



Comunicaciones resilientes para minería subterránea

Guía práctica sobre arquitecturas híbridas, tecnologías ópticas y continuidad operacional

Este ebook explica por qué la conectividad subterránea exige diversidad tecnológica y cómo **VLC, LoRaWAN, FSO y WiFi industrial** pueden trabajar de forma complementaria para sostener servicios críticos.

Ebook técnico-comercial

Edición 1.0 | junio de 2026



Índice

1. Cómo usar esta guía	2
2. Introducción	3
3. Qué aprenderás en este ebook	4
3.1. Diseñada para túneles mineros	4
3.2. Orquestación inteligente	4
3.3. Continuidad operacional	4
4. Por qué la conectividad falla bajo tierra	5
5. Cómo responde una arquitectura híbrida	6
5.1. Capa de borde	6
5.2. Capa de backhaul	6
5.3. Orquestación inteligente	6
6. Qué indicadores permiten evaluar el sistema	7
7. Tecnologías que se complementan	8
8. Aplicaciones en una operación minera	11
9. Datos, monitoreo y trazabilidad	13
9.1. Funcionalidades	13
10. Del diagnóstico al pilotaje	14
11. TerraQuantum y la próxima etapa	15
11.1. Validaciones y avances	15
12. Siguiendo el siguiente paso	16

Cómo usar esta guía

Una lectura breve y visual para comprender el problema, las tecnologías y el camino hacia un piloto.

Si buscas contexto

Comienza por **Por qué la conectividad falla bajo tierra**. Allí se resumen los efectos de la geometría, el polvo, la humedad, las obstrucciones y las interferencias.

Si buscas operación

Consulta **Datos, monitoreo y trazabilidad** y **Qué indicadores permiten evaluar el sistema**.

Si buscas tecnologías

Revisa **Tecnologías que se complementan** para conocer el papel de VLC, LoRa-WAN, FSO y WiFi industrial dentro de una misma arquitectura.

Si buscas implementar

La sección **Del diagnóstico al pilotaje** resume las etapas necesarias para validar la solución en condiciones representativas.

Este ebook entrega una visión general. El diseño final siempre debe ajustarse a las condiciones reales de la faena y a los servicios críticos que se desea proteger.

Introducción

Una guía para comprender por qué la conectividad subterránea requiere resiliencia, redundancia y adaptación.

La minería subterránea presenta condiciones extremas para las comunicaciones: polvo, humedad, geometrías complejas, bloqueos físicos, interferencias electromagnéticas y variaciones permanentes del entorno.

Una arquitectura híbrida combina tecnologías ópticas, inalámbricas, IoT y control de red para mantener la continuidad operacional. El sistema detecta degradaciones y conmuta automáticamente entre enlaces, evitando que la falla de un único medio provoque la pérdida total del servicio.



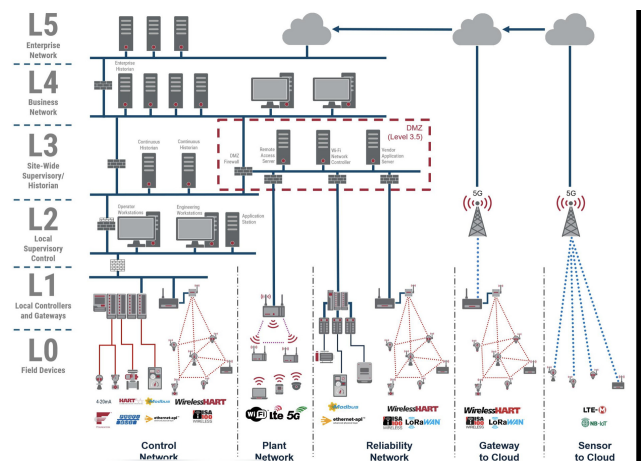
Una sola tecnología siempre tendrá un escenario donde deja de funcionar.

Qué aprenderás en este ebook

Conceptos, tecnologías y criterios para diseñar comunicaciones resilientes en minería subterránea.

A lo largo de esta guía revisaremos cuatro tecnologías complementarias:

- **VLC** para downlink óptico mediante luminarias LED.
- **LoRaWAN** para uplink de telemetría desde sensores y tags.
- **FSO** como enlace óptico de alta capacidad.
- **WiFi P2P industrial** como respaldo redundante.



Diseñada para túneles mineros

Este enfoque está orientado a ambientes donde el polvo, la humedad, la geometría del túnel y las interferencias hacen imposible depender de un solo medio de comunicación.

Orquestación inteligente

Dos routers industriales MikroTik ejecutan health-check continuo, failover automático, balanceo de tráfico y monitoreo operacional.

Continuidad operacional

Cuando un enlace falla, el sistema redirige el tráfico hacia el medio disponible, reduciendo tiempos muertos y manteniendo servicios críticos.



Por qué la conectividad falla bajo tierra

La minería subterránea necesita comunicaciones que no fallen.



Las operaciones subterráneas enfrentan condiciones extremas para las comunicaciones:

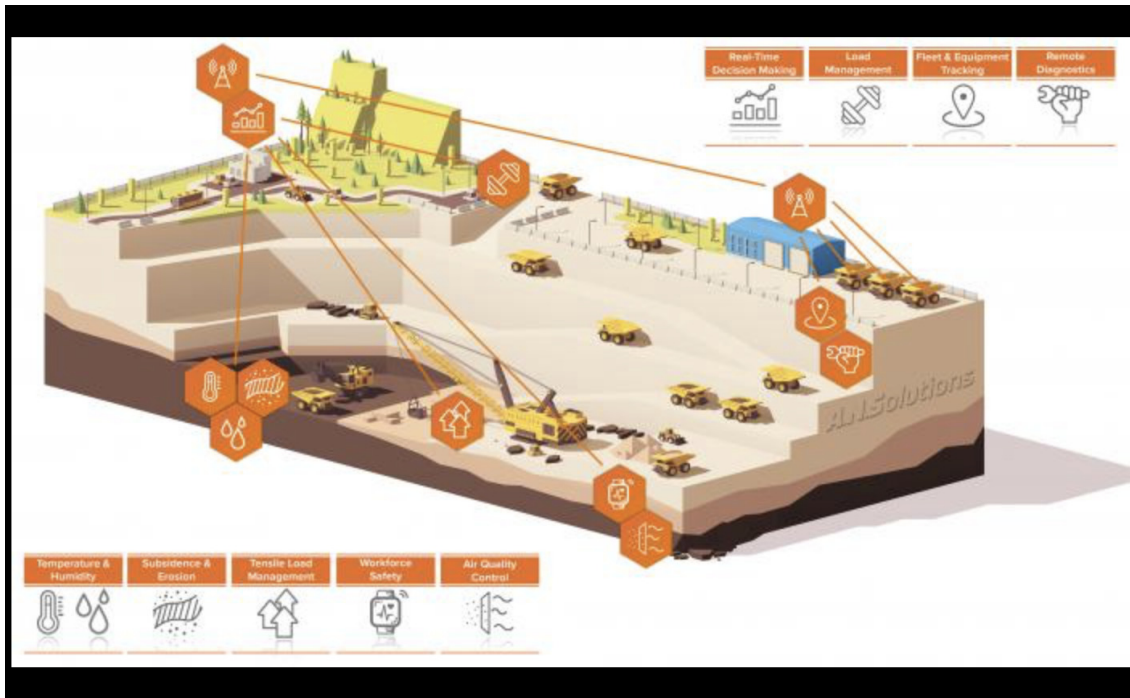
- **Polvo en suspensión.**
- **Humedad constante.**
- **Bloqueos físicos.**
- **Curvas y geometrías complejas.**
- **Interferencias electromagnéticas.**
- **Pérdida frecuente de señal.**

La mayoría de las soluciones actuales dependen de una sola tecnología. Cuando ese enlace falla, la operación pierde conectividad, trazabilidad y capacidad de respuesta.

El objetivo no es eliminar completamente las fallas, sino impedir que una falla puntual provoque la pérdida total del servicio.

Cómo responde una arquitectura híbrida

Una arquitectura híbrida diseñada para continuidad operacional.



Capa de borde

- VLC para downlink óptico mediante luminarias LED.
- LoRaWAN para uplink de telemetría desde sensores y tags.

Capa de backhaul

- FSO como enlace óptico de alta capacidad.
- WiFi P2P industrial como respaldo redundante.

Orquestación inteligente

Dos routers industriales MikroTik ejecutan:

- Health-check continuo.
- Failover automático.
- Balanceo de tráfico.
- Monitoreo operacional.

El sistema detecta degradaciones y conmuta automáticamente entre enlaces en segundos.

Qué indicadores permiten evaluar el sistema

Tecnología validada para ambientes extremos.

$\geq 99\%$
Disponibilidad objetivo del sistema

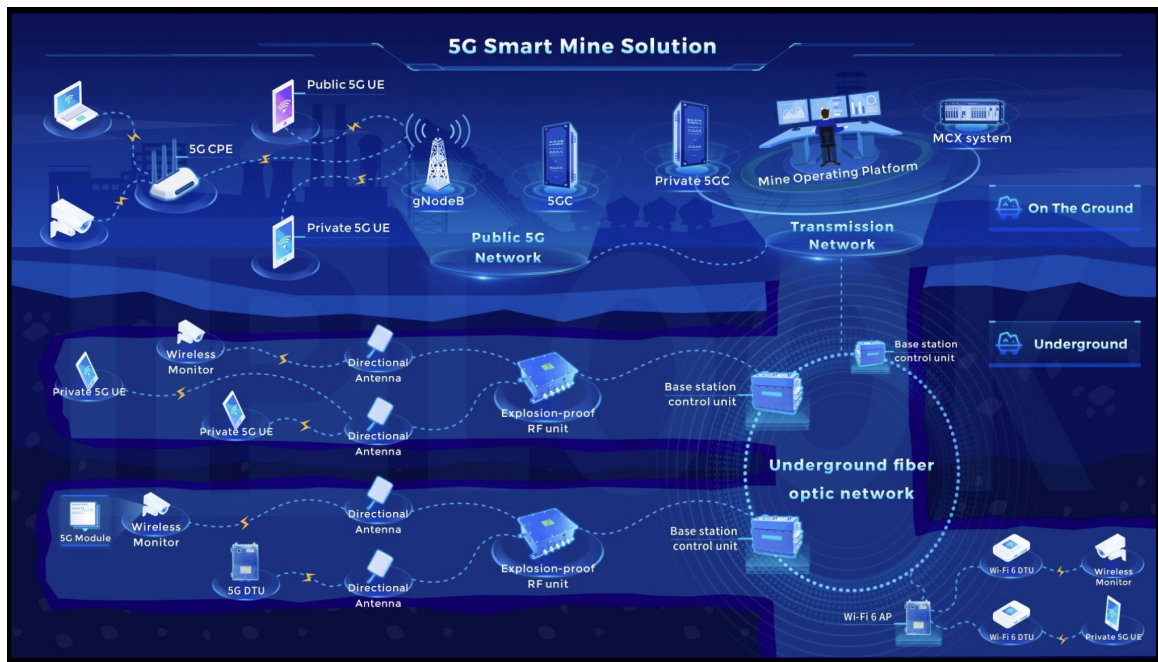
Segundos
Tiempo de failover automático

16 m
Alcance operativo VLC validado en mina de pruebas

80 m
Enlace FSO validado en terreno

Tiempo real
Monitoreo y trazabilidad operacional

4 medios
Diversidad tecnológica integrada



Tecnologías que se complementan

Cada medio cumple una función específica dentro de la arquitectura.

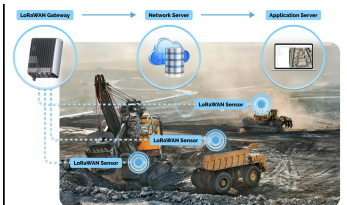


VLC - Comunicación por luz visible

Las luminarias LED transmiten datos mediante modulación imperceptible para el ojo humano. VLC permite enviar instrucciones y comandos hacia los nodos de mina sin utilizar radiofrecuencia.

Beneficios

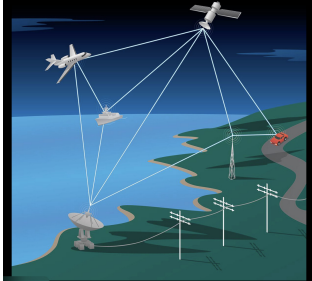
- No genera interferencia RF.
- Usa la infraestructura de iluminación.
- Comunicación segura y dirigida.
- Ideal para evacuación guiada y automatización.



LoRaWAN - Telemetría industrial

LoRaWAN proporciona comunicación inalámbrica de largo alcance y bajo consumo energético para sensores, tags y dispositivos IoT distribuidos en la mina. **Beneficios**

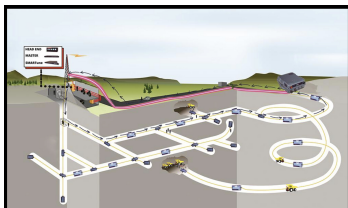
- Bajo consumo y alta cobertura.
- Escalable para múltiples dispositivos.
- Tracking de personal y activos.
- Monitoreo de gases y variables ambientales.



FSO - Free Space Optics

FSO utiliza haces ópticos infrarrojos para transmitir datos a alta velocidad sin cableado físico. Funciona como una fibra óptica inalámbrica. **Beneficios**

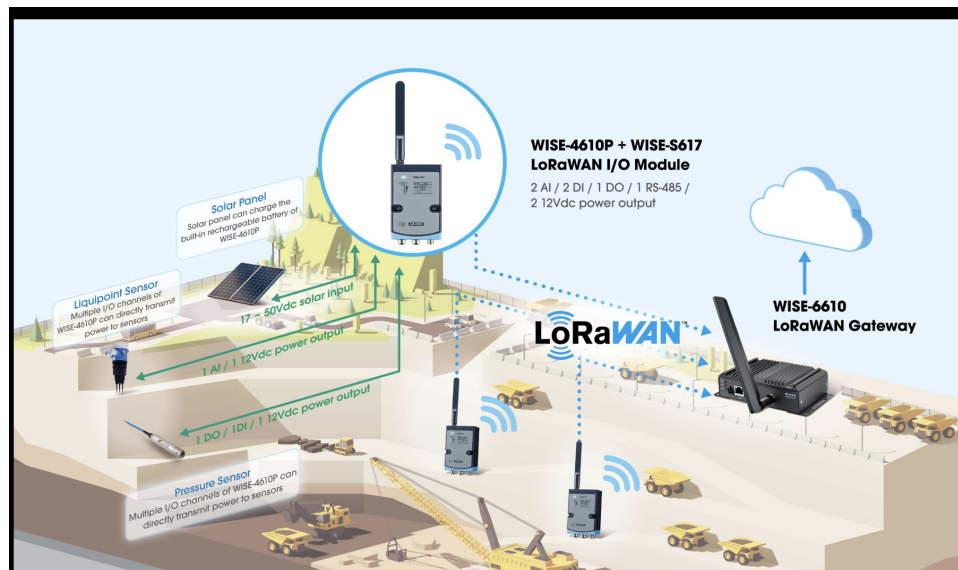
- Alta capacidad.
- Baja latencia.
- Sin uso de espectro RF.
- Ideal para backhaul industrial.



WiFi P2P industrial

La plataforma incorpora enlaces WiFi industriales punto a punto mediante radios direccionales de alta capacidad. Su función principal es actuar como respaldo automático del enlace FSO. **Beneficios**

- Redundancia operacional.
- Alta disponibilidad.
- Fácil despliegue.
- Integración industrial.



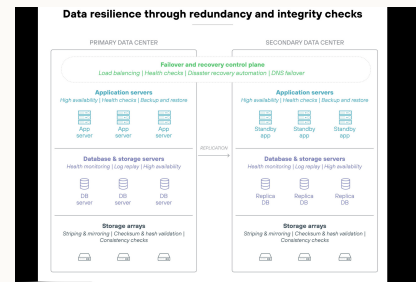
Aplicaciones en una operación minera

Aplicaciones orientadas a seguridad, productividad y continuidad operacional.

Continuidad operacional

Cuando un enlace falla debido a polvo, vibración u obstrucción, el sistema conmuta automáticamente al enlace redundante sin intervención humana.

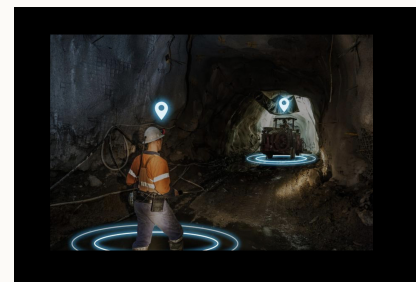
- Continuidad operacional.
- Reducción de tiempos muertos.
- Menor riesgo operacional.
- Alta disponibilidad.



Tracking de personal y activos

Cada operario y equipo crítico puede portar tags LoRaWAN que reportan ubicación y estado en tiempo real.

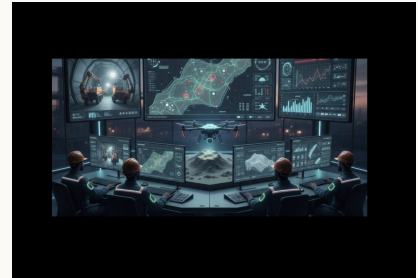
- Geolocalización y geocercas.
- Alertas automáticas.
- Historial de recorridos.
- Mayor seguridad y respuesta ante incidentes.



Evacuación inteligente

En situaciones de emergencia, la plataforma puede activar protocolos automáticos de evacuación utilizando múltiples medios de comunicación. Las luminarias VLC pueden guiar visualmente al personal hacia rutas seguras.

- Respuesta inmediata.
- Reducción de riesgos.
- Trazabilidad de evacuación.
- Integración HSE.



Monitoreo ambiental

Sensores IoT monitorean continuamente CH_4 , CO, temperatura, humedad y polvo ambiental. Cuando se detectan condiciones críticas, el sistema puede activar automáticamente ventilación o alertas.

- Prevención de accidentes.
- Cumplimiento ambiental.
- Automatización operacional.



Datos, monitoreo y trazabilidad

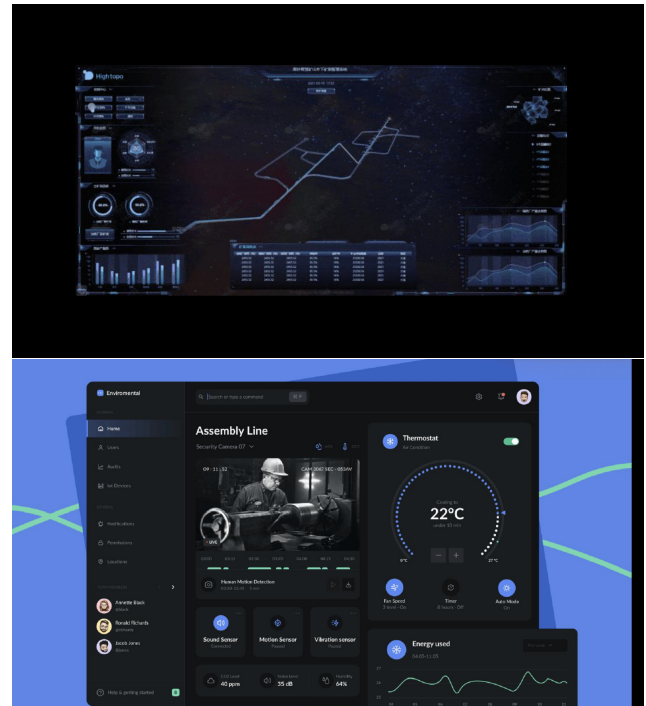
Inteligencia operacional en tiempo real.

Una plataforma de gestión puede centralizar:

- Estado de enlaces.
- Sensores IoT.
- Alarmas.
- Tracking.
- Telemetría.
- Eventos críticos.

Funcionalidades

- Dashboard en tiempo real.
- APIs industriales.
- Integración SCADA.
- Reportes históricos.
- Monitoreo remoto.



Del diagnóstico al pilotaje

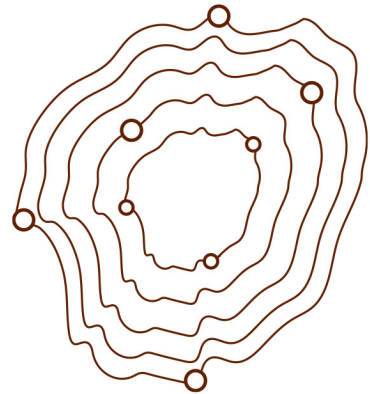
Etapas recomendadas para pasar desde el levantamiento inicial hasta una validación controlada en terreno.

Etapa	Alcance propuesto
Diagnóstico	Levantamiento del entorno, puntos críticos, restricciones de montaje, energía, cobertura y servicios prioritarios.
Diseño	Definición de arquitectura, distribución de tecnologías, criterios de redundancia y configuración de enlaces.
Prototipado	Integración de hardware, electrónica, radios, sensores, óptica y software de control.
Pilotaje	Instalación temporal, pruebas de conectividad, fallas inducidas, medición de KPIs y recopilación de evidencias.
Implementación	Despliegue progresivo, capacitación, documentación técnica y acompañamiento de puesta en marcha.
Soporte	Monitoreo, mantenimiento, ajustes de configuración, análisis de eventos y evolución de la plataforma.

Nota: el alcance final debe definirse según las condiciones reales de la faena, los servicios críticos a soportar y los criterios de aceptación acordados con el cliente.

TerraQuantum y la próxima etapa

Ingeniería avanzada para minería inteligente.



TerraQuantum es una empresa tecnológica especializada en comunicaciones resilientes, IoT industrial y automatización para minería subterránea.

Nuestra solución combina electrónica, redes industriales, óptica, IoT y software avanzado para resolver uno de los mayores desafíos de la minería moderna: mantener la conectividad operacional en ambientes extremos.

Validaciones y avances

- Escuela Mina Planta Chancón.
- Validaciones FSO en terreno.
- Pilotos tecnológicos.
- Proyecto apoyado por CORFO.

Siguiente paso

Continúa profundizando, solicita una conversación técnica o evalúa un piloto adaptado a tu faena.

Conversemos sobre tu operación

Conversemos sobre cómo adaptar una arquitectura híbrida de comunicaciones a las condiciones reales de tu mina.

[Solicitar reunión](#)[Solicitar piloto](#)

También puedes: compartir este ebook, solicitar una evaluación técnica o conocer una propuesta de pilotaje.

