

Revisión de Protocolos de Comunicación Aplicados a la Minería de Carbón: Limitaciones, Tendencias e Innovaciones para Entornos Críticos

Review of Communication Protocols Applied to Coal Mining: Limitations, Trends, and Innovations for Critical Environments

Recibido: 15 Septiembre de 2024

Aprobado: 26 Diciembre de 2024

Cómo citar: P. A. Gomez-Monsalve; H. J. Berrio-Marin; V. D. Villalobos-Mendoza, "Revisión de Protocolos de Comunicación Aplicados a la Minería de Carbón: Limitaciones, Tendencias e Innovaciones para Entornos Críticos", *Mundo Fesc*, vol. 15, no. 33, pp. 379-403, 2025, doi: 10.61799/2216-0388.1799.

Pablo Andres Gomez-Monsalve*



Magister en Controles Industriales,
pablo.gomez@unipamplona.edu.co,
Orcid: 0000-0002-9507-1690,
Universidad de pamplona, Cúcuta, Norte de Santander.

Harvin Jeffrey Berrio-Marin²



Estudiante de pregrado en ingeniera mecatrónica, harvin.
berrio@unipamplona.edu.co,
Orcid: 0009-0002-6479-7613,
Universidad de pamplona, Cúcuta, Norte de Santander.

Victor Daniel Villalobos-Mendoza³



Estudiante de pregrado en ingeniera mecatrónica,
victor.villalobosvic@unipamplona.edu.co,
Orcid: 0009-0005-6965-7646,
Universidad de pamplona, Cúcuta, Norte de Santander.

*Autor para correspondencia:

pablo.gomez@unipamplona.edu.co



Revisión de Protocolos de Comunicación Aplicados a la Minería de Carbón: Limitaciones, Tendencias e Innovaciones para Entornos Críticos

Resumen

En la actualidad, los sistemas de comunicación industrial desempeñan un papel fundamental en la eficiencia y seguridad de los procesos mineros, especialmente en entornos subterráneos como las minas de carbón, donde las condiciones son complejas. El objetivo de este artículo es analizar las principales limitaciones, tendencias e innovaciones en protocolos de comunicación industrial aplicados a la minería de carbón. La metodología consistió en una revisión bibliográfica sistemática de artículos publicados entre 2019 y 2025, obtenidos principalmente de la base de datos Scopus. Los artículos fueron analizados de forma cualitativa para identificar las tendencias, tecnologías emergentes, desafíos comunes y propuestas aplicadas en el contexto minero. Los resultados evidencian una tendencia al uso de sistemas como ZIGBEE, como también redes robustas de Wi-Fi. Por otro lado, se están probando nuevas tecnologías como las redes 5G y el uso del microcontrolador ESP32 como una alternativa económica con su protocolo ESP-now. Asimismo, se destaca la tendencia hacia soluciones basadas en el Internet de las Cosas y redes tipo malla adaptadas a túneles subterráneos. Se concluye que la evolución de los protocolos de comunicación industrial representa una oportunidad para fortalecer la seguridad, optimizar la operación minera y avanzar hacia una minería más segura e inteligente.

Palabras clave: Comunicación industrial, Innovación tecnológica, Minería subterránea, Minas de carbón, Protocolos de comunicación, Tendencias tecnológicas.

Review of Communication Protocols Applied to Coal Mining: Limitations, Trends, and Innovations for Critical Environments

Abstract

Currently, industrial communication systems play a fundamental role in the efficiency and safety of mining processes, especially in underground environments such as coal mines, where conditions are complex. The objective of this article is to analyze the main limitations, trends, and innovations in industrial communication protocols applied to coal mining. The methodology consisted of a systematic literature review of articles published between 2019 and 2025, mainly obtained from the Scopus database. The articles were qualitatively analyzed to identify trends, emerging technologies, common challenges, and proposed solutions applied in the mining context. The results show a trend toward the use of systems such as Zigbee, as well as robust Wi-Fi networks. On the other hand, new technologies such as 5G networks and the use of the ESP32 microcontroller with its ESP-NOW protocol are being tested as cost-effective alternatives. Likewise, the trend towards solutions based on the Internet of Things (IoT) and mesh networks adapted to underground tunnels is highlighted. It is concluded that the evolution of industrial communication protocols represents an opportunity to strengthen safety, optimize mining operations, and advance towards safer and smarter mining.

Keywords: Coal mines, Communication protocols, Industrial communication, Technological innovation, Technological trends, Underground mining.

Introducción

La minería subterránea de carbón representa uno de los entornos industriales más complejos para establecer sistemas de comunicación confiables. La humedad, el polvo, las interferencias electromagnéticas y la geometría irregular de los túneles dificultan la propagación de las señales, afectando tanto la seguridad del personal como la eficiencia de las operaciones diarias. En estos contextos, la comunicación industrial no solo es un canal de intercambio de datos, sino un elemento vital para prevenir accidentes, coordinar actividades críticas y sostener la productividad bajo condiciones extremas.

En los últimos años, la transición hacia la Industria 4.0 ha impulsado la adopción de redes inalámbricas diseñadas para entornos hostiles. Protocolos como Zigbee, LoRa, Wi-Fi, 5G y ESP-NOW se han incorporado progresivamente en la automatización y el monitoreo minero, aunque su desempeño real sigue condicionado por el entorno físico y las limitaciones técnicas. Según Zhang y Yan [1], la integración de redes cableadas e inalámbricas en minas profundas requiere una arquitectura que combine estabilidad, tolerancia a fallos y bajo consumo energético, características difíciles de lograr simultáneamente.

A pesar de los avances tecnológicos, las soluciones actuales no logran garantizar una conectividad continua en todo el sistema subterráneo. Guan et al. [2] señalan que la falta de comunicación estable puede incluso comprometer los modelos de predicción de riesgo en techos de minas, donde los datos deben fluir sin interrupciones para anticipar accidentes estructurales. Este tipo de hallazgos demuestra que la confiabilidad de las redes no solo tiene implicaciones técnicas, sino también de seguridad humana y sostenibilidad operativa.

Sin embargo, la mayoría de los estudios previos se han centrado en descripciones técnicas aisladas de los protocolos, sin ofrecer un análisis crítico sobre su comportamiento en condiciones reales de campo. Fan [3] destaca que la innovación tecnológica en minería debe ir acompañada de estrategias de adaptación que consideren la geología y las condiciones del subsuelo, factores que afectan directamente la viabilidad de cualquier tecnología de comunicación.

Por ello, el objetivo de este trabajo es analizar críticamente las limitaciones, tendencias e innovaciones de los principales protocolos de comunicación industrial aplicados a minas de carbón, enfatizando sus fortalezas, restricciones y posibles sinergias dentro de arquitecturas híbridas. Esta revisión se desarrolló mediante una búsqueda sistemática en la base de datos Scopus, considerando artículos publicados entre 2019 y 2025, con el fin de identificar avances recientes, desafíos técnicos y propuestas emergentes vinculadas con redes inalámbricas, sensores inteligentes y sistemas IoT aplicados al entorno minero.

El aporte de esta revisión radica en ofrecer una visión integradora y prospectiva, que contraste las capacidades reales de los protocolos con los requerimientos específicos de la minería subterránea. Además, se identifican vacíos de investigación relacionados con la interoperabilidad, la seguridad de red y la optimización energética, aspectos cruciales para el desarrollo de sistemas inteligentes adaptativos que fortalezcan la seguridad, la productividad y la sostenibilidad del sector minero.

Materiales y Métodos

La investigación fue desarrollada mediante una revisión bibliográfica enfocada en protocolos de comunicación industrial aplicados a entornos mineros críticos, específicamente en minas de carbón subterráneas. Se consideraron publicaciones entre el año 2019 y 2025, y se tuvo en cuenta los desarrollos más recientes de esta área. La base de datos usada fue Scopus.

La metodología de búsqueda utilizada incluyó palabras clave y fueron utilizados operadores booleanos para tener los mejores resultados, más enfocado y asegurando su relevancia. Se utilizaron palabras como "industrial communication protocols" AND "coal mining", y "wireless communication" AND "harsh environments". Se aplicaron filtros por idioma y periodo de publicación para mantener la coherencia del análisis.

Los criterios para incluir los artículos fueron: artículos que estuvieran relacionado directamente con avances tecnológicos en comunicación industrial, publicados en revistas o en conferencias reconocidas y excluyendo artículos que no hayan sido revisados o que tuvieran enfoques muy alejados a la temática principal.

Para seleccionar la información, estos artículos fueron organizados según el protocolo y la tecnología analizada, su aplicación específica y los resultados obtenidos en cada uno de ellos, teniendo en cuenta un análisis cualitativo del enfoque tomado, permitiendo identificar tendencias, desafíos y oportunidades de las tecnologías innovadoras y relevantes implementadas en entornos mineros, finalmente fueron seleccionados 52 artículos relevantes.

ZIGBEE

Zigbee es un protocolo inalámbrico que se destaca en el área industrial por su resistencia a interferencias y su capacidad de integración con múltiples dispositivos, cualidades que lo hacen ideal para entornos exigentes como la minería de carbón.

Uno de sus usos en este sector se da en los soportes hidráulicos mecatrónicos, haciendo uso de sensores de orientación, carga y posición se registran datos que se transmiten mediante Zigbee hacia un módulo receptor conectado por el estándar RS485 al controlador central. Esta arquitectura permite un control adaptativo entre los soportes

y la roca, dando estabilidad y precisión en el sistema [4].

Asimismo, Zigbee ha sido implementado en sistemas de monitoreo ambiental. Las redes cableadas utilizadas presentan limitaciones estructurales, mientras que los sensores inalámbricos interconectados mediante Zigbee permiten recolectar y transmitir datos de temperatura, humedad y gases en tiempo real, mejorando la capacidad de respuesta ante riesgos ambientales [5].

En el ámbito de la protección del personal minero, se han desarrollado soluciones basadas en Zigbee que facilitan la comunicación entre los operarios y el área de control de riesgos. Un ejemplo es un vehículo explorador no tripulado que utiliza la técnica SLAM; mediante sensores, evita obstáculos y, a su vez, registra variables de temperatura y gases que son enviadas a la estación base. Este tipo de dispositivo mejora la capacidad de respuesta ante emergencias sin poner en riesgo al personal [6].

Gracias a su arquitectura en topología de malla, Zigbee permite determinar la posición de los nodos mediante triangulación de la intensidad de la señal. Esto ha permitido el desarrollo de dispositivos de protección personal, como botas inteligentes con sensores de aceleración y presión, capaces de detectar caídas, delimitar zonas seguras y localizar con precisión a los trabajadores [7].

De manera complementaria, se han propuesto sistemas de monitoreo estructural ante posibles colapsos, utilizando Zigbee en conjunto con comunicación CAN. Esta red en malla recopila datos de vibraciones y desplazamientos en los túneles, transmitiéndolos al área de supervisión para generar alertas tempranas y prevenir accidentes [8].

Por su versatilidad, Zigbee puede integrarse con otros protocolos para crear sistemas de monitoreo multicapa. Por ejemplo, una red Zigbee puede recolectar datos locales y transmitirlos mediante 4G y el protocolo MQTT hacia la nube, donde la información se analiza y visualiza en una plataforma interactiva [9]. Este tipo de arquitectura híbrida mejora la gestión integral del sistema.

Aunque existen protocolos similares, Zigbee sigue siendo una opción robusta. Estudios comparativos con LoRaWAN en minería a cielo abierto muestran que, aunque LoRaWAN ofrece mayor alcance, Zigbee presenta mejor eficiencia energética y facilidad de implementación en redes de corto alcance [10]. En muchos casos, ambos protocolos pueden complementarse según la aplicación [11].

No obstante, tanto Zigbee como Wi-Fi presentan limitaciones en ambientes subterráneos, principalmente por interferencias, alcance reducido y consumo energético en el caso de Wi-Fi. En este contexto, LoRaWAN se plantea como una alternativa viable para ciertas aplicaciones que requieren mayor cobertura [12].

Finalmente, más allá de sus capacidades de comunicación, el contexto del IoT y las redes

WSN con dispositivos multimedia abre nuevas posibilidades de monitoreo. Sin embargo, el uso de tecnologías de canal abierto puede implicar riesgos de seguridad. Estudios recientes han identificado vulnerabilidades en protocolos de autenticación, donde la suplantación de nodos representa una amenaza real [13].

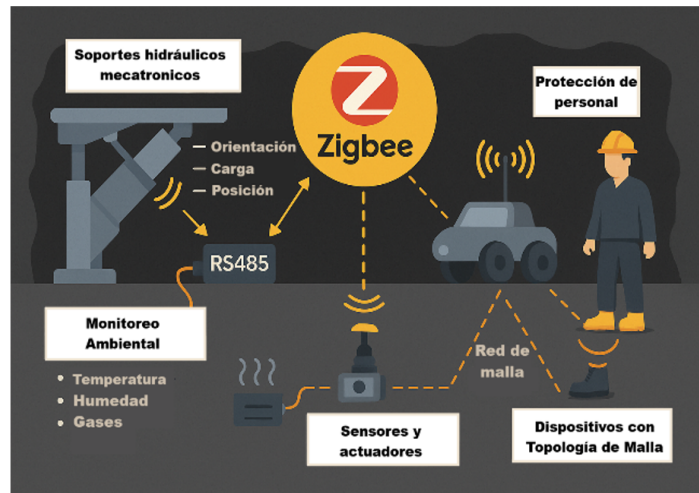


Figura 1: metodología del protocolo Zigbee (Imagen generada con inteligencia artificial).

Zigbee también puede integrarse con técnicas de machine learning para analizar patrones de comportamiento en los sensores y procesos. Esta combinación permitiría anticipar condiciones anómalas en el entorno subterráneo, como la repetición de vibraciones o variaciones en la humedad, construyendo modelos predictivos que fortalezcan la seguridad y reduzcan los errores humanos. El objetivo no sería únicamente reaccionar ante emergencias, sino prevenirlas mediante el análisis de datos y la detección temprana de riesgos.

LORA

LoRa es un protocolo inalámbrico diseñado para la transmisión de datos a largo alcance, ideal para entornos como las minas de carbón donde la conectividad es crítica. Un ejemplo de implementación es el de un casco inteligente equipado con sensores que monitorean tanto al usuario como al entorno. Este dispositivo transmite la información en tiempo real mediante una red LoRaWAN, cuyos datos son procesados y enviados a un centro de control, donde se analizan para mejorar la seguridad del trabajador y supervisar las condiciones del entorno [14].

Con el mismo propósito, se propuso un sistema de red de área amplia y baja potencia, basado en LoRa para el monitoreo de gases. Las pruebas experimentales demostraron que este sistema triplica el alcance respecto a soluciones tradicionales y ofrece una comunicación más fiable [15]. A través de pruebas experimentales se demostró que es 3 veces mejor en cuanto a que es un sistema con mayor alcance y un método de comunicación fiable.

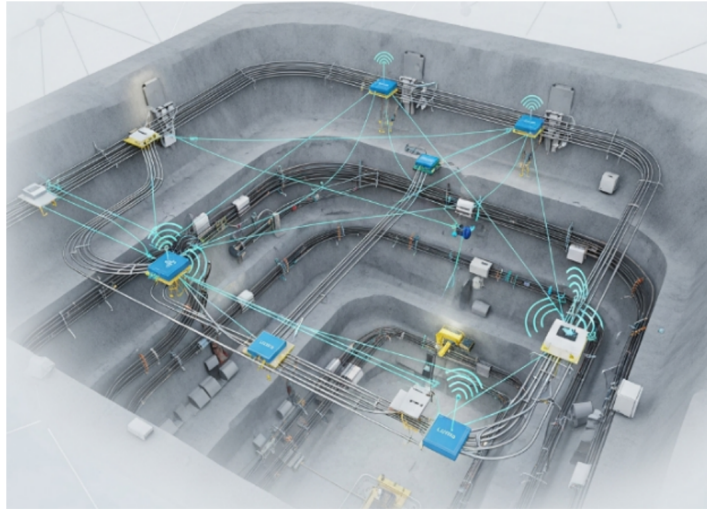


Figura 2: Ejemplo de red Zigbee de bajo consumo (Imagen generada con inteligencia artificial).

Siguiendo este enfoque, se ha desarrollado una red WSN con nodos LoRa integrables en una arquitectura escalable que puede maximizar el alcance de transmisión [16]. En la figura 2 se muestra una red tipo malla que ejemplifica esta topología. La implementación de redes LoRaWAN en minas amplía la cobertura y reduce el consumo energético, pero también facilita la integración de análisis de datos históricos con algoritmos predictivos. Este enfoque permite anticipar eventos críticos como fugas de gas o variaciones de temperatura, cruzando la información recolectada en la nube para generar alertas tempranas que pueden salvar vidas.

A una escala más operativa, se ha diseñado un sistema IoT que utiliza LoRaWAN para la detección de gases, incendios, temperatura, humedad y alertas de emergencia. Este sistema recopila datos en tiempo real, los compara con registros almacenados en la nube y los transmite al centro de control. Para ello, emplea un Arduino UNO en el transmisor y una ESP8266 en el receptor, ambos controlados mediante una interfaz móvil por Bluetooth, logrando un sistema dinámico y adaptable a distintas condiciones de la mina [17]. Dicho sistema fue desarrollado con el fin de aumentar la seguridad del trabajador ante posibles fallas térmicas o estructurales, con énfasis en el análisis de temperatura y humedad en minas subterráneas [18].

En el ámbito de los equipos de protección personal, se han planteado soluciones inteligentes que utilizan LoRaWAN como protocolo de comunicación de bajo consumo y largo alcance para monitorear y notificar alteraciones en los signos vitales del usuario. Los sistemas Smart PPE, incorporan sensores como el DHT11, MQ-2 y medidores de pulso, procesados mediante IoT y se comparan con valores de referencia para emitir alertas preventivas [19].

Finalmente, LoRa destaca por su capacidad de operar con infraestructuras energéticamente autónomas, por lo que es una alternativa atractiva para zonas donde el

suministro eléctrico es inestable. Las soluciones alimentadas por energía solar o baterías de larga duración son necesarias para mantener operativos los nodos sin intervención humana, incrementando la seguridad y la eficiencia en áreas de difícil acceso.

WSN

En la minería subterránea, las WSN son una solución que incrementa la seguridad de las operaciones. Su implementación permite recolectar datos críticos, como para el caso de la minería, la concentración de gases o el estado de operación de la maquinaria, lo que puede permitir generar un sistema de monitoreo en tiempo real capaz de dar respuesta inmediata a emergencias [20].

Dando un paso más allá del monitoreo ambiental, estas redes permiten integrarse con diversas tecnologías de localización por lo que se podría rastrear la posición en tiempo real del personal y los equipos. Estudios han demostrado la confiabilidad de esta herramienta de seguridad tecnológica, ya que puede trabajar con protocolos industriales robustos de comunicación inalámbrica [21].

Las situaciones más amenazantes ante la alta cantidad de gases en el subsuelo, como los incendios, los cuales requieren un sistema de alerta que sea altamente eficaz, debido al espacio y la visibilidad limitada y el riesgo de propagación. En este contexto, las WSN demuestran ser efectivas al ser aplicadas en soluciones que combinan sensores con sistemas de control que forman una red inteligente que puede ser aplicada en estas zonas de difícil acceso [22].

Estas redes, además de mejorar la seguridad, también optimizan la gestión de datos de los entornos mineros, ya que al transmitir los datos sin cables permite el diseño de conexiones optimas de sistemas. Las herramientas de modelado que usan geolocalización o planos estructurales permiten ubicar estratégicamente los nodos de red, lo que puede asegurar una cobertura total e incluso una comunicación redundante que aumente la confiabilidad. Esto aumenta la capacidad de respuesta ante situaciones adversas, por lo que las WSN funcionan como tecnología clave en ambientes industriales exigentes como la minería subterránea [23].



Figura 3: Integración de una red de sensores inalámbrica (Imagen generada con inteligencia artificial).

Sin embargo, el funcionamiento de estas redes tiene una gran dependencia de la conexión energética y que el ambiente permita una buena calidad de señal. En la figura 3 tenemos un sistema WSN interconectado. Algunos estudios de métricas como RSSI y LQI demuestran que las WSN mantienen enlaces confiables, pero al manejar grandes volúmenes de datos puede generar congestión y aumentar el consumo energético [24]. Se han desarrollado protocolos optimizados con Calidad de Servicio (QoS) para que los recursos disponibles estén bien gestionados [25].

Una ventaja de las WSN es su capacidad para operar de manera autónoma con respaldo energético. Existe la posibilidad de generar sistemas de nodos con baterías de larga duración o paneles solares, permitiendo reducir el consumo energético. La red de sensores inalámbricos además de su capacidad de recoger datos, también recopilan información de eventos antiguos y algorítmicos para proporcionar futuras predicciones como sistemas predictivos.

Redes 5G

La tecnología 5G representa uno de los avances más disruptivos en la comunicación industrial, esto gracias a su baja latencia, alta confiabilidad y mayor velocidad de transmisión. En la minería su uso se ve impulsado por el desarrollo de IoT, por lo que se puede implementar nuevos dispositivos inteligentes que son capaces de interactuar con su entorno de forma continua. Se puede apreciar en la tecnología de acceso múltiple no ortogonal (NOMA), con la que se ha propuesto como un método que permite compartir el espectro de la red 5G de manera eficiente, para mejorar la capacidad de monitoreo en tiempo real de zonas subterráneas [26].

No obstante, la red móvil 5G no está diseñadas específicamente para ambientes subterráneos, donde incluso para los equipos que ya están diseñados para estos casos se enfrentan a condiciones adversas. Pero como solución, fue planteado integrar estaciones base en el subsuelo con tecnología de Computación en el Borde Móvil (MEC), permitiendo que los datos sean almacenados y procesados en una red de área local [27]. Este sistema reduce la latencia, mejorando la capacidad de respuesta y adaptando las capacidades y ventajas del 5G a los requerimientos particulares de la minería subterránea. La implementación de esta tecnología facilita la creación dispositivos autónomos inteligentes, que combinan redes 5G con WSN, logrando una optimización de la red y del consumo energético [28]. Al ser integrado este sistema, permite una red más eficiente que prioriza el ahorro de recursos sin sacrificar el monitoreo continuo [29].

La evolución hacia la red F5G, una versión optimizada de 5G centrada específicamente para el ámbito industrial, incorpora redes ópticas pasivas para mejorar el ancho de banda, reducir aún más la latencia y simplificar la gestión de red. Aun mejor, al combinar las redes F5G con la red 5G, se potencian mutuamente sus ventajas, lo que se traduce en una mejor transmisión de datos multimedia para el monitoreo en tiempo real de forma robusta [30].

Gracias a estas tecnologías, se puede implementar el concepto de minas inteligentes donde es posible incorporar la excavación rápida con colaboración directa de la mano obrera con maquinaria, transporte autónomo, control de seguridad en circuito cerrado y operaciones totalmente automatizadas, dando el siguiente paso en la minería de alta eficiencia [31].

Protocolos ESP, Wi-Fi y Alternativas

En el diseño de prendas inteligentes se puede identificar el protocolo Wi-Fi desempeña un papel importante al permitir la transmisión de datos tal como en sensores integrados en una estación de monitoreo. Aunque su uso tiene limitaciones, debido a su baja cobertura se genera una atenuación de la señal, e interferencia electromagnética en los túneles, tiene ventajas, entre ellas su alta tasa de transferencia y su gran compatibilidad IP, lo que lo convierten en un protocolo viable si se implementa mediante puntos de acceso ubicados de manera estratégica [32].

Como alternativa al anterior protocolo tenemos una de las funcionalidades de los microcontroladores ESP32 que ofrecen una comunicación directa y eficiente entre sus dispositivos con el protocolo ESP-NOW sin la necesidad de usar routers. Esta arquitectura P2P puede funcionar muy bien en las minas de carbón donde las condiciones cambian constantemente, siendo su principal fuerte la baja latencia y eficiencia energética, aunque por otro lado su alcance y configuración requieren ajustes especiales [33]. También teniendo en cuenta que los ESP32 no son tan robustos en el ámbito industrial estos dispositivos pueden fallar provocando limitaciones de comunicación en procesos muy críticos por lo que su seguridad es baja.

Las redes en malla basadas en nodos de microcontroladores ESP representan una solución de bajo costo y frente a los desafíos de la comunicación subterránea. A diferencia de estructuras jerárquicas, estas redes son dinámicas y garantizan la continuidad del sistema aun cuando fallan nodos intermedios o algún otro fallo parcial del sistema. Esta adaptabilidad refuerza el monitoreo del ambiente, lo que facilita al operario la toma de decisiones sobre el terreno ante variables de riesgo como los gases, temperatura y humedad [34]

El uso de módulos ESP32 combinados con microcontroladores Arduino, permite diseñar sistemas económicos y eficientes con conectividad inalámbrica punto a punto. Aunque por otro lado el protocolo Wi-Fi puede presentar dificultades en el entorno minero, su uso en conjunto un protocolo de mensajería de publicación-suscripción (MQTT) permite optimizar la gestión de paquetes, garantizando una entrega confiable de datos en aplicaciones críticas, en especial del sector minero [35]. Reiterando el uso limitado del Wi-Fi en minas, su uso suele ser justificado por sus grandes capacidades.

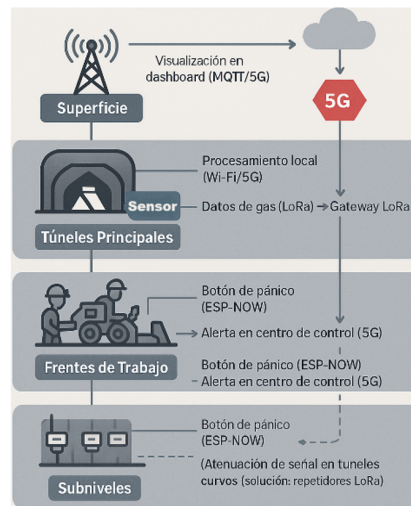


Figura 4: Ejemplo de uso de varios protocolos en un entorno minero (Imagen generada con inteligencia artificial).

En la figura 4, integra el contexto de cómo podría funcionar una aplicación de diferentes protocolos en la industria minera. Para el nivel de superficie se podría ejecutar una red interconectada de cada una de las entradas de cada mina, compartiendo información importante entre ellas. Para los túneles principales y los frentes de trabajo tenemos sistemas que de manera recíproca envían y reciben datos a la superficie para tener un monitoreo constante. Y finalmente en los subniveles donde se usan redes de sensores específicos para detectar cambios que puedan afectar la estructura es necesario una solución con repetidores de red para ampliar el rango de comunicación.

Un ejemplo que destaca es el desarrollo de robots de vigilancia para entornos mineros, los cuales integrando sensores de ambiente mediante microcontroladores ESP8266, transmiten datos en tiempo real, garantizando el monitoreo constante [36]. Este tipo de soluciones no solo funcionan para recolectar datos, sino que anticipa los riesgos a los que está expuesto el trabajador, y permite agregar mediadores tecnológicos con sentidos humanizados.

Finalmente, el despliegue de WSN en minas de carbón mediante módulos NodeMCU y Wi-Fi permite la vigilancia continua de variables ambientales críticas [37]. A pesar de las limitaciones con el uso de Wi-Fi en túneles, su rápida implementación, bajo costo y flexibilidad lo convierten en una herramienta efectiva. Más allá de su eficiencia técnica, estas redes se consolidan como sistemas silenciosos pero atentos, diseñados para acompañar y proteger al trabajador minero sin invadir su labor, reafirmando el papel de la tecnología como aliada ética en contextos de riesgo.

Usar Wi-Fi como base de comunicación en un sistema IoT industrial que integra sensores, actuadores y sistemas de alarma, aumenta la capacidad del protocolo para actuar como medio de recolección de datos, y también como canal de control en tiempo real. Esta implementación requiere que el sistema tenga baja latencia y alta confiabilidad,

condiciones que Wi-Fi puede cumplir si se optimiza y se minimiza la interferencia. Este caso demuestra que, a pesar de sus limitaciones frente a protocolos industriales más robustos como LoRa o Zigbee, Wi-Fi sigue siendo una opción flexible y ampliamente implementable [38].

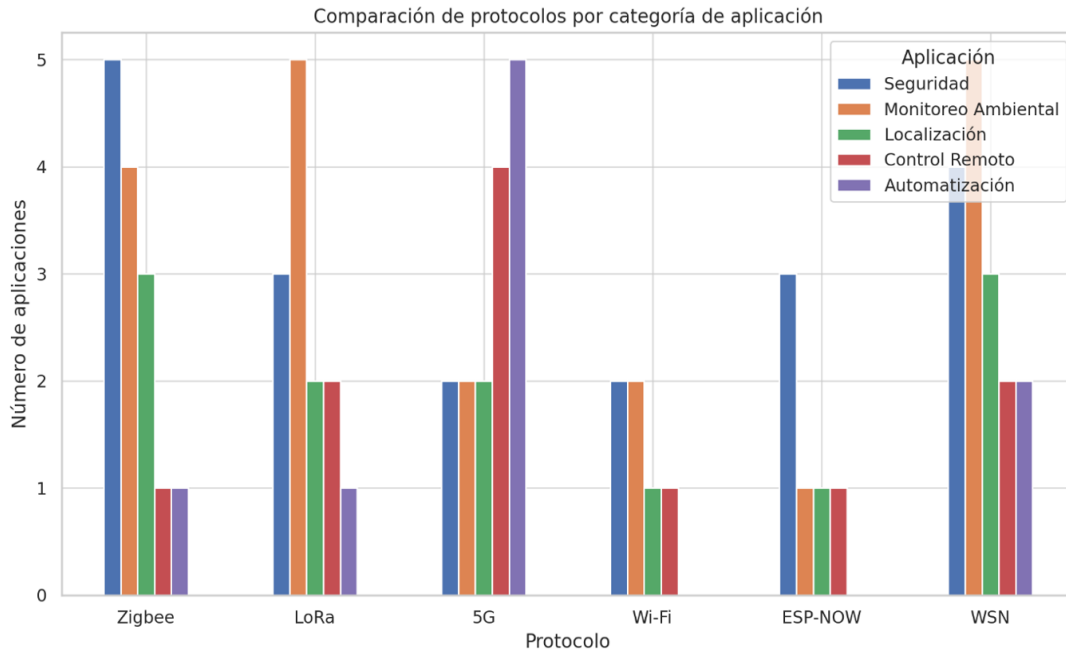


Figura 5: Relación entre los protocolos y su aplicación.

En la figura 5 se aprecia que los protocolos se destacan en un área específica dependiendo de la aplicación, como en el ejemplo del Zigbee que es muy usado en el área de seguridad operativa y un poco menos en monitoreo ambiental y por otro lado LoRa se usa más en el monitoreo ambiental y un poco menos en seguridad operativa.

Proporción de uso de protocolos en artículos revisados

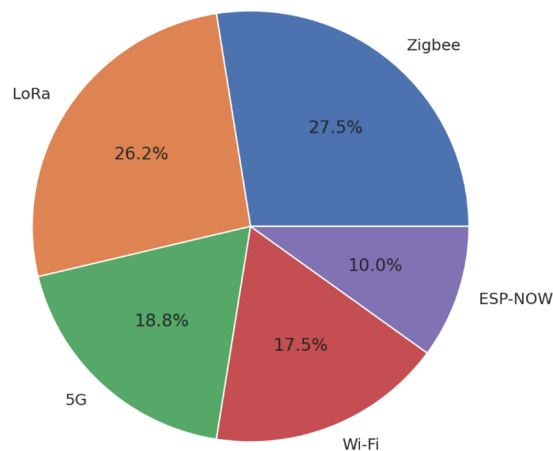


Figura 6: Proporción de los protocolos en la revisión de artículos.

La figura 6 se observa que entre los artículos revisados se encontró que más de un 50% de proporción usan protocolos Zigbee o LoRa, esto es previsible debido a que ambos protocolos son ya bastante robustos para ser aplicados en el entorno de la minería, mientras que los demás son tienen limitantes que ocasionan que aun necesiten actualizaciones e innovaciones.

Tabla I: Fortalezas y limitaciones de cada protocolo.

Protocolo	Fortalezas	Debilidades
Zigbee	Energía baja, redes en malla, fácil integración	Interferencia, rango corto
LoRaWAN	Gran alcance, estabilidad	Baja tasa de datos
Wi-Fi	Alta velocidad, familiaridad	Alto consumo, poca penetración
ESP-NOW	Comunicación directa, sin router	Alcance limitado
5G	Latencia mínima, transmisión masiva	Infraestructura costosa

En la tabla I se distinguen las capacidades de cada protocolo, donde para la industria minera todas tienen sus fortalezas y debilidades, y dependiendo de su aplicación específica se puede aplicar uno u otro. Para la parte de Zigbee es un protocolo muy robusto con muchas ventajas, y a pesar de su rango de bajo alcance, permite formar una red de malla que amplía la señal y permite ampliar mucho más su rango. Mientras que si queremos enviar datos multimedia para un sistema de seguridad más visual necesitamos protocolos con mayor ancho de banda como lo es Wi-Fi y 5G.

Otro uso que se podría aplicar al protocolo ESP-NOW es su potencial como herramienta educativa y de prototipado en la formación técnica de personal minero. Su bajo costo y facilidad de configuración permiten crear maquetas de redes funcionales de monitoreo antes de escalar a soluciones industriales.

La combinación entre ESP-NOW y Wi-Fi habilita una arquitectura mixta donde los datos donde podría recolectarse a nivel local mediante comunicación directa y luego transferirse mediante puntos de acceso estratégicos hacia plataformas de gestión centralizada. Esta arquitectura escalonada podría tener un balance adecuado entre consumo energético, velocidad de transmisión y cobertura.

Otros resultados

El análisis comparativo revela que no existe una solución única, sino un conjunto de tecnologías complementarias que deben adaptarse a las condiciones específicas de cada aplicación y requerimiento operativo. Ningún protocolo es universalmente superior. La solución óptima en minería de carbón consiste en combinar tecnologías según su fortaleza particular: la versatilidad de Zigbee, la cobertura de LoRa, la velocidad de 5G, la economía de ESP-NOW y la amplia adopción de Wi-Fi se entrelazan para construir entornos industriales seguros y eficientes.

Tabla II: comparativa de usos de los protocolos

Aplicación en minería	Zigbee	LoRa	Wi-Fi	ESP-NOW	5G
Monitoreo ambiental	Si	Si	Si	Si	Si
Localización de personal	Si	Si	No	Si	Si
Botón de pánico	Si	No	No	Si	No
Robots autónomos	No	No	Si	No	Si
Transmisión a la nube	Si (vía 4G)	Si	Si	Si	Si

En la tabla II se caracteriza de los artículos estudiados los posibles usos de estos protocolos en cada parte de la industria. Gracias a las fortalezas de Zigbee puede ser aplicado en gran cantidad de procesos. ESP-NOW permite realizar sistemas de bajo costo, pero al no ser un sistema muy robusto el ambiente puede causar interferencias, por lo que es recomendable aplicarlo solo para transmisión de datos en sistemas redundantes o en aplicaciones de prueba teniendo en cuenta su limitado alcance lo que hace que sea menos viable para aplicaciones a gran escala.

En conjunto, el análisis de los diferentes protocolos de comunicación aplicados a la minería de carbón revela que los sistemas más robustos y eficaces no se basan en una única tecnología, sino en la integración estratégica de múltiples soluciones dentro de arquitecturas híbridas.

Tabla III: Características específicas de cada protocolo.

Protocolo	Alcance	Consumo energético	Topología	Aplicaciones destacadas	Ventajas principales	Limitaciones
Zigbee	Corto/Medio (10–100 m)	Muy bajo	Malla	Soportes hidráulicos, sensores ambientales, botones de pánico	Bajo consumo, buena tolerancia a fallos, fácil integración	Interferencia, cobertura limitada
LoRaWAN	Largo (hasta 15 km)	Muy bajo	Estrella/Árbol	Casco inteligente, monitoreo de gases	Gran alcance, robustez en ambientes subterráneos	Baja tasa de datos, mayor latencia
Wi-Fi	Medio (50–100 m)	Alto	Punto a punto o malla usando ESP)	Ropa inteligente, robots de vigilancia	Alta velocidad, infraestructura conocida	Alto consumo, interferencias
ESP-NOW	Corto (20–30 m)	Bajo	Punto a punto o malla	Redes de sensores móviles, comunicación directa	Baja latencia, no requiere router	Poco alcance, configuración sensible
5G	Alto	Medio/alto	Celular	IoT minero, redes inteligentes	Baja latencia, alta velocidad	Infraestructura costosa, limitada en minas subterráneas

Tecnologías como Zigbee, LoRa, WSN, 5G y protocolos ligeros como ESP-NOW aportan fortalezas específicas que, combinadas inteligentemente, permiten avanzar hacia minas más seguras, inteligentes y sostenibles. En relación a la compatibilidad se concluye que de los 50 artículos se puede apreciar que en la industria minera uno de los protocolos más usados es el de Zigbee. A pesar de su alcance, LoRa puede tener problemas en túneles con curvaturas pronunciadas, debido a que la señal se ve limitada y puede

afectar su rendimiento. Soluciones como repetidores bien ubicados pueden mejorar la cobertura en estos escenarios, y generando sistemas redundantes.

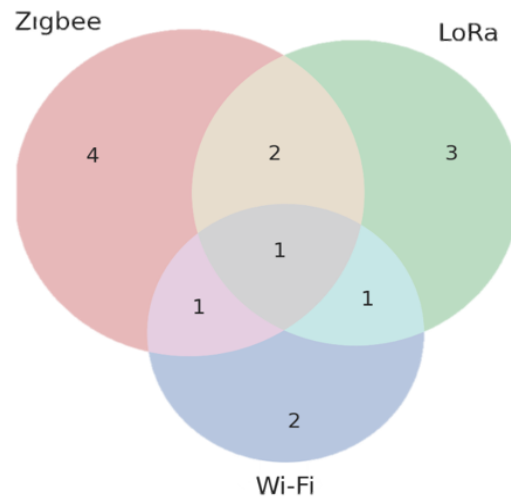


Figura 7: Relación de uso de protocolos entre los artículos.

En la figura 7 se aprecia la interoperabilidad de los distintos protocolos, donde la mayor relación la tiene el protocolo Zigbee y LoRa, pero en general se puede relacionar entre distintos protocolos para formar redes de comunicaciones robustas. Se identifican enrutamientos y capas complementarias que optimizan la conectividad: las redes MANET, y en particular el protocolo AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector), destacan por establecer rutas dinámicas solo cuando son necesarias, lo que resulta útil en minas con vehículos autónomos o zonas de excavación variable [39].

De manera similar, el protocolo PIAOR, inspirado en el comportamiento del *Physarum polycephalum*, selecciona rutas de menor coste energético y latencia, mejorando la eficiencia de las redes móviles frente a modelos clásicos, aunque requiere mayor capacidad de cómputo en los nodos [40]. Este algoritmo mejora la eficiencia de la red frente a protocolos clásicos, pero para ser implementado se requiere que los nodos tengan una alta capacidad de cómputo y algoritmos distribuidos. En minería, donde algunas veces los dispositivos se mueven o enfrentan obstrucciones físicas, este tipo de enrutamiento puede marcar una diferencia en la calidad de la conectividad.

El protocolo MQTT se orienta a entornos con baja conectividad y se basa en un modelo publish-subscribe, facilitando la transmisión entre sensores y un broker que distribuye los datos a los sistemas interesados. Por su bajo consumo de ancho de banda y alta estabilidad, es ideal para redes industriales en minas con enlaces intermitentes [41].

Por otro lado, la combinación de CAN, Ethernet e IoT permite integrar diferentes niveles de red. CAN ofrece comunicación robusta en tiempo real a corta distancia, mientras que Ethernet amplía el alcance y capacidad de datos. Estas arquitecturas híbridas, sincronizadas mediante buses de alta velocidad como SPI y DMA, optimizan la

confiabilidad y la velocidad de transmisión [42].

La tecnología MPOC establece rutas de comunicación múltiples y optimizadas para garantizar la estabilidad de los sistemas de vigilancia minera, incluso en caso de fallos de red. El sistema selecciona dinámicamente el camino más adecuado según la carga, latencia y disponibilidad de cada enlace. MPOC mejora el tiempo de respuesta, y actúa como una capa de resiliencia frente a fallos, ideal para mantener operativos los sistemas de monitoreo continuo [43].

Aunque las cámaras con transmisión por cable han sido el estándar, sus limitaciones frente a la humedad, el polvo y la cobertura restringida han dado paso a equipos móviles como cámaras montadas en vehículos o integradas en linternas. Particularmente, se destaca el uso de Wi-Fi en topología de infraestructura con puntos de acceso subterráneos. Esta arquitectura permite que dispositivos móviles mantengan una conexión constante con los nodos fijos de la red, mejorando los sistemas de comunicación en tiempo real basados en protocolos como TCP/IP sobre Wi-Fi [44].

Para garantizar la confiabilidad de las comunicaciones IIoT en minería, es imprescindible entender cómo se propagan las ondas en túneles subterráneos. En esta investigación se comparan modelos de propagación de señal. El modelo True Rays frente a alternativas clásicas. La banda de 433 MHz, se utiliza en tecnologías como LoRa, y ofrece ventajas por su alta penetración en entornos rocosos, a diferencia de bandas más altas como 2.4 GHz [45].

La estrategia "3115", aplicada a minas inteligentes en China, destaca la necesidad de una infraestructura de comunicación distribuida. Las "tres redes", comunicaciones, industrial y empresarial, constituyen la estructura de la mina conectada. Esta integración de múltiples capas puede gestionarse desde una única plataforma de control que actúe como centro de gestión de datos. La de red debe tolerar fallos y debe ser fácilmente reconfigurable, y se aplica la importancia de estándares abiertos y protocolos en el ecosistema industrial minero [46].

La implementación de monitoreo visual en minas subterráneas integra redes cableadas e inalámbricas, y considera las restricciones físicas. Para ello, se proponen arquitecturas de comunicación híbridas como cámaras portátiles o montadas en vehículos que transmiten datos a través de redes Wi-Fi hacia nodos fijos con acceso a una red cableada Ethernet. Esto permite aprovechar la estabilidad y ancho de banda del cableado en combinación con la movilidad que ofrece Wi-Fi. La comunicación puede establecerse mediante TCP para transmisiones importantes, o UDP cuando se prioriza la respuesta en tiempo real. Además, la red debe soportar mecanismos para mantener la conexión activa mientras el dispositivo móvil cambia de punto de acceso, para no perder continuidad en la transmisión de video [47].

Los sistemas multifuncionales de seguridad minera vigilan variables ambientales,

pero también localizan a los trabajadores mediante dispositivos conectados. Estos nodos deben estar en constante comunicación con la red principal, lo que exige una infraestructura que garantice cobertura completa y baja latencia. Aquí, protocolos como Zigbee o Wi-Fi en malla permiten mantener la conexión incluso en zonas con poca cobertura. Particularmente, la combinación de Wi-Fi en malla con mecanismos de localización (como RSSI o trilateración) permite identificar con precisión la posición del trabajador y mantener actualizados los datos en el sistema de control. Un enfoque orientado a la comunicación entre dispositivos IoT y redes industriales, donde el diseño es fundamental para sostener la estabilidad del sistema [48].

La calidad de los enlaces inalámbricos está condicionada por los materiales que conforman las paredes y estructuras internas. El modelo True Rays ha demostrado ser uno de los mejores ya que considera reflexiones, dispersión y rugosidad superficial. Es necesario decidir el tipo de protocolo a emplear, ya que frecuencias más bajas, como las utilizadas por LoRa (433 MHz), tienen mejor comportamiento en estos ambientes que Wi-Fi (2.4 GHz). A nivel de diseño, esta información ayuda a posicionar los nodos y seleccionar entre protocolos como ESP-NOW, Zigbee o enlaces LPWAN según el caso [49].

La inteligencia artificial en redes industriales subterráneas permite la gestión del tráfico y detección de fallos, como también la optimización de rutas de comunicación. A través de algoritmos de aprendizaje automático, como redes neuronales, es posible analizar patrones de conectividad, identificar cuellos de botella y adaptar la configuración de red en tiempo real. Debido a esto, es posible la reconfiguración automática de parámetros de protocolos como Wi-Fi, MQTT o CAN. Este enfoque requiere que los protocolos usados permitan modificación sobre la marcha [50].

Los sensores ambientales en minas deben operar en red, compartiendo datos con nodos centrales para análisis y actuación inmediata. Estos sistemas usan protocolos como Zigbee o LoRaWAN, estos están diseñados para trabajar en baja potencia y comunicación estable incluso teniendo obstáculos. Zigbee, usa redes de malla que permiten sistemas con amplia cobertura, mientras que LoRaWAN funciona mejor en aplicaciones donde se requiere transmisión a largas distancias [51]. El protocolo escogido afecta en el tiempo de respuesta del sistema ante la detección de gases o cambios térmicos, por lo que su selección debe considerar el entorno físico.

En las minas inteligentes es posible integrar múltiples plataformas tecnológicas en una sola red de comunicaciones. Se pueden usar redes Ethernet industriales, enlaces Wi-Fi para movilidad, y buses CAN para control local de maquinaria. Esta integración es viable si los protocolos utilizados permiten interoperabilidad y sincronización. En la práctica, esto permite que sensores conectados por LoRa, puedan interactuar con sistemas SCADA o PLCs que utilizan Modbus TCP [52].

En conjunto, estos resultados demuestran que el avance hacia minas inteligentes

y autosuficientes requiere combinar la ingeniería de hardware con modelos de comunicación adaptativos y análisis predictivo basado en inteligencia artificial, fortaleciendo la sostenibilidad y la seguridad operacional del sector minero.

Conclusiones

Este estudio recopilatorio resalta la eficacia de los protocolos de comunicación industrial la cual depende de su capacidad de adaptación a las condiciones físicas, energéticas y operativas del entorno. Zigbee se presenta como una opción eficiente para aplicaciones con múltiples sensores y bajo consumo energético, mientras que LoRa sobresale por su amplia cobertura y confiabilidad en infraestructuras grandes, facilitando la vigilancia remota y la protección del personal minero.

Las redes de sensores inalámbricos amplían la cobertura y permite la transmisión de información desde distintos puntos hacia el centro de control. En este contexto, tecnologías como ESP-NOW y Wi-Fi representan alternativas viables y de rápida implementación a pequeña escala, mientras que 5G continúa limitado por su alto costo de implementación y mantenimiento en minería subterránea, lo que evidencia una brecha tecnológica entre la teoría y su aplicabilidad real en entornos hostiles.

A partir del análisis realizado, se identifican vacíos de investigación relacionados con la interoperabilidad entre protocolos, la optimización energética de los nodos y la ciberseguridad en redes abiertas. Asimismo, se observa la necesidad de establecer estándares de integración que faciliten la convivencia entre tecnologías heterogéneas en una misma infraestructura minera.

En definitiva, el futuro de la minería subterránea se orienta hacia la creación de ecosistemas de comunicación interconectados adaptativos, donde cada tecnología cumpla un rol específico según sus fortalezas y limitaciones. Las soluciones más efectivas serán aquellas que integren protocolos complementarios en redes inteligentes capaces de responder a los cambios del entorno y de mantener la operatividad aun en condiciones extremas.

Finalmente, se recomienda que las futuras investigaciones profundicen en la integración de inteligencia artificial, aprendizaje automático y técnicas de análisis predictivo con los protocolos de comunicación industrial. Estas herramientas permitirán anticipar fallas, optimizar la eficiencia energética y reforzar la seguridad operativa, avanzando hacia minas autónomas, autosuficientes y sostenibles, alineadas con los objetivos de la Industria 4.0.

Referencias

- [1] C. Zhang and M. Yan, "Study on mine communication network based on Ethernet and WSN," in *Proc. 2015 Int. Conf. Comput. Intell. Commun. Netw. (CICN)*, 2016, pp. 183–187, doi: 10.1109/CICN.2015.43.
- [2] Z.-Y. Guan, J.-L. Xie, S.-K. Wu, and C. Liang, "Research on predicting the risk level of coal mine roof accident based on machine learning," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, Art. no. 24028, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-07760-6.
- [3] L. Fan, "Geological technological innovations and contributions in the exploration and development of the Shenfu coalfield," in *Meitiandizhi Yu Kantan/Coal Geol. Explor.*, vol. 53, no. 3, 2025, pp. 1–22, doi: 10.12363/issn.1001-1986.25.02.0099.
- [4] Z. Lian, X. Yuan, F. Gao, Y. Liao, Y. Guo y R. Zhao, "Networked intelligent sensing method for powered support," *Journal of China Coal Society*, vol. 45, no. 6, pp. 2078–2089, jun. 2020, doi: 10.13225/j.cnki.jccs.ZN20.0361.
- [5] X. Jia, F. Shi, Y. Guan, S. Tang y M. Tong, "Zigbee-based wireless gas monitoring sensor alarm system in coal mine," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 446, no. 2, mar. 2020, Art. no. 022012, doi: 10.1088/1755-1315/446/2/022012.
- [6] S. S. Kumar, S. S. Jabannavar, K. R. Shashank, M. Nagaraj y B. Shreenivas, "Localization and tracking of unmanned vehicles for underground mines," in *Proc. 2nd IEEE Int. Conf. Electr., Comput., Commun. Technol. (ICECCT)*, 2017, doi: 10.1109/ICECCT.2017.8117958.
- [7] H. Chen y P. Li, "Intelligent positioning boots for miners' fall monitoring based on ZigBee communication protocol and ADXL345 acceleration sensor," in *2022 IEEE Asia-Pacific Conference on Image Processing, Electronics and Computers (IPEC)*, Dalian, China, abr. 2022, pp. 304–307, doi: 10.1109/IPEC54454.2022.9777577.
- [8] A. Wang et al., "Design of intelligent coalmine tunnel collapse warning system based on CAN bus and Zigbee technology," in *2021 7th International Conference on Computing and Artificial Intelligence (ICCAI)*, Virtual, abr. 2021, pp. 493–498, doi: 10.1145/3467707.3467784.
- [9] J. Li, M. Li, F. Yan y D. Miao, "Key technologies of data monitoring for coal machinery equipment in the intelligent IoT environment," in *2020 10th IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, Xi'an, China, oct. 2020, pp. 364–369, doi: 10.1109/CYBER50695.2020.9278951.
- [10] B. P. Reddy y P. Ragam, "LoRa Sense: Sensing and optimization of LoRa link behavior using path-loss models in open-cast mines," *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, vol. 142, no. 1, pp. 425–466, 2025, doi: 10.32604/cmescs.2024.052355.

- [11] A. S. Naik, S. K. Reddy y G. R. Mandela, "A systematic review on implementation of Internet-of-Things-based system in underground mines to monitor environmental parameters," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, vol. 105, no. 2, pp. 1273-1289, ago. 2024, doi: 10.1007/s40033-023-00541-3.
- [12] S. Joy, A. S. Bale, M. I. Anju, R. Baby Chithra, K. A. Patil y P. S. Neethu, "IoT-based enhanced safety monitoring system for underground coal mines using LoRa technology," in *Internet of Everything and Quantum Information Processing*, V. E. Balas, K. B. Prakash y G. P. S. Varma, Eds. Cham, Switzerland: Springer, 2024, pp. 125-130, vol. 1029, Lecture Notes in Networks and Systems. doi: 10.1007/978-3-031-61929-8_18.
- [13] D. Kaur, K. K. Saini y D. Kumar, "Cryptanalysis and enhancement of an authentication protocol for secure multimedia communications in IoT-enabled wireless sensor networks," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 81, no. 27, pp. 39367-39385, nov. 2022, doi: 10.1007/s11042-022-12088-8.
- [14] S. Karna, T. Noushin y S. Tabassum, "IoT-based smart helmet for automated and multi-parametric monitoring of underground miners' health hazards," in *2022 IEEE 15th Dallas Circuits and Systems Conference (DCAS)*, Dallas, TX, USA, 2022, pp. 1-2, doi: 10.1109/DCAS53974.2022.9845621.
- [15] N. Yang, "Communication performance optimization of coal mine goaf LoRa ad hoc network sensor system based on tree topology," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2625, no. 1, Art. no. 012059, 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2625/1/012059.
- [16] S. Saha, S. C. Bakshi, A. Pramanik y R. Lakshmanan, "On underground coal mine environment monitoring with LoRa range extension," in *2023 5th International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Flexible Green Energy Technologies (ICEPE)*, Shillong, India, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICEPE57949.2023.10201552.
- [17] D. Nagadevi, B. Mukesh, J. S. Ganesh y E. S. T. Goud, "Prototype of coal mines safety monitoring and alerting system using IoT," in *2024 7th International Conference on Circuit Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, Kollam, India, 2024, pp. 1369-1374, doi: 10.1109/ICCPCT61902.2024.10672846.
- [18] B. Zhao y K. Zhu, "Temperature and humidity monitoring and communication system for coal mine working based on LoRa," *Int. J. Sens. Netw.*, vol. 47, no. 1, pp. 36-46, 2025, doi: 10.1504/IJSNET.2025.143901.
- [19] M. S. S, K. Rahul, N. S. Kurian, H. V. V y A. M, "Smart PPE using LoRaWAN technology," in *2023 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT)*, Lalitpur, Nepal, 2023, pp. 1272-1279, doi: 10.1109/ICICT57646.2023.10134134.
- [20] J. H. Zhang, M. Chen, Y. Liu y P. Yao, "A network communication frequency routing

protocol of coal mine safety monitoring system based on wireless narrowband data communication network," *Mobile Information Systems*, vol. 2022, Art. no. 4906599, pp. 1-15, doi: 10.1155/2022/4906599

- [21] W. Chen y X. Wang, "Coal mine safety intelligent monitoring based on wireless sensor network," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 22, pp. 25465-25471, 15 nov. 2021, doi: 10.1109/JSEN.2020.3046287.
- [22] A. Bhat, A. V. Bhardwaj, N. S. Kotian y S. G. Prabhu, "Efficient real-time monitoring and fire prevention strategies in bord-and-pillar coal mines utilizing wireless sensor networks," in *2024 International Conference on Data Science and Network Security (ICDSNS)*, Tiptur, India, 2024, pp. 1-9, doi: 10.1109/ICDSNS62112.2024.10690931.
- [23] F. Medina, H. Ruiz, J. Espíndola y E. Avendaño, "Deploying IIoT systems for long-term planning in underground mining: A focus on the monitoring of explosive atmospheres," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 3, Art. no. 1116, feb. 2024, doi: 10.3390/app14031116.
- [24] A. Ranjan, H. B. Sahu, P. Misra, Y. Zhao y H. Sun, "RSSI or LQI: Insights from real-time deployments for underground sensing and applications," in **2020 IEEE INFOCOM - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)**, Toronto, ON, Canada, 2020, pp. 1231-1236, doi: 10.1109/INFOCOMWKSHPS50562.2020.9162754.
- [25] H. Wang, G. Zhou, L. Bhatia, Z. Zhu, W. Li y J. A. McCann, "Energy-neutral and QoS-aware protocol in wireless sensor networks for health monitoring of hoisting systems," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 8, pp. 5543-5553, ago. 2020, doi: 10.1109/TII.2020.2969218.
- [26] Q. Zhao, W. Yang y L. Zhang, "Energy-efficient resource allocation for NOMA-based heterogeneous 5G mine Internet of Things," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 67437-67450, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3184798.
- [27] L. Zhang, W. Yang, B. Hao, Z. Yang y Q. Zhao, "Edge computing resource allocation method for mining 5G communication system," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 49730-49737, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3244242.
- [28] G. Wang et al., "Top level design and practice of smart coal mines," *Journal of China Coal Society*, vol. 45, no. 6, pp. 1909-1924, jun. 2020, doi: 10.13225/j.cnki.jccs.ZN20.0284.
- [29] W. Chen et al., "Cluster routing protocol for coal mine wireless sensor network based on 5G," in *5G for Future Wireless Networks*, X. You and D. Ma (Eds.), *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering (LNICST)*, vol. 278, pp. 60-67, Springer, Cham, 2019, doi: 10.1007/978-3-030-17513-9_5.

- [30] L. Wen, W. Wu y Q. Li, "Study on intelligent coal mine construction scheme of F5G architecture," *Coal Science and Technology*, vol. 50, no. 11, pp. 176-182, nov. 2022, doi: 10.13199/j.cnki.cst.2021-0355.
- [31] G. Wang et al., "Research and practice of intelligent coal mine technology systems in China," *International Journal of Coal Science and Technology*, vol. 9, p. 24, 2022, doi: 10.1007/s40789-022-00491-3.
- [32] C. Ananth, B. S. Revathi, I. Poonguzhali, A. Anitha y T. Ananth Kumar, "Wearable smart jacket for coal miners using IoT," in *2022 2nd International Conference on Technological Advancements in Computational Sciences (ICTACS)*, Tashkent, Uzbekistan, 2022, pp. 669-672, doi: 10.1109/ICTACS56270.2022.9987834.
- [33] S. B. Lenin et al., "Wireless coal mine monitoring system based on ESP-NOW protocol for real-time data acquisition and analysis," *Journal of Engineering Science and Technology Review*, vol. 17, no. 2, pp. 16-22, 2024, doi: 10.25103/jestr.172.03.
- [34] M. Kurvey, M. Pawaskar, S. Nikam, R. Jagtap, S. Bhandary y A. Acharya, "Establishing mesh network to transfer and visualize data for safety of underground miners," in *2023 3rd International Conference on Pervasive Computing and Social Networking (ICPCSN)*, Salem, India, 2023, pp. 1134-1139, doi: 10.1109/ICPCSN58827.2023.00192.
- [35] R. Hussain, F. M. Zakai y A. Iqbal, "Demystifying mining sustainability through efficient and low-cost IoT-based safety implementations," in *2022 Global Conference on Wireless and Optical Technologies (GCWOT)*, Málaga, Spain, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/GCWOT53057.2022.9772903.
- [36] A. Marathe, R. Deshpande, P. Choudhary, M. Deshpande, A. Dhangar y T. Dhangar, "Coal mining surveillance robot," in *2024 3rd International Conference on Applied Artificial Intelligence and Computing (ICAAIC)*, Salem, India, 2024, pp. 1940-1944, doi: 10.1109/ICAAIC60222.2024.10575836.
- [37] A. Sharma et al., "Mine safety monitoring system based on WSN," in *Smart Trends in Computing and Communications: Proceedings of SmartCom 2023*, Y.-D. Zhang et al. (Eds.), Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 617, pp. 93-102, Springer, Singapore, doi: 10.1007/978-981-19-9512-5_9.
- [38] M. H. Ali et al., "Improving coal mine safety with Internet of Things (IoT)-based dynamic sensor information control system," *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, vol. 128, Art. no. 103225, dic. 2022, doi: 10.1016/j.pce.2022.103225.
- [39] W. Ding, R. Xu, B. Xu, C. Xiao y L. Zhao, "A performance comparison of routing protocols for tramcars in mining industry," in *2019 International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom)*

- and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCoM) and IEEE Smart Data (SmartData), Atlanta, GA, USA, 2019, pp. 1148-1153, doi: 10.1109/iThings/GreenCom/CPSCoM/SmartData.2019.00194.
- [40] H. Jiang et al., "Physarum-inspired autonomous optimized routing protocol for coal mine MANET," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2020, Art. no. 8816718, doi: 10.1155/2020/8816718.
- [41] M. R. Joel, S. Srinivasan, C. S. Ranganathan, N. Latha y L. P. Narendruni, "MQTT client protocol-based effective coal mine management system using IoT," in *2023 2nd International Conference on Smart Technologies for Smart Nation (SmartTechCon)*, Singapore, 2023, pp. 328-332, doi: 10.1109/SmartTechCon57526.2023.10391302.
- [42] C. Ma et al., "The research of ultra-low delay gateway for underground remote control," *Radioengineering*, vol. 33, no. 3, pp. 452-462, sep. 2024, doi: 10.13164/re.2024.0452.
- [43] J. Zhang et al., "A multi-path optimal communication (MPOC) technology of coal mine safety monitoring system," in *Proceedings of SPIE 12127, International Conference on Intelligent Equipment and Special Robots (ICIESR 2021)*, Qingdao, China, oct. 2021, Art. no. 121272R, doi: 10.1117/12.2624824.
- [44] J. Zhang, K. He, C. Chen y G. Zhao, "Controlled C-VLAN technology in mining 10 Gigabit industrial networks," in *2023 3rd International Conference on New Energy and Power Engineering (ICNEPE)*, Huzhou, China, 2023, pp. 228-232, doi: 10.1109/ICNEPE60694.2023.10429160.
- [45] A. V. Novikov, K. V. Panevnikov y I. V. Pisarev, "Multi-functional coal mine safety system: Visualisation of events (mining processes) from the miner's workplace," *Gornaya Promyshlennost*, no. 5, pp. 65-69, 2021, doi: 10.30686/1609-9192-2021-5-65-69.
- [46] F. Medina et al., "Evaluating propagation models for IIoT in underground mining: An experimental comparative study in underground coal mines," *Meitan Kexue Jishu (Coal Science and Technology)*, vol. 48, no. 7, pp. 109-117, jun. 2020, doi: 10.13199/j.cnki.cst.2020.07.010.
- [47] J. Qian y Q. Hu, "Construction routes and practice of intelligent coal mine," *Coal Science and Technology*, vol. 48, no. 7, pp. 1-9, jul. 2020, doi: 10.13199/j.cnki.cst.2020.07.010.
- [48] A. Sharma et al., "Gas Detection and Classification Using Multimodal Data Based on Federated Learning," *Sensors*, vol. 24, no. 18, Art. no. 5904, Sep. 2024, doi: 10.3390/s24185904.
- [49] S. Sun et al., "Research on Obstacle-Avoidance Trajectory Planning for Drill and

Anchor Materials Handling by a Mechanical Arm on a Coal Mine Drilling and Anchoring Robot," *Sensors*, vol. 24, no. 20, Art. no. 6709, oct. 2024, doi: 10.3390/s24216866

- [50] X. Kang, X. Xie and K. Zeng, "A new self-sensing fiber optic anchor to monitor bolt axial force and identify loose zones in the surrounding rock of open TBM tunnels," *Sensors*, vol. 24, no. 20, Art. no. 6709, Oct. 2024, doi: 10.3390/s24206709.
- [51] B. Lalithadevi and S. Krishnaveni, "ExAIRFC-GSDC: An advanced machine learning-based interpretable framework for accurate gas leakage detection and classification," *International Journal of Computational Intelligence Systems*, vol. 18, no. 1, Art. no. 16, Dec. 2025, doi: 10.1007/s44196-025-00742-6.
- [52] C. Han, G. Zou, H.-G. Yeh, F. Gong, S. Shi y H. Chen, "Intelligent fault prediction with wavelet-SVM fusion in coal mine," *Computers & Geosciences*, vol. 194, Art. no. 105744, ene. 2025 doi: 10.1016/j.cageo.2024.105744