de mediano plazo (3-5 años)

La evolución del IIoT hacia arquitecturas de Sistemas Ciberfísicos completos —donde los sistemas no sólo monitorean sino que actúan autónomamente para optimizar el proceso en tiempo real— representará la transición más significativa. La integración de gemelos digitales en tiempo real (actualizados continuamente por datos de sensores) con sistemas de optimización impulsados por IA, creará entornos de manufactura cognitiva capaces de autoajustarse a variaciones de demanda, calidad de insumos y condiciones de operación, sin intervención humana para los ajustes rutinarios.

En paralelo, la proliferación del 5G industrial privado como infraestructura de conectividad de planta —con latencias inferiores a 10 ms y densidades de dispositivos que el Wi-Fi industrial no puede soportar— habilitará aplicaciones de control de movimiento y seguridad en tiempo crítico que actualmente requieren cableado.

Señal de alerta: la brecha de habilidades en ciberseguridad OT/IIoT como restricción sistémica

La convergencia IT/OT que habilita el IIoT introduce simultáneamente los vectores de ataque del mundo IT en los sistemas OT que controlan la infraestructura física crítica. **La brecha de habilidades en esta intersección es la más severa del sector.** Según SANS (2026), el 27% de las organizaciones ya sufrió brechas de seguridad como consecuencia directa de déficit de habilidades; el 42% reporta que la brecha impide la adopción de nuevas tecnologías; y PwC (2026) identifica OT e IIoT como el principal desafío de ciberseguridad para el sector industrial-automotriz. Esta brecha es un freno estructural a la transformación digital manufacturera [7][8].

Impacto sobre los procesos transversales de la industria manufacturera

Esta tendencia tiene el mayor alcance transversal: afecta directamente a siete de los nueve procesos. Su naturaleza de infraestructura habilitante hace que el impacto sea amplificador de todas las demás tendencias tecnológicas:

Tabla 1. Impacto actual y proyectado de la tendencia T08 sobre procesos críticos

Proceso transversal	Impacto actual	Impacto proyectado	Descripción del impacto
Producción	Alto	Alto	El IIoT es la columna vertebral de la fábrica inteligente. Actualmente: sensores en líneas de producción que monitorean parámetros de proceso (temperatura, velocidad, presión, vibración) y alertan sobre desviaciones en tiempo real. OEE monitoreado en tiempo real. Control estadístico de proceso (SPC) automatizado. A futuro: bucles de retroalimentación ciberfísicos que ajustan parámetros automáticamente; sistemas de control adaptativo que compensan variaciones de insumos o condiciones ambientales sin intervención del operario. Los perfiles operativos se reconvierten hacia supervisión de sistemas y respuesta a excepciones.
Mantenimiento industrial	Alto	Alto	Es el caso de uso con mayor ROI documentado del IIoT. Actualmente: sensores de vibración, temperatura y corriente en equipos críticos; modelos de ML que predicen fallas con semanas de anticipación; reducción del 18-25% en costos de mantenimiento y hasta 50% en tiempo de inactividad no planificado. A futuro: mantenimiento prescriptivo y autónomo donde el sistema predice la falla, genera la orden de trabajo, verifica disponibilidad de repuestos y reserva el técnico.
Control de calidad	Alto	Alto	Los sensores IIoT y la visión artificial permiten el control de calidad 100% en proceso —cada unidad, no muestras estadísticas—. Actualmente: visión artificial con IA detecta defectos visuales con precisión del 97-99% vs. 70-80% del muestreo manual. Sensores de dimensión y composición integrados en línea. A futuro: sistemas de control de calidad ciberfísicos que ajustan automáticamente parámetros de proceso upstream al detectar desviaciones, cerrando el bucle de calidad en tiempo real.

Proceso transversal	Impacto actual	Impacto proyectado	Descripción del impacto
Gestión de la producción y planificación	Medio	Alto	Los datos IIoT en tiempo real transforman la planificación de producción: la visibilidad instantánea del estado de cada equipo, línea y lote permite al área de planificación recalibrar programas de producción ante fallas o interrupciones en tiempo real. A futuro: la integración de datos IIoT con gemelos digitales y sistemas de planificación, habilitará la optimización continua del programa de producción, transitando de la planificación por ciclos a la planificación por eventos.
Gestión de personas y SSO	Medio	Medio	Los sensores de monitoreo de condiciones de trabajo —detectores de gases, sensores de temperatura, monitores de ruido, wearables de detección de fatiga— mejoran la seguridad laboral y habilitan alertas tempranas ante condiciones de riesgo. Los sistemas de geolocalización en planta mejoran la coordinación de equipos de mantenimiento y emergencia. Los wearables de SSO conectados al IIoT representan el segmento de mayor crecimiento en manufactura.
Logística de entrada	Alto	Alto	Los sensores IoT en el almacén de materias primas monitorean condiciones críticas en tiempo real: temperatura y humedad para insumos sensibles, presencia de gases en almacenes de productos químicos, nivel de stock por ubicación. Los sistemas de geolocalización de AGV/AMR y operarios proveen visibilidad operacional completa. Los sensores en muelles de recepción detectan el estado de los equipos de descarga y optimizan la asignación de recursos. Proyectado: La intralogística de entrada se convertirá en un sistema ciberfísico completo: los sensores detectarán condiciones de almacenamiento, los algoritmos prescribirán acciones y ejecutarán sin intervención humana. La cadena de frío industrial se monitoreará de forma continua y automatizada.

Proceso transversal	Impacto actual	Impacto proyectado	Descripción del impacto
Logística de salida	Medio	Medio	Actual: los sensores en el almacén de producto terminado monitorean condiciones de almacenamiento, ocupación de ubicaciones y estado de los sistemas de picking. Los AMR de picking incorporan sensores de navegación, detección de obstáculos y verificación de producto. El monitoreo en tiempo real del estado de los muelles de despacho optimiza la asignación y reduce tiempos de espera. Proyectado: la integración de sistemas de picking robótico con visión artificial e IoT creará celdas de preparación de pedidos con control de calidad integrado. El almacén de PT operará con visibilidad completa en tiempo real.
Gestión de Residuos	Bajo	Medio	Sensores que monitorean la composición y volumen de flujos de residuos en tiempo real, habilitando la clasificación automatizada y la optimización del transporte de residuos. Los sistemas IIoT aplicados a monitoreo de efluentes y emisiones cumplen requisitos regulatorios de reporte continuo y habilitan la optimización de procesos para reducción en origen.

Impacto ocupacional y sobre perfiles (C2 = 3 – Medio)

El impacto sobre el empleo es de **reconversión parcial significativa**, no de desplazamiento masivo. La tendencia transforma profundamente el contenido de las tareas: reduce el trabajo de inspección física periódica, registro manual de datos y diagnóstico empírico, y aumenta la demanda de competencias de lectura e interpretación de datos digitales, supervisión de sistemas automatizados y respuesta a excepciones.

- Perfiles con mayor reconversión de tareas: técnico de mantenimiento industrial, operario de control de calidad, operario de producción, inspector de SSO, planificador de producción, técnico de logística interna.
- Nuevas competencias demandadas en perfiles existentes: lectura e interpretación de dashboards de monitoreo en tiempo real, respuesta a alertas de sistemas predictivos, comprensión básica de sensores y protocolos de conectividad industrial (OPC-UA, MQTT), uso de plataformas CMMS (Computerized Maintenance Management Systems) integradas con IIoT, configuración básica de umbrales de alerta, seguridad básica en entornos donde convergen OT/IT [5][8].

- Nuevos perfiles emergentes de alta demanda: Ingeniero de Sistemas IIoT, especialista en ciberseguridad OT, analistas de datos de operaciones de manufactura, ingeniero de manufactura digital, analista de mantenimiento predictivo, especialista en *edge computing* industrial.
- La brecha de habilidades como desafío central: el 42% de las organizaciones reporta que la brecha de habilidades impide la adopción de nuevas tecnologías; el 57% tiene proyectos retrasados por limitaciones de fuerza laboral. La escasez de perfiles con competencias en la intersección IT-OT es el principal cuello de botella del despliegue IIoT en manufactura, más limitante que los costos tecnológicos [8].

Anexo A4.8. Evidencia empírica internacional

Datos cuantitativos de referencia

- IMARC Group / Market.us (2024-2025): mercado IIoT global USD 289 mil millones en 2024; proyección USD 847 mil millones 2033. Mercado IoT en manufactura USD 58,7 mil millones en 2024, proyección USD 172,8 mil millones 2034 (CAGR 11,4%). Norteamérica lidera con 32,7% de cuota del mercado IoT en manufactura [1][4].
- Mordor Intelligence (2025): el mercado IIoT alcanzó USD 154,14 mil millones en 2025, con proyección de USD 469,67 mil millones para 2030 (CAGR 24,96%). El crecimiento refleja la caída de precios de sensores, despliegues privados de 5G y diseños de borde-IA basados en chiplets que permiten analítica en tiempo real en el punto de operación [2].
- DataM Intelligence / Cyber-Physical Systems Market (2025): el mercado global de CPS alcanzó USD 137,4 mil millones en 2024, proyectado en USD 405,91 mil millones para 2032 (CAGR 14,5%). Boeing integra CPS en producción de aeronaves para monitoreo en tiempo real del proceso de manufactura y mejora del control de calidad [3].
- Deloitte, Smart Manufacturing and Operations Survey 2025: encuesta a 600 ejecutivos de grandes manufactureras de EE.UU. (agosto-septiembre 2024). El 48% tiene manufactura inteligente en pleno despliegue. El 85% coincide en que estas iniciativas atraerán talento nuevo a la industria. Los principales desafíos reportados: gestión de transformaciones complejas, adquisición de talento digital, mitigación de riesgos operativos y ciberseguridad [5].
- IIoT World / McKinsey, datos mantenimiento predictivo (2025): el mantenimiento predictivo con IIoT reduce costos de mantenimiento entre 18-25% y recorta el tiempo de inactividad no planificado hasta un 50% (McKinsey). El costo mediano de una hora

de inactividad de producción es USD 125.000. El 95% de los adoptantes reporta ROI positivo [6].

- IoT Analytics / Transforma Insights (2024-2025): el número de dispositivos IoT conectados alcanzó 18-19 mil millones en 2024-2025. Transforma Insights proyecta que la base instalada podría superar 40 mil millones para 2034 a medida que la adopción se expande hacia todos los sectores [7].
- SANS 2026 Cybersecurity Report (abril 2026): el 27% de las organizaciones reporta haber sufrido brechas de seguridad como consecuencia directa de brechas de habilidades en la fuerza laboral. El 42% señala que las brechas de habilidades impiden la adopción de nuevas tecnologías. En infraestructura crítica e industria, el 57% reporta proyectos retrasados por limitaciones de fuerza laboral [8].

Casos industriales ilustrativos

- JSW Steel USA — mantenimiento predictivo con IIoT: JSW Steel USA implementó monitoreo en tiempo real de vibración y temperatura en sus operaciones de laminación, reportando mejoras medibles en la producción y reducción del mantenimiento de emergencia. El caso fue documentado por IIoT World como referencia de despliegue a escala industrial en acería [6].
- Planta petroquímica global — de urgente a preventivo: un fabricante líder de materiales redujo el mantenimiento urgente del 43% al menos del 10% de la carga total de mantenimiento al desplegar monitoreo predictivo en 33 equipos críticos, creando un modelo de excelencia operacional replicado en ocho plantas adicionales [6].
- Boeing — CPS en manufactura de aeronaves: Boeing integra sistemas ciberfísicos en el proceso de producción de aeronaves, permitiendo el monitoreo en tiempo real del proceso manufacturero y la mejora del control de calidad. El despliegue conecta sensores físicos con sistemas digitales de supervisión para reducir defectos y tiempos de reelaboración [3].
- Ciberataque a Colonial Pipeline / Colonial Pipeline y precedentes industriales: el ataque *ransomware* a Colonial Pipeline (2021) —que paralizó el 45% del suministro de combustible de la costa este de EE.UU.— y múltiples incidentes posteriores en manufactura ilustran la cara de riesgo de la conectividad IT/OT. El costo promedio de una brecha de seguridad en el sector manufacturero alcanzó USD 4,97 millones en 2024 [7].

- Indorama Ventures — procesamiento químico con IIoT: Indorama Ventures aplicó mantenimiento predictivo impulsado por IA en líneas de procesamiento químico donde las paradas no planificadas cuestan USD 50.000 por hora, demostrando el caso de negocio del IIoT en manufactura continua de proceso [6].

Referencias

- [1] IMARC Group (2025). Industrial IoT Market Size 2025 Industry Forecast by 2033. Disponible en: <https://www.imarcgroup.com/industrial-iiot-market> [Mercado IIoT global USD 289B en 2024; proyección USD 847B para 2033; CAGR 12,7%; Europa: mayor cuota regional por manufactura robusta e iniciativas gubernamentales; hardware: mayor componente].
- [2] Mordor Intelligence (2025-2026). Industrial Internet of Things (IIoT) Market Size to Reach USD 469.67 Billion by 2030. Disponible en: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/industrial-internet-of-things-iiot-market> [USD 154,14B en 2025USD 469,67B en 2030; CAGR 24,96%; arquitecturas híbridas edge-cloud como estándar emergente; caída de precios de sensores y 5G privado como drivers].
- [3] DataM Intelligence (2025). Cyber Physical Systems Market Size Share and Forecast 2032. Disponible en: <https://www.datamintelligence.com/research-report/cyber-physical-systems-market> [CPS global USD 137,4B en 2024; proyección USD 405,91B 2032; CAGR 14,5%; Boeing CPS en manufactura aeroespacial; fuerza laboral ciberseguridad BLS +32% para 2032].
- [4] Market.us (2025). IoT in Manufacturing Market Size CAGR of 11.4%. Disponible en: <https://market.us/report/iiot-in-manufacturing-market/> [Mercado IoT manufactura USD 58,7B en 2024USD 172,8B 2034; CAGR 11,4%; Norteamérica 32,7%; hardware 41,7% cuota; caso CyberArk/Device Authority/Microsoft solución seguridad IoT fábricas, marzo 2025].
- [5] Deloitte (diciembre 2025). 2025 Smart Manufacturing and Operations Survey: Navigating challenges to implementation. Disponible en: <https://www.deloitte.com/us/en/insights/industry/manufacturing/2025-smart-manufacturing-survey.html> [Encuesta 600 ejecutivos EE.UU. ago-sep 2024; 48% en pleno despliegue; 86% considera fábrica inteligente su ventaja competitiva principal; 85% cree atraerá talento; principales desafíos: gestión de transformación, talento digital, ciberseguridad].
- [6] IIoT World / WorkTrek / Oxmaint (2025). Predictive Maintenance Cost Savings: Case Studies & ROI Guide. Disponible en: <https://www.iiot-world.com/predictive-analytics/predictive-maintenance/predictive-maintenance-cost-savings/> [McKinsey: -18-25% costos mantenimiento; -50% downtime no planificado; costo mediano inactividad USD 125.000/hora; 95% reporta ROI positivo; 27% amortización en 12 meses; mercado mantenimiento predictivo USD 10,93B 2024USD 70,73B 2032; casos JSW Steel USA, planta petroquímica global, Indorama Ventures].
- [7] Device Authority / ISACA / IIoT World (2025). Industrial IoT Security Threats and IT/OT Convergence. Disponible en: <https://deviceauthority.com/industrial-iiot-security-threats-top-risks-and-mitigation-strategies-2025/> [Costo brecha seguridad manufactura USD 4,97M en 2024; 18-19B dispositivos IoT conectados 2024-2025; ataques nación-estado con consecuencias físicas triplicados en 2024 (Waterfall Security); CISA CPG 2.0 diciembre 2025: unificó IT-IIoT-OT bajo 6 funciones].

- [8] Industrial Cyber / SANS (abril 2026). 'SANS 2026 Report Flags Cybersecurity Skills Crisis'. Disponible en: <https://industrialcyber.co/reports/sans-2026-report-flags-cybersecurity-skills-crisis> [27% sufrió brechas por brecha de habilidades; 42% brecha impide adopción tecnológica; 57% proyectos retrasados por limitaciones de fuerza laboral; 34% de organizaciones creó roles de especialista ML/IA en seguridad].
- [9] Manufacturing Today (junio 2025). 'OEE, Energy Costs, Downtime: What's Driving Factory Leaders in 2025'. Disponible en: <https://manufacturing-today.com/news/oe-energy-costs-downtime-whats-driving-factory-leaders-in-2025/> [OEE en tiempo real como métrica de excelencia operacional; sensores IoT alimentando dashboards analíticos en tiempo real; identificación automática de causas raíz de desviaciones; OEE como brújula operacional en 2025].
- [10] Fortune Business Insights (2026). IoT in Manufacturing Market Size, Share Industry Report 2034. Disponible en: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/internet-of-things-iot-in-manufacturing-market-101677> [USD 141,18B en 2025; USD 172,65B en 2026; proyección USD 1.108,42B para 2034; CAGR 26,20%; automotriz, electrónica y maquinaria pesada como sectores líderes de adopción].
- [11] ManufacturingLeadGeneration.com (2026). '90+ Manufacturing IoT Statistics (2025-2026): IIoT Market Size'. Disponible en: <https://manufacturingleadgeneration.com/manufacturing-iot-statistics/> [Compilación de estadísticas: Siemens 2024 USD 388B ahorro potencial PdM con +5% productividad; IBM USD 7,5M ahorros por planta con PdM; Grand View Research: Norteamérica 33,4% cuota mercado mantenimiento predictivo 2025].
- [12] PwC (2026 Global Digital Trust Insights) / Industrial Cyber (octubre 2025). 'PwC Flags OT, IIoT and Talent Gaps as Top Cybersecurity Challenges'. Disponible en: <https://industrialcyber.co/reports/pwcs-2026-global-digital-trust-insights-report-flags-ot-iiot-and-talent-gaps-as-top-cybersecurity-challenges> [Encuesta 3.887 ejecutivos, 72 países; manufactura industrial/automotriz 21% de la muestra; brechas de conocimiento y habilidades como top barreras para IA en ciberdefensa; 60% ubica inversión en ciberriesgo entre sus tres prioridades principales].
- [13] Asimily / IIoT World (2023-2025). 'Industrial Internet of Things Security Challenges OT Cybersecurity Skills Shortage'. Disponible en: <https://asimily.com/blog/industrial-iiot-it-ot-convergence-and-security-risks/> [Escasez de talento OT documentada; IIoT requiere expertise IT+OT que es aún más escaso; NIST SP 800-82, CSF 2.0, NIST SP 800-183 como marcos normativos; regla marítima USCG efectiva julio 2025].
- [14] MDPI Information Journal (agosto 2025). 'Integrating AI and IoT for Predictive Maintenance in Industry 4.0 Manufacturing Environments'. Information 2025, 16(9), 737. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2078-2489/16/9/737> [Revisión sistemática y framework de implementación; dataset de 39.470 registros en manufactura de alimentos; validación de modelos AI-IoT predictivos en entorno industrial real].
- [15] Kumar, R., Sangwan, K. S., Herrmann, C., & Thiede, S. (2025). Cyber physical production system for smart manufacturing analytics and management: A systematic literature review, framework and roadmap. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2025.2563261> <https://doi.org/10.1080/0951192X.2025.2563261> [Revisión sistemática 209 estudios 2010-2024; CPPS como tecnología habilitante clave de Industry 4.0; framework propuesto para implementación; brechas de investigación identificadas].