

# Implementación de IIoT para el monitoreo predictivo de motores en una línea de Embotellado Industrial

Hernan Conejeros

h.conejeros01@ufromail.cl

25 de septiembre de 2026

## Resumen

Este informe presenta una propuesta preliminar de ingeniería para la implementación de Internet Industrial de las Cosas (IIoT) en la sección de transporte de una planta embotelladora, enfocado en el monitoreo predictivo de 5 motores eléctricos críticos. A través de una estimación formal de costos de modernización en Pesos Chilenos (CLP) con fecha de referencia a agosto de 2026, el análisis de riesgos de ciberseguridad y la formulación de un modelo de negocio tipo startup integradora, se proyecta la mitigación de paradas no programadas y la reducción del consumo eléctrico por desgaste mecánico. La viabilidad del proyecto se fundamenta teóricamente mediante un modelo económico explícito y reproducible de retorno de inversión (ROI) y período de recuperación de capital.

## 1. Introducción

En la industria embotelladora de proceso continuo, la continuidad operacional resulta determinante para la rentabilidad de la planta. La falla inoportuna de un motor eléctrico en las cintas transportadoras provoca la detención inmediata de toda la línea de llenado, lo que genera pérdidas severas por volumen de producción no realizado y desembolsos no planificados en mantenimientos de emergencia. Frente a este desafío, la adopción del Internet Industrial de las Cosas (IIoT) permite evolucionar desde un esquema de mantenimiento reactivo o preventivo hacia una estrategia predictiva basada en la supervisión continua de variables físicas en tiempo real. El alcance de este estudio se delimita al análisis conceptual y económico para la digitalización de los 5 motores eléctricos principales de la cinta transportadora de embotellado, evaluando su factibilidad técnica, financiera y de ciberseguridad.

## 2. Objetivo

Formular una propuesta preliminar de ingeniería para la implementación de un sistema IIoT de monitoreo predictivo en 5 motores de una planta embotelladora, mediante la estimación de costos de modernización (CAPEX y OPEX), el análisis de riesgos operacionales y de ciberseguridad, y el diseño de un modelo de negocio de startup integradora, con el propósito de fundamentar su viabilidad técnica y financiera para evitar paradas no programadas en la línea de producción.

### 3. Metodología

El presente estudio adopta un enfoque descriptivo y analítico para la elaboración de una propuesta preliminar de ingeniería para el monitoreo predictivo de motores eléctricos en una línea de embotellado industrial. El procedimiento metodológico se desarrolló en cuatro fases consecutivas:

- **Delimitación del alcance técnico:** Se seleccionó la cinta transportadora principal de la línea de llenado, delimitando el análisis a 5 motores eléctricos trifásicos de operación continua.
- **Levantamiento de componentes y conectividad:** Se consultaron especificaciones técnicas (datasheets) y listas de precios de catálogo de proveedores locales e internacionales de automatización (IFM Electronic Chile, RS Components, Rhona) con fecha de referencia a agosto de 2026. Se seleccionaron sensores industriales IP67/IP69K (IEC, 2013) y protocolo IO-Link bajo la norma ISO 20816-1 para la evaluación de vibración en maquinaria.
- **Modelamiento económico y financiero:** Se estructuró el presupuesto de inversión inicial (CAPEX) y los costos operativos del servicio (OPEX). Se formuló un modelo matemático explicativo y reproducible para calcular el período de recuperación de la inversión (Payback) frente al costo de paradas de planta.
- **Análisis de vulnerabilidades y ciberseguridad:** Se identificaron los riesgos de operación ambiental y las amenazas asociadas a la integración OT/IT en el Gateway maestro.

#### 3.1 Subsección: Uso de IA

El proyecto se estructuró de manera secuencial, iniciando con la conceptualización de las fallas operativas en la línea de transporte de la planta embotelladora. A continuación, se investigaron componentes de tecnología IIoT, se analizaron los riesgos de infraestructura física y ciberseguridad, y se diseñó la propuesta de modelo de negocio para una startup integradora.

Para fundamentar el análisis, se consultaron hojas de datos (datasheets) de fabricantes de instrumentación industrial, catálogos oficiales de distribuidores de automatización y la normativa internacional ISO 20816-1 sobre evaluación de vibraciones mecánicas. El alcance técnico y económico se delimitó estrictamente a los 5 motores eléctricos principales de la cinta transportadora de embotellado, con estimaciones presupuestarias expresadas en Pesos Chilenos (CLP) a valor neto, tomando como fecha de referencia agosto de 2026.

#### Declaración de Autoría y Colaboración Tecnológica

- **Hernán Conejeros (Autor / Dirección Técnica):** Conceptualización, metodología, dirección técnica y validación. Asumió la dirección general del proyecto, definió el caso de aplicación en la planta embotelladora, estableció el marco financiero en moneda CLP y audité críticamente el contenido técnico y la memoria de cálculo para garantizar la factibilidad del diseño y el cumplimiento de las pautas requeridas.

- Gemini (Asistencia de IA): Investigación, análisis formal, estructuración de borradores y edición. Actuó como herramienta auxiliar para la búsqueda de especificaciones técnicas, sistematización de apartados, verificación de indicadores económicos y soporte en la redacción formal.

## **4. Resultados**

### **4.1. Propuesta de Arquitectura e Infraestructura**

Se propone una solución de monitoreo continuo para los 5 motores de la cinta transportadora. A diferencia de los sistemas IoT residenciales, la solución IIoT industrial exige alta disponibilidad y resistencia ambiental. Por ello, se consideran sensores de vibración triaxial (RMS en mm/s) y temperatura en superficie (°C) montados directamente en las carcasas de los motores bajo la norma ISO 20816-1.

La transmisión de datos se estructura mediante bus de campo IO-Link hacia un Gateway maestro centralizado que envía las métricas de condición al software de monitoreo de la planta. Ante desviaciones de las lecturas normales, el sistema proyecta la activación de alarmas locales y notificaciones remotas al equipo de mantenimiento antes de que ocurra una falla catastrófica.

### **4.2. Alcance Técnico y Presupuesto General**

Se estima un presupuesto de inversión inicial (CAPEX) para la digitalización de los 5 motores. Todos los valores corresponden a precios netos en Pesos Chilenos (CLP), consultados con fecha de referencia a agosto de 2026:

| <b>Componente / Concepto</b>         | <b>Especificación / Modelo</b>        | <b>Cantidad</b> | <b>Costo Unitario (CLP)</b> | <b>Costo Total (CLP)</b> | <b>Fuente / Evidencia</b>  |
|--------------------------------------|---------------------------------------|-----------------|-----------------------------|--------------------------|----------------------------|
| <b>Sensores de Vibración y Temp.</b> | IFM VVB001 (IO-Link)                  | 5               | \$528.000                   | \$2.640.000              | Catálogo oficial IFM Chile |
| <b>Gateway Maestro IO-Link</b>       | IFM AL1102 (8 puertos, PROFINET IP67) | 1               | \$529.980                   | \$529.980                | Catálogo Oficial IFM Chile |
| <b>Cables M12 Apantallados (5m)</b>  | IFM EVC005 / RS PRO                   | 5               | \$27.122                    | \$135.610                | RS Components Chile        |
| <b>Tubería Conduit Flexible 1"</b>   | Delikon Revestido PVC                 | 10 [m]          | \$1.878 [CLP/m]             | \$18.780                 | Rhona (\$2.235 IVA inc.)   |
| <b>Prensaestopas Metálicos IP68</b>  | DTK PG9                               | 5               | \$3.097                     | \$15.485                 | Catálogo Especializado     |
| <b>Instalación y Montaje</b>         | Mano de obra en terreno               | 1 global        | \$500.000                   | \$500.000                | Supuesto Estimado          |
| <b>Software Interfaz de Datos</b>    | IFM QLA010                            | 1               | \$264.000                   | \$264.000                | Catálogo IFM Chile         |
| <b>Total Inversión (CAPEX)</b>       | Proyecto IIoT 5 Motores               | -               | -                           | \$4.103.855              | Valores netos en CLP       |

Tabla 1. Presupuesto de inversión inicial para la digitalización de 5 motores.

Nota aclaratoria sobre el ítem de Instalación y Montaje: El monto de \$500.000 CLP netos corresponde a un supuesto de costo estimado de proyecto para la ejecución de los trabajos en terreno (montaje mecánico de sensores, tendido de canalización Conduit, cableado y conexión al gateway). Este valor supone la contratación de 2 técnicos especialistas en instrumentación durante 2 jornadas completas de trabajo (32 Horas), considerando una tarifa estimada de \$125.000 CLP netos/día por técnico. El costo real podrá variar sujeto a la cotización final del contratista o si el montaje es ejecutado por personal propio de mantención de la planta.

### 4.3. Evaluación Económica e Impacto Operativo (ROI y Payback)

Para evaluar la rentabilidad del proyecto, se contrapone la inversión inicial (CAPEX) de

\$4.103.855 CLP netos frente al impacto financiero que genera una parada de planta no programada por falla en uno de los 5 motores monitoreados.

#### Marco Metodológico: Modelo del Iceberg Financiero

El sustento económico del costo de falla se fundamenta en la metodología del *Iceberg Financiero* y la fórmula de ingeniería financiera B2B para la estimación del costo por hora de detención ( $C_{hora}$ ) (Calidad Energética, 2026):

$$C_{hora} = P_{pérdida} + M_{desperdicio} + H_{improductiva} + K_{penalización}$$

Donde el impacto económico total de un evento de falla se compone de:

- **Costo Directo (Punta del Iceberg - 25% del total):**
  - Reparación o reemplazo del motor dañado: \$1.500.000 CLP
- **Costos Ocultos por Downtime /  $C_{hora}$  (Base del Iceberg - 75% del total):**
  - Producción perdida ( $P_{pérdida}$ ) y mano de obra inactiva ( $H_{improductiva}$ ): \$4.500.000 CLP (correspondiente a una parada no programada de 4 a 6 horas en la línea).
- **Impacto Total por Evento de Falla: \$6.000.000 CLP**

*Los valores de costo directo (1.500.000CLP) y costo oculto (4.500.000 CLP) corresponden a un escenario base estimado para una planta embotelladora, dimensionado bajo el criterio conservador de la metodología de Calidad Energética (2026).*

### Parámetros de Entrada y Evaluación Financiera

- Inversión Inicial (CAPEX Total): \$4.103.855 CLP netos.
- Costo Operativo Anual (OPEX): \$0 CLP (la licencia IFM QLA010 es de pago único *On-Premises* y el hardware cuenta con protección industrial IP67/IP69K sin costo de suscripción).
- Beneficio Anual Neto (Evitación de 1 falla/año):

$$\text{Beneficio Anual Neto} = \text{Ahorro Bruto} - \text{OPEX} = \$6.000.000 - \$0 = \$6.000.000 [\text{CLP/año}]$$

### Memoria de Cálculo de Indicadores de Rentabilidad

- **Período de Recuperación de la Inversión (Payback):**

$$\text{Payback(años)} = \frac{\text{CAPEX}}{\text{Beneficio Actual Neto}} = \frac{\$4.103.855}{\$6.000.000} \approx 0,68 \text{ años}$$

$$\text{Payback(meses)} = 0,68 \times 12 \approx 8,2 \text{ meses}$$

- **Retorno sobre la Inversión (ROI) - Año 1:**

$$ROI_1 = \left( \frac{\text{Beneficio Actual Neto} - \text{CAPEX}}{\text{CAPEX}} \right) \times 100 = \left( \frac{6.000.000 - 4.103.855}{4.103.855} \right) \times 100 = 46,20\%$$

- **Retorno sobre la Inversión Proyectado a 3 Años:**

$$ROI_3 = \left( \frac{18.000.000 - 4.103.855}{4.103.855} \right) \times 100 = 338,61\%$$

| <b>Indicador Financiero</b>             | <b>Valor Calculado</b> | <b>Justificación</b>                                             |
|-----------------------------------------|------------------------|------------------------------------------------------------------|
| <b>Inversión Inicial (CAPEX)</b>        | \$4.103.855 CLP        | Respaldo verificado con precios de mercado (Tabla 4.2).          |
| <b>Costo Operativo (OPEX Anual)</b>     | \$0 CLP                | Licencia perpetua On-Premises y equipos sin suscripción.         |
| <b>Ahorro Anual Estimado</b>            | \$6.000.000 CLP        | Prevención de 1 detención no programada al año en los 5 motores. |
| <b>Tiempo de Recuperación (Payback)</b> | 8,2 meses              | Amortización completa de la inversión en el primer año.          |
| <b>ROI (Año 1)</b>                      | 46,20%                 | Rentabilidad positiva desde el año inicial de operación.         |
| <b>ROI Acumulado (3 Años)</b>           | 338,61%                | Elevada viabilidad y rendimiento financiero a mediano plazo.     |

Tabla 2. Resumen de indicadores financieros y rentabilidad del proyecto.

#### 4.4. Ventajas de la Modernización y Análisis de Riesgos

##### Ventajas Esperadas de la Modernización

- **Detección temprana y eficiencia energética:** Identifica fallas mecánicas (desbalance, desgaste de rodamientos) en etapas incipientes según la norma ISO 20816-1. Al detectar las fallas en su etapa inicial, el sistema permite detener los motores de forma segura para su revisión, evitando que sigan funcionando bajo estrés y sufran daños irreparables.
- **Optimización de stock y repuestos:** Al monitorear la tendencia de vibración y estimar la vida útil remanente del motor, se elimina la necesidad de mantener un inventario sobredimensionado en bodega, gestionando repuestos bajo demanda.
- **Seguridad laboral:** Minimiza las mediciones manuales con equipos portátiles en zonas con maquinaria en movimiento, acceso restringido o alta temperatura.

##### Análisis de Limitaciones y Riesgos

- **Riesgo Técnico (Ambiente Industrial):** La exposición a derrames de líquidos y humedad en la línea de embotellado puede degradar las conexiones.
- **Riesgo de ciberseguridad:** Conectar el Gateway AL1102 a la red de la planta abre un punto de entrada a accesos no autorizados.

- Limitación Económica: Requiere una inversión inicial (CAPEX) de \$4.103.855 CLP netos. Su retorno depende directamente de la prevención de las paradas no programadas de la planta.

#### **4.5. Modelo de Negocio**

- Propuesta de Valor: Instalación y configuración en paradas programadas de planta (sin interrumpir la producción continua), entregando alertas en tiempo real al teléfono/correo del Jefe de Mantenimiento mediante el agente IFM QLA010.
- Estructura de Costos y Modalidad: ○ CAPEX: \$4.103.855 CLP netos (Hardware, software On-Premises, canalización y mano de obra). ○ OPEX Base: \$0 CLP/mes (Licencia perpetua de pago único sin cargos de suscripción).

#### **Estrategia de Acercamiento B2B:**

1. Primer Contacto: Venta técnica enfocada en el Jefe de Mantenimiento o Gerente de Planta mediante la Calculadora de Paradas No Programadas, demostrando con el modelo del Iceberg Financiero el costo directo e indirecto de detener la línea. 2. Cierre por Prueba de Concepto: Instalación piloto de 30 días en el motor más crítico o problemático para validar los datos de vibración en vivo antes del escalamiento completo.

#### **5. Discusión**

Para mitigar el riesgo financiero y validar el valor técnico en terreno, se recomienda iniciar con una Prueba de Concepto (PoC) de 30 días en el motor más crítico de la línea. Esta fase piloto permitirá evaluar la precisión de las métricas de vibración, comprobar la estabilidad de la red- Por su parte, la viabilidad de la inversión de \$4.103.855 CLP netos está directamente ligada al volumen de producción y facturación de la planta. En entornos industriales de proceso continuo, el costo de no invertir puede ser superior: una sola parada no programada por falla en un motor principal supera el costo total de este proyecto en pocas horas de inactividad (\$6.000.000 CLP/evento). La selección de componentes industriales normados y la transparencia en la cotización buscan precisamente maximizar el retorno de inversión (ROI de 46,20% al año 1) sin comprometer la confiabilidad técnica.

#### **Impacto Multidimensional: Producción, Seguridad y Recursos**

- Seguridad Laboral: Al automatizar el monitoreo de vibración y temperatura, se reduce la exposición del personal técnico a mediciones manuales en zonas de riesgo mecánico y térmico.
- Eficiencia Operativa y Energética: La detección temprana de desalineaciones o desgastes evita operar motores en condiciones de sobreesfuerzo, reduciendo el consumo eléctrico excesivo y optimizando las compras de repuestos bajo demanda.

## **Equilibrio entre Digitalización y Riesgo Operativo**

El análisis realizado permite establecer que los riesgos de humedad y ciberseguridad pueden gestionarse mediante la selección de envoltentes IP67/IP69K y la segmentación de redes OT.

## **Escalabilidad a Futuro**

La arquitectura basada en el Gateway maestro IO-Link AL1102 (8 puertos) deja 3 puertos disponibles para que la planta añada nuevos sensores (presión, flujo, nivel) sin necesidad de reinvertir en software ni infraestructura principal, reduciendo el costo unitario por activo digitalizado.

## **6. Conclusiones**

El análisis de la propuesta de implementación IIoT permite establecer que es técnicamente posible modernizar la línea de producción mediante una arquitectura robusta, transitando de un mantenimiento reactivo a una estrategia predictiva alineada con la norma ISO 20816-1, protegiendo la continuidad operativa y previniendo paradas no programadas.

El presupuesto de \$4.103.855 CLP netos utiliza componentes de gama alta con grado de protección IP67/IP69K y licencias perpetuas On-Premises. La inversión se justifica desde el punto de vista financiero con un período de recuperación (Payback) de 8,2 meses.

## **Declaración final**

Yo, Hernan Conejeros, en mi calidad de autor del presente informe técnico, declaró explícitamente lo siguiente respecto a la propiedad, modificación y difusión de este documento:

- **Publicación con identidad real:** Autorizo la publicación del informe registrando mi nombre y apellido reales.
- **Modificación por coautores:** Autorizó la incorporación de modificaciones o ediciones al contenido por parte de coautores tras una revisión editorial.
- **Publicación web:** Autorizo la difusión y publicación de este informe en sitios web, repositorios o plataformas de informes académicos.

## 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. <https://arxiv.org/abs/2608.13190>. Preprint, 2026, arXiv:2608.13190.
- IFM Electronic Chile. (2026). AL1102 - Maestro IO-Link con interfaz PROFINET 8 puertos IP67. <https://www.ifm.cl/catalogo/Products/AL1102>
- IFM Electronic Chile. (2026). QLA010: Interfaz de datos para máquinas e instalaciones (ifm Agent). <https://www.ifm.cl/catalogo/Products/QLA010>
- IFM Electronic Chile. (2026). VVB001 - Sensor de vibración IO-Link para monitoreo de condición. <https://www.ifm.cl/catalogo/Products/VVB001>
- International Electrotechnical Commission. (2013). Degrees of protection provided by enclosures (IP Code) (Norma IEC No. 60529:1989+AMD1:1999+AMD2:2013). <https://webstore.iec.ch/publication/2452>
- International Organization for Standardization. (2016). Mechanical vibration - Measurement and evaluation of machine vibration - Part 1: General guidelines (Norma ISO No. 20816-1:2016). <https://www.iso.org/standard/63180.html>
- Diartek. (2026). Prensa estopa metálica PG9 4,0 a 8,0 mm (DTK). Catálogo de Productos Diartek. <https://diartek.cl/prensa-estopa-metalica-pg9-4-a-8mm>
- Reves S.A. (2026). Portal de Productos. <https://reves.cl/producto/3822/conduit-flexible-metalico-1.html>
- RS Components Chile. (2026). EVC005 - Cable de actuador y sensor M12 (IFM Electronic). Portal RS Components Chile. <https://www.rs-chile.com/product/ifm-electronic/evc005/cable-de-actuador-de-sensor-ifm-electronic-con-a-b/0140127>
- Calidad Energética. (2026, 27 de agosto). ¿Cuál es el costo real de una parada no programada por fallas electrónicas en plantas B2B? Metodología financiera del Iceberg Financiero. <https://calidadenergetica.cl/2026/08/27/cual-es-el-costo-real-de-una-parada-no-programada-por-fallas-electronicas-en-plantas-b2b/>