

Implementación e Impacto Técnico-Económico de Soluciones IIoT para Mantenimiento Predictivo en la Modernización de Plantas Industriales

Curso: Automatización (Semestre 2026-02)

Universidad de La Frontera

Autor: Martin Alonso Mardones Sandoval

Correo: m.mardones10@ufromail.cl

Fecha de Entrega: 2026-08-27

IIS670 — Informe Semana 02

Resumen

El presente informe analiza la implementación e impacto técnico-económico del Internet de las Cosas Industrial (IIoT) enfocado en el mantenimiento predictivo de maquinaria rotatoria en entornos de manufactura. Se establece la diferenciación fundamental entre el IoT de consumo y el IIoT, destacando los requerimientos de determinación temporal, robustez física y ciberseguridad operacional (OT) que caracterizan a este último. A través de un estudio de caso representativo, se dimensiona cuantitativamente la modernización de una sección de planta compuesta por 20 motores eléctricos industriales, estimando una inversión inicial de capital (CAPEX) de \$14.200 USD y un costo operativo anual (OPEX) de \$2.400 USD. Asimismo, se evalúan las ventajas de eficiencia operativa frente a los riesgos críticos de ciberseguridad en redes convergentes IT/OT y las barreras organizacionales de adopción. Finalmente, asumiendo la dirección de la startup integradora VibraSense IIoT, se articula un modelo de negocio B2B basado en Hardware-as-a-Service (HaaS) y suscripción SaaS, diseñado para acelerar la adopción tecnológica en PyMEs industriales.

1. Introducción

La cuarta revolución industrial exige la transformación de las plantas de producción tradicionales en sistemas ciberfísicos altamente interconectados. En el núcleo de esta metamorfosis se encuentra la disciplina de la automatización, la cual ha evolucionado desde el control de lazo cerrado local basado en autómatas programables (PLC) e interfaces HMI hacia ecosistemas analíticos distribuidos e inteligentes. La capacidad de capturar, transmitir y procesar datos operativos en tiempo real representa la piedra angular para optimizar el rendimiento global de los equipos (OEE) y mitigar fallas catastróficas imprevistas. Dentro de la asignatura de Automatización de la Universidad de La Frontera (Semestre 2026-02), resulta esencial expandir los conceptos teóricos discutidos en aula hacia las tendencias tecnológicas que están redefiniendo el sector industrial. Entre estas, el Industrial Internet of Things (IIoT) destaca por su capacidad de integrar sensores de vibración y temperatura de bajo costo con algoritmos de analítica predictiva en la nube o en el borde (Edge Computing). Sin embargo, la migración tecnológica plantea desafíos complejos que van más allá del diseño ingenieril, involucrando la cuantificación precisa de inversiones, la mitigación de vectores de ataque informático y la sostenibilidad financiera de las empresas integradoras de tecnología. Este documento aborda de manera sistemática la fundamentación técnica, la viabilidad económica y el modelo de negocio estratégico asociado a la modernización IIoT en la industria contemporánea.

2. Objetivo

Evaluar el impacto técnico, económico y estratégico de la implementación de soluciones de Industrial Internet of Things (IIoT) para el mantenimiento predictivo en una sección de planta industrial, mediante un análisis cuantitativo de costos, la identificación de riesgos operacionales y la formulación de un modelo de negocio B2B sustentable para una startup integradora.

3. Metodología

Para alcanzar el objetivo formulado, se ejecutó una metodología analítica estructurada en tres fases interrelacionadas: Fase 1: Caracterización Tecnológica y Comparativa: Revisión de la literatura técnica sobre arquitecturas IIoT, protocolos de comunicación industrial (MQTT, OPC-UA) y análisis diferencial frente al IoT de consumo. Fase 2: Modelado Económico Paramétrico y Simulación Financiera: Ante la variabilidad de cotizaciones privadas corporativas, los costos técnico-económicos se formalizan mediante un Modelo Paramétrico de Simulación Financiera estandarizado a fecha 27 de agosto de 2026, expresado en Dólares Estadounidenses (USD). Los valores unitarios provienen de especificaciones y listas de precios públicas de fabricantes industriales (IFM Electronic, Advantech) y servicios de infraestructura Nube (AWS IoT). Límites y Simplificaciones del Modelo: 1. Alcance: Monitoreo predictivo de 20 motores de inducción trifásicos (7.5 kW a 22 kW) en la línea de envasado. 2. Exclusiones: Se excluyen impuestos locales (IVA 19% en Chile), aranceles de importación e intervenciones mecánicas mayores. Se asume infraestructura eléctrica y de red local (Ethernet/Wi-Fi industrial) preexistente. 3. Parámetros Financieros: Tasa de descuento anual (r) = 10%; Horizonte de evaluación = 3 años. Fase 3: Diseño de Modelo de Negocio B2B: Estructuración de una propuesta comercial para una startup tecnológica emergente, aplicando el esquema de lienzo de modelo de negocios orientado a servicios de hardware y software industrial.

3.1 Uso de IA

En cumplimiento del marco de Ciencia Generativa (Alarcón, 2026), se utilizó el modelo de inteligencia artificial generativa Google Gemini como herramienta de apoyo en el desarrollo del informe. Las atribuciones y responsabilidades se distribuyeron de la siguiente manera: Roles Centrales de Responsabilidad Humana (Inalienables): El estudiante asumió de forma exclusiva la Conceptualización (delimitación del caso de estudio de envasado y enfoque de la startup), la Metodología (criterios presupuestarios, selección de parámetros técnicos) y la Validación (auditoría de precios de mercado, verificación de coherencia técnica y revisión del texto final). Roles Asistidos o Delegados a la IA: El sistema de IA brindó soporte en la Investigación documental comparativa, Análisis formal de modelos de negocio, Redacción del borrador inicial, Revisión estilística y Visualización mediante la maquetación de tablas HTML.

4. Resultados

4.1 Caracterización del IIoT y Diferenciación respecto al IoT Comercial (Pregunta 1)

El Internet de las Cosas Industrial (IIoT) se define como la extensión de los conceptos de conectividad de red y sensores a entornos de manufactura, energía e infraestructura crítica. A diferencia del IoT comercial o doméstico (enfocado en el confort, la conveniencia personal y el consumo de bienes), el IIoT está diseñado para optimizar procesos productivos, prevenir fallas operacionales y garantizar la continuidad operativa en ambientes hostiles. En la aplicación industrial seleccionada (Mantenimiento Predictivo en Maquinaria Rotatoria), el IIoT emplea acelerómetros triaxiales y sensores térmicos instalados en los rodamientos de motores y bombas. Estos dispositivos captan señales de vibración en alta frecuencia (hasta 10 kHz), procesan indicadores FFT (Fast Fourier Transform) en el borde y transmiten métricas de condición operacional hacia plataformas de analítica. Las diferencias estructurales entre ambas vertientes tecnológicas se sintetizan a continuación en la Tabla 1: (Boyes et al., 2018; Sisinni et al., 2018).

Tabla 1. Comparación sistemática entre el Internet de las Cosas Comercial (IoT) y el Internet de las Cosas Industrial (IIoT).

Criterio de Comparación	IoT Comercial / Doméstico	IIoT (Industrial IoT)
Ambiente Operativo	Residencial / Oficina (temperaturas controladas, sin interferencia electromagnética severa).	Plantas industriales (alta vibración, polvo, humedad, ruido electromagnético, norma IP67/Ex).
Requisitos de Latencia y Tiempo Real	Baja o moderada (tolerancia a retardos de segundos o minutos en la transmisión).	Crítica o determinista (milisegundos para eventos de alarma o paradas de emergencia).
Protocolos de Comunicación	Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, HTTP/REST.	MQTT/Sparkplug, OPC-UA, Modbus TCP, Profinet, IO-Link.
Ciberseguridad y Confiabilidad	Seguridad estándar a nivel de aplicación; fallas causan inconvenientes menores.	Arquitectura de seguridad IT/OT (IEC 62443); fallas causan pérdidas millonarias o accidentes.

4.2 Estimación Económica para la Modernización de una Planta (Pregunta 2)

Para evaluar el costo de modernización, se consideró una sección de embotellado de bebidas que cuenta con 20 motores eléctricos trifásicos (7.5 kW a 22 kW) encargados del accionamiento de bombas de fluidos, cintas de transporte y compresores de aire. La solución proyectada consiste en un sistema de monitoreo continuo de condición mediante nodos de vibración y temperatura inalámbricos conectables vía protocolo Bluetooth Low Energy (BLE) Industrial hacia dos Gateways Edge con salida MQTT sobre Ethernet hacia la nube. Los supuestos económicos, costos unitarios y el presupuesto consolidado para la modernización de la sección de planta se detallan a continuación en la Tabla 2:

Tabla 2. Presupuesto y estimación económica para la modernización IIoT de 20 motores en una línea de envasado industrial (Valores en USD al 27 de agosto de 2026).

Ítem / Componente	Modelo / Referencia Comercial	Cantidad	Costo Unitario (USD)	Costo Total (USD)	Clasificación	Simplificaciones y Notas
Sensores de Vibración/Temp. IP67	IFM Electronic VVB001 / Advantech WISE-2410	20 un.	\$350,00	\$7.000,00	CAPEX	Acelerómetro triaxial industrial BLE/IO-Link . Incluye soporte magnético.
Gateway Industrial Edge IIoT	Advantech UNO-2271G-V2 / IFM AL1300	2 un.	\$1.200,00	\$2.400,00	CAPEX	Montaje en carril DIN, soporte MQTT/OPC-UA, alimentación 24VDC.
Ingeniería e Integración OT	Servicio Técnico Especializado (80 hrs @ \$60/h)	1 serv.	\$4.800,00	\$4.800,00	CAPEX	Instalación física, configuración de red OT, pruebas de comunicación.
Suscripción Cloud & SaaS	AWS IoT Core + Licencia SaaS Analítica (\$10/motor/mes)	12 meses	\$200,00 /mes	\$2.400,00	OPEX	Plataforma de analítica predictiva, almacenamiento, alertas SMS/Correo.
INVERSIÓN INICIAL TOTAL (CAPEX)	-	-	-	\$14.200,00	CAPEX	Llave en mano para puesta en marcha inicial.
COSTO RECURRENTE ANUAL (OPEX)	-	-	-	\$2.400,00	OPEX	Mantenimiento de licencias y soporte técnico.

Fuentes de precios: Catálogos públicos de Advantech e IFM Electronic (2026), cotizaciones base de AWS IoT Core y tarifas estándar de ingeniería industrial en Chile.

4.2.1 Cálculo Financiero con Escenarios Reproducibles (Pregunta 2)

Para garantizar la reproducibilidad de las conclusiones económicas, se definen las siguientes ecuaciones de evaluación financiera:

1. Flujo Neto de caja anual (F_t):

$$F_t = \text{Ahorro Anual por Paradas Evitadas} - \text{OPEX}$$

2. Valor Actual Neto (VAN):

$$\text{VAN} = -\text{CAPEX} + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+r)^t}$$

Donde $r = 0,10$ (10% tasa de descuento) y $n = 3$ años

3. Periodo de recuperación simple (PRI / payback):

$$PRI = \frac{CAPEX}{F_t} \text{ (En años)}$$

Evaluación de Escenarios de Sensibilidad

Se asume un costo de parada no planificada en la línea de envasado de **\$5.000 USD/hora**. Se formulan tres escenarios reproducibles según las horas de parada no programada evitadas al año:

- **Escenario Conservador (Pesimista):** Se evitan 1,5 horas/año de parada.
 - Ahorro Bruto = 1,5 x \$5.000 = \$7.500 USD/año.
 - Flujo Neto Anual (F_t) = \$7.500 - \$2.400 = \$5.100 USD/año.
- **Escenario Base (Esperado):** Se evitan 4,0 horas/año de parada.
 - Ahorro Bruto = 4,0 x \$5.000 = \$20.000 USD/año.
 - Flujo Neto Anual (F_t) = \$20.000 - \$2.400 = \$17.600 USD/año.
- **Escenario Optimista:** Se evitan 8,0 horas/año de parada.
 - Ahorro Bruto = 8,0 x \$5.000 = \$40.000 USD/año.
 - Flujo Neto Anual (F_t) = \$40.000 - \$2.400 = \$37.600 USD/año.

La evaluación de los escenarios se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Matriz de análisis de sensibilidad financiera por escenarios (Horizonte n = 3 años, r = 10%, CAPEX = \$14.200 USD).

Métrica/Indicador	Escenario Conservador (1,5 hrs evitadas)	Escenario Base (4,0 hrs evitadas)	Escenario Optimista (8,0 hrs evitadas)
Ahorro Bruto Anual	\$7.500,00 USD	\$20.000,00 USD	\$40.000,00 USD
OPEX Anual	\$2.400,00 USD	\$2.400,00 USD	\$2.400,00 USD
Flujo Neto Anual (F_t)	\$5.100,00 USD	\$17.600,00 USD	\$37.600,00 USD
Payback Simple (PRI)	2,78 años (~33,4 meses)	0,81 años (~9,7 meses)	0,38 años (~4,5 meses)
Valor Actual Neto (VAN)	-\$1.517,05 USD	+\$29.568,59 USD	+\$79.305,64 USD
Tasa Interna de Retorno (TIR)	4,8%	104,2%	252,1%

4.3 Ventajas Esperadas y Análisis de Riesgos (Pregunta 3)

Ventajas Operacionales Esperadas:

- **Reducción de Downtime No Planificado:** Detección temprana de desalineaciones, desequilibrios o desgaste de rodamientos con semanas de anticipación, reduciendo las paradas imprevistas en un 35%. Considerando que una hora de parada en la línea de envasado cuesta \$5.000 USD, evitar 4 horas de falla al año paga íntegramente la inversión.
- **Extensión de Vida Útil de Activos:** Optimización de las pautas de lubricación y mantenimiento basadas en condición real y no en horas de operación estimadas.
- **Eficiencia Energética:** Detección de motores operando fuera de su curva de eficiencia máxima debido a desajustes mecánicos. Análisis de Limitaciones y Riesgos Críticos:

- **Riesgo Técnico / Ciberseguridad (Convergencia IT/OT):** La principal vulnerabilidad reside en conectar redes de control operacional (OT) históricamente aisladas a la nube (IT). Un ataque de ransomware o la interceptación de brokers MQTT sin cifrado TLS 1.3 podría permitir a un atacante inyectar datos falsos o tomar control del Gateway Edge, comprometiendo la seguridad física de la planta. Se requiere la implementación de firewalls industriales y segmentación bajo el modelo Purdue (IEC 62443).
- **Riesgo Organizacional:** Resistencia del equipo tradicional de mantenimiento a confiar en algoritmos predictivos ("fatiga de alarmas") y falta de competencias internas en análisis de datos.

4.4 Modelo de Negocio para Startup Integradora "VibraSense IIoT" (Pregunta 4)

Asumiendo el rol de Gerente General de la startup VibraSense IIoT, se diseña un modelo de negocio orientado a remover la barrera del alto CAPEX inicial para las pequeñas y medianas empresas industriales. Los componentes estructurantes del modelo de negocio B2B se resumen a continuación en la Tabla 4:

Tabla 4. Matriz del modelo de negocio B2B para la startup integradora VibraSense IIoT.

Dimensión Estratégica	Propuesta y Estrategia Operativa
Proveedores Clave	Fabricantes OEM de sensores piezoeléctricos (IFM, Murrelektronik), proveedores de gateways Edge (Advantech), y proveedores Cloud (AWS IoT / Azure IoT).
Clientes Objetivo	PyMEs manufactureras, plantas alimentarias, embotelladoras y madereras con procesos continuos que no poseen departamentos dedicados de I+D.
Propuesta de Valor	"Mantenimiento predictivo sin fricción": Solución Plug & Play con diagnóstico prescriptivo en español, soporte en menos de 4 horas e integración sin interrumpir la producción.
Estructura de Precios y Modalidad	Modelo HaaS (Hardware-as-a-Service) + SaaS: Tarifa mensual fija de \$45 USD por motor monitoreado (incluye sensor, gateway, plataforma cloud y reemplazo de hardware por fallas), contrato mínimo a 24 meses. Elimina la necesidad de CAPEX masivo.
Estrategia de Acercamiento (Go-To-Market)	Prueba de Concepto (PoC) gratuita de 30 días monitoreando los 3 motores más críticos del cliente. Demostración del ROI estimado con datos reales antes del cierre del contrato. Alianzas estratégicas con empresas de reparación de motores eléctricos locales.

5. Discusión

Los resultados del análisis técnico-económico demuestran que la barrera principal para la adopción masiva del IIoT no reside en la inmadurez del hardware o software, sino en la rigidez financiera de los esquemas tradicionales de venta de proyectos de automatización basados en altos costos de capital (CAPEX).

Para atender la observación de respaldo cuantitativo, la evaluación económica se formalizó como un Modelo Paramétrico de Simulación Financiera estandarizado con fecha de corte al 27 de agosto de 2026 y expresado en Dólares Estadounidenses (USD). El alcance se delimitó a la modernización de 20 motores eléctricos en una línea de envasado industrial (CAPEX inicial de \$14.200 USD y OPEX anual de \$2.400 USD), asumiendo la simplificación de infraestructura de red preexistente y excluyendo impuestos locales (IVA) o fletes de importación.

Al evaluar la sensibilidad del modelo ante tres escenarios reproducibles de horas de parada no planificada evitadas al año (fijando un costo de parada de \$5.000 USD/hora y una tasa de descuento del 10% a 3 años), se observa lo siguiente:

- En el Escenario Base (4,0 horas evitadas/año), la solución alcanza un VAN de +\$29.568,59 USD, una TIR de 104,2% y un período de recuperación (Payback) de solo 9,7 meses, confirmando una alta rentabilidad operacional.
- En el Escenario Optimista (8,0 horas evitadas/año), el VAN se eleva a +\$79.305,64 USD con un Payback acelerado de 4,5 meses.
- En el Escenario Conservador (1,5 horas evitadas/año), el VAN resulta negativo (-\$1.517,05 USD), lo que permite determinar el punto de equilibrio mínimo en 1,85 horas/año de paradas no programadas evitadas (ahorro bruto de \$9.250 USD/año) para garantizar la viabilidad económica en un horizonte de 36 meses.

Esta variabilidad financiera valida la pertinencia estratégica de la propuesta de la startup VibraSense IIoT. El modelo de negocio combinado Hardware-as-a-Service (HaaS) y SaaS (\$45 USD/mes por motor) elimina la barrera del CAPEX para PyMEs industriales, transfiriendo el riesgo tecnológico al integrador y garantizando un gasto operacional (OPEX) predecible y amortizable desde las primeras horas de falla mitigadas.

Finalmente, desde la perspectiva de la auditoría técnica bajo el marco de Ciencia Generativa (Alarcón, 2026), se destaca que la inteligencia artificial generativa facilitó la estructuración rápida de la matriz de riesgos y la simulación presupuestaria inicial. No obstante, la validación final exigió la intervención del estudiante para supervisar los supuestos técnicos y contrastar las estimaciones financieras con la realidad del mercado industrial regional en Chile, ajustando los costos de ingeniería local, las restricciones de ancho de banda y el consumo energético de los sensores para asegurar la coherencia del estudio en el contexto productivo nacional.

6. Conclusiones

El desarrollo del presente informe ha permitido cumplir satisfactoriamente el objetivo general establecido, arribando a las siguientes conclusiones principales: El IIoT se diferencia radicalmente del IoT de consumo por su exigencia de determinismo, resistencia a ambientes severos y estricta seguridad en protocolos de comunicación operacional como MQTT y OPC-UA. La modernización de una sección representativa de 20 motores industriales mediante un CAPEX de \$14.200 USD y un OPEX de \$2.400 USD/año es financieramente rentable a partir de 1,85 horas/año de paradas no programadas evitadas. En el escenario base (4 horas evitadas/año), el proyecto genera un VAN de \$29.568,59 USD (tasa del 10% a 3 años), una TIR de 104,2% y un retorno de inversión en 9,7 meses. Los riesgos de ciberseguridad derivados de la convergencia IT/OT representan la principal amenaza técnica, requiriendo segmentación estricta según la norma IEC 62443. El modelo de negocio HaaS + SaaS comercializado mediante pruebas de concepto (PoC) constituye una estrategia comercial altamente efectiva para democratizar el mantenimiento predictivo en el segmento PyME.

7. Declaraciones

Matriz de Contribución Humano - IA

Conforme al marco analítico de Ciencia Generativa (Alarcón, 2026), la distribución explícita de roles y la contribución de los participantes en la elaboración de este informe se detallan a continuación en la Tabla 5:

Tabla 5. Matriz de contribución y distribución de roles entre el participante humano y el modelo de IA generativa.

Participante	Tipo	Roles Desempeñados
Martin Alonso Mardones Sandoval	Humano	Conceptualización, Metodología y Validación.
Google Gemini	Modelo de IA Generativa	Investigación documental, Análisis formal, Redacción del borrador original, Revisión y edición, Visualización.

Contraste de evaluación: La IA generó propuestas estructuradas para el presupuesto y los componentes del modelo de negocio. El estudiante contrastó los montos proyectados con precios de mercado real, ajustó la terminología de ciberseguridad OT (modelo Purdue) y validó la viabilidad del modelo HaaS para el entorno industrial nacional.

Declaración Final de Autorizaciones

- Publicación con identidad real: Autorizo la publicación de este informe con mi nombre y apellido en el marco del curso.
- Modificación por coautores: Autorizo modificaciones por parte de coautores o docentes tras una revisión editorial.
- Publicación web: Autorizo la publicación de este informe en repositorios académicos o sitios web del curso.

8. Bibliografía

- Alarcón, C. (2026). Generative Science as an analytical framework for integrating the full capabilities of generative artificial intelligence into scientific research while preserving scientific recognition. *Generative Science Preprints*, 2026(07), 19055673. <https://doi.org/10.5281/zenodo.19055673>
- Boyes, H., Hallaq, B., Cunningham, J., & Watson, T. (2018). The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework. *Computers in Industry*, 101, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.04.015>
- Sisinni, E., Saifullah, A., Han, S., Jennehag, U., & Gidlund, M. (2018). Industrial Internet of Things: Challenges, opportunities, and directions. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(11), 4724-4734. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2852491>
- Zuntini, F., & Rullo, A. (2024). Cyber-Physical Security in IIoT Deployments: Standards, Protocols, and Best Practices. *Journal of Industrial Information Integration*, 38, 100580.