

¿Qué es un sistema híbrido de comunicaciones?

Abstract—Un sistema híbrido de comunicaciones integra distintos medios de transmisión con el objetivo de aumentar la disponibilidad, robustez y continuidad operacional de una red. En entornos críticos, como la minería subterránea, ninguna tecnología individual responde de forma óptima a todos los escenarios. Este artículo explica, desde una perspectiva divulgativa, cómo la combinación de enlaces ópticos, inalámbricos, redes de sensores y mecanismos de control permite construir arquitecturas resilientes frente a fallas, interferencias o degradaciones del entorno.

I. Introducción

Un sistema híbrido de comunicaciones es una arquitectura que combina múltiples tecnologías de transmisión para mejorar la disponibilidad, resiliencia y continuidad del servicio. En lugar de depender de un único medio físico, utiliza diferentes enlaces que pueden operar de forma complementaria [1].

Este enfoque es especialmente relevante en aplicaciones industriales y entornos críticos, donde una pérdida de conectividad puede afectar monitoreo, control, seguridad y coordinación operacional. En minería subterránea, por ejemplo, las condiciones del entorno cambian constantemente y pueden afectar de forma distinta a cada tecnología de comunicación [2].

La idea central de un sistema híbrido no es que todos los enlaces hagan lo mismo, sino que cada uno aporte una capacidad específica. Algunos enlaces pueden entregar alta velocidad, otros mayor cobertura, otros bajo consumo energético y otros pueden actuar como respaldo ante fallas.

II. Limitaciones de una arquitectura tradicional

Las arquitecturas tradicionales suelen depender de un medio principal de comunicación, como fibra óptica, radiofrecuencia, WiFi industrial o enlaces punto a punto. Si ese medio se degrada o falla, el servicio completo puede verse afectado.

En condiciones ideales, una tecnología única puede funcionar correctamente. Sin embargo, en ambientes reales, especialmente en minería subterránea, existen obstáculos, interferencias, curvas, polvo, humedad, vibraciones y equipos

en movimiento. Estas condiciones pueden provocar pérdida de señal, aumento de latencia, pérdida de paquetes o desconexiones temporales.

Por ejemplo, un enlace óptico puede entregar alta capacidad y baja latencia, pero requiere línea de vista. Un enlace inalámbrico puede ser más flexible, pero puede verse afectado por interferencias o zonas de sombra. Una red LoRaWAN puede ser adecuada para telemetría de sensores, pero no para transmitir grandes volúmenes de información [1], [3].

Por esta razón, una arquitectura basada en una sola tecnología puede ser insuficiente cuando se requiere continuidad operacional.

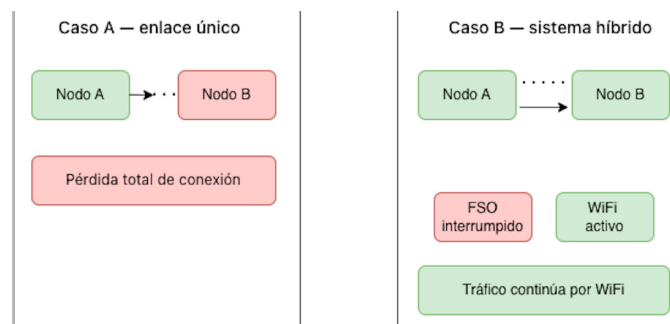


Fig. 1. Comparación conceptual entre un enlace único y una arquitectura híbrida con ruta alternativa ante fallas.

III. Principio de una arquitectura híbrida

Una arquitectura híbrida busca integrar tecnologías con características complementarias. En vez de asumir que un enlace será siempre confiable, el sistema se diseña para adaptarse cuando cambia la condición del entorno.

En este tipo de arquitectura, distintos medios físicos pueden operar como caminos alternativos o paralelos. Por ejemplo, un sistema puede combinar un enlace óptico FSO para transporte de alta capacidad, un enlace WiFi punto a punto como respaldo, LoRaWAN para telemetría y VLC para comunicación óptica localizada [1], [3], [4].

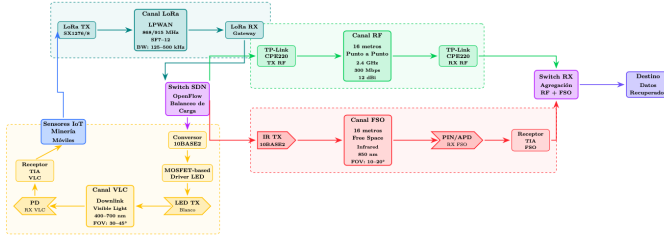


Fig. 2. Arquitectura híbrida compuesta por capa de borde, backhaul redundante y control de red para continuidad operacional.

Desde el punto de vista de red, estos enlaces pueden ser gestionados por un equipo de control, como un router industrial. Este equipo monitorea el estado de cada enlace, registra eventos, mide tráfico y decide por qué camino enviar la información según la política configurada [5].

Así, la robustez no depende de que un enlace sea perfecto, sino de que el sistema completo pueda mantener operación cuando alguno de sus componentes pierde disponibilidad.

IV. Redundancia, balanceo y failover

Existen tres conceptos importantes dentro de un sistema híbrido: redundancia, balanceo de carga y failover.

La redundancia consiste en disponer de más de un camino de comunicación para evitar que la falla de un enlace provoque la caída total del servicio. Si el enlace principal deja de estar disponible, otro enlace puede asumir la transmisión de datos [6].

El balanceo de carga permite distribuir tráfico entre múltiples enlaces cuando estos se encuentran activos. Esto puede mejorar el uso de los recursos disponibles y evitar que todo el tráfico dependa de una sola ruta.

El failover corresponde a la conmutación automática hacia un enlace alternativo cuando el sistema detecta que el enlace principal falló o se degradó. Este proceso requiere mecanismos de monitoreo, detección de disponibilidad y actualización de rutas [1], [5].

Estos tres elementos permiten que una red híbrida entregue continuidad operacional incluso en condiciones variables o ante fallas inducidas.

V. Aplicación en minería subterránea

En minería subterránea, un sistema híbrido puede organizarse en distintas capas. Una capa de borde puede utilizar tecnologías como LoRaWAN y VLC para conectar sensores, nodos móviles, actuadores o dispositivos de monitoreo. LoRaWAN puede encargarse de telemetría de bajo consumo, mientras que VLC puede emplearse como canal

óptico localizado [3], [4].

Por otra parte, una capa de backhaul puede integrar enlaces de mayor capacidad, como FSO y WiFi punto a punto. El enlace FSO puede operar como camino óptico principal cuando existe línea de vista, mientras que WiFi puede funcionar como respaldo o ruta paralela cuando el enlace óptico se interrumpe [1].

En el centro de esta arquitectura se ubican los equipos de control y gestión, encargados de monitorear disponibilidad, registrar eventos y aplicar políticas de continuidad. De esta manera, las tecnologías físicas aportan diversidad de medios, mientras que la capa de control permite coordinar su uso.

El resultado es una red más flexible y tolerante a fallas, capaz de sostener la comunicación aunque el entorno presente polvo, bloqueos, desalineaciones o interferencias.

VI. Degradación controlada del servicio

Una ventaja importante de los sistemas híbridos es que permiten pasar de una falla total a una degradación controlada. Esto significa que, si un enlace de alta capacidad deja de estar disponible, el sistema puede continuar operando con menor rendimiento, pero sin perder completamente la conectividad [1], [6].

En aplicaciones críticas, esta diferencia es fundamental. Mantener una comunicación limitada puede ser suficiente para transmitir alertas, estados de sensores, comandos básicos o información de seguridad. En cambio, una desconexión total puede dejar a la operación sin capacidad de respuesta.

Por esta razón, el objetivo de una arquitectura híbrida no es eliminar todas las fallas, sino reducir su impacto operacional. El sistema debe detectar el problema, redirigir el tráfico, estabilizar el servicio y registrar evidencia de lo ocurrido.

VII. Conclusión

Un sistema híbrido de comunicaciones integra múltiples tecnologías para mejorar la continuidad, resiliencia y disponibilidad de una red. En entornos como la minería subterránea, donde las condiciones físicas y ambientales cambian constantemente, depender de una sola tecnología puede ser insuficiente.

La combinación de enlaces ópticos, inalámbricos, redes de sensores y mecanismos de control permite construir una arquitectura capaz de adaptarse ante fallas o degradaciones. En este enfoque, el valor principal no está en una tecnología aislada, sino en la coordinación inteligente del sistema completo.

Por ello, los sistemas híbridos representan una estrategia adecuada para avanzar hacia comunicaciones más robustas, trazables y confiables en entornos industriales críticos.

Proyección y pilotaje

La arquitectura híbrida propuesta por TerraQuantum requiere integrar y validar sus distintos enlaces bajo escenarios controlados y, posteriormente, en condiciones operacionales. El acceso a espacios de prototipado y pilotaje permitirá evaluar la coordinación entre VLC, LoRaWAN, FSO, WiFi y los mecanismos de control de red.

Conoce más sobre la participación de TerraQuantum en actividades de vinculación con el Centro Nacional de Pilotaje:

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

References

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] M. Jouhari, E. M. Amhoud, N. Saeed, and M.-S. Alouini, "A Survey on Scalable LoRaWAN for Massive IoT: Recent Advances, Potentials, and Challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 25, no. 3, pp. 1841–1876, 2023, doi: 10.1109/COMST.2023.3274934.
- [4] T.-C. Yu, W.-T. Huang, W.-B. Lee, C.-W. Chow, S.-W. Chang, and H.-C. Kuo, "Visible Light Communication System Technology Review: Devices, Architectures, and Applications," *Crystals*, vol. 11, no. 9, Art. no. 1098, 2021, doi: 10.3390/cryst11091098.
- [5] A. Aijaz, "High-Performance Industrial Wireless: Achieving Reliable and Deterministic Connectivity over IEEE 802.11 WLANs," *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, vol. 1, pp. 28–37, 2020, doi: 10.1109/OJIES.2020.2984391.
- [6] G. Cena, S. Scanzio, and A. Valenzano, "Experimental Evaluation of Seamless Redundancy Applied to Industrial Wi-Fi Networks," arXiv:2210.16404, 2022.

Proyecto apoyado por

