

Evaluación técnica de protocolos de comunicación industrial: hacia la integración de tecnologías inalámbricas en la Industria 4.0

(abril de 2026)

Eduar Hernando Navas Valencia, Oscar Fernando Becerra Angarita,
Facultad de Ingeniería Mecatrónica,
Universidad Santo Tomas
Bucaramanga, Santander

Eduarhernando.navas@ustabuca.edu.co, oscar.becerra01@ustabuca.edu.co

I. INTRODUCCIÓN

Resumen —La presente monografía analiza las comunicaciones industriales con énfasis en tecnologías inalámbricas en el contexto de la industria 4.0, estableciendo una comparación técnica con sistemas cableados. A partir de la revisión de literatura científica y documentación técnica, se examinan protocolos cableados como Ethernet industrial, PROFIBUS, PROFINET, EtherNet/IP y Modbus (RTU/TCP), junto con tecnologías inalámbricas como Wi-Fi industrial, Bluetooth, Zigbee, WirelessHART, Sigfox LoRaWAN, NB-IoT y 5G industrial. El análisis se fundamenta en criterios como latencia, confiabilidad, escalabilidad, seguridad y tipo de aplicación, permitiendo identificar tanto capacidades como las interdependencias entre parámetros, evidenciando factores como la distancia, el medio de transmisión y las condiciones del entorno impactan directamente en el desempeño, afectando e retardando, la disponibilidad del enlace y la integración de los datos.

Palabras claves: *redes inalámbricas, latencia, confiabilidad, IoT industrial, 5G, Ethernet industrial.*

Abstract - This monograph analyzes industrial communication technologies with emphasis on wireless solutions within the context of Industry 4.0, establishing a technical comparison with traditional wired systems. Based on a review of scientific literature and technical documentation, it examines wired protocols such as Industrial Ethernet, PROFIBUS, PROFINET, EtherNet/IP, and Modbus (RTU/TCP), as well as wireless technologies including Industrial Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, WirelessHART, Sigfox, LoRa/LoRaWAN, NB-IoT, and industrial 5G. The analysis is structured around key criteria such as latency, reliability, scalability, security, and application type, highlighting both their capabilities and interdependencies, and showing how variables such as transmission distance, communication medium, and environmental conditions directly impact performance in terms of delay, link availability, and data integrity.

Keywords: *wireless networks, latency, reliability, industrial IoT, 5G, Industrial Ethernet.*

La transformación digital en la industria, impulsada por la industria 4.0 y el internet industrial de las cosas (IIoT), crean la necesidad de infraestructuras de comunicación capaces de garantizar interoperabilidad, la disponibilidad de datos en tiempo real y la integración entre sistemas de control y plataformas de información [1]. En este contexto, las redes de comunicación industrial se consolidan como un elemento crítico para habilitar arquitecturas distribuidas, modulares y orientadas a servicios, donde dispositivos, controladores y aplicaciones intercambian información de manera continua y eficiente.

Tradicionalmente, las comunicaciones cableadas han sido la base de los sistemas de automatización industrial debido a su alta confiabilidad, determinismo y resistencia a condiciones adversas del entorno industrial. Sin embargo, factores como la interferencia electromagnética, el desgaste físico del cableado, los altos costos de instalación y mantenimiento, así como la necesidad de cubrir grandes extensiones geográficas, han impulsado la adopción progresiva de tecnologías inalámbricas como complemento o alternativa en determinados escenarios industriales. Esta transición tecnológica introduce retos de latencia, seguridad, confiabilidad y cobertura, especialmente en aplicaciones críticas de control [1].

En este escenario, surge la necesidad de establecer criterios claros que permitan analizar y seleccionar las tecnologías de comunicación industrial más adecuadas según los requerimientos de cada aplicación. La coexistencia de múltiples protocolos, tanto cableado como inalámbricos, con diferentes niveles de desempeño, latencia, seguridad y escalabilidad, plantea desafíos en el diseño de sistemas de automatización eficientes y confiables, especialmente en entornos donde las exigencias de tiempo real y disponibilidad son críticas [4][33].

La relevancia de este análisis se sustenta en el hecho de que la infraestructura de comunicación constituye la base de la digitalización industrial, permitiendo la adquisición, transmisión y procesamiento de datos necesarios para optimizar procesos productivos, mejorar la toma de decisiones y habilitar

nuevas arquitecturas como sistemas ciberfísicos y soluciones basadas en servicios [1][2]. Además, la creciente convergencia entre tecnologías de operación (OT) y tecnologías de la información (IT) exige soluciones de comunicación que no solo sean robustas, sino también interoperables y seguras [2][3].

El presente trabajo tiene como objetivo realizar una evaluación técnica de las principales tecnologías de comunicación industrial, incluyendo soluciones cableadas como Ethernet industrial, PROFIBUS, PROFINET, ETHERNET/IP y Modbus (RTU/TCP), así como tecnologías inalámbricas como Wi-Fi Industrial, Bluetooth Industrial, Zigbee, WirelessHART, sigfox, LoRa/LoRaWAN, NB-IoT y 5G industrial. Se analizan características operativas, mecanismos de comunicación, desempeño, seguridad y aplicaciones reales en la industria, con especial énfasis en las implicaciones reales en la industria.

II. METODOLOGIA

Se basa en un proceso estructurado de revisión de literatura científica, tal como se ilustra en la Fig.1. Inicialmente, se realizó una búsqueda en bases de datos especializadas como IEEE Xplore y ScienceDirect, con el objetivo de identificar publicaciones relacionadas con las comunicaciones industriales. A partir de este conjunto inicial, se aplicó un criterio de inclusión basado en relevancias temáticas, descartando aquellos trabajos que no abordaban directamente aspectos técnicos de las comunicaciones en entornos industriales.

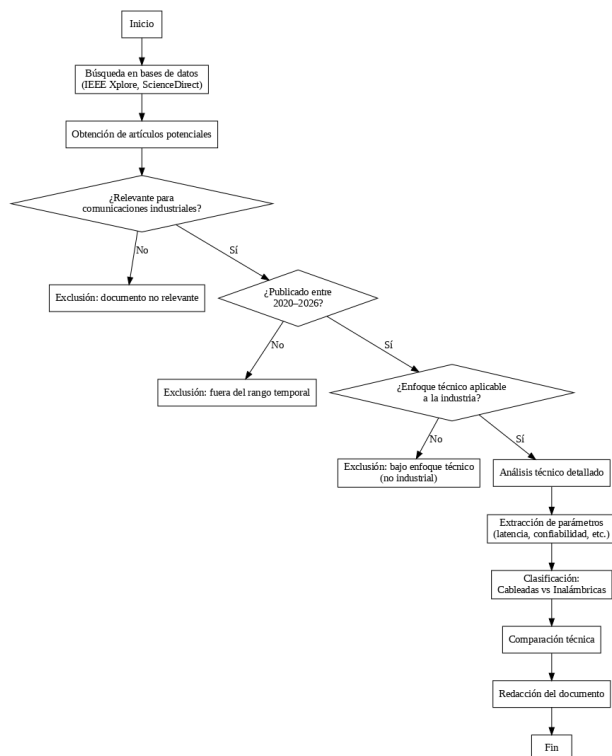


Fig 1. Diagrama de flujo de selección de literatura

La estrategia de búsqueda dentro de los repositorios se estructuró mediante el uso de **ecuaciones booleanas** orientadas a la identificación de literatura relevante en el ámbito de las

comunicaciones industriales. Se emplearon combinaciones de tipo "Industrial Communication" AND [Tecnología], donde el término [Tecnología] correspondía a los protocolos y estándares que se abordan en el documento. Adicionalmente, se incorporaron términos como "IEEE 802", "implementation" e "industrial", con el fin de ampliar los resultados de búsqueda hacia estudios con enfoque aplicado y técnico. Esto permitió abarcar tanto fundamentos teóricos como implementaciones prácticas reportadas en la literatura actualmente.

Posteriormente, se estableció un filtro temporal, considerando únicamente artículos publicados entre los años 2021 y 2026, con el fin de garantizar que la información analizada fuera actualizada y pertinente. En una etapa adicional se evaluó el enfoque de cada documento de manera iterativa a partir de resúmenes (abstracts) y una inspección preliminar del contenido de los artículos identificados, priorizando aquellos con aplicación directa en la industria.

III. COMUNICACIONES INDUSTRIALES ALAMBRICAS

Las comunicaciones industriales tradicionales, también conocidas como comunicaciones cableadas, han sido durante décadas la base de los sistemas de automatización industrial. Estas tecnologías permiten la transmisión de información entre dispositivos mediante medios físicos como cables de cobre o más reciente mente fibra óptica, los sistemas están diseñados para transmitir datos en tiempo real, sincronizarse entre dispositivos y tolerar fallos. Características importantes para asegurar el correcto funcionamiento de los procesos, especialmente aplicaciones de control y monitoreo continuo.

Dentro de las comunicaciones tradicionales podemos encontrar:

A. Ethernet Industrial

Es una de las tecnologías más utilizadas en las comunicaciones industriales modernas, debido a su alta velocidad de transmisión, facilidad de integración y compatibilidad con redes basadas en el protocolo TCP/IP. Su desarrollo se basa en el estándar IEEE802.3, el cual define los aspectos relacionados con la capa física y la MAC [5][8].

Se implementa utilizando cableado de par trenzado o fibra óptica, dependiendo de los requerimientos de distancia, velocidad y condiciones del entorno. En aplicaciones industriales, el uso de cableado blindado es común para reducir los efectos de la interferencia electromagnética. En el caso del cable de cobre las distancias típicas alcanzan hasta 100 metros por segmento, mientras que con fibra óptica pueden llegar a mayores distancias [5].

La velocidad de transmisión actualmente permite su uso en aplicaciones industriales que requieren grandes volúmenes de datos y comunicación en tiempo casi real que van desde 100 Mb/s, 1Gb/s, hasta velocidades superiores [5].

La transmisión de datos se realiza mediante tramas Ethernet, las cuales incluyen direcciones de origen y destino, datos y mecanismos de verificación de errores, esto garantiza la transmisión de la información que es un aspecto crítico en entornos industriales [5].

La latencia depende del tráfico de red. No obstante, en ethernet industrial se implementan mecanismos adicionales como la segmentación del tráfico y la asignación de intervalos de tiempo para mejorar el comportamiento en aplicaciones de tiempo real [6].

Las configuraciones que permite ethernet en cuanto a tipologías de red son estrella, bus, árbol y anillo, facilitando la expansión de la red y la conexión de múltiples dispositivos. Además, permite la integración de sistemas de control como PLC, sensores y sistemas de supervisión siendo ampliamente utilizando en arquitecturas de automatización industrial [7].

B. Profibus

Es un protocolo de comunicación industrial de tipo fielbus, utilizando en sistemas de automatización, especialmente en procesos de control y manufactura. Este protocolo permite la conexión de hasta 126 nodos dentro de una red, empleando una topología tipo bus, en la cual los múltiples dispositivos se conectan a un mismo canal de comunicación.

En términos de transmisión, PROFIBUS puede alcanzar velocidades de hasta 12 Mbps, las cuales dependen de la longitud del cable y de la configuración de la red. La distancia de transmisión puede llegar hasta 1200 metros; sin embargo, a medida que esta aumenta, la velocidad debe reducirse para garantizar la integridad de la señal [9].

Se utiliza cableado de par trenzado blindado, diseñado para minimizar efectos de la interferencia electromagnética. La red requiere terminaciones en ambos extremos del bus para evitar reflexiones de señal, aspecto importante en el diseño e instalación del sistema.

La latencia presenta tiempos de respuesta bajo y predecibles, adecuado para sistemas de control en tiempo real [10].

El acceso al medio se realiza mediante un esquema maestro-esclavo combinado con paso token, utiliza el estándar de comunicación RS-485, ampliamente empleado en entornos industriales por su robustez a interferencias [9].

C. Profinet

Basado en ethernet, surge como evolución de PROFIBUS, mejorando en los aspectos de velocidad y flexibilidad en entornos industriales. Se fundamenta en el estándar IEEE802.3 [11][12].

La arquitectura que se utiliza es un modelo proveedor/consumidor, en el cual los dispositivos intercambian datos de forma cíclica entre un control central y dispositivos de campo, permitiendo una comunicación eficiente y estructurado

dentro de sistemas de automatización industrial [12][13].

Cada dispositivo dentro de una red PROFINET cuenta con una dirección MAC, una dirección IP y un nombre de estación asignada, lo que facilita la identificación e integración a la red [11].

PROFINET opera en modo full-duplex sobre redes ethernet conmutadas, eliminando colisiones y mejorando el rendimiento de la comunicación. Permite el intercambio de datos en tiempo real mediante diferentes clases, que incluye comunicación cíclica, diagnóstico de res y sincronización para aplicaciones de alto desempeño [13]; mediante sus modos de operación que son Soft Real-Time (SRT) optimizando el tiempo de transmisión reduciendo las capas involucradas en la comunicación y Isochronous Real-Time (IRT) diseñado para aplicaciones críticas que requieren respuesta inferiores a 1 ms, utilizando sincronización precisa entre dispositivos [12].

D. EtherNet/IP (Ethernet Industrial Protocol)

Es un Protocolo de comunicación industrial basado en ethernet, diseñado para aplicaciones de automatización y control industrial. Este protocolo se fundamenta en el estándar IEEE 802.3 y el conjunto de protocolo TCP/IP para la transmisión de datos, lo que permite su integración directa con redes industriales y sistemas de tecnologías de la información [14][16].

La arquitectura utilizada se basa en el protocolo (CIP), el cual define la organización de los datos y los mecanismos de comunicación entre dispositivos industriales, lo que permite la interoperabilidad entre equipos de distintos fabricantes y facilidad de sistemas distribuidos [14][15].

La comunicación entre múltiples dispositivos en sistemas distribuidos incluye controladores, sensores y actuadores, siendo muy utilizado en sistemas de automatización de procesos y manufactura [9], la adaptación a distintas aplicaciones industriales es una característica relevante de este protocolo que soporta diferentes mecanismos de comunicación, como conexiones punto a punto, multicast y comunicación basada en eventos [14].

E. Modbus

Ampliamente utilizado en sistemas de automatización, especialmente entre controladores lógicos programables (PLC) y dispositivos de campo. Se caracteriza por ser un protocolo de capa de aplicación, independientemente del medio físico, lo que permite operar sobre diferentes tecnologías de transmisión como RS-232, RS-485 y ethernet [1].

Funciona como protocolo serial basado en una arquitectura esclavo maestro, en la cual un dispositivo maestro envía solicitudes y los dispositivos esclavos responden con la información requerida, permitiendo un esquema de comunicación centralizado y estructurado del intercambio de datos dentro de la red. Es comúnmente implementado sobre RS-485 en entornos industriales, por su mayor inmunidad al

ruido y la capacidad de cubrir mayores distancias; en esta configuración, es posible conectar múltiples dispositivos en una misma red, alcanzado 127 nodos direccionables [1].

Modbus/TCP es una variante evolucionada que opera sobre TCP/IP y redes basadas en el estándar IEEE 802.3. Esta versión permite el intercambio de datos en tiempo real entre dispositivos industriales mediante la configuración adecuada. En este esquema, los PLC actúan como dispositivos esclavos que reciben solicitudes de un servidor o sistemas maestros, se procesa la información y responde según las operaciones requeridas [9].

En los sistemas de automatización industrial, la seguridad de las comunicaciones representa un aspecto crítico debido a la creciente interconectividad entre dispositivos, controladores y sistemas de supervisión. Sin embargo, una de las limitaciones de los protocolos antes mencionados fue desarrollados para priorizar el tiempo real, la eficiencia y la confiabilidad en la transmisión de datos, dejando en segundo plano aspectos como la autenticación, el cifrado y la integridad de la información [17], como consecuencia son vulnerables a ataques como interceptación de datos, suplantación de dispositivos o manipulación de mensajes.

Para abordar estas vulnerabilidades, se han desarrollado estándares internacionales orientados a la seguridad en sistemas de automatización industrial. Entre ellos, las normas IEC 62443 se ha consolidado como uno de los marcos más relevantes, ya que establece requisitos para la protección de redes industriales, sistemas y componentes [18]. Este estándar introduce conceptos fundamentales como la segmentación de redes en zonas y conductos, e análisis de riesgos y la implementación de niveles de seguridad.

Otro aspecto relevante en la seguridad de las comunicaciones es la compatibilidad electromagnética, en entornos donde existen altos niveles de interferencia eléctrica. Equipos como motores, inversores o sistemas de potencia pueden generar ruido electromagnético que afecta la integridad de la señal, comprometiendo la transmisión de datos. Por ello,

es necesario implementar medidas como el uso de cables apantallados, sistemas de puesta a tierra adecuados y diseño de hardware con capacidad de blindaje para minimizar los efectos de interferencia externas e internas [19].

La seguridad en las comunicaciones industriales no depende únicamente de los protocolos, sino de la integración de estándares, arquitecturas de protección y buenas prácticas de diseño e implementación.

Las tecnologías de comunicación industrial cableadas presentan diferencias en cuestión de velocidad de transmisión, alcance, determinismo y complejidad de implementación, lo que determina su elección según donde se va a utilizar dentro de la industria. Estas características como se observa en la figura 1.

CONTROL & AUTOMATIZACIÓN (Sensores y Actuadores)



SUPERVISIÓN & MONITOREO (Datos y SCADA)



Los protocolos gestionan sensores/actuadores; Modbus TCP y OPC UA suelen realizar la supervisión

Fig 1. Usos de las comunicaciones industriales cableadas

Una característica que comparten los protocolos de comunicación industrial, es que el alcance de transmisión de los datos similar en casi todos, por la forma en la que se hace el envío de información y el medio de transmisión, variando en otros aspectos como se muestra en la tabla 1.

Tabla I.
Comparativa de parámetros técnicos y operativos de protocolos de comunicación industrial cableada.

Protocolo	Velocidad de transmisión	Alance	Medio físico	topología	Susceptibilidad electromagnética	Ref
Ethernet industrial	10 Mbps – 100 Gbps	Cobre: hasta 100 m	Par trenzado (Cat5e, Cat6), Fibra óptica	Estrella, Árbol	Cobre: Media/Alta Fibra Óptica: Baja	[1],[7]
PROFIBUS	1 - 12 Mbps	Hasta 1200 m	RS-485 (Par trenzado blindado)	Bus	Media	[9],[13]
PROFINET	100 Mbps – 1 Gbps	Cobre: 100 m	Ethernet industrial (Cat5e, Cat6, Fibra Óptica)	Estrella, Línea	Cobre: Media/Alta Fibra Óptica: Baja	[11],[12],[13]
EtherNet/IP	100 Mbps – 1 Gbps	Cobre: 100 m	Ethernet Estándar (Cat5e, Cat6)	Estrella	Media/ Alta	[14],[15],[16]
Modbus (RTU/TCP)	TCP: hasta 100 Mbps	RS-485: Hasta 1200m Ethernet: 100 m	RS-232, RS-485 o Ethernet	Bus, Estrella	Media	[1],[9]

Nota: Los valores expuestos pueden oscilar en función de las variables de implementación y de campo.

IV. COMUNICACIONES INDUSTRIALES INALÁMBRICAS

Las tecnologías de comunicación inalámbrica han adquirido un papel importante dentro de los entornos de automatización industrial, en el contexto de la industria 4.0, donde la flexibilidad, la movilidad y la integración de dispositivos IoT son cada vez mas comunes. Las facilidades de las comunicaciones inalámbricas van desde la conexión de equipos móviles, sensores distribuidos y sistemas ubicados donde el cableado resulta inviable o costoso, facilitando así la digitalización de procesos productivos [20][1].

Las exigencias de la automatización industrial como bajas latencias, alta confiabilidad y comportamiento determinista, que es un reto para estas tecnologías debido a la variabilidad y tendencias a la interferencia del medio inalámbrico [20]. Además, la interferencia electromagnética, la congestión del espectro y la seguridad informática son aspectos críticos que condicionan la implementación de estos en entornos industriales [21].

A. Wi-Fi Industrial

Basado en la familia de los estándares IEEE 802.11, es la tecnología inalámbrica más extendida en entornos industriales debido a su integración con redes ethernet y su alta disponibilidad de dispositivos. ha evolucionado hacia estándares como IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) ha permitido mejoras significativas en eficiencia espectral, capacidad de usuarios y latencia [20][2].

Opera en bandas ISM (Industrial, scientific and medical) 2.4 GHz y 5 GHz, altamente congestionadas, susceptible a ruido electromagnético; Puede alcanzar latencias cercanas a los 2ms, pero su falta de determinismo es una de sus limitaciones, ya que utiliza mecanismo de acceso al medio basado en (CSMA/CA), que genera jitter y limita su uso en control de tiempo real [21].

En entornos industriales se implementa bajo una arquitectura de red tipo WLAN industrial, donde múltiples Access Point (APs) conectados a la red troncal ethernet industrial, permitiendo integración directa con sistemas IT/OT [20][2].

En términos de seguridad integra protocolos como WPA2 y WPA3, proporcionando cifrado y autenticado. No obstante, en entornos industriales estos mecanismos deben complementarse con arquitecturas de seguridad basadas en estándares como IEC 62443 [2].

Un caso de implementación de Wi-Fi industrial en entornos productivos es el estudio presentado en [22], que evalúa el desempeño de una red Wi-Fi industrial determinista en una planta de manufactura a gran escala en operación real.

La red inalámbrica se implementa sobre una infraestructura

basada en puntos de acceso industriales distribuidos a lo largo de la planta, permitiendo la comunicación de sistemas críticos como grúas de carga pesada operadas de manera inalámbrica. La red emplea mecanismos de Industrial Point Coordination Function con Multi-Controller (IPCF - MC), lo que reemplaza el acceso al medio basado en contenida (CSMA/CA) por un esquema de acceso programado tipo polling, con el objetivo de garantizar latencias acotadas y comportamientos más deterministas.

Desde el punto de vista de instalación, el sistema se despliega mediante múltiples Access Points separados aproximadamente 50 metros, conectados a la red troncal Ethernet industrial, Formando un WLAN industrial que proporciona cobertura continua y soporte a movilidad. Aspecto crítico en aplicaciones donde se requiere desplazamientos dentro de la planta sin pérdida de conectividad.

Los resultados obtenidos en condiciones de operación muestran que:

- Wi-Fi industrial es capaz de mantener latencias dentro de los rangos aceptables para las aplicaciones industriales (< 100 ms).
- El desempeño depende de la configuración de la red y los mecanismos de gestión de movilidad implementados
- El uso de mecanismos de calidad de servicio (QoS), como la priorización de tráfico mediante DSCP, es fundamental para garantizar el comportamiento en aplicaciones de control.

El estudio evidencia que aunque el Wi-Fi industrial puede aproximarse a requerimientos de tiempo real, su desempeño sigue estando condicionado por factores de interferencia, la congestión del espectro y la correcta planificación de la red.

En términos de aplicación industrial, este tipo de soluciones es ampliamente utilizado en sectores como:

- **Manufactura y Automatización industrial:** Comunicación con maquinaria móvil, robots y sistemas de transporte interno (AGVs).
- **Industria Alimenticia:** Monitoreo y supervisión de líneas de producción donde se requiere flexibilidad en la disposición de equipos.
- **Sistemas TI/OT:** integración de dispositivos inalámbricos con plataformas de supervisión, SCADA y análisis de datos.

Debido al contexto, Wi-Fi industrial se emplea principalmente para supervisión, monitoreo y comunicación con dispositivos móviles, más que para control determinista estricto, debido a las limitaciones inherentes en el acceso al medio y la variabilidad en la latencia.

B. Bluetooth Industrial

Es una tecnología orientada a comunicaciones de corto alcance con bajo consumo energético. Opera en la banda ISM de 2.4 GHz y utiliza la técnica de Espectro Ensanchado por Salto de Frecuencia (FHSS), que permite cambiar frecuencia de transmisión de forma continua, reduciendo las interferencias [1][21].

En el ámbito industrial, esta tecnología destaca en arquitectura WPAN por su capacidad para gestionar entornos de alta densidad mediante configuraciones piconet (1 maestro y hasta 8 esclavos) y scatternet (2 o más piconet), lo que facilita la comunicación escalable entre múltiples nodos en distancias cortas. A pesar de operar en una banda compartida, mitiga las posibles interferencias mediante el uso de espectro ensanchado por salto de frecuencia (FHSS), integrando además robustos mecanismos de cifrado y autenticación a nivel de enlace para garantizar la seguridad de la red [21].

Se han documentado evaluaciones experimentales del desempeño de Bluetooth Low Energy (BLE) en entornos industriales controlados que permiten inferir su aplicabilidad en escenarios reales. En [23], se analiza la confiabilidad de enlaces punto a punto basado en BLE bajo diferentes condiciones de canal, incluyendo modelos industriales con multi trayectoria y dispersión temporal representativa en fábricas.

El estudio emplea como métrica principal la tasa de error por paquetes (PER), evaluando dos configuraciones físicas (BLE 1M y BLE 2M) en presencia de ruido, desvanecimiento y canales industriales definidos por el modelo IEEE 802.15.4^a. Los resultados evidencian que BLE 1M puede cumplir con requisitos típicos de aplicaciones industriales ($PER \approx 10^{-3}$) en escenarios de monitoreo y automatización, alcanzando distancias del orden de 10 – 17 m en condiciones industriales realista. Asimismo, se identifica que la confiabilidad está fuertemente condicionada por fenómenos como la interferencia Inter simbólica y la pérdida de línea de vista, lo que limita su uso en aplicaciones críticas de control en tiempo real.

A partir de estos resultados, se puede inferir que BLE se utiliza en entornos industriales reales bajo un enfoque de comunicaciones no críticas, especialmente en tareas de supervisión, adquisición de datos y seguimiento de activos. En sectores como sistemas logísticos y almacenes automatizados, BLE es ampliamente empleado para soluciones de rastreo mediante balizas (Beacons), permitiendo la localización de herramientas o quipos móviles dentro de la planta. Este tipo de implementación aprovecha su bajo consumo energético y facilidad de despliegue en redes densas.

En aplicaciones de mantenimiento predictivo y monitoreo de condiciones, BLE se utiliza para recolectar datos de sensores inalámbricos instalados en maquinaria, transmitiendo variables como vibración, temperatura o estado operativo hacia sistemas de supervisión. En estos casos, la latencia no determinista no representa una limitación significativa, ya que se prioriza eficiencia energética y periodicidad de los datos.

C. Zigbee (IEEE802.15.4)

Protocolo diseñado para redes de sensores inalámbricos, caracterizado por bajo consumo energético, baja tasa de datos y soporte para topología tipo malla, mejorando la cobertura; opera en la banda de 2.4 GHz y está optimizado para aplicaciones con datos reducidos. Su arquitectura incluye nodos coordinadores, routers y dispositivos finales, haciendo una red escalable [1].

La saturación de la banda genera susceptibilidad a interferencias esa es su principal limitación, por lo que no es adecuado cuando se requiere alta velocidad o baja latencia, pero es efectivo para monitoreo distribuidos [21].

En términos de seguridad se implementa un cifrado AES – 128, proporcionando un nivel adecuado.

Zigbee ha sido ampliamente estudiado como base para redes de sensores inalámbricos (WSN) en entornos industriales, particularmente por su capacidad de operar bajo esquemas de consumo y de alta densidad de nodos. En [24], se analiza la implementación de redes Zigbee con topología tipo malla, destacando su capacidad de auto organización, enrutamiento multimodo (multi-hop) y reducción del consumo energético, alcanzando mejoras del orden del 9.1% mediante optimización del proceso de networking.

Las redes están compuestas por nodos con diferentes roles (coordinadores, routers y dispositivos finales), donde los nodos intermedios permitiendo la retransmisión de datos, extendiendo la cobertura de entornos con obstáculos o condiciones adversas. Estas características resultan especialmente relevantes en escenarios industriales complejos, donde la propagación de la señal se ve afectada por estructuras metálicas, maquinaria o interferencias electromagnéticas. Asimismo, el uso de direccionamiento jerárquico y topologías tipo árbol o malla permite escalar la red hasta decenas de millones de nodos, manteniendo a la eficiencia en la comunicación.

Se implementa en entornos industriales reales bajo el concepto de redes de monitoreo de distribución, donde múltiples sensores recolectan información y la transmiten hace nodos Gateway que integran la red con sistemas de supervisión o plataformas IoT. En la industria de alimentos, por ejemplo, se utiliza en monitoreo de variables ambientales como temperatura, humedad y condiciones de almacenamiento, garantizando la trazabilidad y calidad del producto en tiempo real. De manera similar, en sistemas de gestión de edificios, Zigbee permite la supervisión y control de iluminaciones, climatización y consumo energético mediante redes densas de sensores y actuadores.

Su bajo consumo energético y costo reducido facilitan su despliegue en aplicaciones donde se requiere una gran cantidad de nodos distribuidos, como en monitoreo de procesos, detección de variables críticas o supervisión de entornos peligroso. No obstante, debido a su baja tasa de transmisión y sensibilidad a interferencias en la banda de 2.4 GHz, su uso se limita principalmente a aplicaciones donde la latencia no es

crítica y el volumen de datos es reducido.

D. *WirelessHART*

Tecnología diseñada específicamente para aplicaciones industriales de proceso, basada en el estándar IEEE802.15.4 con mejoras en la capa MAC y red para garantizar confiabilidad y determinismo [21].

Una de sus principales características es el uso de TDMA (Time Division Multiple Acces), donde cada dispositivo transmite en intervalos de tiempo designado, eliminando colisiones y garantizando comportamiento determinista; Para aumentar la robustez del sistema se incorpora técnicas avanzadas como channel hopping y blacklisting, que permiten evitar canales con alta interferencia y mejora la disponibilidad del enlace [21].

En entornos industriales reales se implementa principalmente en redes de sensores y actuadores para control de procesos. Un caso documentado en [25] evalúa el desempeño de una red *WirelessHART* utilizando instrumentación industrial real, analizando topologías tipo estrella extendida y malla. Los resultados muestran que, aunque la latencia aumente con la distancia y la presencia de obstáculos físicos, la topología en malla permite mantener la comunicación mediante múltiples rutas redundantes, garantizando la comunicación del servicio incluso ante fallos de nodos o degradación del enlace.

Este comportamiento evidencia uno de los principios claves su alta robustez se basa en redundancia de ruta, autoorganización y mecanismos de auto-recuperación (Self-healing). En la topología mallada, los dispositivos pueden reenviar paquetes a través de múltiples saltos, seleccionando dinámicamente la mejor ruta hacia el Gateway, lo que reduce el impacto de interferencias, obstrucciones físicas o fallos de equipos.

Se utiliza ampliamente en industrias como la petrolera, gas y químicos, donde la confiabilidad de la comunicación es crítica. Su implementación permite el monitoreo continuo de variables, integración de sensores en zonas de difícil acceso o peligrosas y sistemas de control distribuidos donde el determinismo y la disponibilidad son prioridad.

E. *Sigfox*

Es una tecnología LPWAN diseñada para comunicaciones de bajo consumo y largo alcance, ideal para aplicaciones IoT donde se transmiten pequeñas cantidades de datos de forma esporádica [1].

Utiliza modulación Ultra Narrow Band (UNB), lo que permite operar con alta sensibilidad y bajo nivel de ruido, siendo capaz de detectar señales cercanas al límite del ruido térmico. Por lo que tiene un gran alcance, pero una baja tasa de datos [1], por lo que es adecuado para aplicaciones de monitoreo, pero no para control en tiempo real.

Se despliega bajo una arquitectura estrella, dispositivos finales se comunican directamente con estaciones base operadas por un proveedor externo [1].

Ha sido implementado en soluciones IoT integradas con plataformas en la nube. En [26] se presenta un sistema de basado en sigfox combinado con servicios cloud, donde sensores y actuadores transmiten datos hacia la nube para su análisis, visualización y toma de decisiones. Este enfoque demuestra como sigfox puede integrarse en arquitecturas IoT escalable, permitiendo la recolección de datos en tiempo casi diferido y posteriormente su procesamiento mediante herramientas analíticas, lo que resulta adecuado para aplicaciones de supervisión distribuida.

Aunque el caso presentado se orienta a un entorno tipo Smart System, refleja un esquema directamente extrapolable a entornos industriales, donde Sigfox se utiliza bajo el concepto de conectividad masiva de dispositivos IoT de ultra bajo consumo y costo. Su capacidad de transmitir pequeños paquetes de datos con autonomías de batería de varios años lo hace especialmente útil en escenarios donde el acceso físico es limitado o costoso.

En aplicaciones industriales, esta tecnología es ampliamente utilizada en sectores como logística y puertos, donde permite el monitoreo y rastreo de activos distribuidos geográficamente. Algunos usos típicos son el seguimiento de contenedores y mercancías de tránsito, monitoreo de condiciones ambientales en cadenas de suministro, entre otras.

Sigfox opera principalmente en modo de supervisión, enviando información periódica o por eventos donde la latencia de varios segundos y la limitación en el número de transmisión diaria no representa una restricción significativa.

F. *LoRa/LoRaWAN*

LoRa y su protocolo de red LoRaWAN constituyen a una solución LPWAN más usada en entornos industriales, utilizan modulación Chirp Spread Spectrum (CSS), que mejora la relación señal – ruido y es altamente resistente a interferencias electromagnéticas y condiciones adversas del canal [21].

Tiene la capacidad de ajustar su factor de propagación (Spreading Factor), lo que permite balancear entre alcance y tasa de datos [21]. Permite comunicación de largo alcance con bajo consumo energético, ideal para aplicaciones de monitoreo distribuido.

Su arquitectura de tipo estrella de estrella, permite que múltiples dispositivos finales se conecten con uno o varios gateways que retransmiten la información hacia un servidor central [21]. Además, Implementa cifrado AES – 128 a nivel de red y aplicación, que es un modelo robusto de protección de datos.

En aplicaciones reales, LoRaWAN ha sido utilizada en entornos industriales críticos. En [27] se presenta un sistema implementando en la industria minera, donde una red de sensores basada en LoRaWAN permite el monitoreo en tiempo

real de variables ambientales como temperatura, humedad, concentración de gases y eventos peligrosos. El sistema integra además técnicas de Machine Learning en el borde (Edge computing), lo que permite detectar condiciones peligrosas en aproximadamente 5 segundos, reduciendo la latencia asociada a sistemas basados exclusivamente en la nube.

El concepto de red de monitoreo distribuido de largo alcance, donde múltiples nodos sensoriales transmiten información hacia un nodo central para supervisión y toma de decisiones. La confiabilidad del sistema se apoya en mecanismos como Adaptive Data Rate (ADR), corrección de errores (FEC) y retransmisiones, permitiendo mantener la comunicación estable incluso en áreas extensas.

Sectores como el de la Agricultura lo usa para el monitoreo de variables como humedad del suelo, temperatura, condiciones climáticas y control de riego; se usa dentro de los sistemas de monitoreo industrial en la supervisión de infraestructura, sensores remotos y activos distribuidos, entre otras aplicaciones.

Opera en modo supervisión y control de clase C o B, dependiendo del requerimiento de latencia, permitiendo una mayor disponibilidad de recepción en comparación con dispositivos de clase A. Esto solo lo hace adecuado para aplicaciones donde se requiere cierto nivel de control remoto, aunque no estrictamente en tiempo real.

Una de las ventajas frente a otras tecnologías es la posibilidad de desplegar redes privadas, lo que permite a las organizaciones tener el control total sobre infraestructura, seguridad y gestión de datos, aspectos claves en entornos industriales.

G. NB-IoT

Basado en la infraestructura celular LTE, este protocolo está diseñado específicamente para aplicaciones IoT de bajo consumo de energía, operando en un espectro licenciado que garantiza una mayor inmunidad ante interferencias y una calidad de servicio. Ofrece buena cobertura en interiores y permite la conexión masiva de dispositivos, su latencia variable y elevada impide su implementación en aplicaciones críticas que requieran una respuesta en tiempo real [21].

Esta tecnología hereda los mecanismos de LTE, incluyendo autenticación, cifrado y gestión de identidad, garantizando alto nivel de protección.

Se utiliza bajo el concepto de IoT celular masivo (mMTC), donde múltiples nodos sensores transmiten información hacia estaciones base que gestionan el tráfico, almacenamiento y procesamiento en la nube o en el Edge. Su arquitectura incluye capas de adquisición de datos, transmisión, procesamiento y visualización. Lo que permite implementar sistemas inteligentes como la agricultura de precisión, donde se monitorean variables como humedad, temperatura y condiciones del suelo en tiempo casi real [28].

Es utilizada en servicios públicos como redes de agua, gas y energía. Por ejemplo, los medidores inteligentes [29] emplean NB-IoT para enviar lecturas periódicas de consumo hacia sistemas centrales sin necesidad de intervención manual. Gracias a su capacidad de penetración en interiores (Deep Indoor Coverage), es especialmente adecuada para medidores ubicados en sótanos, cámaras subterráneas o zonas urbanas densas donde otras tecnologías tienen limitaciones de señal. En estos casos la comunicación o requiere alta frecuencia ni baja latencia estricta, sino confiabilidad, cobertura y eficiencia energética.

Es una solución robusta para supervisión distribuida de gran escala, especialmente en escenarios donde se requiere cobertura amplia, bajo consumo energético y operación confiable sobre estructura celular existente.

H. 5G Industrial

Representa la evolución más avanzada en Comunicaciones inalámbricas, diseñado específicamente para soportar aplicaciones de industria 4.0 mediante tres paradigmas fundamentales: eMBB (enhanced Mobile Broadband), mMTC (masive Machine Type Communication) y URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communications) [2][21].

El paradigma eMBB se enfoca en proporcionar altas tasas de transmisión de datos (Gbps), siendo clave para aplicaciones como monitoreo remoto en alta definición, realidad aumentada/virtual y análisis de video en tiempo real dentro de entornos industriales. En fábricas inteligentes este paradigma permite la supervisión continua de procesos mediante cámaras y sistemas de inspección visual avanzados, soportando grandes volúmenes de datos generados por sensores y sistemas de control [30][32]. Esto se logra principalmente mediante el uso de bandas de frecuencia alta (mmWave) que ofrecen grandes anchos de bandas disponibles junto con técnicas avanzadas de MIMO masivo (Multiple Input Multiple Output) y beamforming, que permite dirigir la señal de manera eficiente hacia el usuario. Además, utiliza esquemas de modulación de alta eficiencia (256-QAM) y agregación de portadores, lo que incrementa significativamente la capacidad de transmisión.

mMTC está diseñado para soportar una conectividad masiva de dispositivos IoT. Su funcionamiento se basa en optimizar el acceso al medio mediante técnicas como acceso aleatorio eficiente, señalización reducida y protocolos ligeros que minimizan el consumo energético. En lugar de priorizar velocidad, prioriza escalabilidad, permitiendo conexión simultánea de miles de sensores con tráfico esporádico y bajo volumen; clave para escenarios industriales con redes de sensores para monitoreo continuo.

URLLC se enfoca en garantizar latencias extremadamente bajas y alta confiabilidad. Esto se consigue mediante varios mecanismos: Reducción del tamaño de los intervalos de transmisión (TTI), asignación prioritaria de recursos en la red, técnicas de retransmisión rápida, diversidad espacial y temporal, y esquemas de codificación robustos. Según [30], cuando coexisten con otros tipos de tráfico, el sistema

implementa priorización explícita, donde URLLC puede interrumpir transmisiones en curso (Preemptive Scheduling) para asegurar el desempeño. Ideal para aplicaciones críticas como control en tiempo real.

Las mejoras a nivel arquitectura como el soporte de comunicaciones dispositivo a dispositivo (D2D), que permite que sensores, actuadores y robots se comuniquen directamente sin pasar siempre por la estación base, reduciendo latencia y carga en la red. [30]

Esta diferenciación permite que múltiples servicios coexistan de forma eficiente. Por ejemplo, según [30], en una línea de producción, URLLC se utiliza de para la sincronización y control de maquinaria, mientras que eMBB se emplea para monitoreo remoto y análisis de datos, garantizando aislamiento de desempeño mediante técnicas como networkin slicing y asignación dinámica de recursos.

Desde el punto de vista de implementación, el despliegue de 5G industrial implica una infraestructura compleja que incluye estaciones base densamente distribuidas, uso de espectro licenciado y soporte de Edge computing. Incrementando los costos, pero permitiendo cumplir los estrictos requisitos de la industria 4.0

La selección de los protocolos de comunicación inalámbrica es un proceso que depende de muchos factores, ya que se encuentra condicionado por factores técnicos, como el ancho de banda, el consumo energético, la latencia, el alcance, entre otras y variables ambientales relacionadas con la propagación de la señal. Se sintetizó la información de las tecnologías analizadas en esta sección, la figura 2 categoriza los sectores industriales y comerciales donde cada protocolo posee una mayor relevancia, su modo de implementación y fortalezas que distingue a cada protocolo. En la tabla 2 se desarrolla un resumen con las métricas más relevantes de cada uno de los protocolos.

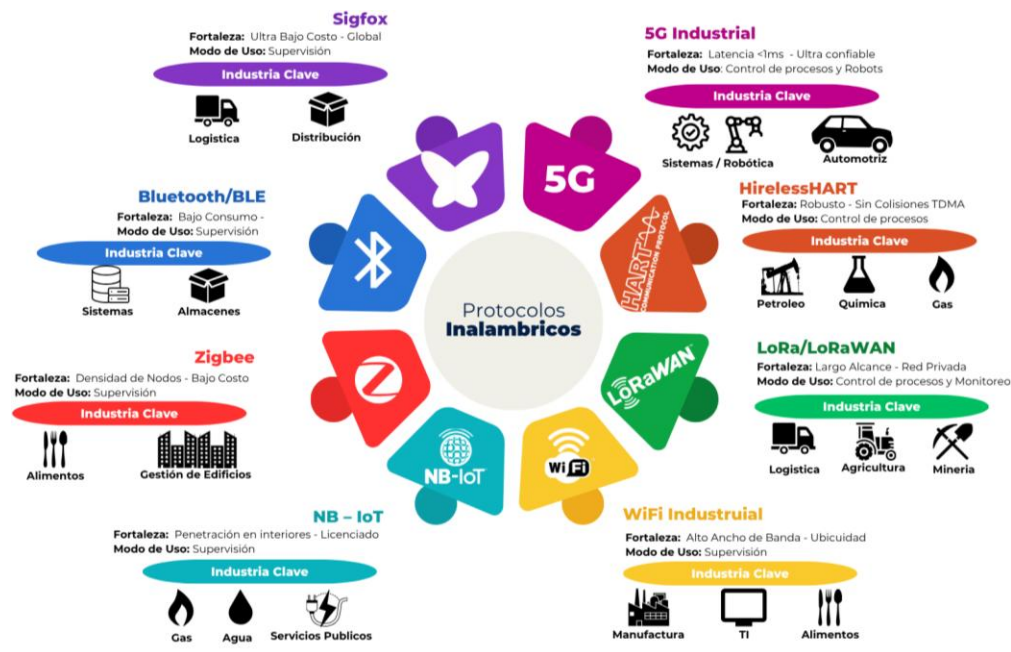


Fig 2. Aplicaciones y capacidades de las redes industriales inalámbricas [2][21]

Tabla II.
Características de los protocolos de comunicación industrial inalámbrico.

Protocolo	Velocidad de transmisión	Alance	Medio físico	topología	Susceptibilidad electromagnética
Wi - Fi industrial	54 Mbps – 9.6 Gbps	50 – 100 m	Radio (2.4 / 5 / 6 GHz)	Estrella	Alta
Bluetooth industrial	125 kbps – 3Mbps	10 – 100 m	Radio (2.4 GHz ISM)	Piconet / Mesh	Media (FHSS)
Zigbee	20 kbps – 250 kbps	10 -100 m	Radio (2.4 GHz)	Malla / Estrella	Medi/alta
WirelessHART	~250 kbps	50 – 200 m	Radio (2.4 GHz)	Malla Autoorganizada	Baja/media
Sigfox	100 bps – 600 bps	10 – 50 km	Radio (Ultra Narrow Band)	Estrella	Baja
LoRa/LoRaWAN	0.3 kbps – 50 kbps	2 – 15 km	Radio	Estrella de estrellas	Baja (CSS)
NB-IoT	20 kbps – 250 kbps	1 -10 km	Radio (LTE)	Celular	Muy Baja
5G industrial	100 Mbps – 20 Gbps	100 m - # Km	Radio (sub – 6 GHz / mmWave)	Celular / red privada	Baja

Nota: Los valores expuestos pueden oscilar en función de las variables de implementación y de campo [2], [1], [21]

V. COMPARATIVA

El análisis comparativo de las tecnologías de comunicación industrial no puede abordarse desde una visión fragmentada de parámetros independientes. En entornos industriales reales, la modificación de factores como la latencia, escalabilidad, seguridad, entre otros impacta directamente sobre los demás, generando reevaluar los compromisos técnicos. En este contexto, las tecnologías inalámbricas han emergido como una alternativa viable y en muchos casos, necesaria frente a las limitaciones estructurales de los sistemas cableados, aunque su adopción implica desafíos técnicos en su uso e implementación.

La latencia es un parámetro crítico en sistemas de automatización, evidencia una de las diferencias más marcadas entre tecnologías cableadas e inalámbricas. En sistemas tradicionales como Ethernet Industrial, PROFINET en modo IRT o Ethernet/IP, la latencia se mantiene en niveles bajos y más importante aún, predecibles lo que permite su utilización en aplicaciones de control en tiempo real. Este comportamiento se debe principalmente al uso de medios físicos dedicados, a la eliminación de colisiones mediante comunicación Full-Duplex y a la implementación de mecanismos de planificación temporal del tráfico. No obstante, incluso en estos sistemas, la latencia no es completamente independiente de la distancia, ya que el incremento en la cantidad de dispositivos intermedios, como switches y repetidores, introduce retardos acumulativos que afectan el desempeño.

Por su parte las tecnologías inalámbricas presentan una relación mucho más evidente entre latencia y distancia, así como las condiciones del entorno. En sistemas como Wi-Fi industrial, la latencia puede mantenerse en rangos relativamente bajos en condiciones ideales pero su comportamiento se vuelve altamente variable debido al uso de mecanismos de acceso al medio basados en contienda, como CSMA/CA. Esta variabilidad introduce Jitter, como en Fig. 3, lo que limita su aplicabilidad en sistemas de control estricto. A medida que aumentan la distancia o densidad de dispositivos, la probabilidad de colisiones y retransmisión se incrementa, generando retardos en la comunicación.

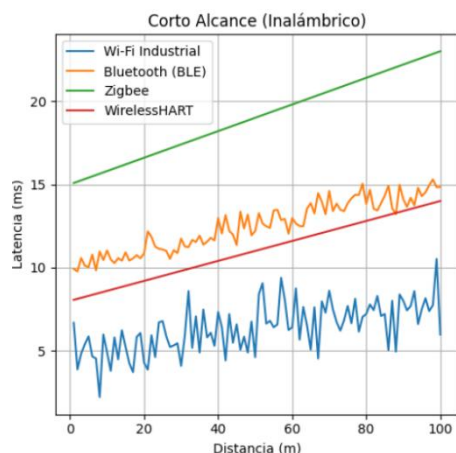


Fig 3. Relación latencia en función de la distancia en protocolos inalámbricos de corto alcance.

En tecnologías de largo alcance, como LoRaWAN o Sigfox, donde la latencia no solo depende de la distancia física sino también de parámetros de configuración como el factor de propagación o las restricciones de transmisión. En estos sistemas, el incremento del alcance implica necesariamente una reducción de tasa de datos y un aumento en el tiempo de transmisión, lo que hace inapropiados para aplicaciones de control en tiempo real, pero adecuados para monitoreo distribuido, como en Fig. 4. De esta manera, se evidencia una relación directa entre alcance, latencia y capacidad de respuesta, donde la optimización de uno de estos factores implica la degradación de otro.

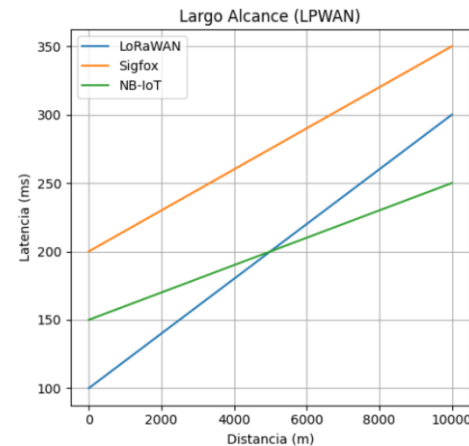


Fig 4. Relación latencia en función de la distancia en protocolos inalámbricos largo alcance

La confiabilidad está estrechamente ligada tanto al medio de transmisión como a la arquitectura de red. En sistemas cableados, la confiabilidad se fundamenta en la estabilidad del medio físico, donde la transmisión se ve menos afectada por interferencia externa y donde los errores pueden ser controlados mediante mecanismos bien definidos. Sin embargo, esta misma dependencia del medio físico introduce vulnerabilidades asociadas a fallos mecánicos, como cortes de cables o problemas de conexión, los cuales pueden comprometer completamente el enlace.

En el caso de las comunicaciones inalámbricas no depende únicamente del enlace directo, sino de la capacidad del sistema para adaptarse a las condiciones cambiantes del entorno. Tecnologías como el WirelessHART ilustran este enfoque al incorporar topologías en malla, redundancia de rutas y técnicas como salto de frecuencia, lo que permite mantener la comunicación incluso en presencia de interferencia o fallos de nodos. No obstante, esta mejora en la confiabilidad incrementa la complejidad del sistema y en muchos casos, la latencia por la necesidad de retransmisiones y múltiples saltos.

El costo de implementación constituye otro factor determinante que se encuentra directamente influenciado por los requerimientos de desempeño. Las soluciones cableadas implican, en general, altos costos iniciales asociados a la instalación física del cableado, especialmente en entornos industriales complejos o de gran extensión. Sin embargo, una

vez desplegadas, estas redes presentan costos operativos relativamente bajos y una alta estabilidad a lo largo del tiempo.

Por el contrario, las tecnologías inalámbricas reducen significativamente los costos iniciales de despliegue, eliminando la necesidad de infraestructura física extensa. Esto resulta una ventaja en aplicaciones donde la movilidad, la flexibilidad o la dificultad de acceso hacen inviable el uso de cableado. No obstante, esta reducción en el costo inicial puede verse compensada por la necesidad de una planificación más compleja, así como por la implementación para garantizar confiabilidad y seguridad.

La escalabilidad presenta una de las principales ventajas de a tecnologías inalámbricas frente a soluciones tradicionales. Mientras que en sistemas cableados la expansión de red implica modificaciones físicas y en muchos casos, interrupciones en la operación, las redes inalámbricas permiten la incorporación de nuevos dispositivos de manera más flexible. Tecnologías como Zigbee, LoRaWAN y NB – IoT han sido diseñadas específicamente para soportar grandes cantidades de dispositivos, lo que las hace ideales para escenarios de IoT industrial.

Esta capacidad de escalabilidad no es gratuita. A medida que aumenta el número de dispositivos conectados, la red debe

gestionar un mayor volumen de tráfico, lo que puede afectar la latencia, la confiabilidad y la eficiencia del sistema. En este contexto muchas tecnologías optan por reducir la tasa de datos por dispositivos o implementar esquemas de transmisión esporádica, lo que limita su uso a aplicaciones de monitoreo y supervisión, como en Fig. 2.

La seguridad se presenta como un aspecto transversal que afecta a todos los criterios anteriores. En sistemas cableados, la seguridad no fue originalmente una prioridad, lo que llevó a la necesidad de implementar mecanismos adicionales de protección en la actualidad. En contraste, las tecnologías inalámbricas han incorporado desde su diseño mecanismos de cifrado y autenticación, aunque su naturaleza abierta las hace más susceptibles a ataques externos.

A medida que aumenta la conectividad y la integración de sistemas, también lo hace la superficie de ataque, lo que incrementa la complejidad de la gestión de seguridad. Este fenómeno es particularmente relevante en tecnologías como 5G, donde la convergencia entre redes industriales y sistemas de información requiere la implementación de arquitecturas de seguridad avanzadas.

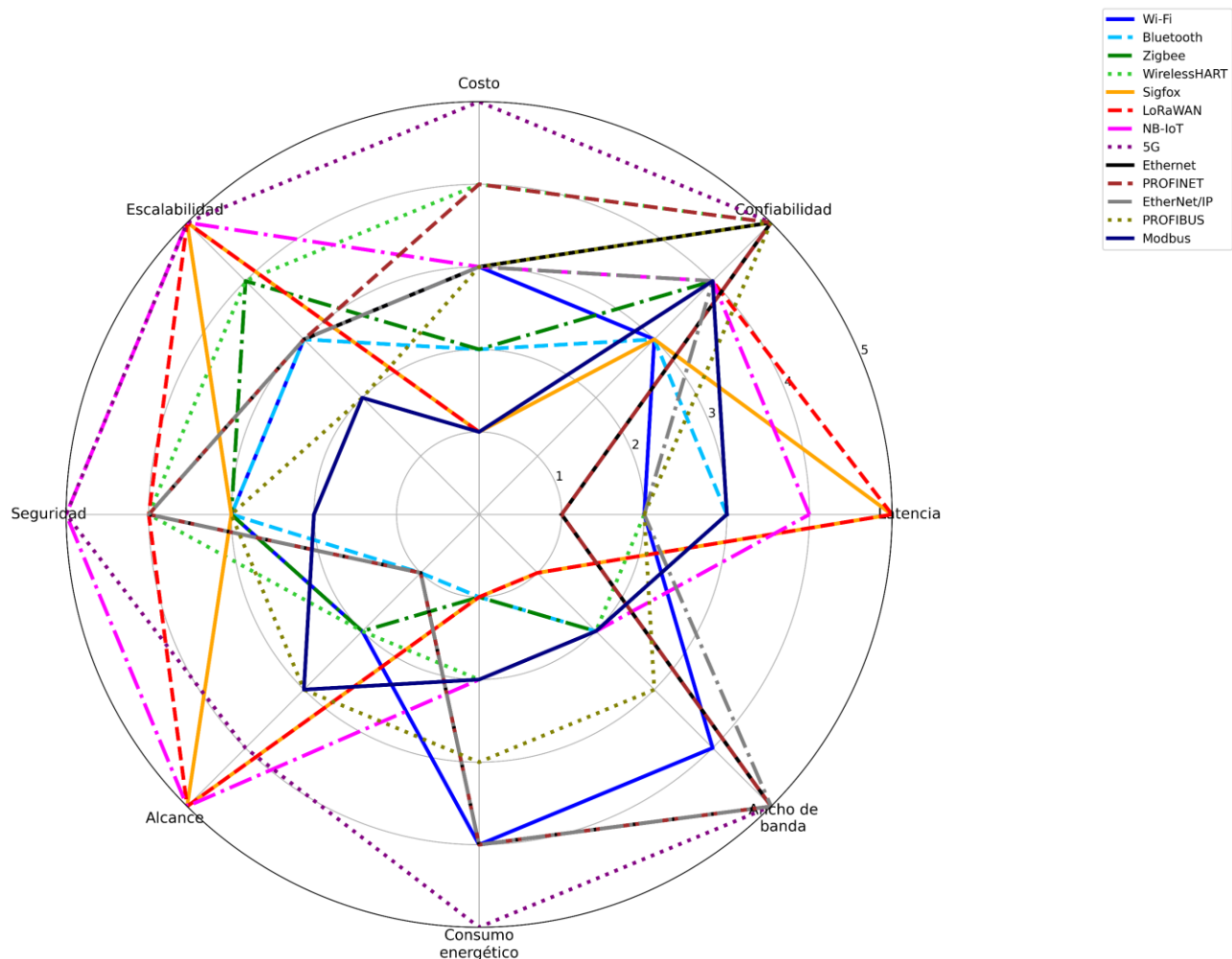


Fig 6. Características de protocolos de comunicación industrial

El ancho de banda es un factor determinista en aplicaciones industriales. Las tecnologías cableadas basadas en Ethernet Industrial, PROFINET y Ethernet/IP ofrecen velocidades elevadas y estables, adecuadas para aplicaciones de control en tiempo real y transferencia continua de la información. En contraste, tecnologías inalámbricas como Zigbee, WirelessHART o LoRaWAN presentan transmisiones considerablemente menores debido a su orientación de aplicaciones de monitoreo.

El consumo energético es un criterio relevante, los sistemas cableados eliminan parcialmente este aspecto al utilizar alimentación física directa en muchos dispositivos industriales. Tecnologías como Zigbee, LoRaWAN y NB – IoT se diseñaron para operar con bajo consumo energético largos periodos de tiempo, permitiendo el despliegue de redes extensas de sensores alimentados por una batería; Wi-Fi industrial o 5G requieren mayor consumo energético debido a sus capacidades de transmisión y procesamiento.

La topología de red influye directamente sobre la confiabilidad y escalabilidad del sistema. En redes cableadas son mas comunes las arquitecturas jerárquicas y deterministas basados en switches industriales y buses de campo, mientras que varias tecnologías inalámbricas incorporan topología más flexible. Empleando tipología tipo malla permite la redundancia de rutas y adaptación frente a fallos o interferencias, mejorando la tolerancia a fallos en entornos industriales, lo que también aumenta la complejidad de administración y puede introducir retardos adicionales por retransmisiones.

En términos de aplicación industrial, la selección de una tecnología no depende de un único criterio, sino del equilibrio entre todos ellos y los criterios que se buscan cubrir en la industria, como en Fig. 6. Las soluciones cableadas continúan siendo la opción preferida para aplicaciones de control crítico, donde la latencia y el determinismo son fundamentales. No obstante, las tecnologías inalámbricas han demostrado ser altamente efectivas en escenarios de monitoreo, supervisión, movilidad y conectividad masiva, donde sus ventajas en flexibilidad y escalabilidad superan las limitaciones en latencia y confiabilidad.

VI. CONCLUSIONES

El análisis de la presente monografía permite evaluar las tecnologías de comunicación industrial, tanto cableadas como inalámbricas, bajo criterios técnicos fundamentales como latencia, confiabilidad, escalabilidad, seguridad y tipo de aplicación. A partir de la revisión sistemática de literatura científica y la comparación de protocolos representativos, se evidencia que no existe una solución universal optima, sino un conjunto de tecnologías cuya aplicabilidad depende directamente de las condiciones operativas y los requerimientos específicos de cada entorno industrial.

Se confirma que la transmisión de datos en tiempo real en la industria 4.0 continúa siendo un desafío cuando se enfrenta a

condiciones adversas como interferencia electromagnética, limitaciones físicas del cableado y necesidad de cubrir grandes áreas. En este contexto, las comunicaciones inalámbricas emergen como una alternativa técnicamente viable para superar restricciones asociadas a la rigidez estructural de las redes cableadas, en escenarios donde la movilidad, escalabilidad y distribución geográfica de los dispositivos son factores determinantes; muestran fortalezas en escenarios de monitoreo distribuido, IoT industrial y sistemas donde el cableado resulta inviable. Protocolos como Zigbee, LoRaWAN y NB-IoT destacan por su capacidad de escalabilidad y bajo consumo energético, mientras que soluciones como WirelessHART priorizan la confiabilidad mediante redundancia y sincronización.

El análisis también muestra que existen limitaciones. La naturaleza del medio inalámbrico introduce variabilidad en la latencia, susceptibilidad a interferencias y mayores desafíos en términos de seguridad. A diferencia de los sistemas cableados, donde el determinismo y la estabilidad del canal físico permite garantizar tiempos de respuesta predecible, las tecnologías como Ethernet industrial, PROFINET o Ethernet/IP continúan siendo la solución predominante en aplicaciones de control crítico, donde la baja latencia y el comportamiento determinista son indispensables.

En un nivel más avanzado, 5G industrial representa un punto de convergencia tecnológico al integrar, mediante sus paradigmas eMBB, mMTC y URLLC capacidades de alta velocidad, conectividad masiva y baja latencia dentro de una misma infraestructura. La implementación implica un reto en términos de costo, complejidad de despliegue, gestión de espectro y seguridad.

El panorama actual de las comunicaciones inalámbricas no sustituye completamente a las cableadas, sino que las complementan, extendiendo las capacidades de los sistemas industriales hacia nuevos escenarios operativos.

La investigación permite concluir que las comunicaciones inalámbricas constituyen un elemento clave en la evolución hacia la industria 4.0, ofreciendo ventajas significativas. No obstante, su implementación requiere un análisis técnico riguroso que considere la interdependencia entre los distintos parámetros de desempeño, así como las limitaciones inherentes al medio inalámbrico. La correcta selección e integración de estas tecnologías es un factor crítico para garantizar sistemas de comunicación eficiente, confiable y seguros en la industria moderna.

REFERENCIAS

- [1] P. Ganesan, S. Gunasekaran, A. Ashwin Balaji, S. Jini Fathima and S. Suryaprakash, "Comparative Analysis on Industrial IoT Communication Protocols and its Future Directives," *2021 International Conference on Advancements in Electrical, Electronics, Communication, Computing and Automation (ICAECA)*, Coimbatore, India, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICAECA52838.2021.9675583.
- [2] N. Petkov and A. Naumov, "Overview of Industrial Communication in Process Automation," *2022 International Conference Automatics and Informatics (ICAI)*, Varna, Bulgaria, 2022, pp. 229-234, doi: 10.1109/ICAIS5857.2022.9960067.
- [3] N. Wang, X. Fan, F. Feng, Y. Li, H. Ye and Y. Liu, "An Industrial Communication System for PLC," *2024 IEEE 4th International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI)*, Changchun, China, 2024, pp. 125-129, doi: 10.1109/ICETCI61221.2024.10594451.
- [4] W. Feng, "A Review with a Novel Perspective on IoT Evolution, Technical Architecture, Applications, and Challenges-Solutions," *2025 IEEE 3rd International Conference on Image Processing and Computer Applications (ICIPCA)*, Shenyang, China, 2025, pp. 2161-2167, doi: 10.1109/ICIPCA65645.2025.11138143.
- [5] Dominique Paret; Hassina Rebaine; B. A. Engel, "Ethernet and Automobiles," in *Autonomous and Connected Vehicles: Network Architectures from Legacy Networks to Automotive Ethernet*, Wiley, 2022, pp.237-316, doi: 10.1002/9781119816140.ch5
- [6] M. Gang, B. Yan and B. Hu, "Research and Implementation of Industrial Real-Time Ethernet Scheduling Method Based on Time Slot Reuse," *2024 5th International Seminar on Artificial Intelligence, Networking and Information Technology (AINIT)*, Nanjing, China, 2024, pp. 428-433, doi: 10.1109/AINIT61980.2024.10581481.
- [7] H. Li, F. Zhang, J. Zhang, N. Zhang, L. Wang and X. Yang, "Research and realization of a spinning machine control and monitoring system by industrial ethernet communication between IPC and OMRON PLC," *2016 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*, Ningbo, China, 2016, pp. 1901-1906, doi: 10.1109/ICInfA.2016.7832129.
- [8] "IEEE Standard for Ethernet Amendment 10: Physical Layer Specifications and Management Parameters for Enhancement of 10 Mb/s Operation over Single Balanced Pair Multidrop Segments," in *IEEE Std 802.3da-2026 (Amendment to IEEE Std 802.3-2022 as amended by IEEE Std 802.3dd-2022, IEEE Std 802.3cs-2022, IEEE Std 802.3db-2022, IEEE Std 802.3ck-2022, IEEE Std 802.3de-2022, IEEE Std 802.3cx-2023, IEEE Std 802.3cz-2023, IEEE Std 802.3c , vol., no., pp.1-172, 11 March 2026*, doi: 10.1109/IEEESTD.2026.11429651.
- [9] M. Shaikh, P. Shah and R. Sekhar, "Communication Protocols in Industry 4.0," *2023 International Conference on Sustainable Emerging Innovations in Engineering and Technology (ICSEIET)*, Ghaziabad, India, 2023, pp. 709-714, doi: 10.1109/ICSEIET58677.2023.10303397.
- [10] B. Vanseveren, W. Cottagnie, J. Knockaert, F. Depuydt, S. Noppe and P. Saey, "Low-cost PROFIBUS DP Slave Shield for embedded controllers," *2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Berlin, Germany, 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/ETFA.2016.7733509.
- [11] M. K. Escalona H, L. Chichan, M. Torrealba and R. M. Toasa, "Migration of control system data to a system profibus and profinet devices for H&K Omega Lavana bottle washing machine 345," *2020 15th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, Seville, Spain, 2020, pp. 1-6, doi: 10.23919/CISTI49556.2020.9140838.
- [12] A. B. Lugli, E. R. Neto, J. P. C. Henriques, M. T. d. C. Silva, N. D. Pereira and T. C. Pimenta, "A Database Proposal for an Application Involving Industrial Networks for Industry 4.0 Concepts," *2020 27th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and System (MIXDES)*, Lodz, Poland, 2020, pp. 239-244, doi: 10.23919/MIXDES49814.2020.9155979.
- [13] A. L. Dias, G. S. Sestito, A. C. Turcato and D. Brandão, "Panorama, challenges and opportunities in PROFINET protocol research," *2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, Sao Paulo, Brazil, 2018, pp. 186-193, doi: 10.1109/INDUSCON.2018.8627173.
- [14] A. B. D. Kinabo, J. B. Mwangama and A. A. Lysko, "An Overview of Time-Sensitive Communications for the Factory Floor," *2021 IST-Africa Conference (IST-Africa)*, South Africa, South Africa, 2021, pp. 1-9.
- [15] C. Niu, Z. Xie and T. Zhou, "Application of Ethernet/IP Protocol in Equipment Lifecycle Management," *2021 IEEE International Conference on Information Communication and Software Engineering (ICICSE)*, Chengdu, China, 2021, pp. 260-263, doi: 10.1109/ICICSE52190.2021.9404137.
- [16] A. M. Penarrieta, S. G. Benitez and A. R. Benalcázar, "Development of an Industrial Communication Driver for Ethernet/IP Devices," *2022 IEEE Sixth Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*, Quito, Ecuador, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/ETCM56276.2022.9935752.
- [17] W. Jingran, L. Mingzhe, X. Aidong, H. Bo, H. Xiaojia and Z. Xiufang, "Research and Implementation of Secure Industrial Communication Protocols," *2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems (ICAIS)*, Dalian, China, 2020, pp. 314-317, doi: 10.1109/ICAIS49377.2020.9194854.
- [18] M. Ehrlich, H. Trsek, L. Wisniewski and J. Jasperneite, "Survey of Security Standards for an automated Industrie 4.0 compatible Manufacturing," *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Lisbon, Portugal, 2019, pp. 2849-2854, doi: 10.1109/IECON.2019.8927559.
- [19] W. Yuhong and H. Xiangdong, "Industrial Internet Security Protection Based on an Industrial Firewall," *2021 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA)*, Dalian, China, 2021, pp. 239-247, doi: 10.1109/ICAICA52286.2021.9497973.
- [20] P. Drahoš, E. Kučera, O. Haffner, R. Pribiš and L. Beňo, "Trends in Industrial Networks including APL, TSN, WiFi-6E and 5G Technologies," *2022 Cybernetics & Informatics (K&I)*, Visegrád, Hungary, 2022, pp. 1-7, doi: 10.1109/KI55792.2022.9925965.
- [21] Marzieh Jalal Abadi; Babak Hossein Khalaj, "Connectivity through Wireless Communications and Sensors," in *Industry 4.0 Vision for the Supply of Energy and Materials: Enabling Technologies and Emerging Applications*, Wiley, 2022, pp.3-58, doi: 10.1002/9781119695868.ch1.
- [22] A. Kabaci, S. B. Damsgaard and P. E. Mogensen, "Latency Evaluation of Industrial Wi-Fi for Real-Time Connectivity in Factory Setup," *2025 IEEE 30th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Porto, Portugal, 2025, pp. 1-8, doi: 10.1109/ETFA65518.2025.11205714.
- [23] V. Díez, A. Arriola, I. Val and M. Velez, "Reliability Evaluation of Bluetooth Low Energy for Industry 4.0," *2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Zaragoza, Spain, 2019, pp. 1148-1154, doi: 10.1109/ETFA.2019.8869211.
- [24] B. Nie, "Zigbee-based Wireless Sensor Network Energy-Saving Networking Intelligent Technology and Middleware Optimization," *2022 3rd International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC)*, Trichy, India, 2022, pp. 644-647, doi: 10.1109/ICOSEC54921.2022.9951997.
- [25] M. Kostadinovic, A. Stjepanovic, G. Kuzmic, M. Stojcic and T. Kostadinovic, "Quality Analysis of Data Transferring Through the Process of Modeling WirelessHART Network," *2020 19th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)*, East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/INFOTEH48170.2020.9066315.
- [26] L. Beňo, E. Kučera, O. Haffner, A. Valašík, D. Janecký and P. Drahoš, "Revolutionizing IoT Connectivity with Low-Cost Wide-Range LPWAN Technology Sigfox," *2025 International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD)*, Barcelona, Spain, 2025, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICCAD64771.2025.11099235.
- [27] R. J and N. D, "LoRa WAN Based Smart System for Unsafe Event Detection in Mining Industry Using ML," *2024 9th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*, Coimbatore, India, 2024, pp. 684-691, doi: 10.1109/ICCES63552.2024.10859998.
- [28] S. Senthil, M. R. Kumar, R. S. Kumar, A. K. Jabakumar and K. Madhan, "Design and Implementation of Smart Agriculture Management Intelligent Things Using NB-IOT," *2022 Third International Conference on Smart Technologies in Computing, Electrical and Electronics (ICSTCEE)*, Bengaluru, India, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICSTCEE56972.2022.10100320.
- [29] B. Khan and C. Pirak, "Experimental Performance Analysis of MQTT and CoAP Protocol Usage for NB-IoT Smart Meter," *2021 9th International Electrical Engineering Congress (IEECON)*, Pattaya, Thailand, 2021, pp. 65-68, doi: 10.1109/IEECON51072.2021.9440273.

- [30] D. Ivanova, E. Markova, D. Moltchanov, R. Pirmagomedov, Y. Koucheryavy and K. Samouylov, "Performance of Priority-Based Traffic Coexistence Strategies in 5G mmWave Industrial Deployments," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 9241-9256, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3143583.
- [31] Y. Tang, F. Wang, Z. Hu and C. -C. Li, "BeamCovert: Spatial Covert Communication for Secure and Efficient IIoT in 5G Smart Factories," 2025 International Conference on Smart Applications, Communications and Networking (SmartNets), Istanbul, Turkiye, 2025, pp. 1-6, doi: 10.1109/SmartNets65254.2025.11106792.
- [32] N. Saqib, N. F. Abdullah, A. Abu-Samah, H. A. H. Alobaidy and R. Nordin, "Adaptive VNF Placement Considering Overall Latency and 5G Wireless Channel Reliability in Industry 4.0: A Reinforcement Learning Based Approach," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 88883-88896, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3419065.
- [33] G. Chirita and M. Barbu, "Software sensors in advanced technological processes: a synthesis of data acquisition, integration and intelligent processing technologies," 2025 29th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), Cluj-Napoca, Romania, 2025, pp. 697-703, doi: 10.1109/ICSTCC66753.2025.11240245.