

Resultados preliminares del sistema TerraQuantum

Abstract—El sistema TerraQuantum propone una arquitectura híbrida de comunicaciones orientada a continuidad operacional en minería subterránea. La solución integra tecnologías como VLC, LoRaWAN, FSO, WiFi punto a punto y mecanismos de control IP mediante routers MikroTik. Este artículo presenta, desde una perspectiva divulgativa, los resultados preliminares obtenidos durante las etapas de validación, destacando el comportamiento del sistema frente a fallas inducidas, la trazabilidad de evidencias y la proyección hacia pruebas en entornos mineros más representativos.

I. Introducción

El sistema TerraQuantum surge como una propuesta tecnológica orientada a mejorar la continuidad operacional de las comunicaciones en minería subterránea. Su enfoque principal es integrar múltiples tecnologías de transmisión para evitar que la falla de un único enlace provoque la pérdida total de conectividad.

La arquitectura considera distintos medios físicos y una capa de control común. Entre las tecnologías evaluadas se encuentran VLC, LoRaWAN, enlaces ópticos FSO, WiFi punto a punto y routers MikroTik para monitoreo, balanceo y failover.

Durante las etapas preliminares del proyecto se han desarrollado pruebas experimentales orientadas a validar tanto el funcionamiento individual de los enlaces como el comportamiento del sistema ante eventos de falla y recuperación.

II. Arquitectura evaluada

La arquitectura evaluada se organiza en dos niveles principales: una capa de borde y una capa de backhaul. La capa de borde considera tecnologías orientadas a sensores, nodos móviles, actuadores o comunicación localizada. En este nivel se ubican LoRaWAN y VLC.

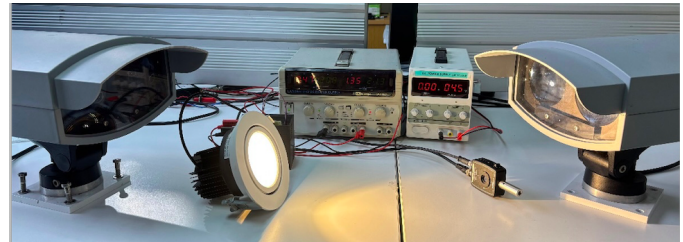


Fig. 1. Montaje experimental del sistema TerraQuantum, integrando transceptores FSO, luminaria VLC, receptor óptico e instrumentación de laboratorio.

LoRaWAN se orienta principalmente a telemetría de bajo consumo, permitiendo que sensores o nodos distribuidos reporten información hacia un gateway. VLC, por su parte, permite transmitir información mediante luz visible, utilizando luminarias LED como medio de comunicación óptica localizada.

La capa de backhaul considera enlaces de mayor capacidad para transportar tráfico IP entre puntos de la red. En esta capa se ubican FSO y WiFi punto a punto. FSO puede entregar un enlace óptico de alta capacidad cuando existe línea de vista, mientras que WiFi P2P puede actuar como respaldo o camino paralelo.

Los routers MikroTik cumplen el rol de control y gestión. Desde ellos se monitorea la disponibilidad de enlaces, se registran eventos, se observan tasas de tráfico y se aplican políticas de conmutación o balanceo.

III. Metodología de validación

La validación preliminar se ha basado en pruebas controladas, con generación de tráfico extremo a extremo y registro de evidencias por corrida. Cada prueba puede identificarse mediante un RUN_ID, lo que permite asociar configuración, eventos, resultados y observaciones a una ejecución específica.

Durante las pruebas se consideran distintas fuentes de evidencia. Entre ellas se incluyen logs del router, eventos UP/DOWN, registros de tasas por interfaz, pruebas de conectividad mediante ping, mediciones de throughput con

iperf3 y bitácoras de montaje o condiciones experimentales.

Esta metodología permite correlacionar el comportamiento de la red con el estado de los enlaces. Por ejemplo, si un enlace entra en estado DOWN, se espera observar una reducción de tráfico en esa interfaz y una migración hacia un enlace alternativo disponible.

El uso de evidencia trazable es fundamental para diferenciar una percepción de continuidad de una validación técnica. No basta con indicar que el sistema funcionó; es necesario respaldar el comportamiento mediante registros, tiempos, métricas y eventos.

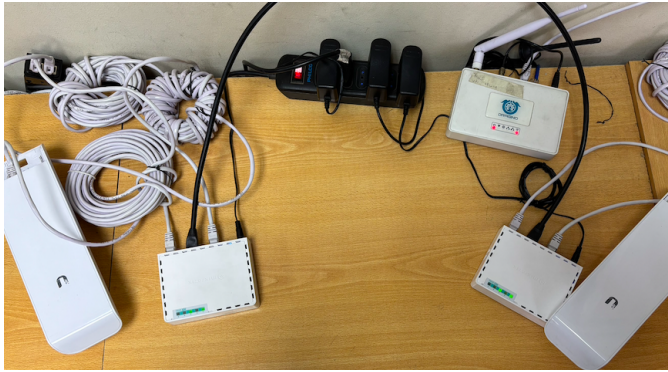


Fig. 2. Montaje de red con radios NanoStation y routers MikroTik utilizados para pruebas de backhaul y continuidad IP.

IV. Pruebas de conmutación

Uno de los objetivos principales de las pruebas ha sido observar la capacidad del sistema para mantener comunicación ante fallas inducidas. Para ello se deshabilitan enlaces de forma controlada y se registra cómo responde la arquitectura.

En una prueba típica, el sistema opera inicialmente con los enlaces disponibles. Luego, se induce la caída de uno de ellos, por ejemplo, deshabilitando una interfaz o bloqueando temporalmente un camino. El router detecta el cambio de estado y actualiza la disponibilidad del enlace.

Si el sistema está configurado correctamente, el tráfico debe migrar hacia el enlace alternativo. Esta migración puede observarse mediante registros de tráfico por interfaz, eventos de ruteo y continuidad en las pruebas de conectividad extremo a extremo.

Posteriormente, el enlace afectado se restablece. En esta etapa se analiza si el sistema retorna al camino original, si mantiene el tráfico por el enlace alternativo o si aplica una política de espera antes del failback.

V. Resultados preliminares observados

Los resultados preliminares muestran que la arquitectura híbrida permite sostener conectividad ante eventos controlados de indisponibilidad. Cuando un enlace entra en estado DOWN, se observa una disminución de tráfico en la interfaz afectada y actividad en el enlace alternativo disponible.

También se ha observado coherencia entre los eventos de disponibilidad y los registros de ruteo. Cuando un gateway deja de estar alcanzable, el sistema lo marca como no activo, y cuando el enlace se recupera, vuelve a considerarlo disponible.

En las pruebas de backhaul, la combinación de FSO y WiFi punto a punto permite evaluar distintos escenarios de transporte. FSO aporta capacidad óptica cuando existe línea de vista, mientras que WiFi puede operar como respaldo ante pérdida o degradación del enlace óptico.

En paralelo, las pruebas sobre VLC y LoRaWAN permiten validar canales complementarios dentro de la capa de borde. Esto refuerza la idea de que el sistema no depende de una sola tecnología, sino de la integración de múltiples medios con funciones específicas.

```
client_id="mqtt-consumer-1", protocol="mqtt", url="mqtt://192.168.1.100:1883"
2026-03-02 08:59:47.171 INFO Connecting to mqtt://192.168.1.100:1883
2026-03-02 08:59:49.488 INFO MQTT connected OK, subscribing to: /v3/tts-hello/1883/devices/1883
2026-03-02 08:59:52.974 INFO OK | devwtgto-hello-1 fcnt=305 rssi=-47 snr=10.8 payload=SRC=UART;BODY=MSG|node_id=UNO_A|msg_id=13
2026-03-02 08:59:59.063 INFO OK | devwtgto-hello-1 fcnt=306 rssi=-45 snr=9.5 payload=SRC=UART;BODY=MSG|node_id=UNO_A|msg_id=13
2026-03-02 09:00:06.401 INFO OK | devwtgto-hello-1 fcnt=307 rssi=-45 snr=7.2 payload=SRC=UART;BODY=MSG|node_id=UNO_A|msg_id=13
2026-03-02 09:00:13.100 INFO OK | devwtgto-hello-1 fcnt=308 rssi=-47 snr=10.8 payload=SRC=UART;BODY=MSG|node_id=UNO_A|msg_id=13
2026-03-02 09:00:20.420 INFO OK | devwtgto-hello-1 fcnt=309 rssi=-44 snr=9.2 payload=SRC=UART;BODY=MSG|node_id=UNO_A|msg_id=13
2026-03-02 09:00:27.133 INFO OK | devwtgto-hello-1 fcnt=310 rssi=-47 snr=10 payload=SRC=UART;BODY=MSG|node_id=UNO_A|msg_id=13
2026-03-02 09:00:34.456 INFO OK | devwtgto-hello-1 fcnt=311 rssi=-45 snr=9.8 payload=SRC=UART;BODY=MSG|node_id=UNO_A|msg_id=14
2026-03-02 09:00:41.159 INFO OK | devwtgto-hello-1 fcnt=312 rssi=-45 snr=10.8 payload=SRC=UART;BODY=MSG|node_id=UNO_A|msg_id=14
2026-03-02 09:00:48.487 INFO OK | devwtgto-hello-1 fcnt=313 rssi=-46 snr=9.8 payload=SRC=UART;BODY=MSG|node_id=UNO_A|msg_id=14
2026-03-02 09:00:55.186 INFO OK | devwtgto-hello-1 fcnt=314 rssi=-46 snr=9.8 payload=SRC=UART;BODY=MSG|node_id=UNO_A|msg_id=14
2026-03-02 09:01:02.522 INFO OK | devwtgto-hello-1 fcnt=315 rssi=-47 snr=7.2 payload=SRC=UART;BODY=MSG|node_id=UNO_A|msg_id=14
2026-03-02 09:01:09.224 INFO OK | devwtgto-hello-1 fcnt=316 rssi=-46 snr=8.8 payload=SRC=UART;BODY=MSG|node_id=UNO_A|msg_id=14
2026-03-02 09:01:16.534 INFO OK | devwtgto-hello-1 fcnt=317 rssi=-45 snr=10.2 payload=SRC=UART;BODY=MSG|node_id=UNO_A|msg_id=14
2026-03-02 09:01:23.251 INFO OK | devwtgto-hello-1 fcnt=318 rssi=-47 snr=8.8 payload=SRC=UART;BODY=MSG|node_id=UNO_A|msg_id=14
2026-03-02 09:01:30.570 INFO OK | devwtgto-hello-1 fcnt=319 rssi=-47 snr=9.5 payload=SRC=UART;BODY=MSG|node_id=UNO_A|msg_id=14
2026-03-02 09:01:37.273 INFO OK | devwtgto-hello-1 fcnt=320 rssi=-51 snr=8.5 payload=SRC=UART;BODY=MSG|node_id=UNO_A|msg_id=14
2026-03-02 09:01:37.273 INFO OK | devwtgto-hello-1 fcnt=320 rssi=-51 snr=8.5 payload=SRC=UART;BODY=MSG|node_id=UNO_A|msg_id=14
```

Fig. 3. Ejecución del consumidor MQTT encargado de recibir uplinks desde The Things Stack, decodificar el payload y registrar los eventos en la base de datos local.

VI. Importancia de la trazabilidad

Un aspecto central del proceso de validación es la trazabilidad. Cada corrida debe registrar no solo el resultado final, sino también la configuración utilizada, el mapeo de enlaces, los eventos ocurridos, las condiciones de prueba y las evidencias generadas.

El uso de RUN_ID permite ordenar esta información y facilitar el análisis posterior. Esto es especialmente relevante cuando se realizan múltiples pruebas en distintos escenarios, ya que permite comparar resultados, identificar causas de falla y justificar decisiones de mejora.

La trazabilidad también aporta valor en procesos de aceptación técnica. En una futura prueba SAT, será necesario demostrar que los criterios definidos se cumplen mediante evidencias objetivas, no solo mediante observaciones

generales.

Por ello, el registro sistemático de logs, mediciones, capturas, fotografías, bitácoras y resultados constituye una parte esencial del desarrollo del sistema.

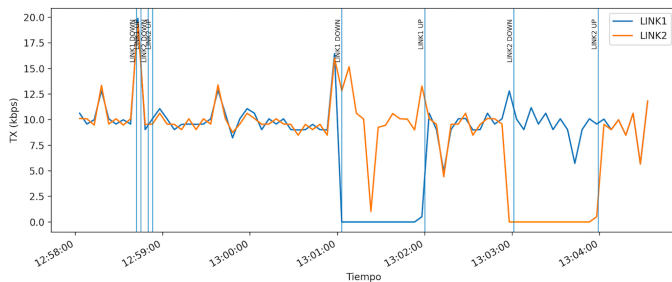


Fig. 4. Comportamiento de tráfico por enlace durante una prueba de continuidad operacional, evidenciando la redistribución del tráfico entre LINK1 y LINK2 ante eventos de falla y recuperación.

VII. Proyección hacia entorno minero

Aunque las pruebas preliminares permiten validar principios de funcionamiento, el siguiente paso es avanzar hacia escenarios más representativos de operación minera. Esto implica probar el sistema en túneles, galerías o instalaciones donde existan condiciones reales de polvo, tránsito, vibración, iluminación y restricciones de montaje.

En esa etapa será importante definir criterios de aceptación, tiempos máximos de conmutación, umbrales de pérdida, latencia, jitter, disponibilidad y estabilidad post-recuperación.

También será necesario evaluar aspectos operacionales, como instalación temporal, seguridad, energía, permisos, alineación de enlaces ópticos y desmontaje seguro al finalizar la jornada.

De esta forma, el proyecto podrá avanzar desde una validación de laboratorio hacia una validación de campo, fortaleciendo su aplicabilidad en entornos industriales reales.

VIII. Conclusión

Los resultados preliminares del sistema TerraQuantum muestran la factibilidad de una arquitectura híbrida orientada a continuidad operacional en minería subterránea. La integración de VLC, LoRaWAN, FSO, WiFi punto a punto y control mediante MikroTik permite construir una solución capaz de responder ante fallas o degradaciones de enlace.

Las pruebas realizadas evidencian que el sistema puede detectar cambios de disponibilidad, redirigir tráfico y registrar eventos relevantes para análisis posterior. Esta trazabilidad es fundamental para respaldar técnicamente el desempeño de la solución.

El desafío siguiente consiste en validar el sistema en condiciones más cercanas a la operación minera real, incorporando criterios SAT, campañas de terreno y métricas de aceptación. Con ello, TerraQuantum puede avanzar hacia una solución robusta, medible y transferible para comunicaciones resilientes en entornos subterráneos.

Próxima etapa: prototipado y pilotaje

Los resultados preliminares obtenidos en laboratorio constituyen la base para avanzar hacia una nueva etapa de prototipado, validación y pilotaje. TerraQuantum busca evaluar la solución en infraestructuras especializadas y escenarios más representativos, con el objetivo de escalar la tecnología y acelerar su futura inserción en la industria minera.

La nota completa puede consultarse en:

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

Proyecto apoyado por

