

¿Por qué las minas subterráneas tienen problemas de comunicación?

Abstract—Las operaciones mineras subterráneas presentan condiciones particularmente adversas para los sistemas de comunicación. La geometría de los túneles, la presencia de polvo, humedad, vibraciones, maquinaria en movimiento y ausencia de línea de vista prolongada dificultan la propagación estable de señales. Este artículo explica, desde una perspectiva divulgativa, por qué las comunicaciones bajo tierra requieren arquitecturas resilientes capaces de combinar múltiples tecnologías para mantener continuidad operacional.

I. Introducción

La minería subterránea es uno de los entornos más complejos para desplegar sistemas de comunicación estables. A diferencia de una operación en superficie, donde las señales pueden propagarse con menos obstáculos, los túneles mineros presentan condiciones físicas y ambientales que afectan directamente la conectividad [1].

En este tipo de operación, la comunicación no solo cumple una función informativa. También permite monitorear variables críticas, coordinar equipos, transmitir alertas, registrar eventos y apoyar la seguridad del personal. Por esta razón, una pérdida de conectividad puede tener consecuencias operacionales importantes [2], [3].

El problema central es que bajo tierra no existe un ambiente de propagación ideal. Los túneles tienen geometrías irregulares, curvas, bifurcaciones, desniveles y zonas de obstrucción. Además, la presencia de polvo, humedad, vibraciones y maquinaria pesada modifica constantemente las condiciones del entorno.

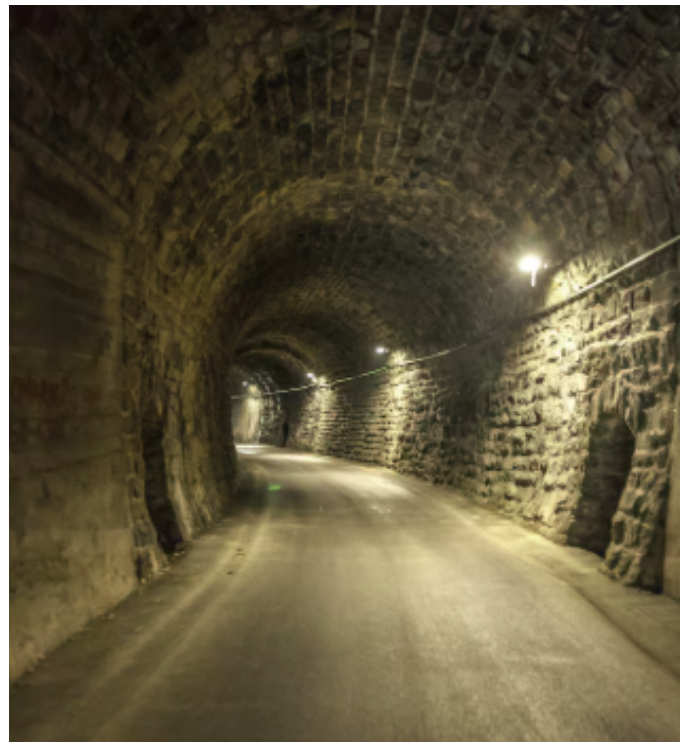


Fig. 1. Geometría irregular del túnel y condición NLoS que limita la propagación directa de señales.

II. Condiciones físicas del entorno subterráneo

Uno de los principales desafíos corresponde a la geometría de los túneles. Las galerías subterráneas no son espacios abiertos ni rectos de manera permanente. Existen curvas, intersecciones, zonas estrechas y estructuras metálicas que pueden bloquear, reflejar o debilitar las señales de comunicación [1], [2].

Esto afecta especialmente a tecnologías que dependen de línea de vista directa, como enlaces ópticos o sistemas inalámbricos direccionales. Cuando la señal no puede propagarse directamente entre transmisor y receptor, el enlace

puede degradarse o interrumpirse.

A esto se suma el tránsito constante de equipos y personas. Camiones, maquinaria, estructuras temporales y elementos móviles pueden generar bloqueos parciales o totales. En una red subterránea, una condición que funciona correctamente en un instante puede cambiar minutos después debido al movimiento normal de la operación.



Fig. 2. La presencia de maquinaria, trabajadores y elementos móviles puede generar obstrucciones parciales o totales entre transmisor y receptor, modificando dinámicamente las condiciones del canal de comunicación.

III. Factores ambientales y operacionales

Además de la geometría, el ambiente subterráneo presenta factores que afectan la calidad de los enlaces. El polvo en suspensión puede atenuar señales ópticas, especialmente en tecnologías que requieren línea de vista, como FSO o VLC [4]. La humedad puede afectar conectores, equipos electrónicos y superficies ópticas. Las vibraciones pueden producir desalineaciones en enlaces direccionales [5].



Fig. 3. El polvo en suspensión y la visibilidad reducida pueden atenuar señales ópticas y degradar el desempeño de enlaces que dependen de línea de vista, como FSO o VLC.

También existen fuentes de interferencia electromagnética asociadas a motores, variadores de frecuencia, tableros eléctricos, sistemas de potencia y maquinaria industrial. Estas condiciones pueden afectar el desempeño de tecnologías basadas en radiofrecuencia, especialmente cuando se requiere estabilidad y baja pérdida de paquetes.

En consecuencia, ninguna tecnología individual es capaz de resolver todos los escenarios de comunicación presentes en una mina subterránea. Cada medio físico posee ventajas, pero también limitaciones específicas.

IV. Limitaciones de depender de una sola tecnología

Una red basada únicamente en radiofrecuencia puede ofrecer flexibilidad de despliegue, pero puede verse afectada por interferencias, zonas de sombra o congestión espectral. Un enlace óptico puede entregar alta capacidad y baja latencia, pero requiere alineación y línea de vista [1]. Una red de sensores de bajo consumo puede cubrir largas distancias, pero no está diseñada para transportar grandes volúmenes de información.

Esto demuestra que el problema no se resuelve simplemente aumentando potencia o instalando más equipos. En muchos casos, la solución requiere diversidad tecnológica. Es decir, combinar distintos medios de comunicación para que el sistema pueda adaptarse cuando uno de ellos falla o se degrada.

Desde esta perspectiva, la conectividad subterránea debe entenderse como un problema de continuidad operacional. El objetivo no es evitar completamente las fallas, sino impedir que una falla puntual provoque la pérdida total del servicio.

V. Arquitecturas híbridas como respuesta

Una arquitectura híbrida de comunicaciones permite integrar tecnologías con características complementarias. Por ejemplo, enlaces ópticos pueden utilizarse para transporte de alta capacidad, mientras que enlaces inalámbricos pueden operar como respaldo [5]. A su vez, tecnologías de bajo consumo pueden encargarse de telemetría, sensores o monitoreo distribuido.

En este enfoque, el valor principal no está en una tecnología aislada, sino en la capacidad del sistema completo para mantener conectividad ante cambios del entorno. Si un enlace pierde disponibilidad, el tráfico puede migrar hacia otro camino disponible mediante mecanismos de redundancia, balanceo o failover.

Para minería subterránea, este principio es especialmente relevante. La operación requiere continuidad, trazabilidad y capacidad de respuesta. Por lo tanto, una solución robusta

debe considerar no solo la transmisión de datos, sino también la detección de fallas, la conmutación automática y el registro de evidencias.

Proyecto apoyado por



VI. Conclusión

Las minas subterráneas presentan condiciones adversas para las comunicaciones debido a su geometría irregular, presencia de polvo, humedad, vibraciones, tránsito de maquinaria e interferencias. Estas variables dificultan la propagación estable de señales y hacen insuficiente depender de una única tecnología.

Frente a este escenario, las arquitecturas híbridas aparecen como una alternativa adecuada para aumentar la resiliencia del sistema. Al combinar distintos medios físicos y mecanismos de control, es posible mantener continuidad operacional incluso cuando un enlace se degrada o falla.

En minería subterránea, la conectividad no depende de encontrar una tecnología perfecta, sino de diseñar un sistema capaz de adaptarse a un entorno dinámico y exigente.

Proyección y pilotaje

Los desafíos de comunicación descritos en este artículo requieren validaciones en condiciones cada vez más representativas de la operación minera. TerraQuantum busca avanzar desde las pruebas de laboratorio hacia procesos de prototipado y pilotaje que permitan evaluar la solución frente a condiciones reales de túneles, obstrucciones y degradación de enlaces. Conoce más sobre la vinculación de TerraQuantum con el ecosistema de pilotaje y validación tecnológica del Centro Nacional de Pilotaje en la nota publicada por Reporte Minero:

[Leer la nota completa en Reporte Minero](#)

References

- [1] M. Theissen, L. Kern, T. Hartmann, and E. Clausen, "Use-Case-Oriented Evaluation of Wireless Communication Technologies for Advanced Underground Mining Operations," *Sensors*, vol. 23, no. 7, Art. no. 3537, 2023, doi: 10.3390/s23073537.
- [2] O. Stoicuta, S. Riurean, S. Burian, M. Leba, and A. Ionica, "Application of Optical Communication for an Enhanced Health and Safety System in Underground Mine," *Sensors*, vol. 23, no. 2, Art. no. 692, 2023, doi: 10.3390/s23020692.
- [3] P. L. Ngwenyama and R. C. W. Webber-Youngman, "A Review of the Applications of Through-the-Earth (TTE) Communication Systems for Underground Mines," *Mining, Metallurgy & Exploration*, vol. 41, pp. 2291–2323, 2024, doi: 10.1007/s42461-024-01056-5.
- [4] P. Palacios Játiva, C. Azurdia-Meza, I. Sánchez, D. Zabala-Blanco, A. Dehghan Firoozabadi, I. Soto, and F. Seguel, "An Enhanced VLC Channel Model for Underground Mining Environments Considering a 3D Dust Particle Distribution Model," *Sensors*, vol. 22, no. 7, Art. no. 2483, 2022, doi: 10.3390/s22072483.
- [5] S. Phuchortham and H. Sabit, "A Survey on Free-Space Optical Communication with RF Backup: Models, Simulations, Experience, Machine Learning, Challenges and Future Directions," *Sensors*, vol. 25, no. 11, Art. no. 3310, 2025, doi: 10.3390/s25113310.