

FSO: enlaces ópticos inalámbricos para minería

Abstract—Free Space Optics, o FSO, es una tecnología de comunicación óptica que permite transmitir datos mediante haces de luz propagados por el aire. Su funcionamiento puede compararse con una fibra óptica inalámbrica, ya que permite establecer enlaces punto a punto de alta capacidad sin necesidad de cable físico entre ambos extremos. Este artículo explica, desde una perspectiva divulgativa, el principio de funcionamiento de FSO, sus ventajas, limitaciones y potencial aplicación como enlace de backhaul en minería subterránea.

I. Introducción

FSO, o Free Space Optics, es una tecnología de comunicación óptica que transmite información mediante haces de luz a través del espacio libre. A diferencia de la fibra óptica tradicional, donde la luz viaja guiada dentro de un cable, en FSO la señal se propaga por el aire entre dos transceptores alineados [1], [2].

Por esta razón, FSO suele describirse como una fibra óptica inalámbrica. Ambos sistemas utilizan principios ópticos para transportar información, pero FSO elimina la necesidad de tender cable físico entre los puntos de comunicación [2].

Esta característica lo convierte en una alternativa interesante para escenarios donde instalar fibra puede ser costoso, lento, temporalmente inviable o físicamente complejo. En ambientes industriales, y especialmente en minería subterránea, esta flexibilidad puede aportar ventajas importantes para enlaces de transporte o backhaul [3].

II. Principio de funcionamiento

Un enlace FSO está compuesto por dos unidades ópticas enfrentadas. Cada unidad puede transmitir y recibir información mediante un haz de luz, generalmente en el rango infrarrojo. Para que el enlace funcione correctamente, ambos extremos deben estar alineados y mantener línea de vista directa.

La información eléctrica se convierte en una señal óptica en el transmisor. Esta señal viaja por el aire hasta llegar al receptor, donde un fotodetector la transforma nuevamente en una señal eléctrica [2]. Luego, el equipo entrega esa información a una interfaz de red, como Ethernet,

permitiendo transportar tráfico IP entre ambos puntos.

En términos prácticos, un sistema FSO puede comportarse como un puente de comunicación entre dos segmentos de red. Para los equipos conectados, el enlace puede verse como una conexión cableada convencional, aunque físicamente la transmisión ocurra mediante luz.

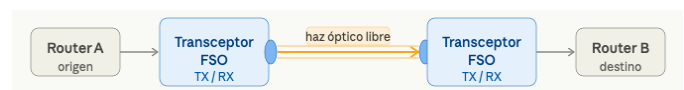


Fig. 1. Representación conceptual de un enlace FSO como backhaul óptico en espacio libre entre dos nodos de red.

III. Ventajas de FSO

Una de las principales ventajas de FSO es su capacidad de transmisión. Al utilizar haces ópticos direccionales, puede transportar datos a altas tasas y con baja latencia, lo que lo hace atractivo para enlaces de backhaul o transporte principal. Otra ventaja es que no utiliza espectro de radiofrecuencia. Esto permite evitar interferencias electromagnéticas y reducir la dependencia de bandas RF que podrían estar saturadas o restringidas en ciertos entornos industriales [1], [3].

FSO también ofrece una comunicación altamente direccional. El haz óptico se concentra entre los dos extremos del enlace, lo que reduce la dispersión de la señal y puede aportar una mayor seguridad física frente a emisiones ampliamente propagadas [1].

Además, al no requerir cable entre ambos puntos, puede desplegarse con mayor rapidez en ciertos escenarios. Esto puede ser útil en pruebas, pilotos, instalaciones temporales o sectores donde el tendido de cableado resulta difícil.



Fig. 2. Transceptor FSO CompactLink 300 utilizado como enlace óptico punto a punto para pruebas de backhaul en espacio libre.

IV. Limitaciones y desafíos

El principal desafío de FSO es su dependencia de la línea de vista. Si entre el transmisor y el receptor aparece una obstrucción física, el enlace puede degradarse o interrumpirse completamente [1], [2].

También es sensible a la alineación. Como el haz óptico es direccional, pequeños movimientos, vibraciones o cambios en la posición de los equipos pueden afectar la potencia recibida. En ambientes dinámicos, esto obliga a considerar soportes estables, alineación precisa y revisión periódica del montaje.

Las condiciones ambientales también influyen. Polvo, humo, niebla, humedad o partículas en suspensión pueden atenuar el haz óptico y reducir la calidad del enlace [4]. En minería subterránea, estos factores son especialmente relevantes debido al tránsito de maquinaria, ventilación, movimiento de material y condiciones propias del túnel.

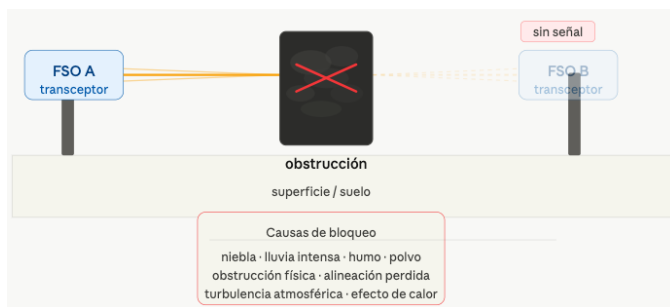


Fig. 3. Ejemplo de interrupción de un enlace FSO por pérdida de línea de vista, obstrucciones o condiciones ambientales adversas.

Por estas razones, FSO no debe ser entendido como una solución aislada capaz de garantizar conectividad en todos los escenarios. Su desempeño puede ser muy alto cuando las condiciones son favorables, pero requiere respaldo cuando el entorno afecta la línea de vista o la alineación.



Fig. 4. Montaje experimental con transceptores FSO enfrentados, donde la alineación entre ambos equipos permite establecer un enlace óptico punto a punto.

V. Aplicación en minería subterránea

En minería subterránea, FSO puede utilizarse como enlace de backhaul entre dos puntos con línea de vista dentro de una galería o túnel. Su capacidad y baja latencia permiten transportar información entre nodos de red, cámaras, sistemas de monitoreo o infraestructura de control [1], [3].

Por ejemplo, un enlace FSO puede conectar dos routers ubicados en extremos de un tramo de prueba, permitiendo transportar tráfico IP sin necesidad de cableado físico. Esto resulta útil en pilotos tecnológicos, zonas donde instalar fibra es complejo o sectores donde se requiere una solución temporal y desmontable.

Sin embargo, el uso de FSO en minería debe considerar cuidadosamente la geometría del túnel, el tránsito operacional, la estabilidad mecánica del montaje y la presencia de polvo o vibración. La selección del punto de instalación es clave para mantener una línea de vista estable y minimizar bloqueos accidentales.

En este contexto, FSO puede entregar gran valor cuando forma parte de una arquitectura híbrida. Puede operar como enlace principal de alta capacidad, mientras otro medio, como WiFi punto a punto o radioenlace, actúa como respaldo ante pérdida de línea de vista o degradación del canal óptico [4], [5].

VI. FSO dentro de una arquitectura híbrida

El verdadero potencial de FSO en entornos críticos aparece cuando se integra con otros medios de comunicación. En una arquitectura híbrida, el enlace óptico puede transportar tráfico principal mientras se encuentra disponible, pero el sistema puede conmutar hacia un enlace alternativo si detecta pérdida de conectividad.

Este enfoque permite aprovechar las ventajas de FSO sin depender completamente de sus condiciones ideales. Si el haz óptico se bloquea temporalmente, el tráfico puede migrar hacia otro camino disponible mediante mecanismos de failover [4], [5].

De esta manera, la operación no queda expuesta a una caída total por la falla de un único medio. El sistema mantiene continuidad operacional mediante diversidad tecnológica, monitoreo y control de rutas.

En minería subterránea, esta lógica resulta especialmente importante. El entorno puede cambiar rápidamente, por lo que la red debe estar preparada para adaptarse a bloqueos, polvo, vibración o variaciones de alineación.

VII. Conclusión

FSO es una tecnología óptica inalámbrica capaz de entregar enlaces punto a punto de alta capacidad, baja latencia y sin uso de radiofrecuencia. Estas características la convierten en una alternativa atractiva para backhaul industrial y aplicaciones en minería subterránea.

No obstante, su dependencia de línea de vista, alineación y condiciones ambientales hace necesario utilizarla con criterios de diseño adecuados. En ambientes subterráneos, factores como polvo, vibración, tránsito de equipos y obstrucciones pueden afectar su estabilidad.

Por ello, FSO alcanza su mayor valor cuando se integra dentro de un sistema híbrido. En combinación con enlaces de respaldo y mecanismos de failover, puede aportar capacidad y rendimiento sin comprometer la continuidad operacional del sistema completo.

Proyección y pilotaje

La validación de enlaces FSO requiere estudiar alineación, estabilidad mecánica, obstrucciones y degradación óptica en condiciones cercanas a una operación minera. TerraQuantum proyecta avanzar hacia procesos de pilotaje que permitan evaluar esta tecnología como enlace de backhaul y su coordinación con rutas inalámbricas de respaldo.

Conoce más sobre la vinculación de TerraQuantum con espacios de prototipado, testeo y validación para la industria minera:

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

References

- [1] I. A. Alimi and P. P. Monteiro, "Revolutionizing Free-Space Optics: A Survey of Enabling Technologies, Challenges, Trends, and Prospects of Beyond 5G Free-Space Optical Communication Systems," *Sensors*, vol. 24, no. 24, Art. no. 8036, 2024, doi: 10.3390/s24248036.
- [2] A. A. B. Raj, P. Krishnan, U. Darusalam, and G. Kaddoum, "A Review—Unguided Optical Communications: Developments, Technology Evolution, and Challenges," *Electronics*, vol. 12, no. 8, Art. no. 1922, 2023, doi: 10.3390/electronics12081922.
- [3] O. Aboelala, I. E. Lee, and G. C. Chung, "A Survey of Hybrid Free Space Optics Communication Networks to Achieve 5G Connectivity for Backhauling," *Entropy*, vol. 24, no. 11, Art. no. 1573, 2022, doi: 10.3390/e24111573.
- [4] 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.
- [5] S. Song, Y. Liu, T. Xu, and L. Guo, "Hybrid FSO/RF System Using Intelligent Power Control and Link Switching," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 33, no. 18, pp. 1018–1021, 2021, doi: 10.1109/LPT.2021.3076467.

Proyecto apoyado por

