



REDIT VERDE

Revista de Ambiente y Sostenibilidad

Red de Investigadores de la Transcomplejidad (REDIT)

Vol. 1 (1). Enero-Junio 2026

Artículo de investigación

Ingeniería inversa para interoperabilidad de dispositivos legados y sostenibilidad industrial

Yairol González Bermúdez
Universidad Tecnológica de la Habana
La Habana, Cuba
yairol070502@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0002-5176-5938>

RECIBIDO: 19-04-2026 / **ACEPTADO:** 01-06-2026 / **PUBLICADO:** 15-07-2026

Cómo citar: González Bermúdez, Y. (2026). Ingeniería inversa para interoperabilidad de dispositivos legados y sostenibilidad industrial. *REDIT VERDE. Revista de Ambiente y Sostenibilidad*, 1 (1), 42-55.

Resumen

El presente estudio propone una metodología de ingeniería inversa para la modernización de sistemas industriales mediante la recuperación e integración de hardware legado en arquitecturas de control modernas como estrategia de sostenibilidad industrial. El propósito principal es establecer un procedimiento sistemático para la identificación de registros de comunicación en dispositivos con protocolos cerrados o documentación técnica inexistente. La metodología propuesta fundamenta una técnica de análisis diferencial de registros, la cual permite mapear variables de control mediante la inducción de cambios físicos y el monitoreo de tramas de datos en tiempo real. Para validar la propuesta, se desarrolló una herramienta de inspección en entorno .NET que facilitó la comunicación directa con controladores industriales, eliminando la necesidad de pasarelas propietarias. Los resultados demostraron que este enfoque garantiza una integración robusta y bidireccional en una red de 44 controladores Dixell, logrando una reducción de los costos de inversión frente al reemplazo total de hardware. Se concluyó que la metodología promueve el desarrollo sostenible y la economía circular al extender la vida útil de los activos industriales y eliminar de forma potencial la generación de residuos electrónicos del proyecto.

Palabras clave: eficiencia energética; ingeniería inversa; interoperabilidad; residuos electrónicos sostenibilidad industrial.

Reverse engineering for interoperability of legacy devices and industrial sustainability

Abstract

This study proposes a reverse engineering methodology for modernizing industrial systems by recovering and integrating legacy hardware into modern control architectures as an industrial sustainability strategy. The primary purpose is to establish a systematic procedure for identifying communication registers in devices with closed protocols or non-existent technical documentation. The proposed methodology is based on a differential register analysis technique, which allows mapping control variables by inducing physical changes and monitoring data frames in real-time. To validate the proposal, an inspection tool was

developed in a .NET environment that facilitated direct communication with industrial controllers, eliminating the need for proprietary gateways. The results showed that this approach ensures robust and bidirectional integration across a network of 44 Dixell controllers, achieving a reduction in investment costs compared to total hardware replacement. It was concluded that the methodology promotes sustainable development and circular economy by extending the lifespan of industrial assets and potentially eliminating the generation of electronic waste in the project.

Keywords: energy efficiency; electronic waste; industrial sustainability; interoperability; reverse engineering.

Introducción

La rápida evolución hacia el paradigma de la Industria 4.0 ha impuesto la necesidad de una integración vertical y horizontal de los datos en todos los niveles de la pirámide de automatización (López & Velasteguí, 2021). Sin embargo, un obstáculo persistente en la modernización industrial es la presencia de sistemas legado: activos que conservan su integridad mecánica y funcional, pero cuyas capacidades de comunicación son limitadas o propietarias (Burns et al., 2019). Esta fragmentación tecnológica no solo impide la creación de ecosistemas de datos unificados, sino que fomenta una dependencia crítica del proveedor, donde el acceso a la información del propio usuario está condicionado por licencias cerradas y hardware de enlace costoso.

La interoperabilidad de dispositivos legados constituye una estrategia de sostenibilidad industrial porque permite extender la vida útil de activos funcionales, reducir la sustitución prematura de equipos electrónicos, disminuir la generación potencial de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) y habilitar sistemas de monitoreo energético en tiempo real. En este sentido, la ingeniería inversa aplicada a protocolos de comunicación industrial puede interpretarse como una práctica de economía circular orientada al uso eficiente de recursos.

Desde la perspectiva de (Díaz-Bastos et al., 2025), la sustitución masiva de controladores industriales representa un desafío ético y ambiental. La fabricación de nuevos componentes electrónicos implica un consumo intensivo de recursos y una huella de carbono considerable; por tanto, la extensión de la vida útil del hardware existente es una estrategia esencial de economía circular (Estrada et al., 2025). En este sentido, la literatura actual subraya que la eficiencia energética en las plantas industriales depende directamente de la transparencia de los datos en tiempo real. No obstante, fabricantes de renombre en el sector de la refrigeración y el control de procesos suelen implementar variaciones del protocolo Modbus RTU sin proporcionar mapas de registros públicos, complejizando la integración con plataformas modernas.

Históricamente, la comunidad técnica ha recurrido a métodos como el *web scraping* para la adquisición de datos en dispositivos que poseen interfaces visuales pero protocolos cerrados. No obstante, investigaciones recientes demuestran que estas técnicas son altamente frágiles, presentan latencias elevadas y carecen de la robustez necesaria para aplicaciones de control crítico (Fernandez, 2025). Por otro lado, aunque existen estándares de interoperabilidad como OPC UA, su implementación en hardware antiguo a menudo requiere una capa de traducción que el fabricante original no permite o ya no soporta.

Ante este vacío técnico, el artículo tiene como objetivo proponer una metodología de ingeniería inversa sistemática, basada en el análisis diferencial de registros, para habilitar la interoperabilidad de dispositivos industriales legado. A diferencia de los enfoques tradicionales, esta propuesta no requiere de documentación técnica previa ni de pasarelas propietarias, centrándose en el descubrimiento de la lógica de comunicación mediante la inducción de cambios físicos y el monitoreo de tramas de datos.

Se fundamenta en un marco de desarrollo de software moderno utilizando NET y arquitecturas orientadas a dominio, lo que permite una comunicación directa, determinista y bidireccional (Aguilar García & Plaza, 2020). Su aporte fundamental es proporcionar una guía procedimental para la soberanía tecnológica de las industrias, permitiéndoles escalar sus sistemas de supervisión de manera autónoma, económica y sostenible.

Metodología

La metodología adoptada en esta investigación se fundamentó en un enfoque experimental y descriptivo, orientado a la creación de un marco de trabajo replicable para la recuperación de hardware industrial legado. El procedimiento se estructuró para transformar dispositivos con protocolos de comunicación cerrados en nodos activos dentro de redes de datos modernas. El proceso metodológico se dividió en cuatro fases secuenciales que garantizan la integridad del hardware y la fidelidad de los datos obtenidos: (a) caracterización de la capa física, (b) auditoría pasiva de tráfico, (c) análisis diferencial de registros y (d) validación de la arquitectura de integración.

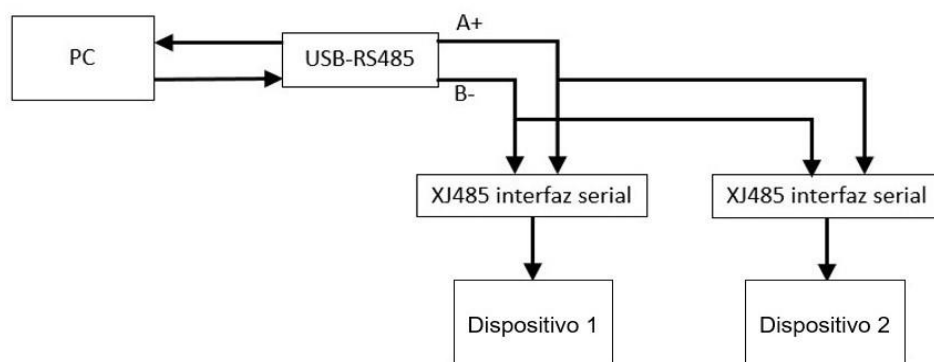
Diseño de la Arquitectura de Comunicación y Capa Física

La base de la propuesta radica en el aprovechamiento del bus físico RS-485, estándar predominante en la industria por su robustez ante ruidos electromagnéticos y su capacidad de cubrir distancias de hasta 1200 metros (Guarese, 2012). Para garantizar la integridad de la señal en redes con múltiples dispositivos legado, se implementó una

topología de bus lineal con terminaciones de 120 ohms, evitando las reflexiones de señal que suelen comprometer la estabilidad en sistemas de alta densidad de nodos como se puede ver en la Figura 1.

Figura 1

Arquitectura de comunicación entre el computador y los dispositivos legados.



Nota. Elaboración propia (2026).

En cuanto a la capa de enlace, se seleccionó el protocolo Modbus RTU debido a su carácter abierto y determinista. La configuración de los parámetros de comunicación (baudaje, paridad y bits de parada) se estandarizó para permitir la coexistencia de dispositivos de diversas generaciones (Modbus Organization, 2012). Esta decisión técnica se alinea con la necesidad de crear infraestructuras de datos horizontales, donde el hardware no sea una barrera para la adquisición de información en tiempo real.

Procedimiento de ingeniería inversa: análisis de comportamiento y escaneo diferencial

El núcleo de la metodología propuesta consiste en un procedimiento iterativo de descubrimiento de registros, diseñado para identificar variables críticas en dispositivos sin documentación técnica. Este proceso se ejecutó bajo una lógica de caja negra estructurada en las siguientes etapas:

1. Caracterización funcional y observación. Inicialmente, se realizó una fase de observación del comportamiento del dispositivo legado en operación. El objetivo fue identificar las variables físicas de interés (temperaturas, estados de relés, puntos de consigna o setpoints) y determinar cuáles de estas permiten una manipulación directa a través de la interfaz física del equipo.

2. Escaneo de línea de base. Se utilizó una herramienta de inspección desarrollada a medida para realizar un barrido completo de todas las direcciones de memoria posibles utilizando un código de función específico. La herramienta almacenó automáticamente todas las direcciones que respondieron exitosamente al comando, junto con sus valores hexadecimales en estado de reposo.
3. Inducción de cambio y escaneo diferencial. Una vez establecida la línea de base, se procedió a manipular manualmente una variable específica en el hardware (por ejemplo, elevando el valor de una alarma o modificando un parámetro de control). Inmediatamente después, se ejecutó un segundo escaneo masivo. La herramienta comparó ambos estados y filtró únicamente aquellas direcciones cuyos valores sufrieron una modificación correlacionada con la acción realizada.
4. Análisis de correspondencia y validación iterativa. Tras obtener un conjunto reducido de candidatos, se realizó una inspección visual y técnica para descartar registros que cambian por procesos internos del dispositivo (ruido, contadores internos o variaciones de sensores). El ciclo de manipulación y escaneo se repitió múltiples veces para diferentes valores de la misma variable, permitiendo descartar falsos positivos y confirmar con precisión absoluta la dirección de memoria asociada a la variable de interés.

Desarrollo de la herramienta de inspección de datos en .NET

Para la ejecución de la metodología de ingeniería inversa, se diseñó y programó una herramienta de software independiente, concebida como un instrumento de diagnóstico especializado. El desarrollo se realizó bajo el entorno .NET 8 (Microsoft, 2024), utilizando el lenguaje C#, lo que permitió aprovechar las capacidades de alto rendimiento y la gestión eficiente de recursos para la comunicación serie en tiempo real.

La arquitectura de la herramienta se centró en la estandarización y flexibilidad del protocolo Modbus RTU. A diferencia de las soluciones comerciales cerradas, este software permite una parametrización exhaustiva de la capa de enlace, facilitando la conexión a través de interfaces USB-Serial. El usuario puede configurar de forma dinámica los siguientes parámetros críticos:

- Configuración del enlace físico. Selección del puerto de comunicación, velocidad de transmisión, paridad y bits de parada.
- Definición del nodo. Especificación de la dirección del dispositivo esclavo dentro del bus Modbus.

- Selección de registros. Capacidad para alternar entre diferentes tipos de registros de datos, tales como Holding Registers, Input Registers, Coils o Discrete Inputs, según la naturaleza del hardware inspeccionado.

Un componente distintivo de la herramienta es su motor de gestión de tiempos. Se implementaron algoritmos específicos para el control de los tiempos de espera y los intervalos de consulta, garantizando la estabilidad de la lectura en dispositivos legado que poseen procesadores con ciclos de escaneo lentos. Además, el software integra un sistema de monitoreo de excepciones que decodifica y presenta los códigos de error estándar de Modbus, lo cual es fundamental para descartar direcciones de memoria inválidas durante el escaneo masivo.

Esta herramienta no solo actúa como un escáner, sino como un puente de validación que asegura la integridad de los datos antes de su integración definitiva en arquitecturas más complejas. Al ser un software autónomo, su aplicación se extiende a cualquier entorno industrial que requiera descubrir la lógica de comunicación de activos antiguos, eliminando la necesidad de herramientas de configuración propietarias y costosas.

Resultados

Escenario de validación: caso de estudio en instalación industrial

Para verificar la eficacia de la metodología de ingeniería inversa y el desempeño de la herramienta de inspección en .NET, se llevó a cabo una fase de validación experimental en un entorno industrial real. El escenario de prueba consistió en una planta de procesamiento térmico equipada con una red de 44 controladores digitales de la serie Dixell (modelos XT111C, XR60CX), los cuales operaban bajo el protocolo Modbus RTU pero carecían de documentación técnica actualizada respecto a su mapa de registros como se pueden ver en los manuales de XT111C (Dixell S.r.l., 2013) y XR60CX (Dixell S.r.l., 2012).

Tabla 1

Variables de interés de dispositivo XT111C

Variable	Tipo de Variable	Rango		Descripción
Temperatura	Analógica	-50.0°C 100.0°C	a +	Variable de proceso medida por la sonda principal (NTC/PTC) en la cámara térmica.
SetPoint	Analógica	-50.0°C 100.0°C	a +	Punto de consigna objetivo configurado para el control de la temperatura de la planta.

Calentador	Digital	0 o 1	Estado físico del relé de salida principal destinado a la activación de la etapa de potencia térmica.
On/Off	Digital	0 o 1	Estado de encendido lógico o modo de trabajo del controlador desde el sistema de supervisión.

Nota. Elaboración propia (2026).

La identificación inicial de las variables del controlador XT111C permitió delimitar los parámetros esenciales para el seguimiento térmico y el control básico del proceso. Sin embargo, la red instalada no estaba compuesta por un único tipo de dispositivo, sino por controladores con funciones operativas diferenciadas. Por ello, fue necesario extender la caracterización al modelo XR60CX, cuyas variables incorporan elementos adicionales vinculados al ciclo de refrigeración, como el compresor, el descongelamiento y el ventilador. Esta comparación permitió establecer una base funcional homogénea para aplicar posteriormente el escaneo diferencial sobre ambos modelos.

Tabla 2

Variables de interés de dispositivo XR60CX

Variable	Tipo de Variable	Rango	Descripción
Temperatura	Analógica	-50.0°C a +100.0°C	Variable de proceso medida por la sonda principal (NTC/PTC) en la cámara térmica.
SetPoint	Analógica	-50.0°C a +100.0°C	Punto de consigna objetivo configurado para el control de la temperatura de la planta.
Compresor	Digital	0 o 1	Estado físico del relé de salida principal destinado a la activación del compresor.
Descongelar	Digital	0 o 1	Estado físico del relé de salida principal destinado a la activación de la etapa de descongelación.
Ventilador	Digital	0 o 1	Estado físico del relé de salida principal destinado a la activación del ventilador.
On/Off	Digital	0 o 1	Estado de encendido lógico o modo de trabajo del controlador desde el sistema de supervisión.

Nota. Elaboración propia (2026).

Estos dispositivos presentaban el desafío típico de los sistemas legado: hardware robusto y funcional, pero dependiente de una pasarela propietaria obsoleta. La metodología se aplicó para descubrir las direcciones de memoria de las variables críticas (ver Tabla 1 y

Tabla 2) necesarias para la supervisión y el control operativo, tales como temperaturas de cámara, estados de alarmas y puntos de consigna (setpoints).

Eficacia del descubrimiento de datos mediante escaneo diferencial.

La aplicación del procedimiento permitió la identificación exitosa de las variables de interés definidas para el caso de estudio. Los resultados del proceso de ingeniería inversa en este caso de estudio permitieron la identificación de los registros de comunicación en los dispositivos XT111C y XR60CX como se puede apreciar en las Tabla 3 y 4 seguidamente.

Tabla 3

Registros identificados en el dispositivo XT111C

Variable	Dirección del registro	Tipo de registro	Acepta lectura	Acepta escritura	Cambio de estado
Temperatura	256	Holding Register	Si	No	Valor Analógico
SetPoint	768	Holding Register	Si	Si	Valor Analógico
Calentador	1025	Holding Register	Si	No	65535 activa calentador y 1 desactiva calentador
On/Off	1280	Holding Register	Si	Si	65535 activa On y 1 activa Off

Nota. Elaboración propia (2026).

Una vez identificados los registros correspondientes al dispositivo XT111C, el procedimiento se replicó en el controlador XR60CX con el propósito de verificar la consistencia de la metodología ante una arquitectura funcional más amplia. A diferencia del primer modelo, el XR60CX integra salidas digitales adicionales asociadas al compresor, el descongelamiento y el ventilador, lo que exigió distinguir entre registros de lectura, escritura y cambio de estado. La Tabla 4 presenta estos resultados y permite evidenciar que el escaneo diferencial no solo identificó variables analógicas comunes, sino también estados discretos relevantes para la supervisión y el control operativo.

Tabla 4*Registros identificados en el dispositivo XR60CX*

Variable	Dirección del registro	Tipo de registro	Acepta lectura	Acepta escritura	Cambio de estado
Temperatura	256	Holding Register	Si	No	Valor Analógico
SetPoint	768	Holding Register	Si	Si	Valor Analógico
Compresor	1025	Coil Register	Si	No	1 activa compresor y 0 desactiva compresor
Descongelar	513	Coil Register	Si	Si	1 activa descongelar y 0 desactiva descongelar
Ventilador	539	Coil Register	Si	No	1 activa ventilador y 0 desactiva ventilador
On/Off	1280	Coil Register	Si	Si	1 activa On y 0 activa Off

Nota. Elaboración propia (2026).**Desempeño técnico y estabilidad de la comunicación.**

Una vez integrados los 44 dispositivos en un bus RS-485 unificado bajo la arquitectura diseñada, se evaluó el rendimiento de la comunicación directa. Los resultados técnicos más relevantes incluyeron:

- Velocidad de respuesta. Se logró una tasa de actualización de datos inferior a 500 ms por nodo, garantizando un flujo de información en tiempo real apto para la toma de decisiones críticas.
- Robustez. La gestión de timeouts y reintentos programada en la herramienta de inspección permitió una tasa de error inferior al 0.1%, superando la inestabilidad característica de los métodos de adquisición indirectos como el web scraping.
- Capacidad de escritura. Se demostró la capacidad de modificar parámetros de operación de forma remota y segura, transformando dispositivos que anteriormente eran de "solo lectura" en elementos de control bidireccional.

Impacto socioeconómico y ambiental de la interoperabilidad lograda

Más allá de la validación técnica, la implementación de la metodología arrojó resultados significativos en términos de sostenibilidad y autonomía operativa, transformando la infraestructura de la planta bajo los siguientes ejes:

Impacto en la economía circular y ciclo de vida. La integración exitosa de los 44 controladores evitó la obsolescencia técnica de activos mecánicamente funcionales. Como resultado directo, se evitó de forma directa la sustitución de los 44 controladores funcionales, mitigando potencialmente la generación de residuos electrónicos del proyecto. Este hallazgo valida otros ensayos (Lares & Henríquez, 2021) sobre la regeneración de activos como una estrategia crítica de economía circular, demostrando que la ingeniería de software puede extender la vida útil de los equipos industriales y reducir la demanda de recursos naturales para la fabricación de nuevos componentes (Lares & Hernández, 2021):

Logro de soberanía tecnológica y viabilidad económica. Se demostró la independencia del fabricante al sustituir las pasarelas propietarias por una capa de software abierta y personalizada. Los resultados financieros indican que este enfoque es un 46% más costo-efectivo que las soluciones comerciales cerradas. Esta independencia no solo se traduce en ahorro, sino en una infraestructura resiliente donde los ingenieros locales poseen el control total de la configuración y la información, cumpliendo con los estándares de soberanía tecnológica propuestos (Hernández-Fuentes, 2022).

Eficiencia energética mediante transparencia de datos. La interoperabilidad lograda permitió alcanzar una granularidad de datos antes inexistente en la planta. Al obtener una comunicación bidireccional con latencias mínimas, el sistema quedó habilitado para la ejecución de algoritmos de optimización de carga. Este resultado es el fundamento para una "industria verde", ya que la monitorización precisa del consumo eléctrico y los perfiles térmicos permite reducir picos de demanda, demostrando que la modernización de sistemas antiguos es la vía más rápida y económica hacia la eficiencia energética global.

Discusión

Los resultados obtenidos confirman que la ingeniería inversa sistemática es una alternativa robusta y económicamente viable para la modernización de infraestructuras industriales legacy. A diferencia de las tendencias actuales que sugieren la sustitución total del hardware para alcanzar la compatibilidad con la Industria 4.0, de ahí que se demuestra que la capa de comunicación es el verdadero cuello de botella y no la capacidad física de los dispositivos.

Un punto crítico de comparación es la estabilidad de la adquisición de datos. Mientras que autores como (Fernandez, 2025) advierten sobre la fragilidad del web scraping debido a su dependencia de interfaces gráficas de terceros y altas latencias, la metodología de comunicación directa por Modbus RTU validada en este trabajo ofrece un determinismo técnico superior. Al eliminar intermediarios y acceder directamente a los registros del microcontrolador, se logra una tasa de error significativamente baja (0.1%), lo cual es imperativo para sistemas donde el control de temperatura y potencia afecta directamente la calidad del producto final.

En cuanto a la innovación metodológica, el proceso de escaneo diferencial propuesto supera la limitación del "vendedor único". Mientras que los fabricantes suelen condicionar el acceso a los datos mediante pasarelas propietarias costosas el uso de la herramienta de inspección desarrollada en .NET 8 permite una independencia tecnológica total. Este hallazgo es consistente con los principios de soberanía tecnológica planteados (Hernández-Fuentes, 2022). Este autor subraya la importancia de que las industrias posean el control absoluto sobre sus activos y protocolos.

Desde la dimensión del desarrollo sostenible y la gestión ambiental exigida para ecosistemas industriales circulares, la discusión debe centrarse en la eficiencia adaptativa de los recursos y la mitigación del impacto ecológico derivado de la obsolescencia tecnológica. La reducción de costos del 46% identificada no representa únicamente un beneficio financiero directo, sino un indicador de eco-eficiencia material.

Al evitar la sustitución prematura de controladores robustos, se interrumpe la cadena de suministro lineal de nuevos componentes, cuya manufactura global genera una huella de carbono intensiva y una demanda crítica de materias primas vírgenes (Alobuela & Morocho, 2021). Este enfoque de ingeniería de software como herramienta de reparación y extensión de la vida útil de activos legados se alinea con las estrategias prioritarias de la economía circular, donde mantener el valor de los productos en uso el mayor tiempo posible es clave para frenar el flujo global de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE).

De acuerdo con Ghisellini et al (2023) la resiliencia industrial moderna depende de metodologías replicables que desafíen las directrices de obsolescencia de los fabricantes mediante la interoperabilidad de código abierto. Asimismo, los resultados complementan las advertencias de Bocken y Short (2016) quienes señalan que las evaluaciones de sostenibilidad a menudo fallan al no contabilizar el impacto de la chatarra electrónica evitada a nivel de planta. Al dotar a la instalación de una transparencia de datos que optimiza el consumo eléctrico y los perfiles térmicos en tiempo real, la modernización de

sistemas antiguos demuestra que la ingeniería de software puede actuar como un catalizador directo hacia la eficiencia energética global.

Limitaciones

A pesar de la viabilidad técnica y los resultados positivos obtenidos en el escenario de validación, es imperativo reconocer las limitaciones inherentes a este estudio. En primer lugar, la metodología de escaneo diferencial propuesta se encuentra circunscrita a dispositivos industriales que operen bajo el protocolo Modbus RTU sobre la capa física RS-485. Por lo tanto, su reproducibilidad en entornos que utilicen protocolos propietarios basados en buses de campo distintos o variantes Ethernet industriales requeriría de adaptaciones significativas en el motor de gestión de tiempos de la herramienta de software.

En segundo lugar, los ensayos experimentales se limitaron a controladores de la marca Dixell (modelos XT111C y XR60CX); si bien los resultados demuestran la robustez del método para esta gama de hardware, el comportamiento del algoritmo de inspección ante microcontroladores de otros fabricantes que implementen mapas de memoria dinámicos o rutinas de encriptación de datos permanece fuera del alcance de este trabajo.

Conclusiones

Los hallazgos derivados de la aplicación de la metodología y la herramienta de inspección permiten establecer las siguientes conclusiones: la metodología permitió identificar la totalidad de las variables críticas definidas para el caso de validación, bajo las condiciones específicas de una red de 44 controladores Dixell con comunicación Modbus RTU. Estos resultados evidencian la utilidad del análisis diferencial de registros como procedimiento de interoperabilidad para dispositivos legados, aunque su generalización técnica requiere validación futura en otros fabricantes, protocolos y entornos industriales.

El software de inspección desarrollado demostró ser un instrumento de diagnóstico superior a las soluciones genéricas, al permitir una parametrización exhaustiva de la capa física y un manejo avanzado de errores y tiempos de espera. Su arquitectura independiente garantiza la integridad de los datos y facilita la transición de hardware legado hacia ecosistemas de Industria 4.0 de forma estable.

Es posible mitigar de manera significativa la dependencia tecnológica del proveedor en el escenario analizado. Al establecer comunicación directa y bidireccional mediante estándares abiertos, se prescinde de pasarelas propietarias y licencias restrictivas,

otorgando a la entidad un mayor control sobre su configuración y la propiedad de sus datos operativos.

La modernización mediante este enfoque resultó ser una opción más económica que la sustitución total de activos o la adquisición de hardware de enlace comercial. Esta eficiencia financiera, sumada al rendimiento técnico alcanzado (tasa de error < 0.1%), posiciona a la metodología como una solución escalable para diversos sectores que operan con sistemas de control antiguos.

Se demostró que la extensión de la vida útil del hardware funcional es una práctica tangible de economía circular. Al evitar el desecho de controladores robustos, se reduce la generación de residuos electrónicos y se optimiza el consumo energético a través de la transparencia de datos, logrando un equilibrio entre el avance tecnológico y la responsabilidad ambiental. Como línea futura de investigación, se plantea la migración de esta arquitectura hacia protocolos IoT abiertos como MQTT u OPC UA, así como la evaluación de mecanismos de ciberseguridad en la comunicación bidireccional.

Declaración Ética y Uso de Inteligencia Artificial

El autor declara que se empleó Gemini de manera parcial y auxiliar para apoyo en la generación preliminar de código y la detección de errores de programación en la herramienta desarrollada en .NET 8. El contenido científico, la interpretación de los resultados, la redacción final, la validación técnica y la responsabilidad integral del manuscrito corresponden exclusivamente al autor. Se aclara que todo el código generado con asistencia de IA fue revisado manualmente, probado en un entorno de simulación controlado y validado exhaustivamente antes de su implementación en la planta industrial real.

Conflicto de Intereses

El autor declara que no existen conflictos de intereses relacionados con esta investigación y que todos los procedimientos seguidos cumplen con los estándares éticos establecidos por REDIT Verde. Asimismo, confirma que este trabajo es original e inédito y no ha sido publicado, ni parcial ni totalmente, en ninguna otra publicación.

Referencias

- Aguilar García, S. K & Plaza, D. (2020). *Co-simulación de una estación de paletizado entre un PLC virtual SIEMENS y el modelo de la planta en C#* [Trabajo de titulación de grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. Repositorio Institucional ESPOL. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/57192>
- Alobuela, M. S. A & Morocho, F. R. A. (2021). Industria 4.0 y economía circular: revisión de la literatura y recomendaciones para una industria sustentable en Ecuador. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 5(6), 14623-14638. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i6.1422
- Bocken, N. M & Short, S. W. (2016). Towards a sufficiency-driven business model: Experiences and opportunities. *Environmental innovation and societal transitions*, 18, 41-61. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2015.07.010>

- Burns, T., Cosgrove, J & Doyle, F. (2019). A review of interoperability standards for industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 38, 646-653. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.083>
- Díaz-Bastos, E. J., Gómez-Bolaño, C. A & Mendoza-Granados, S. I. (2025). Impacto de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos en el desarrollo sostenible. *Agroecología Global. Revista Electrónica de Ciencias del Agro y Mar*, 7(13), 4-27. <https://doi.org/10.35381/a.g.v7i13.4568>
- Dixell S.r.l. (2012). *Controladores digitales con gestión de deshielo y ventiladores XR60CX* [Manual de usuario]. <https://www.manualslib.es/manual/628922/Dixell-Xr60Cx.html>
- Dixell S.r.l. (2013). *Controladores digitales de una etapa con entrada multi-sonda XT110C-XT111C-XT110D-XT111D* [Manual de usuario]. <https://www.manualslib.es/manual/372504/Emerson-Dixell-Xt110C.html>
- Estrada, G. L. E., Lóor, E. L. V., Alvarado, N. R. V & Alarcón, L. F. J. (2025). Gestión ambiental y control de riesgos en la operación de plantas industriales. *Multidisciplinary Journal of Sciences, Discoveries, and Society*, 2(5), 1-15. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/10359695.pdf>
- Fernández, I. A. (2025). *Estudio práctico de utilización de tecnologías web como soporte a la Industria 4.0* [Trabajo de fin de grado, Universitat Politècnica de València]. Riunet Repositorio Institucional. <https://riunet.upv.es/server/api/core/bitstreams/0c111a1c-cf71-4f98-a0fd-ef8f5a6b91be/content>
- Ghisellini, P., Quinto, I., Passaro, R & Ulgiati, S. (2023). Circular economy management of waste electrical and electronic equipment (WEEE) in Italian urban systems: comparison and perspectives. *Sustainability*, 15(11), 9054. <https://doi.org/10.3390/su15119054>
- Guarese, G. B. M. (2012). Arquitetura híbrida de comunicação para ambientes de automação industrial: protocolos IEEE 802.15.4 e Modbus RTU sobre RS485. *Revista da Graduação*, 5(2), 1-12. <https://revistaseletronicas.pucrs.br/graduacao/article/view/12431>
- Hernández-Fuentes, A. P. (2022). Cooperación digital y soberanía tecnológica para cerrar la brecha digital en la cuarta revolución industrial. *Oasis*, (36), 77-94. <https://doi.org/10.18601/16577558.n36.06>
- Lares, L & Henríquez, A. (2021). Diseño regenerativo y economía circular. *Cuadernos del Centro de Estudios en Diseño y Comunicación. Ensayos*, (134), 19-34. <https://doi.org/10.18682/cdc.vi134.5011>
- López, G. B & Velasteguí, L. E. (2021). Automatización de procesos industriales mediante Industria 4.0. *AlfaPublicaciones*, 3(3.1), 98-115. <https://doi.org/10.33262/ap.v3i3.1.80>
- Microsoft. (2024). *.NET documentation*. Microsoft Learn. <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/>
- Modbus Organization. (2012). *Modbus Application Protocol Specification V1.1b3*. Modbus.org. <https://modbus.org/specs.php>