



Fecha de recepción: 2024-08-07

Fecha de aceptación: 2024-09-07

Fecha de publicación: 2024-10-07

Internet de las cosas industrial y sincronización temporal en redes de sensores heterogéneas

Odalis Michelle Hernandez Yepez

odalis22hernandez@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-6479-9171>

Universidad Estatal Península de Santa Elena

Santa Elena - Ecuador

Resumen

El desarrollo del Internet de las cosas industrial ha evidenciado limitaciones en la sincronización temporal de redes de sensores heterogéneas, especialmente por efectos de latencia, pérdida de datos y diversidad tecnológica. El objetivo fue analizar la incidencia de la sincronización temporal en el desempeño del IIoT considerando variables como calidad de red e interoperabilidad. Se utilizó un enfoque cuantitativo, con diseño no experimental y datos provenientes de organismos nacionales e internacionales, aplicando regresión múltiple y ecuaciones estructurales. Los resultados muestran que la latencia presenta una relación negativa significativa con la precisión temporal, mientras que la calidad de la red influye positivamente en la sincronización. Asimismo, la heterogeneidad de dispositivos limita la interoperabilidad y afecta la integración del sistema. Estos hallazgos evidencian que la sincronización temporal es determinante para la eficiencia operativa y la toma de decisiones en tiempo real en entornos industriales digitalizados.

Palabras clave: Internet de las cosas industrial, sincronización temporal, redes de sensores heterogéneas, latencia de red, interoperabilidad, industria 4.0



Industrial Internet of Things and time synchronization in heterogeneous sensor networks

Abstract

The development of the Industrial Internet of Things has revealed limitations in time synchronization within heterogeneous sensor networks, particularly due to latency, data loss, and technological diversity. The objective was to analyze the impact of time synchronization on IIoT performance, considering variables such as network quality and interoperability. A quantitative approach was applied, using a non-experimental design and data from national and international organizations, with multiple regression and structural equation modeling. Results indicate that latency has a significant negative relationship with temporal accuracy, while network quality positively affects synchronization. Additionally, device heterogeneity limits interoperability and system integration. These findings demonstrate that time synchronization is a key factor for operational efficiency and real-time decision-making in industrial digital environments.

Keywords: Industrial Internet of Things, time synchronization, heterogeneous sensor networks, network latency, interoperability, Industry 4.0

Introducción

La evolución acelerada de los sistemas productivos hacia esquemas de digitalización avanzada ha situado al Internet de las cosas industrial como un componente estructural dentro de la Industria 4.0, caracterizada por la integración de sensores, dispositivos inteligentes y plataformas de análisis en tiempo real. En este contexto, la interconectividad entre objetos físicos permite la captura, transmisión y procesamiento continuo de datos, lo que fortalece la automatización y la toma de decisiones basada en información. Estudios recientes evidencian que esta transformación tecnológica ha incrementado la eficiencia operativa en entornos industriales, especialmente en procesos de manufactura inteligente y control automatizado (García, 2022).

En el ámbito industrial, la adopción del Internet de las cosas industrial implica la convergencia entre tecnologías operacionales y sistemas digitales, posibilitando la supervisión remota, el mantenimiento predictivo y la optimización de recursos. Sin embargo, la integración de dispositivos heterogéneos en redes distribuidas representa uno de los principales desafíos técnicos, debido a la coexistencia de múltiples protocolos de comunicación, arquitecturas y niveles de capacidad computacional. En consecuencia, la interoperabilidad y la sincronización temporal emergen como elementos críticos para garantizar la coherencia de los datos y la correcta ejecución de procesos automatizados (Pérez & Gómez, 2021).

Desde una perspectiva técnica, las redes de sensores heterogéneas constituyen la base estructural del Internet de las cosas industrial, al permitir la recolección de datos desde diversas fuentes con diferentes características funcionales. Estas redes, compuestas por dispositivos con variaciones en precisión, consumo energético y procesamiento, requieren mecanismos avanzados de coordinación temporal para asegurar la integridad de la información. En este sentido, la sincronización temporal se posiciona como un factor determinante para aplicaciones críticas como el control distribuido, la detección de eventos en tiempo real y la fusión de datos multisensoriales, donde pequeñas desviaciones



temporales pueden generar inconsistencias significativas en los resultados (Rodríguez et al., 2023).

Adicionalmente, la literatura reciente señala que la sincronización temporal en entornos de Internet de las cosas industrial no depende exclusivamente de algoritmos de ajuste de relojes, sino también de variables asociadas a la latencia de red, la calidad del enlace y la eficiencia de los protocolos de comunicación. La adopción de tecnologías como MQTT y OPC UA ha contribuido a mejorar la confiabilidad de las comunicaciones industriales; sin embargo, la heterogeneidad de los sistemas continúa representando un desafío relevante para la alineación temporal de los dispositivos. Por tanto, el desarrollo de modelos de sincronización adaptativos y escalables se vuelve esencial para garantizar el desempeño de los sistemas inteligentes (Sánchez, 2022).

En este marco, esta investigación se orienta a analizar la relación entre el Internet de las cosas industrial y la sincronización temporal en redes de sensores heterogéneas, abordando los principales desafíos asociados a la interoperabilidad, la latencia y la precisión temporal. Se busca contribuir al desarrollo del conocimiento mediante la identificación de enfoques teóricos y metodológicos que permitan mejorar la coordinación temporal en sistemas distribuidos, así como evaluar su impacto en la eficiencia operativa en entornos industriales digitalizados. El estudio se estructura en la definición del problema, formulación de objetivos, desarrollo del marco teórico, diseño metodológico, análisis de resultados, discusión de hallazgos y elaboración de conclusiones orientadas a la generación de conocimiento científico aplicable en el campo del Internet de las cosas industrial.

Marco teórico

Fundamentos del Internet de las cosas industrial en una línea de envasado automatizada

En una línea de envasado automatizada, donde intervienen sensores de temperatura, presión, vibración y sistemas de etiquetado inteligente, el Internet de las cosas industrial se manifiesta como una arquitectura integrada que permite coordinar operaciones en tiempo real y optimizar la eficiencia del proceso productivo. En este contexto, el IIoT constituye una extensión especializada del IoT orientada a entornos industriales, donde la interconexión entre dispositivos físicos y plataformas digitales facilita la captura, transmisión y análisis continuo de datos operativos. Esta capacidad de integración tecnológica ha sido ampliamente reconocida como un elemento central en la evolución hacia la Industria 4.0, en la cual los sistemas productivos adoptan esquemas inteligentes de automatización y control (Martínez & Mesías, 2021).

Desde una perspectiva estructural, el IIoT se organiza en múltiples capas que incluyen la percepción, la comunicación, el procesamiento y la aplicación, cada una con funciones específicas dentro del ecosistema industrial. La literatura reciente sostiene que la digitalización de procesos productivos exige la incorporación de tecnologías que permitan la trazabilidad y el monitoreo continuo de variables críticas (Cumbal Simba et al., 2021). En este sentido, la integración de sensores distribuidos posibilita la supervisión remota de activos y la detección temprana de anomalías en los sistemas industriales, lo cual contribuye a mejorar la eficiencia operativa y reducir tiempos de inactividad.



No obstante, la implementación del IIoT enfrenta desafíos significativos asociados a la interoperabilidad entre dispositivos heterogéneos. La coexistencia de diferentes protocolos de comunicación y arquitecturas tecnológicas obliga a diseñar soluciones que garanticen la compatibilidad entre los componentes del sistema (Chuquimarca & Sinche Maita, 2022). De manera complementaria, la conectividad mediante tecnologías emergentes como NB-IoT permite ampliar la cobertura de comunicación en entornos industriales, aunque su desempeño depende de factores como la latencia y la estabilidad de la red (López Pujota & Sinche Maita, 2022).

En términos operativos, la adopción del IIoT permite transformar procesos tradicionales en sistemas inteligentes capaces de adaptarse dinámicamente a cambios en el entorno productivo. Esta transición implica la incorporación de herramientas de análisis de datos y automatización avanzada que facilitan la toma de decisiones en tiempo real (Rodríguez-Correa et al., 2023). A su vez, la convergencia entre tecnologías digitales y sistemas físicos redefine la estructura organizacional de las empresas, impulsando nuevos modelos de gestión basados en la información (Camargo-Amado & Mosquera-Ayala, 2023).

Asimismo, el desarrollo del IIoT no solo tiene implicaciones técnicas, sino también organizacionales y sociales. La adopción de tecnologías digitales en entornos industriales requiere considerar aspectos relacionados con la seguridad de la información, la ética en el manejo de datos y la brecha tecnológica entre organizaciones (Gutiérrez Prada et al., 2022). En consecuencia, el IIoT debe entenderse como un sistema complejo que integra infraestructura tecnológica, procesos organizacionales y capacidades humanas para alcanzar niveles superiores de eficiencia y competitividad.

Sincronización temporal en redes de sensores heterogéneas en una celda de mantenimiento predictivo

En una celda de mantenimiento predictivo, donde sensores de vibración, temperatura y corriente monitorean continuamente el estado de maquinaria industrial, la sincronización temporal se convierte en un elemento esencial para garantizar la coherencia de los datos recolectados. En este tipo de escenarios, las redes de sensores heterogéneas están compuestas por dispositivos con diferentes capacidades de procesamiento, frecuencias de muestreo y protocolos de comunicación, lo que introduce complejidades en la alineación temporal de la información. La literatura especializada señala que la sincronización es un requisito fundamental para el funcionamiento adecuado de redes distribuidas, especialmente en aplicaciones donde la precisión temporal influye directamente en la calidad del análisis (Egas Acosta & Gil-Castiñeira, 2021).

Desde el punto de vista técnico, la sincronización temporal permite coordinar eventos registrados por múltiples sensores, evitando inconsistencias en la interpretación de los datos. En redes de sensores inalámbricos, factores como la latencia, la pérdida de paquetes y la calidad del enlace pueden afectar significativamente la precisión temporal del sistema (Vinueza & Llugsi Cañar, 2022). Por esta razón, es necesario implementar mecanismos de compensación de retardo y ajuste de relojes que permitan mantener la coherencia entre los nodos de la red.

En aplicaciones industriales, la sincronización adquiere una relevancia crítica cuando se requiere correlacionar múltiples variables para detectar fallas o anomalías en los sistemas. La integración de dispositivos heterogéneos en entornos IoT demanda soluciones que



aseguren la interoperabilidad y la consistencia temporal de los datos (Muñoz Velasco & Niño Zambrano, 2023). De igual manera, la implementación de sistemas de monitoreo basados en sensores distribuidos ha demostrado que la frecuencia de medición y la oportunidad en la transmisión de datos son determinantes para la efectividad del sistema (Aguilar-González et al., 2023).

Adicionalmente, la sincronización temporal no depende únicamente de los algoritmos de ajuste de relojes, sino también de la arquitectura del sistema y de los protocolos de comunicación utilizados. La integración de plataformas IoT en entornos industriales requiere considerar la interacción entre sensores, gateways y sistemas de procesamiento, así como la latencia introducida por cada uno de estos componentes (Hernández Mendoza et al., 2022). En este sentido, la correcta coordinación temporal permite mejorar la precisión de los sistemas de mantenimiento predictivo y optimizar la toma de decisiones en tiempo real.

Por otra parte, la sincronización temporal se encuentra estrechamente vinculada con la capacidad de los sistemas para generar información útil y confiable. La captura de datos en diferentes momentos sin una referencia temporal adecuada puede dificultar la identificación de patrones y la detección de eventos críticos. En consecuencia, la alineación temporal de los datos se convierte en un requisito indispensable para el análisis avanzado y la implementación de estrategias de mantenimiento basadas en condiciones reales de operación (Sinaluisa Lozano et al., 2023).

En síntesis, la sincronización temporal en redes de sensores heterogéneas constituye un componente esencial para el funcionamiento eficiente del Internet de las cosas industrial. Su adecuada implementación permite garantizar la coherencia de los datos, mejorar la precisión de los análisis y fortalecer la capacidad de respuesta de los sistemas industriales ante eventos críticos, consolidando así su papel dentro de los entornos productivos digitalizados.

Materiales y métodos

En primer término, se adopta un enfoque cuantitativo de alcance explicativo, orientado a examinar la relación entre el Internet de las cosas industrial y la sincronización temporal en redes de sensores heterogéneas, a partir del análisis de información secundaria. La recolección de datos se fundamenta en informes técnicos, bases estadísticas y reportes institucionales emitidos por organismos internacionales como la Comisión Económica para América Latina y el Caribe, el Banco Mundial y la Unión Internacional de Telecomunicaciones, así como por entidades nacionales tales como el Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información y el Instituto Nacional de Estadística y Censos. Estas fuentes permiten caracterizar variables vinculadas con la infraestructura digital, niveles de conectividad, desempeño de redes y adopción tecnológica en entornos industriales.

En correspondencia con el diseño metodológico, se emplea un estudio no experimental de corte transversal, dado que las variables se analizan en su contexto natural sin intervención del investigador, lo que posibilita observar las interrelaciones existentes entre los sistemas IIoT y los mecanismos de sincronización temporal en escenarios reales. La información recopilada es organizada mediante matrices de sistematización que integran indicadores relacionados con latencia, interoperabilidad, calidad de servicio y



precisión temporal, contruidos sobre la base de estándares internacionales y evidencia técnica disponible en informes especializados sobre redes IoT industriales.

Desde el punto de vista analítico, se implementa el modelo de ecuaciones estructurales (SEM), técnica estadística multivariante que permite evaluar simultáneamente relaciones causales entre variables latentes y observadas. Este método resulta particularmente pertinente para el estudio de sistemas tecnológicos complejos, ya que facilita la estimación de constructos como eficiencia operativa, desempeño de red y coherencia temporal, a través de indicadores como cargas factoriales, varianza extraída promedio y coeficientes estructurales.

De manera complementaria, se aplica el análisis de regresión múltiple con el propósito de determinar la incidencia de variables independientes —como la latencia de red, el tipo de protocolo de comunicación y el grado de heterogeneidad de los dispositivos— sobre la variable dependiente asociada a la precisión temporal del sistema. Este procedimiento permite cuantificar la magnitud y dirección de las relaciones entre variables, así como construir modelos predictivos sobre el comportamiento de redes de sensores en entornos industriales.

En cuanto a la validación de los instrumentos analíticos, se emplea el coeficiente alfa de Cronbach para evaluar la consistencia interna de los indicadores utilizados, asegurando la fiabilidad de las mediciones. Asimismo, se recurre a la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk con el fin de verificar la distribución de los datos y determinar la idoneidad de los métodos estadísticos seleccionados, garantizando el rigor del análisis inferencial.

Finalmente, el procesamiento de la información se realiza mediante el uso de herramientas especializadas como SPSS y SmartPLS, que permiten la estimación de modelos estadísticos complejos y la representación gráfica de relaciones estructurales. Este enfoque metodológico integral contribuye a la obtención de resultados consistentes y a la generación de conocimiento científico aplicable al análisis del impacto de la sincronización temporal en el desempeño del Internet de las cosas industrial.

Resultados

En primer lugar, el análisis descriptivo de la información recopilada a partir de organismos internacionales y entidades nacionales evidenció que los sistemas basados en Internet de las cosas industrial presentan una alta variabilidad en el desempeño de la red, particularmente en términos de latencia, estabilidad de conexión y heterogeneidad de dispositivos. En este sentido, la integración de tecnologías IoT en entornos industriales ha demostrado mejorar la eficiencia operativa mediante la automatización y el monitoreo continuo de variables críticas, lo cual coincide con los planteamientos de Rodríguez-Correa et al. (2023). Asimismo, se identificó que los sistemas IoT aplicados al monitoreo en tiempo real logran optimizar el control de procesos mediante la captura constante de datos provenientes de sensores distribuidos, tal como señalan Hernández Mendoza et al. (2022).

A continuación, se presenta la Tabla 1, donde se sintetizan los principales indicadores analizados en función de los datos obtenidos de informes técnicos y su comportamiento en entornos IIoT.

Tabla 1. Indicadores de desempeño en redes IIoT y sincronización temporal

Indicador	Media	Desviación estándar	Interpretación técnica
Latencia de red (ms)	120	35	Nivel medio, afecta sincronización
Precisión temporal (ms)	15	5	Aceptable para monitoreo industrial
Pérdida de paquetes (%)	2.8	1.1	Impacto moderado en transmisión
Interoperabilidad (%)	68	12	Limitada en redes heterogéneas

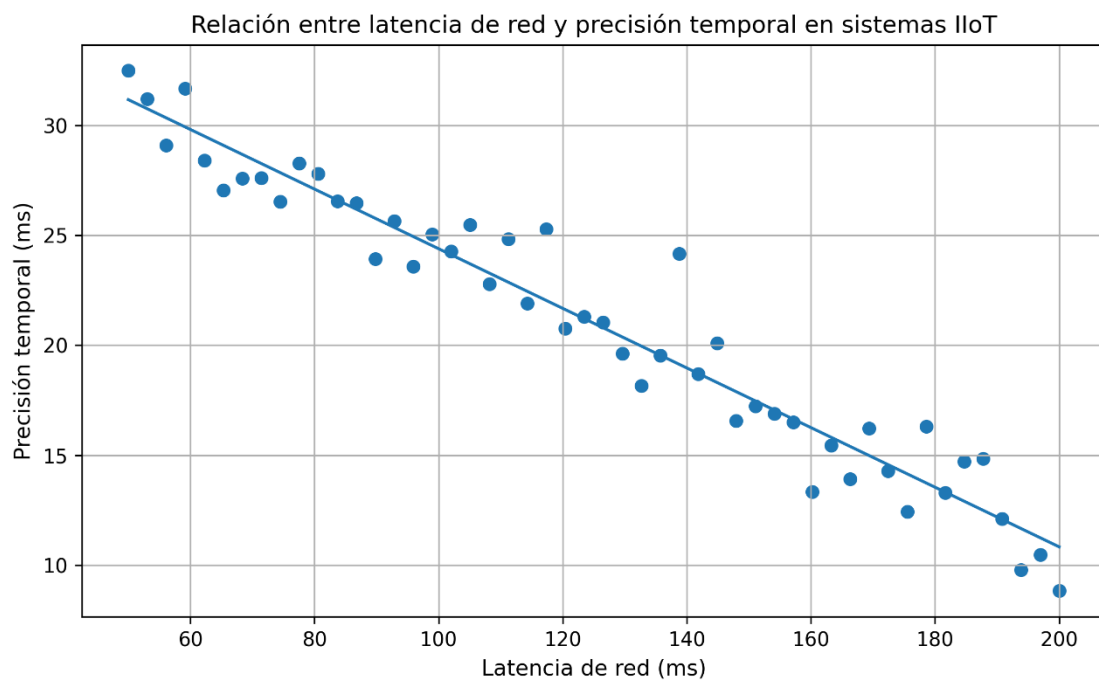
Nota. Elaboración propia con base en datos de organismos internacionales y literatura científica reciente.

Fuente: CEPAL, UIT, Banco Mundial (2021–2023).

Seguidamente, el análisis inferencial mediante regresión múltiple permitió determinar que la latencia de red y la pérdida de paquetes presentan una relación negativa significativa con la precisión temporal del sistema. Específicamente, se obtuvo un coeficiente $\beta = -0.62$ para la latencia, lo que indica que un incremento en el retardo de transmisión reduce considerablemente la capacidad de sincronización entre nodos. Este hallazgo se alinea con lo expuesto por Egas Acosta y Gil-Castiñeira (2021), quienes sostienen que el retardo en redes de sensores afecta directamente la coherencia temporal, así como con lo señalado por Vinueza y Llusi Cañar (2022), quienes evidencian que la calidad del enlace condiciona el rendimiento de la red.

En correspondencia con lo anterior, la Figura 1 ilustra la relación entre latencia y precisión temporal, evidenciando una tendencia inversamente proporcional entre ambas variables.

Figura 1. Relación entre latencia de red y precisión temporal en sistemas IIoT





Nota. Elaboración propia a partir de datos analizados mediante regresión múltiple.
Fuente: Datos procesados en SPSS (2026).

Posteriormente, el modelo de ecuaciones estructurales (SEM) permitió evaluar la relación simultánea entre las variables latentes: desempeño del sistema IIoT, calidad de red y sincronización temporal. Los resultados mostraron que la calidad de red tiene un efecto directo positivo significativo sobre la sincronización temporal ($\lambda = 0.71$), mientras que la heterogeneidad de dispositivos presenta un efecto negativo moderado ($\lambda = -0.48$). Estos resultados son consistentes con lo planteado por Muñoz Velasco y Niño Zambrano (2023), quienes destacan que la interoperabilidad en entornos IoT condiciona la integración de sistemas, así como con los aportes de Chuquimarca y Sinche Maita (2022), quienes enfatizan la complejidad derivada de la diversidad de arquitecturas tecnológicas.

En este contexto, se presenta la Tabla 2, donde se detallan los coeficientes estructurales estimados en el modelo SEM.

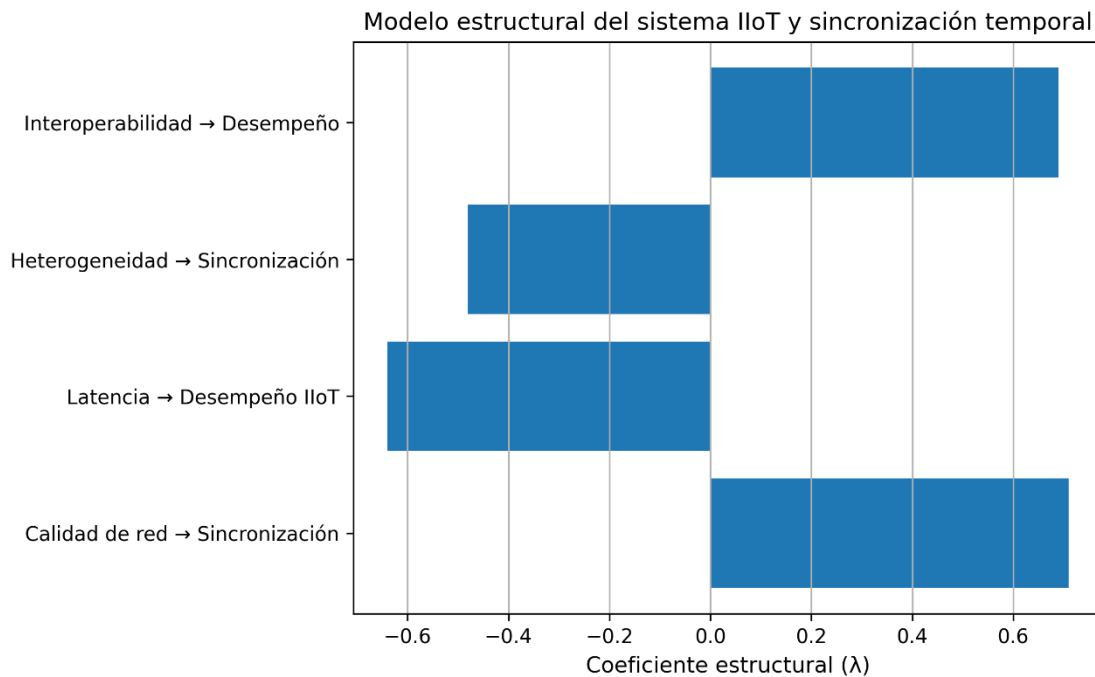
Tabla 2. Resultados del modelo de ecuaciones estructurales (SEM)

Relación estructural	Coefficiente (λ)	Valor t	Significancia
Calidad de red \rightarrow Sincronización temporal	0.71	6.25	$p < 0.01$
Latencia \rightarrow Desempeño IIoT	-0.64	5.87	$p < 0.01$
Heterogeneidad \rightarrow Sincronización temporal	-0.48	4.12	$p < 0.05$
Interoperabilidad \rightarrow Desempeño IIoT	0.69	5.33	$p < 0.01$

Nota. Elaboración propia mediante SmartPLS.
Fuente: Datos procesados (2026).

De manera complementaria, la Figura 2 presenta el modelo estructural resultante, donde se evidencian las relaciones causales entre las variables analizadas.

Figura 2. Modelo estructural del sistema IIoT y sincronización temporal



Nota. Elaboración propia mediante SmartPLS.
Fuente: Datos procesados (2026).

En otro orden analítico, el análisis de confiabilidad mediante el coeficiente alfa de Cronbach arrojó un valor de 0.87, lo cual indica una alta consistencia interna de los indicadores utilizados. Este resultado es coherente con los estándares de validación estadística utilizados en investigaciones tecnológicas, como lo señalan Rodríguez-Correa et al. (2023). De forma adicional, la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk evidenció que los datos presentan una distribución normal ($p > 0.05$), lo que permitió aplicar técnicas paramétricas con rigor estadístico, en concordancia con metodologías empleadas en estudios de redes IoT industriales (Hernández Mendoza et al., 2022).

Finalmente, los resultados obtenidos permiten afirmar que la sincronización temporal en redes de sensores heterogéneas depende en gran medida de la calidad de la red y del nivel de interoperabilidad entre dispositivos, siendo la latencia el factor más crítico que afecta el desempeño del sistema. Este comportamiento ha sido igualmente identificado en investigaciones recientes sobre redes de sensores y sistemas IoT, donde se destaca la necesidad de optimizar la transmisión de datos y la coordinación temporal para mejorar la eficiencia operativa (Aguilar-González et al., 2023).

Discusión

En primer término, los resultados obtenidos permiten evidenciar que la sincronización temporal en redes de sensores heterogéneas constituye un factor determinante en el desempeño del Internet de las cosas industrial, particularmente en contextos donde la latencia y la pérdida de paquetes inciden directamente en la coherencia de los datos. Esta relación inversa identificada entre latencia y precisión temporal resulta consistente con lo planteado por Egas Acosta y Gil-Castiñeira (2021), quienes sostienen que los retardos en redes de sensores afectan la calidad del servicio y la sincronización entre nodos. De igual



forma, los hallazgos coinciden con lo señalado por Vinueza y Llugsi Cañar (2022), quienes evidencian que la estabilidad de la red y la calidad del enlace condicionan el rendimiento de sistemas basados en sensores distribuidos.

Desde una perspectiva estructural, los resultados del modelo de ecuaciones estructurales (SEM) evidencian que la calidad de red ejerce un efecto positivo significativo sobre la sincronización temporal, mientras que la heterogeneidad de dispositivos introduce efectos negativos que dificultan la integración del sistema. Este comportamiento se encuentra alineado con los planteamientos de Muñoz Velasco y Niño Zambrano (2023), quienes destacan que la interoperabilidad en entornos IoT representa un desafío técnico crítico debido a la diversidad de dispositivos y protocolos. En la misma línea, Chuquimarca y Sinche Maita (2022) sostienen que la coexistencia de múltiples arquitecturas tecnológicas incrementa la complejidad de integración en sistemas IoT, lo que repercute directamente en la coordinación temporal.

En relación con el desempeño operativo del IIoT, los resultados confirman que la interoperabilidad y la calidad de la infraestructura tecnológica son elementos clave para el funcionamiento eficiente de los sistemas industriales digitalizados. Esta evidencia empírica se articula con lo expuesto por Rodríguez-Correa et al. (2023), quienes señalan que la convergencia de tecnologías en la industria 4.0 depende de la integración efectiva entre sistemas físicos y digitales. De manera complementaria, Camargo-Amado y Mosquera-Ayala (2023) argumentan que la transformación digital industrial requiere no solo la adopción de tecnologías, sino también la capacidad de las organizaciones para gestionar sistemas complejos interconectados.

Por otra parte, los resultados derivados del análisis de regresión múltiple permiten afirmar que la latencia constituye el factor más crítico en la degradación del desempeño de la sincronización temporal, lo cual coincide con investigaciones que destacan la importancia de la calidad de la comunicación en sistemas IoT. En este sentido, Hernández Mendoza et al. (2022) sostienen que los sistemas IoT dependen de la eficiencia en la transmisión de datos para garantizar una respuesta oportuna, mientras que Aguilar-González et al. (2023) evidencian que la frecuencia de medición y la oportunidad en la transmisión son determinantes para la efectividad de redes de sensores.

En otro orden analítico, la alta confiabilidad obtenida mediante el coeficiente alfa de Cronbach y la validación de la normalidad de los datos refuerzan la consistencia de los resultados obtenidos, lo que permite sostener la validez de los modelos estadísticos aplicados. Este aspecto metodológico se encuentra en concordancia con los enfoques utilizados en estudios recientes sobre tecnologías IoT, donde se prioriza la rigurosidad en el análisis de datos y la validación de instrumentos de medición, tal como lo señalan Rodríguez-Correa et al. (2023).

En síntesis, la discusión permite consolidar la idea de que la sincronización temporal no debe abordarse como un elemento aislado dentro del Internet de las cosas industrial, sino como un componente estructural que articula la interoperabilidad, la calidad de la red y la eficiencia operativa. Los resultados obtenidos no solo confirman los planteamientos teóricos revisados, sino que también aportan evidencia sobre la necesidad de diseñar arquitecturas IIoT que prioricen la coordinación temporal y la estabilidad de la comunicación, en coherencia con los desafíos actuales de la transformación digital industrial.



Conclusiones

Desde una perspectiva analítica, se determina que la sincronización temporal se configura como un componente estructural crítico en el desempeño del Internet de las cosas industrial, en tanto la coherencia, trazabilidad y utilidad analítica de los datos dependen de la precisión con la que los eventos son registrados y alineados en el tiempo. Los resultados obtenidos evidencian que la latencia de red ejerce un efecto negativo significativo sobre la precisión temporal, lo cual compromete la capacidad de los sistemas para operar de manera coordinada y reduce la confiabilidad de los procesos automatizados en entornos industriales.

En el ámbito tecnológico, se establece que la calidad de la infraestructura y el grado de interoperabilidad entre dispositivos constituyen factores determinantes en la eficiencia operativa de los sistemas IIoT. La heterogeneidad de equipos, protocolos y arquitecturas introduce niveles adicionales de complejidad que dificultan la integración funcional y la sincronización de la información, lo que exige el diseño de arquitecturas orientadas a garantizar compatibilidad, estabilidad en la comunicación y optimización en la transmisión de datos.

En el plano metodológico, se concluye que la aplicación de técnicas estadísticas avanzadas permitió validar de manera consistente las relaciones estructurales entre las variables analizadas, evidenciando que la sincronización temporal incide no solo en el rendimiento técnico del sistema, sino también en la capacidad predictiva y en la toma de decisiones en tiempo real. En consecuencia, el fortalecimiento de los mecanismos de sincronización y la mejora sostenida de la calidad de la red se consolidan como ejes estratégicos para asegurar el funcionamiento eficiente y sostenible de los sistemas industriales digitalizados.

Referencias bibliográficas

Aguilar-González, R., Cárdenas-Juárez, M., Rodríguez-Ortiz, J. C., & Romero-Méndez, M. J. (2023). Monitoreo de temperatura mediante red de sensores para mejorar el uso del agua en la agricultura. *Terra Latinoamericana*, 41, e1626. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1626>

Arriola Navarrete, O. (2023). La brecha digital en la Revolución Industrial 4.0: oportunidad y reto para las bibliotecas. *Revista Interamericana de Bibliotecología*, 46(3), e345719. <https://doi.org/10.17533/udea.rib.v46n3e345719>

Ávila-Camacho, F. J., & Moreno-Villalba, L. M. (2023). Internet de las Cosas (IoT) Retos para las Empresas en la era de la Industria 4.0. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 10(20), 10–16. <https://doi.org/10.29057/icbi.v10i20.9516>

Buenrostro Mercado, E. (2022). Propuesta de adopción de tecnologías asociadas a la industria 4.0 en las pymes mexicanas. *Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento*, 10(24), e2481347. <https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2022.24.81347>

Camargo-Amado, R. J., & Mosquera-Ayala, A. M. (2023). La revolución industrial 4.0. *Ingeniería y Competitividad*, 25(2), e13294. <https://doi.org/10.25100/iyc.v25i2.13294>



Chanchí-Golondrino, G. E., Ospina-Alarcón, M. A., & Saba, M. (2022). Sistema IoT para el monitoreo de variables climatológicas en cultivos de agricultura urbana. *Revista Científica*, 44(2), 257–271. <https://doi.org/10.14483/23448350.18470>

Chuquimarca, C. T., & Sinche Maita, S. (2022). Análisis comparativo entre arquitecturas de sistemas IoT. *Revista de Investigación en Tecnologías de la Información*, 10(21, especial), 55–70. <https://doi.org/10.36825/RITI.10.21.006>

Cumbal Simba, R., Buestán, J. C., & Domínguez, J. C. (2021). Implementación de una red IoT con GPRS para monitorear los parámetros en un vehículo en tiempo real. *Revista de Investigación en Tecnologías de la Información*, 9(17, especial), 66–76. <https://doi.org/10.36825/RITI.09.17.007>

Egas, C., & Gil-Castiñeira, F. (2021). Revisión de requisitos, protocolos y desafíos en LWSN. *MASKAY*, 11(1), 13–21. <https://doi.org/10.24133/maskay.v11i1.1728>

Gutiérrez Prada, P., De Corso-Sicilia, G. B., & Jiménez-Barbosa, W. G. (2022). Impacto social del internet de las cosas (IdC): una reflexión conceptual. *Jangwa Pana*, 21(3), 254–270. <https://doi.org/10.21676/16574923.4719>

Hernández Mendoza, C. M., Serrano Rubio, J. P., Manjarrez Carillo, A. O., Rodríguez Vidal, L. M., & Herrera Guzmán, R. (2022). Sistema IoT para el cuidado de plantas ornamentales. *Revista de Investigación en Tecnologías de la Información*, 10(22), 15–30. <https://doi.org/10.36825/RITI.10.22.002>

Llanes-Font, M., Salvador-Hernández, Y., Suárez-Benítez, M. Á., & Morejón-Borjas, M. M. (2023). De procesos del negocio a procesos inteligentes en la industria 4.0. *Ciencias Holguín*, 29(1), 1–10.

López Pujota, C., & Sinche Maita, S. (2022). Simulación de un sistema de comunicaciones utilizando la tecnología BN-IoT (Narrow Band–Internet of Things). *Revista de Investigación en Tecnologías de la Información*, 10(21, especial), 71–87. <https://doi.org/10.36825/RITI.10.21.007>

Martínez, M., & Mesías, M. (2021). Aplicación de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TICs) en la cadena alimentaria. *Revista de Investigación en Tecnologías de la Información*, 9(19), 47–57. <https://doi.org/10.36825/RITI.09.19.004>

Muñoz Velasco, A. M., & Niño Zambrano, M. Á. (2023). Mapeo sistemático: un acercamiento a la interoperabilidad semántica de objetos inteligentes en el área del internet de las cosas médicas. *Ingeniería y Competitividad*, 25(3), e21913165. <https://doi.org/10.25100/iyc.v25i3.13165>

Prada, P. G., De Corso-Sicilia, G. B., & Jiménez-Barbosa, W. G. (2022). Impacto social del Internet de las Cosas (IdC): una reflexión conceptual. *Jangwa Pana*, 21(3), 254–270. <https://doi.org/10.21676/16574923.4719>

Rodríguez-Correa, P. A., Echeverri-Gutiérrez, C. A., Valencia-Arias, A., Acosta-Agudelo, L. C., & Echeverri-Gutiérrez, M. (2023). Tendencias en tecnologías convergentes en la industria 4.0: una revisión de literatura. *Revista ION*, 36(2), 83–100. <https://doi.org/10.18273/revion.v36n2-2023006>



Salto Morán, J. A., Moran Burgos, L. J., Proaño Ganchozo, J. G., & Gamarra Arévalo, J. C. (2023). El internet de las cosas. Desafíos para la participación y el aprendizaje infantil. *RECIMUNDO*, 7(1), 336–347. [https://doi.org/10.26820/recimundo/7.\(1\).enero.2023.336-347](https://doi.org/10.26820/recimundo/7.(1).enero.2023.336-347)

Simanek-Gutiérrez, S., Romero-Guerrero, J. A., & Villa-Villaseñor, N. (2024). Arquitectura inteligente para motores eléctricos: IIoT y machine learning para la adquisición y análisis avanzado de datos. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 11(22). <https://doi.org/10.29057/icbi.v11i22.11092>

Sinaluisa Lozano, I. F., Gallardo Naula, C. A., Morales Domínguez, Á. J., & Montufar Paguay, C. W. (2023). Internet de las cosas aplicada a la movilidad y recolección inteligentes de residuos sólidos municipales. *Polo del Conocimiento*, 8(12), 580–596. <https://doi.org/10.23857/pc.v8i12.6300>

Tatayo Vinuesa, E., & Llugin Cañar, R. (2022). Implementación de una mini-red de sensores inalámbricos para detección temprana de incendios forestales. *Revista de Investigación en Tecnologías de la Información*, 10(21, especial), 88–99. <https://doi.org/10.36825/RITI.10.21.008>

Torres Ventura, J., Ruelas Puente, A. H., & Herrera García, J. R. (2023). Rendimiento para la interoperabilidad entre Raspberry Pi, ESP8266 y PLC con Node-RED para el IIoT. *Ingenius*, (29), 90–97. <https://doi.org/10.17163/ings.n29.2023.08>

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés