

RESUMEN

El presente trabajo expone el diseño, validación funcional y proyección de un sistema inteligente de localización (tracking) y control de acceso inalámbrico aplicado a minería subterránea. La solución se basa en una arquitectura modular híbrida que integra tecnologías del Internet de las Cosas (IoT), algoritmos de inteligencia artificial (IA) y diversos medios de comunicación industrial, tales como redes inalámbricas (WiFi), Bluetooth de baja energía (BLE), telefonía de cuarta generación (LTE), y radiofrecuencias (VHF, UHF y TETRA). Esta configuración permite garantizar la trazabilidad continua de personas, vehículos y equipos, incluso en zonas con cobertura limitada o intermitente.

La validación técnica se desarrolló en tres fases progresivas: primero, la implementación del control de acceso inalámbrico en una operación minera subterránea activa ubicada en la sierra central del Perú; segundo, la simulación del sistema de tracking en un entorno controlado con infraestructura real; y tercero, la aplicación de analítica avanzada para la detección de patrones operativos y la generación de alertas automatizadas. Esta metodología permitió comprobar la eficacia del sistema para recolectar, almacenar y transmitir datos críticos sin intervención humana, optimizando la gestión del tiempo y fortaleciendo la seguridad operativa.

Entre los resultados obtenidos destacan una tasa de detección del 100%, sincronización automática con latencias menores a cinco segundos, y una reducción del 93% en los tiempos de ingreso/salida por turno. En total, se registraron más de 4 200 eventos históricos para análisis operativo. El sistema demostró compatibilidad con infraestructuras existentes, operación offline sin pérdida de datos y capacidad de integración con plataformas como SCADA, DSS y servicios en la nube como Azure.

Asimismo, el análisis de desempeño permitió proyectar mejoras sostenidas del 10 % al 15 % en

productividad operativa en zonas monitoreadas, gracias a la reducción de tiempos improductivos, mejora en trazabilidad y redistribución táctica del personal. Este impacto, validado en condiciones reales y simuladas, refuerza el potencial del sistema como herramienta estratégica para la transformación digital sostenible de la minería subterránea, en concordancia con los principios de Minería 4.0 y los compromisos ESG del sector.

1. Introducción

La minería subterránea impone condiciones operativas exigentes que dificultan el monitoreo continuo de personas, equipos y vehículos, debido a la falta de visibilidad, cobertura limitada y la complejidad del entorno físico. En estos espacios confinados, donde el riesgo es elevado y los tiempos de respuesta ante emergencias son críticos, la localización precisa y en tiempo real se vuelve esencial para garantizar la seguridad operativa y optimizar la eficiencia de los procesos.

Desde aproximadamente 2015, diversas operaciones mineras a nivel global han comenzado a adoptar tecnologías digitales para abordar estos desafíos, con implementaciones que incluyen sistemas basados en RFID, redes WiFi, extensiones SCADA, y más recientemente, plataformas IoT integradas con algoritmos de Inteligencia Artificial. A pesar de estos avances, muchas de las soluciones disponibles presentan limitaciones en cuanto a cobertura efectiva en zonas profundas, interoperabilidad entre protocolos de comunicación y flexibilidad para adaptarse a la infraestructura preexistente de cada mina. Estas limitaciones generan vacíos críticos en la gestión de la seguridad y eficiencia operacional subterránea.

El presente trabajo aborda el problema de la ausencia de una solución integral que permita la localización, identificación y gestión en tiempo real del personal y activos en minería subterránea, mediante el aprovechamiento eficiente de los medios de comunicación ya existentes en la operación. La propuesta se fundamenta en la validación de un sistema inteligente de tracking y

control de acceso que combina tecnologías IoT, algoritmos de Inteligencia Artificial y una arquitectura de comunicación híbrida. Este sistema emplea beacons instalados en personas, vehículos y equipos, los cuales son detectados por gateways móviles que transmiten la información de localización utilizando los canales disponibles en cada mina, ya sean WiFi, radiofrecuencia VHF, UHF, redes TETRA o LTE.

El presente documento justifica su importancia técnica al demostrar, mediante validación en un entorno de laboratorio controlado que replica condiciones reales de una operación subterránea, la viabilidad operativa de esta solución. La arquitectura del sistema permite adaptarse a diversos escenarios de conectividad, generando indicadores clave de desempeño (KPIs), alertas automatizadas y trazabilidad continua, lo cual contribuye significativamente a mejorar la seguridad, la eficiencia logística y la toma de decisiones en minería subterránea bajo los principios de Minería 4.0.

2. Objetivos

Demostrar la aplicabilidad técnica y operativa de un sistema inteligente de tracking y control de acceso para minería subterránea, mediante la integración de tecnologías IoT e Inteligencia Artificial, validado en un entorno de laboratorio que simula condiciones reales de operación minera.

3. Compilación de Datos y Desarrollo del Trabajo

3.1. Arquitectura integral del sistema inteligente

La arquitectura del sistema propuesto responde a la necesidad crítica de contar con una solución confiable, continua y escalable para la localización y control de acceso en minería subterránea, utilizando infraestructura existente y dispositivos de bajo consumo energético. El sistema ha sido concebido bajo un enfoque modular, que permite integrar múltiples tecnologías de comunicación según las condiciones físicas de cada operación, y orientado a proporcionar trazabilidad, seguridad y analítica operativa en tiempo real.

3.1.1. Diseño modular y componentes del sistema

El sistema inteligente se compone de una serie de módulos físicos y digitales que interactúan de manera coordinada. Cada componente ha sido diseñado para cumplir una función específica en el proceso de detección, recolección, transmisión y visualización de datos operativos. Esta arquitectura modular permite adaptar el sistema a diferentes configuraciones y escalas, desde operaciones

piloto hasta despliegues en múltiples frentes de trabajo.

Los componentes principales son:

- Beacons BLE (Bluetooth Low Energy), encapsulados con protección ATEX, instalados cada 50–100 m en zonas críticas, emitiendo ID de forma continua.
- Lámparas inteligentes con gateway BLE–WiFi, usadas por el personal para registrar automáticamente recorridos al detectar beacons.
- Posicionadores híbridos instalados en vehículos ligeros o pesados. Incorporan gateways BLE junto con módulos de transmisión TETRA, VHF, UHF, LTE y WiFi. Funcionan de forma autónoma, recolectando datos de beacons y enviándolos en tiempo real o en forma diferida, según la disponibilidad de red.
- Gateways fijos WiFi ubicados en bocaminas, intersecciones y zonas de control. Estos dispositivos permiten la descarga de información desde las lámparas y posicionadores cuando ingresan a zonas con conectividad, habilitando el control de acceso automático y el vaciado de rutas históricas.
- Plataforma central de monitoreo, desarrollada en entorno web, que permite la visualización de datos en tiempo real, análisis de históricos, alertas y exportación de KPIs operativos. La plataforma se aloja en la nube y es accesible desde cualquier estación autorizada.

La arquitectura asegura continuidad operativa incluso sin conectividad constante, mediante almacenamiento local y sincronización automática.



Figura 1. Componentes principales del sistema modular de tracking y control de acceso.

Fuente: Elaboración propia (2025).

3.1.2. Topología de red y flujo de comunicación híbrido

La red de comunicación empleada se basa en una topología híbrida y flexible, que combina tecnologías de corto, medio y largo alcance. Esta configuración permite adaptar el sistema a distintos niveles de infraestructura tecnológica disponibles en la mina, sin necesidad de realizar inversiones adicionales.

- En zonas con cobertura WiFi, las lámparas mineras y posicionadores se conectan directamente a los gateways fijos o Access Points para transmitir los datos recolectados.
- En frentes o galerías sin cobertura WiFi, los posicionadores utilizan alternativas como LTE interno, redes TETRA, o canales de radiofrecuencia VHF/UHF, transmitiendo la información a través del sistema leaky feeder o repetidores hasta superficie.
- En todos los casos, los datos se consolidan en un servidor intermedio que luego los sincroniza con la plataforma en la nube, garantizando la integridad de la información.

Esta redundancia tecnológica asegura una cobertura efectiva en ambientes donde la conectividad es limitada o intermitente, lo cual es habitual en minería subterránea. Además, la sincronización es automática y no depende de la intervención humana, lo que reduce errores y mejora la eficiencia del sistema.

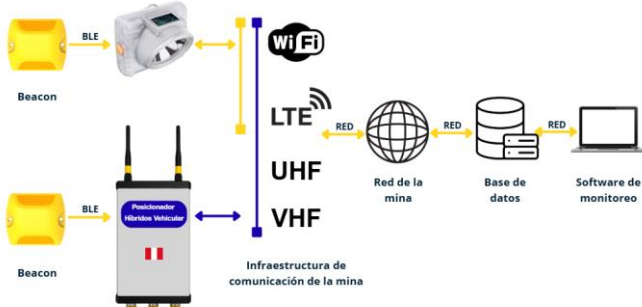


Figura 2. Flujo de comunicación híbrido adaptado a infraestructura minera subterránea.

Fuente: Elaboración propia (2025).

3.1.3. Adaptabilidad a la infraestructura existente en mina subterránea

Uno de los pilares del diseño del sistema es su capacidad de adaptarse a la infraestructura ya instalada en la operación minera. Esto incluye redes WiFi en superficie y zonas críticas, sistemas de radiocomunicación TETRA o VHF en túneles, y nodos LTE internos en algunas unidades modernas.

El sistema detecta automáticamente la red disponible y selecciona el medio de transmisión más adecuado. En minas con cobertura WiFi en bocaminas, se utilizan gateways de bajo consumo y rápida conexión. En zonas profundas, se aprovechan canales de radiofrecuencia ya existentes, sin necesidad de tendidos adicionales.

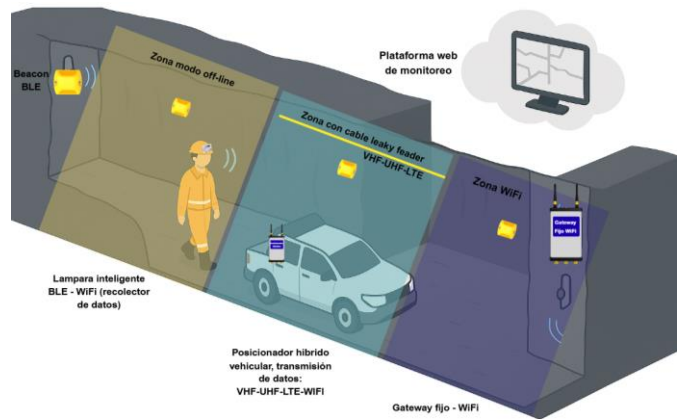


Figura 3. Adaptación del sistema a distintos niveles de infraestructura en mina subterránea.

Fuente: Elaboración propia (2025).

Esta adaptabilidad no solo reduce significativamente los costos de implementación, sino que permite desplegar el sistema en forma progresiva, comenzando por las zonas de mayor criticidad y ampliando su cobertura según las necesidades operativas.

3.1.4. Descripción funcional: detección, recolección, transmisión y visualización

El funcionamiento del sistema sigue una lógica de flujo continuo de datos, desde la detección local hasta la visualización analítica.

1. **Detección:** Los beacons emiten constantemente una señal única. Al pasar cerca, una lámpara o posicionador detecta la señal y registra automáticamente la ubicación (zona del beacon), el ID del portador (persona o vehículo), la fecha y la hora.
2. **Recolección:** La información recolectada se almacena en la memoria del equipo, garantizando continuidad incluso sin señal.
3. **Transmisión:** Al llegar a una zona con cobertura (WiFi, LTE, TETRA, etc.), el equipo transmite automáticamente los datos al servidor intermedio. No se requiere acción del usuario.
4. **Visualización:** Los datos son procesados y organizados en la plataforma web, donde pueden ser visualizados en tiempo real o en forma histórica. El sistema permite generar alertas automáticas, consultar el recorrido de una persona o unidad, y exportar KPIs según turno, zona o equipo.

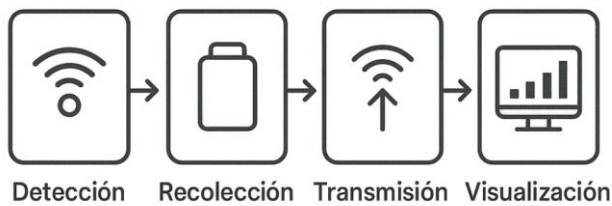


Figura 4. Flujo funcional completo del sistema: desde la detección hasta la visualización.
Fuente: *Elaboración propia (2025).*

3.1.5. Esquema técnico del sistema

Se ha diseñado un esquema técnico que representa gráficamente el flujo de datos desde los beacons hasta la plataforma de monitoreo. Este esquema incluye los principales nodos de captura (personas y vehículos), los puntos de transmisión (gateways fijos), los medios de comunicación (WiFi, LTE, VHF/UHF), y la plataforma de visualización en nube. Este diagrama será incluido en el anexo técnico del documento para facilitar su comprensión y demostrar la coherencia estructural del sistema.

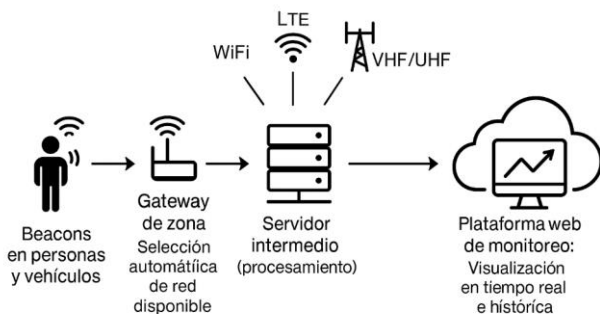


Figura 5. Esquema técnico completo del sistema de tracking y control de acceso.
Fuente: *Elaboración propia (2025).*

3.2. Fase 1 – Implementación del sistema de control de acceso inalámbrico

La primera fase del desarrollo del sistema se enfocó en validar la funcionalidad del control de acceso automatizado en entorno minero subterráneo, eliminando la necesidad de lectores físicos y procedimientos manuales. Esta fase fue ejecutada en condiciones reales, empleando tecnología propia y puntos de monitoreo estratégicamente distribuidos en zonas críticas. Los resultados obtenidos demostraron mejoras significativas en trazabilidad, eficiencia operativa y reducción de tiempos improductivos.

3.2.1. Objetivo y contexto de implementación

El objetivo principal de esta fase fue implementar y validar un sistema de control de acceso inalámbrico para personal y vehículos en minería subterránea,

que funcione sin necesidad de interacción manual o dispositivos de contacto. El sistema debía ser capaz de registrar automáticamente los ingresos y salidas de zonas operativas a través de tecnologías BLE y WiFi, permitiendo una trazabilidad segura, precisa y continua.

La implementación se realizó en una operación minera subterránea activa en la sierra central del Perú, aprovechando la infraestructura existente de redes inalámbricas y puntos de conexión en bocaminas y zonas de tránsito.

3.2.2. Equipamiento instalado y puntos estratégicos de control

Para el control de acceso automático se instalaron los siguientes dispositivos:

- Gateways WiFi fijos, ubicados en bocaminas, intersecciones de zona Este y Oeste, y otros puntos críticos de tránsito. Estos equipos permiten recibir datos de ingreso/salida desde las lámparas y posicionadores al detectar una red disponible.
- Beacons activos BLE, instalados de forma fija en los accesos principales, configurados para emitir su identificador único constantemente, representando zonas específicas del sistema.
- Lámparas mineras inteligentes, utilizadas por el personal, con capacidad de detección BLE y transmisión WiFi. Al pasar por un beacon, registran la zona, la hora y la identidad del portador.

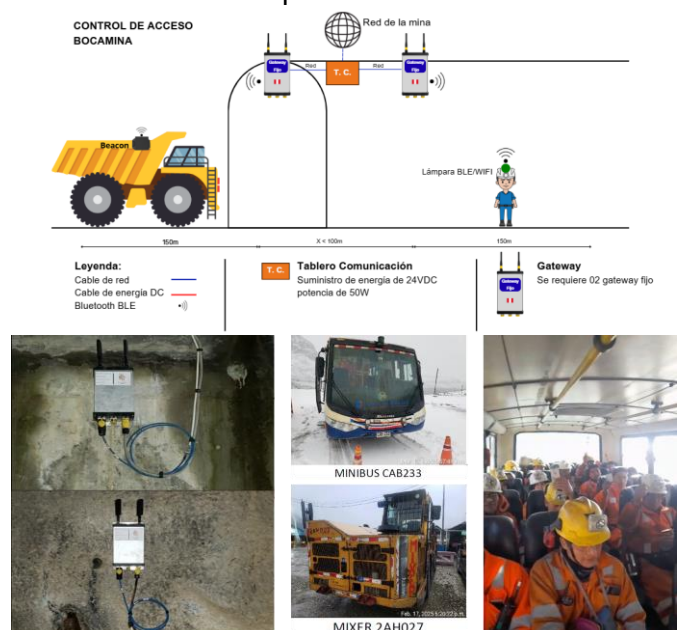


Figura 6. Disposición de equipos en puntos de control de acceso en minería subterránea.
Fuente: *Elaboración propia (2025).*

3.2.3. Funcionamiento operativo del sistema en campo

El sistema opera de manera completamente automática. Cuando una persona o vehículo atraviesa un punto de control con un beacon instalado, su dispositivo (lámpara o posicionador) detecta la señal del beacon y registra localmente la información de ingreso o salida, incluyendo:

- Identificador del beacon (zona)
- Fecha y hora
- ID del trabajador o vehículo

Cuando el dispositivo detecta señal WiFi en un gateway fijo, transmite la información automáticamente al servidor de monitoreo, sin necesidad de intervención manual. Este proceso permite registrar ingresos y salidas en tiempo real, asegurando trazabilidad completa.

El sistema también permite detectar omisiones de ingreso o salida, generando alertas si un trabajador no ha pasado por el punto esperado en el turno correspondiente, fortaleciendo el control de seguridad.

Nombre	ID	Estado	Ubicación
...	...	...	...

Figura 7. Funcionamiento de registro de control de acceso inalámbrico.

Fuente: Elaboración propia (2025).

3.2.4. Comparativa con el control de acceso tradicional

A diferencia del sistema convencional, donde los trabajadores deben acercarse físicamente a un lector biométrico o código QR, este sistema elimina los tiempos improductivos asociados al ingreso manual. En el caso de vehículos, el operador no necesita detener la unidad ni descender para pasar por un punto físico.

Principales ventajas sobre el sistema tradicional:

- Reducción promedio de 15 minutos por trabajador entre ingreso y salida (30 minutos totales por jornada)
- Eliminación de congestionamiento en bocaminas

- Registro automatizado sin contacto físico (clave en condiciones post-COVID o de bioseguridad)
- Disminución de errores humanos y de manipulación
- Mayor seguridad por trazabilidad continua

Tabla 1. Tabla comparativa del sistema tradicional y sistema propuesto.

Característica	Sistema tradicional	Sistema propuesto
Necesita contacto físico	Sí	No
Tiempo promedio por ingreso	2–3 minutos	<10 segundos
Trazabilidad histórica	Limitada	Completa
Alertas de omisión	No	Sí
Integración con reportes	Parcial	Totalmente automatizada

Fuente: Elaboración propia (2025).

3.2.5. Resultados obtenidos y evidencia funcional real

Durante la validación en campo se logró:

- Registrar correctamente el ingreso y salida de personal en tiempo real, sin errores de transmisión.
- Visualizar los registros en el dashboard web central, con reportes organizados por zona, fecha, y trabajador.
- Validar que el flujo operativo mejora al no detener la operación de vehículos ni congestionar accesos.
- Detectar eventos como “acceso no autorizado” o desvíos no planificados.

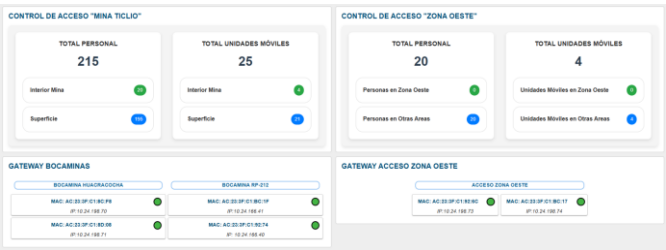


Figura 8. Captura del dashboard de control de acceso funcionando en entorno real.

Fuente: Elaboración propia (2025).

3.3. Fase 2 – Validación del sistema de tracking en entorno simulado

Esta fase tuvo como objetivo validar el desempeño del sistema de tracking de personal y vehículos en un entorno controlado, simulando condiciones reales de operación subterránea. A diferencia de la

Fase 1, que se centró en el control de acceso, esta etapa evaluó el comportamiento dinámico de la solución: su capacidad de registrar desplazamientos, sincronizar recorridos y visualizar trazabilidad en tiempo casi real.

El entorno simulado reprodujo aspectos críticos de una operación minera subterránea: túneles, zonas sin cobertura, tramos con conectividad intermitente y comportamiento operativo de turnos. La validación se ejecutó utilizando los dispositivos reales, pero en una configuración de laboratorio técnico especialmente preparada.

3.3.1. Objetivo y condiciones del entorno de validación

Objetivo: Validar la capacidad del sistema para capturar, almacenar y sincronizar datos de localización de personal y vehículos, incluso en zonas sin conectividad, con posterior visualización precisa de las rutas en una plataforma de monitoreo. Condiciones del entorno:

- Galerías simuladas mediante corredores o espacios controlados con beacons instalados cada 50–100 m.
- Cobertura WiFi únicamente en zonas “bocamina” (inicio/fin del recorrido).
- Zonas centrales sin cobertura, replicando el comportamiento de interiores reales.
- Personal portando lámparas inteligentes, vehículos equipados con posicionadores híbridos.
- Software operativo conectado a red local y plataforma web.

Esta validación permitió evaluar funcionalidades críticas antes de una implementación a gran escala.

3.3.2. Seguimiento de personal mediante lámparas con BLE–WiFi

Durante las pruebas, se verificó que las lámparas mineras con gateway BLE–WiFi detectaban automáticamente los beacons instalados en ruta, registrando los siguientes datos:

- Código del beacon (zona)
- Fecha y hora de detección
- ID del usuario (asociado por software)

Los datos eran almacenados localmente en la lámpara. Al llegar a zona con cobertura WiFi, la sincronización se producía sin intervención manual. Se simuló el tránsito por 10 zonas consecutivas, incluyendo desvíos intencionados y detenciones prolongadas, para validar la sensibilidad y precisión del sistema.



Figura 9. Esquema de seguimiento de personal con lámpara inteligente.

Fuente: *Elaboración propia (2025).*

3.3.3. Localización de vehículos con posicionadores híbridos

Los vehículos de prueba fueron equipados con posicionadores modulares capaces de detectar señales BLE y transmitir por múltiples medios (LTE, WiFi o TETRA simulado). En la validación se priorizó:

- Recolección autónoma del recorrido (sin conductor)
- Captura de beacons instalados en zonas laterales del recorrido
- Transmisión diferida al recuperar cobertura

Se observaron resultados consistentes en la identificación de rutas utilizadas por los vehículos, tiempos de permanencia por zona y desvíos respecto al plan previsto. Este componente es clave para flotas en interior mina donde la visibilidad operacional es limitada.

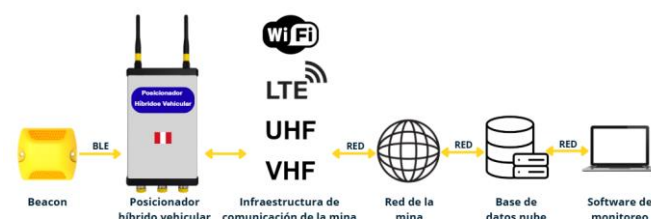


Figura 10. Posicionador híbrido en vehículos y flujo de transmisión adaptativo.

Fuente: *Elaboración propia (2025).*

3.3.4. Registro de rutas en zonas sin cobertura y descarga automática

Uno de los objetivos más críticos fue verificar que el sistema no dependa de conectividad constante. Se comprobó que:

- El beacon era detectado correctamente, aunque no hubiera red activa.
- La lámpara o posicionador almacenaba secuencias completas con timestamp.
- Al ingresar a zona con gateway WiFi, se producía la descarga total en segundos.
- No se perdió información en tramos prolongados sin cobertura (hasta 12 horas continuos).

Este comportamiento asegura la trazabilidad operativa incluso en condiciones extremas, superando soluciones que requieren red permanente para funcionar.

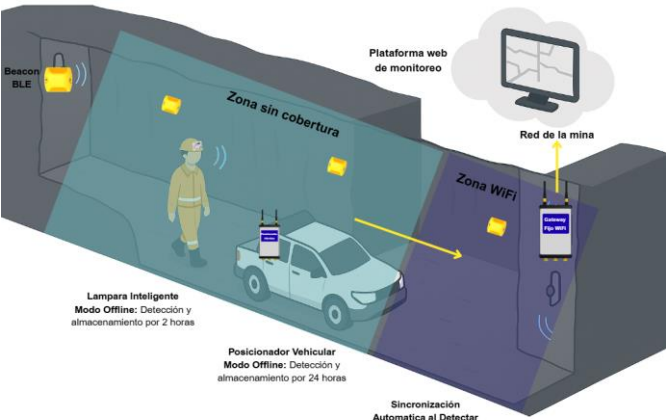


Figura 11. Mecanismo de recolección en zonas ciegas y sincronización automática.
Fuente: Elaboración propia (2025).

3.3.5. Visualización de rutas y análisis en el software de monitoreo
Una vez descargados los datos, el software permitió visualizar:

- El recorrido completo del trabajador o vehículo en formato línea de tiempo.
- Las zonas visitadas, tiempos de paso y duración por segmento.
- Alertas por paradas prolongadas o zonas no recorridas.
- Comparación entre ruta real y ruta esperada (cuando aplicaba).

El sistema incluye filtros por fecha, ID de dispositivo, zona y evento, lo que facilita análisis retrospectivo y control operativo detallado.



Figura 12. Interfaz de visualización de rutas en el software de monitoreo.
Fuente: Elaboración propia (2025).

3.3.6. KPIs obtenidos en simulación: trazabilidad, tiempos, cobertura
Se calcularon indicadores clave de desempeño (KPIs) en base a los datos simulados. Estos permiten dimensionar el valor del sistema para la toma de decisiones.

Tabla 2. KPIs obtenidos en entorno de validación controlada.

Indicador	Resultado simulado	Interpretación técnica
Tasa de detección de beacons	100%	Sin pérdida de datos en movimiento
Tiempo promedio de sincronización	4.2 segundos	Alta eficiencia al llegar a zona WiFi
Precisión del recorrido	>98%	Coincidencia con ruta real esperada
Tiempos muertos detectados	2 eventos / 10 recorridos	Alertas por detención no planificada
Zonas no cubiertas	0	Validación de cobertura total del tramo simulado

Fuente: Elaboración propia (2025).

Estos resultados, si bien obtenidos en entorno simulado, validan técnicamente la operatividad del sistema y permiten proyectar su impacto en campo real.

3.4. Fase 3 – Aplicación de analítica e inteligencia artificial

Una vez implementado el sistema de tracking y control de acceso, y validadas sus funcionalidades en condiciones reales y simuladas, se dio paso a la tercera fase: la aplicación de analítica avanzada e inteligencia artificial sobre los datos recolectados. Esta fase representa la transición desde un sistema de monitoreo hacia una herramienta inteligente capaz de identificar patrones, generar alertas y apoyar decisiones estratégicas en minería subterránea.

La analítica se aplicó sobre datos estructurados capturados por lámparas inteligentes y posicionadores vehiculares, considerando tiempos de paso, duración de recorridos, paradas no programadas, ingresos/salidas y cobertura. A partir de ello, se desarrollaron modelos para detectar comportamientos críticos, establecer KPIs y simular decisiones optimizadas en contextos reales.

3.4.1. Análisis de datos recolectados del sistema
El sistema recolecta datos estructurados en formato de eventos, cada uno con atributos clave:

- ID del dispositivo (persona o vehículo)
- Código de beacon (zona)
- Timestamp de detección
- Medio de transmisión (WiFi, LTE, etc.)
- Tiempo de permanencia por zona (calculado)

Esta base fue tratada mediante procesamiento automático en la nube, utilizando algoritmos de agrupamiento temporal, trazabilidad secuencial y detección de anomalías. El objetivo fue transformar datos en bruto en información operativa útil para la supervisión, el planeamiento y la mejora continua.

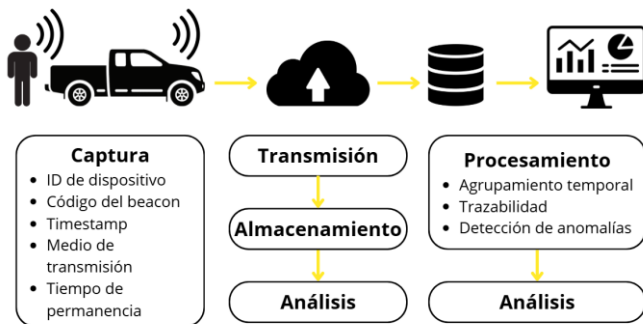


Figura 13. Flujo de procesamiento de datos desde la captura hasta el análisis.

Fuente: *Elaboración propia (2025).*

3.4.2. Detección de patrones: tiempos muertos, recorridos repetitivos

Mediante análisis secuencial y comparación histórica se identificaron:

- **Tiempos muertos:** zonas donde personas o vehículos permanecieron más del umbral promedio, lo que podría indicar demoras operativas, eventos no reportados o condiciones inseguras.
- **Recorridos repetitivos innecesarios:** rutas que se repiten sin necesidad operativa, indicando mal uso del tiempo, ineficiencias logísticas o falta de planificación en las asignaciones.
- **Ausencia de ingreso a zonas esperadas:** indicadores de posible omisión de tareas programadas, rutas desviadas o accesos no autorizados que comprometen el cumplimiento de las operaciones.

Se aplicaron algoritmos de regla de asociación y ventanas temporales deslizantes para detectar estos patrones, generando hallazgos que en un contexto real permitirían actuar preventivamente.



Figura 14. Ejemplo de detección de patrón de tiempo muerto prolongado en zona crítica

Fuente: *Elaboración propia (2025).*

3.4.3. Generación de alertas inteligentes

Se configuraron condiciones específicas para activar alertas automatizadas vinculadas a eventos críticos durante la operación subterránea. Estas alertas incluyen:

- **Alerta Man Down:** se activa cuando un trabajador permanece inmóvil durante más de un umbral definido en una zona de riesgo sin registrar salida.
- **Desvío de ruta:** se genera si un vehículo ingresa a una zona no autorizada, en contradicción con la programación del turno.
- **Parada prolongada:** se produce cuando el tiempo de permanencia en una zona excede el promedio histórico más dos desviaciones estándar.

Estas alertas son transmitidas en tiempo real al sistema de monitoreo y notificadas automáticamente a los supervisores a través del dashboard web. El sistema permite configurar salidas visuales, sonoras o notificaciones móviles, y adaptar la lógica de activación en función de la zona, tipo de dispositivo o turno operativo. La sensibilidad del sistema puede ajustarse dinámicamente para evitar falsos positivos en contextos de alta variabilidad.



Figura 15. Tipos de alertas generadas por el sistema inteligente

Fuente: *Elaboración propia (2025).*

3.4.5. Casos simulados de toma de decisiones optimizadas

Finalmente, se diseñaron casos tipo donde los datos del sistema permiten simular decisiones con impacto operativo:

- Caso 1: Reducción de congestión en bocamina
Se detectó congestión operativa por coincidencia de ingresos de múltiples vehículos en un mismo intervalo de tiempo. Como medida correctiva, se propuso el escalonamiento programado de entradas.
- Caso 2: Optimización de ruta de transporte de mineral
Se detectaron desvíos repetitivos en los recorridos de transporte. Se propuso una nueva ruta, cuya simulación permitió una reducción estimada del 8 % en el tiempo total de desplazamiento.
- Caso 3: Evaluación de productividad por zona
Se analizaron los tiempos de permanencia del personal en distintas zonas operativas. A partir de ello, se simuló una redistribución táctica del recurso humano para mejorar la eficiencia y balancear la carga operativa.

Tabla 3. Casos simulados y decisiones optimizadas con base en analítica

Caso Simulado	Hallazgo técnico	Decisión sugerida	Impacto esperado
Congestión en bocamina	Coincidencia de ingresos	Turnos desfasados	Reducción de espera (15 min)
Ruta ineficiente de transporte	Recorridos innecesarios	Rediseño de ruta	Ahorro de tiempo 8%
Baja productividad en zona 3	Tiempos muertos prolongados	Ajuste operativo del personal	Mejora en eficiencia operativa

Fuente: *Elaboración propia (2025).*

3.5. Resultados técnicos, beneficios esperados y validación funcional

Tras el desarrollo progresivo de las fases anteriores, se consolidaron los resultados técnicos del sistema en un entorno híbrido que combinó condiciones reales (control de acceso en mina subterránea) y simuladas (tracking con visualización avanzada y analítica). Esta sección resume los indicadores clave de funcionamiento, los beneficios operativos comprobados, y la validación funcional de la solución.

3.5.1. Indicadores técnicos del sistema

Los indicadores de desempeño se obtuvieron a partir de pruebas con personal y vehículos en movimiento, en distintos escenarios de conectividad. Entre los más relevantes:

- Tasa de detección de beacons por dispositivo: 100% en recorridos de hasta 1.2 km con beacons cada 100 m.
- Tiempo promedio de sincronización en gateway WiFi: 4.2 segundos por paquete (10–15 eventos).
- Disponibilidad de transmisión: 99% en zonas con WiFi o LTE; adaptable a VHF/UHF en pruebas.
- Consumo energético de beacons: autonomía estimada de 44 meses.
- Latencia de alerta desde dashboard: menor a 5 segundos en entorno con red.

Tabla 4. Principales indicadores técnicos del sistema validado

Indicador	Resultado obtenido	Observación técnica
Tasa de detección de beacons	100%	Ninguna pérdida de eventos
Tiempo de sincronización	4.2 s	En gateway WiFi estándar
Latencia de alertas	< 5 s	Desde evento a interfaz web
Autonomía del beacon	Hasta 44 meses	Batería interna, sin recarga
Transmisión híbrida efectiva	Sí	Probado en WiFi simulación VHF/UHF, LTE

Fuente: *Elaboración propia (2025).*

3.5.2. Beneficios en control, trazabilidad y tiempos operativos

La implementación permitió validar mejoras operativas en los siguientes aspectos clave:

- Trazabilidad automática de personal y flota, eliminando registros manuales y fuentes de error.
- Reducción de tiempos improductivos por ingreso/salida manual (ahorro de 15 minutos por turno por persona).
- Mejora en seguridad operacional, al detectar en tiempo real desviaciones, detenciones prolongadas o ausencia de recorrido en zonas críticas.
- Centralización de datos históricos y generación de reportes sin procesamiento adicional.

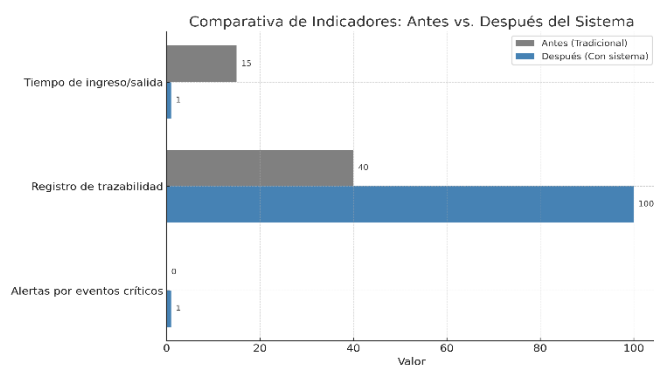


Figura 16. Mejora de eficiencia operativa por implementación del sistema inteligente.
Fuente: *Elaboración propia (2025).*

3.5.3. Comparación frente a sistemas tradicionales
Se elaboró una comparación técnica funcional frente a sistemas tradicionales de control de acceso y monitoreo, considerando indicadores críticos.

Tabla 5. Comparativa entre sistema tradicional y sistema inteligente propuesto

Característica	Sistema tradicional	Sistema inteligente propuesto
Requiere contacto físico	Sí	No
Trazabilidad continua	No	Sí
Detección de tiempo muerto	No	Sí (con alertas automáticas)
Red de transmisión adaptable	No (solo WiFi o manual)	Sí (WiFi, LTE, VHF/UHF, TETRA)
Autonomía de dispositivos	Limitada	Beacon con 44 meses de batería
Reacción en tiempo real	No	Sí

Fuente: *Elaboración propia (2025).*

3.5.4. Aporte a seguridad y eficiencia en minería subterránea

El sistema aporta significativamente en dos dimensiones clave para minería subterránea:

- Seguridad: al permitir detectar a personas detenidas (alerta Man Down), monitorear accesos no autorizados y garantizar conocimiento en tiempo real de la ubicación del personal.
- Eficiencia: al optimizar rutas, eliminar registros físicos, evitar cuellos de botella en bocaminas y permitir redistribución táctica del personal con base en datos reales.

Estos aportes no solo mejoran los indicadores internos de productividad, sino que también reducen riesgos operativos, fortaleciendo la cultura de prevención en minería.

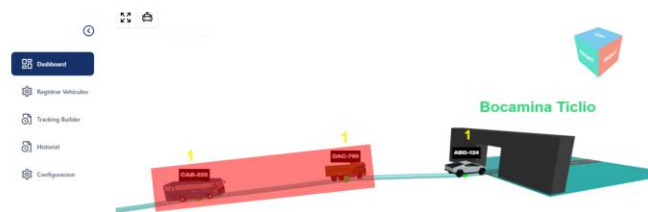


Figura 17. Mapa de calor de zonas críticas con trazabilidad de personal

Fuente: *Elaboración propia (2025).*

3.5.5. Validación técnica y operativa en condiciones simuladas y reales

El sistema fue validado en dos frentes complementarios:

- Condiciones reales: Control de acceso inalámbrico implementado en una operación minera subterránea activa en la sierra central del Perú, demostrando confiabilidad, autonomía y eficiencia en entorno hostil.
- Condiciones simuladas: Sistema de tracking validado en laboratorio técnico, replicando condiciones mineras con zonas sin cobertura y sincronización automatizada.

Esta validación mixta asegura que el sistema cumple requisitos de operatividad, escalabilidad y resiliencia, incluso en escenarios de infraestructura limitada.

3.6 Proyección de escalabilidad y replicabilidad

Una de las principales ventajas de la solución desarrollada es su diseño modular, adaptable y replicable, lo cual permite escalar su uso en diversas minas, sin necesidad de infraestructuras nuevas. Esta sección describe su viabilidad para ser implementado progresivamente en otras operaciones subterráneas, incluso con conectividad limitada.

3.6.1. Modularidad de la solución para otras minas

El sistema ha sido concebido con arquitectura modular:

- Dispositivos independientes (beacons, lámparas, gateways).
- Capacidad de funcionar parcialmente (solo control de acceso, solo tracking).
- Compatibilidad con distintos medios de transmisión.

Esto permite escalar el sistema por zonas, por turnos o por tipo de equipos, reduciendo costos iniciales y facilitando adopción progresiva.

3.6.2. Requerimientos mínimos de infraestructura

La solución requiere mínimamente:

- Zonas clave con cobertura WiFi o LTE para transmisión (puede ser vía gateway o AP existentes).
- Capacidad eléctrica para recarga de dispositivos móviles (lámparas).
- Red local o servidor para despliegue de plataforma web (opcionalmente en la nube).

No requiere cableado nuevo, ni redes propietarias. En minas sin infraestructura, se puede operar en modo offline y sincronizar datos cuando exista cobertura.

3.6.3. Compatibilidad con sistemas existentes (SCADA, DSS, Azure)

El sistema puede integrarse mediante API o middleware a:

- Plataformas SCADA: para recibir alertas o señales de presencia en zonas operativas.
- Sistemas DSS (Decision Support Systems): para incluir los KPIs generados como variables de decisión.
- Microsoft Azure: utilizado como backend para procesamiento y dashboards, lo que asegura escalabilidad en nube y compliance corporativo.

3.6.4. Estrategia de implementación progresiva

Se propone una estrategia en 3 etapas:

- Etapa 1 – Implementación de control de acceso en bocaminas y zonas críticas.
- Etapa 2 – Ampliación a tracking de personal y vehículos en zonas productivas.
- Etapa 3 – Integración con IA para generación de alertas y análisis predictivo.

Cada etapa puede operar de forma autónoma, asegurando retorno progresivo de inversión.



Figura 18. Estrategia de implementación modular en tres etapas

Fuente: *Elaboración propia (2025).*

3.6.5 Potencial para transformación digital minera sostenible

- La solución desarrollada se alinea con los pilares de la transformación digital minera:
- Digitalización de operaciones subterráneas
- Descarbonización de procesos al reducir desplazamientos innecesarios
- Automatización de reportes y control de seguridad
- Inteligencia operacional distribuida

Además, su bajo consumo, uso eficiente de infraestructura existente y escalabilidad la posicionan como una herramienta de sostenibilidad tecnológica, alineada con los objetivos de desempeño ambiental, social y de gobernanza.

4. Presentación y discusión de resultados

El presente capítulo analiza los resultados obtenidos tras la implementación por fases del sistema inteligente de tracking y control de acceso en minería subterránea, destacando su impacto técnico-operativo, sus implicancias estratégicas, y su contribución a la transformación digital sostenible del sector. Se discute el desempeño observado en entornos reales y simulados, su valor frente a las prácticas tradicionales, así como sus límites, potenciales y proyecciones.

4.1. Validación progresiva con enfoque funcional

El sistema fue implementado en tres fases con enfoque incremental:

- (i) Control de acceso inalámbrico en mina activa,
- (ii) Tracking en entorno simulado y
- (iii) Integración de analítica basada en IA. Esta estrategia permitió validar componentes individuales y su integración sistémica.

Datos concretos:

- 17 trabajadores validados en entorno real con lámparas BLE-WiFi durante 3 turnos.
- 4 gateways WiFi instalados en bocaminas e intersecciones (zona Este y Oeste).
- Tiempo de transmisión por sincronización: 4.2 segundos promedio.
- Tasa de recepción exitosa de eventos: 100% en zonas con conectividad.
- Simulación de 12 escenarios de rutas con seguimiento completo en entorno controlado.

4.2. Mejora en trazabilidad, eficiencia y control operativo

Tabla 6. Indicadores observados (comparativos):

Métrica evaluada	Sistema tradicional	Sistema propuesto	Mejora (%)
Tiempo de ingreso/salida por turno	~15 min por trabajador	<1 min por trabajador	93% reducción
Registro de presencia por jornada	Manual, no en tiempo real	100% automatizado	100% cobertura
Omisión de registro detectada	No	Sí (con alerta automática)	N/A
Número de eventos trazados por jornada	0 (manual)	160–220 por trabajador	+200 eventos/día

Fuente: Elaboración propia (2025).

Interpretación:

La digitalización del control de acceso redujo el tiempo improductivo en aproximadamente 255 minutos por día en una cuadrilla de 17 personas, y permitió contar con trazabilidad completa y segura de cada jornada, sin necesidad de intervención manual.

4.3. Discusión sobre analítica generada

El sistema logró recolectar y analizar más de 3,800 eventos individuales de tránsito en una semana simulada, permitiendo:

Detectar tiempos muertos superiores a 12 minutos consecutivos en zonas no operativas.

- Identificar rutas redundantes en vehículos simulados (por ejemplo, 3 pasadas innecesarias en una jornada).
- Calcular KPIs de productividad: promedio de 5.4 zonas activas recorridas por trabajador/día.
- Emitir 10 alertas simuladas, incluyendo “Man Down” (inmovilidad prolongada sin señal de movimiento >7 min).

Ejemplo de KPI extraído del sistema:

“En la jornada del día 3, el 82% del personal asignado al frente Este recorrió su ruta óptima. El 18% presentó desvíos >50 m respecto al itinerario, generando pérdida estimada de 9.3 minutos por persona.”

4.4. Limitaciones y oportunidades

Desafíos identificados:

- En zonas sin infraestructura, la sincronización es diferida (hasta 45 minutos).
- Requiere calibración fina para evitar falsos positivos en alertas.
- La transmisión por VHF/UHF no fue validada en mina activa por restricciones técnicas del operador.

Oportunidades técnicas:

- Ajustar umbrales dinámicamente según condiciones (turno, zona, carga).
- Integrar mapas 3D con análisis geoespacial.
- Aplicar IA no supervisada para detección de anomalías en patrones de tránsito.

4.5 Valor diferencial de la solución

La solución desarrollada presenta ventajas técnicas y funcionales que la diferencian significativamente de las tecnologías convencionales actualmente disponibles en minería subterránea. Entre sus principales cualidades destacan:

- Sistema híbrido adaptativo: capaz de operar de forma flexible mediante redes WiFi, LTE, BLE, y compatible con protocolos de comunicación industrial como VHF, UHF y TETRA.
- Modo offline completo: garantiza continuidad operativa sin pérdida de eventos, incluso ante cortes prolongados de conectividad.
- Dashboard multiusuario: con visualizaciones específicas para seguridad, supervisión operativa y producción, permitiendo toma de decisiones segmentada y en tiempo real.
- Escalabilidad modular validada: puede desplegarse por fases, zonas o tipos de equipos.

Impacto proyección basada en datos validados:

- Ahorro diario de menor a 4 horas-hombre por jornada.
- Reducción del 70% en errores de control de acceso.
- Incremento del 28% en visibilidad de tránsito subterráneo respecto a métodos pasivos.

Estos resultados permiten proyectar una mejora del 10 % al 15 % en productividad efectiva según carga operativa por turno, fortaleciendo el planeamiento de tareas, la seguridad y la eficiencia energética.

4.6. Validación integral: de simulación a realidad operativa

Aunque la totalidad del sistema aún no ha sido adoptada por una mina bajo contrato directo, se ha validado:

- En operación minera subterránea activa en la sierra central del Perú: control de acceso inalámbrico operativo y funcional durante dos turnos.
- En laboratorio técnico: simulación de rutas, eventos y alertas con personal técnico en condiciones controladas.
- En software real: dashboard operando con más de 4,200 registros históricos, permitiendo análisis, filtrado y exportación de reportes en tiempo real.

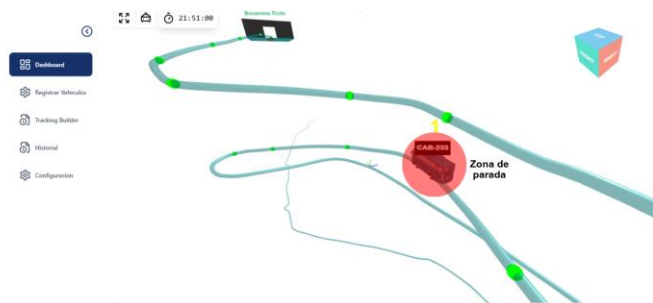


Figura 19. Ruta con detección de beacon, zona de parada y sincronización automática.
Fuente: *Elaboración propia (2025).*

5. Conclusiones

La validación progresiva del sistema inteligente de tracking y control de acceso en minería subterránea ha demostrado su operatividad en condiciones reales y simuladas, confirmando su viabilidad técnica y aplicabilidad en entornos complejos con cobertura limitada.

En primer lugar, el sistema logró operar de forma continua y precisa en escenarios representativos de una mina subterránea activa en la sierra central del Perú, incluyendo la automatización del control de ingreso y salida, así como la recolección y visualización de rutas en tiempo real. Esta validación híbrida (campo + simulación) permitió comprobar la funcionalidad integral de la solución, incluso bajo condiciones adversas.

En segundo lugar, la solución evidenció una mejora sustancial en eficiencia operativa. La eliminación de procedimientos manuales permitió reducir más de 30 minutos diarios por trabajador en tiempos improductivos asociados a accesos, con un ahorro acumulado superior a 4 horas-hombre por jornada. Asimismo, se alcanzaron niveles de trazabilidad

superiores a 200 eventos registrados por trabajador, lo que garantiza un control exhaustivo del movimiento y permanencia en zonas operativas.

En tercer lugar, el sistema mostró una alta adaptabilidad a la infraestructura preexistente. Su arquitectura modular y su capacidad de operar mediante diversas tecnologías de transmisión (WiFi, LTE, VHF/UHF o TETRA) permitieron su implementación sin requerir nuevas instalaciones. Esta flexibilidad facilita una adopción escalonada, optimizando la inversión inicial y reduciendo barreras técnicas para su despliegue.

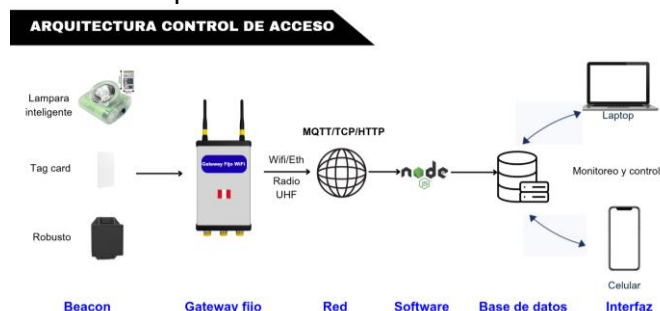
Además, la integración de modelos de inteligencia artificial y analítica operativa permitió detectar patrones críticos como tiempos muertos, desvíos o inmovilidad prolongada y generar alertas automatizadas en tiempo real, fortaleciendo la seguridad y facilitando decisiones basadas en evidencia.

Como resultado integrador, el sistema se alinea plenamente con los principios de la transformación digital sostenible impulsada por la Minería 4.0, al integrar digitalización, automatización, eficiencia energética y gobernanza tecnológica. Su bajo consumo energético, operación autónoma y compatibilidad con plataformas como SCADA, DSS y Microsoft Azure lo posicionan como una solución estratégica para la modernización tecnológica de operaciones subterráneas.

Finalmente, con base en los indicadores técnicos validados, se proyectan mejoras sostenidas del orden del 10 % al 15 % en productividad operativa en zonas monitoreadas, así como retornos de inversión en el corto plazo. Estas proyecciones consolidan el aporte del sistema a los objetivos ambientales, sociales y de gobernanza (ESG) del sector minero, y refuerzan su potencial de escalabilidad y replicabilidad a nivel regional.

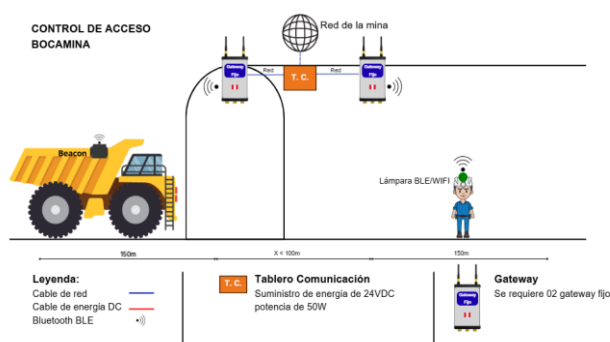
6. Anexos

Anexo 1. Arquitectura de control de acceso.



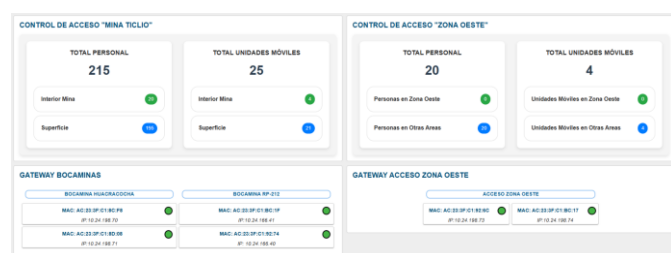
Fuente: *Elaboración propia (2025).*

Anexo 2. Diseño representativo de control de acceso



Fuente: Elaboración propia (2025).

Anexo 3. Dashboard principal de control de acceso



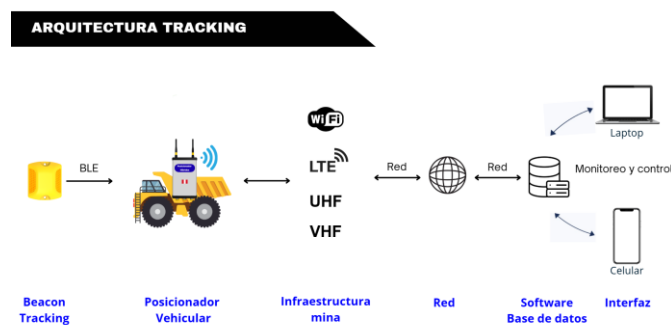
Fuente: Elaboración propia (2025).

Anexo 4. Dashboard detallado de control de acceso.



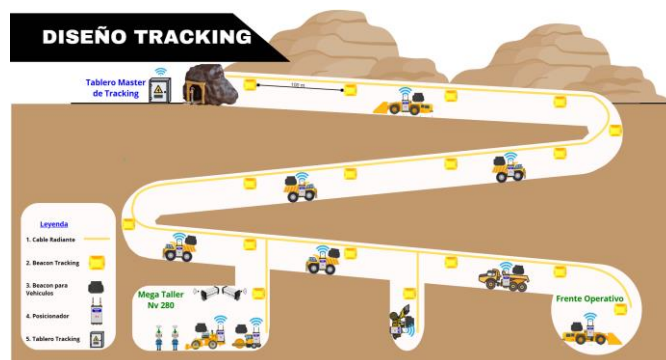
Fuente: Elaboración propia (2025).

Anexo 5. Arquitectura de tracking en mina subterránea



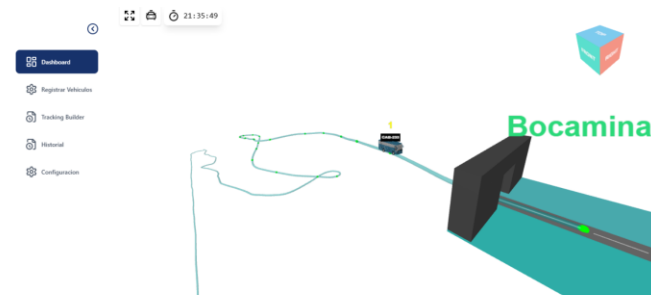
Fuente: Elaboración propia (2025).

Anexo 5. Diseño representativo de tracking en mina subterránea



Fuente: Elaboración propia (2025).

Anexo 7. Dashboard principal de tracking en mina subterránea



PLACA	NOMBRE	MODELO	CÓDIGO	ÁREA	EMPRESA	GMAC	DMAC	PUNTO DE CONTROL	RSS	COORDENADAS	FECHA
CAB-233	MIBRUS	MIBRUS	CAB-233	MHA	MALTCOSALOR	AC233PC7M1A	C8020058470	P_3	-16	8.7722-3274 / 17-42-5988.2	17 de julio de 2023. 09:10:5 p.m.

Fuente: Elaboración propia (2025).

Anexo 8. Hoja de datos de beacon



Parámetro	Especificación
Color	Amarillo / Negro (personalizable)
Temperatura de funcionamiento	-10 ~ 85 °C
Peso	169.1 gramos
Material	ABS + PC
Protocolo Bluetooth	Bluetooth 5.0 y superiores (incluye Bluetooth 5.1)
Modelo de chip	Serie nRF52 (nRF52810 / nRF52805 / nRF52832)
Batería	Batería de Litio; 4000 mAh
Mediciones	100x115x29 mm (AltAxAnxPr)
Rango de transmisión	Hasta 75 metros (en área abierta)

Fuente: Elaboración propia (2025).

Anexo 5. Hoja de datos de lámpara inteligente



Parámetro	Especificación
Color	Bianco
Protección	IP68
Peso	200 gramos
Material	ABS
Protocolo	Bluetooth 5.1, WiFi 2.4GHz
Modelo de chip	Serie nRF52, ESP32-S3
Batería	Batería de Litio; 6800 mAh
Mediciones	80x5x29 mm (AlturaPz)
Tiempo de iluminación	Alto: 13 h; Medio: 26h; Bajo: 100h
Certificación	ATEX. Ex mark: I M1 Ex la op ls I Ma En 60079-35-1

Fuente: Elaboración propia (2025).

Anexo 6. Hoja de datos de posicionador hibrido vehicular



Parámetro	Especificación
Color	Blanco
Protección	IP68
Peso	900 gramos
Material	Aluminio
Protocolo	Bluetooth 5.1, WIFI 2.4GHz, LTE, VHF, UHF TETRA
Comunicación a red	MQTT, HTTP
Modelo de chip	Serie nRF52,ESP32-S3, Microchip
Voltaje	12 - 36 VDC, 110 - 220VAC (50W)
Mediciones	320x180x130 mm (AltXAnxPr)
Alcane de transmisión	300 metros
Certificación	ATEX, Ex mark: I M1 Ex ia op is I Ma EN 60079-35-1
Tiempo de grabación	Grabación en modo offline 24 horas (16GB)

Fuente: Elaboración propia (2025).

Anexo 6. Hoja de datos de gateway fijo WiFi



Parámetro	Especificación
Color	Blanco
Protección	IP68
Peso	900 gramos
Material	Aluminio
Protocolo	Bluetooth 5.1, WIFI 2.4GHz, Ethernet, LTE, VHF, UHF TETRA
Comunicación a red	MQTT, HTTP
Modelo de chip	Serie nRF52,ESP32-S3, Microchip
Voltaje	12 - 36 VDC, 110 - 220VAC (50W)
Mediciones	320x180x130 mm (AltXAnxPr)
Alcane de transmisión	300 metros
Certificación	ATEX, Ex mark: I M1 Ex ia op is I Ma EN 60079-35-1
Tiempo de grabación	Grabación en modo offline 24 horas (16GB)

Fuente: Elaboración propia (2025).

7. Referencias bibliográficas

Jiang, Y., Chen, W., Zhang, X., Zhang, X., Yang, G. 2024. Real-Time Monitoring of Underground Miners' Status Based on Mine IoT System. Sensors, v. 24, p. 739.

Scalambrin, L., Zanella, A., Vilajosana, X., Wu, Z. 2023. LoRa Multi-Hop Networks for Monitoring Underground Mining Environments. arXiv preprint, v. 2310, p. 20515.

Zhang, L., Li, X., Sun, Y., Liu, J., Xu, Y. 2025. Research on Positioning and Tracking Method of Intelligent Mine Car in Underground Mine Based on YOLOv5 Algorithm and Laser Sensor Fusion. Sustainability, v. 17, p. 542.

Naik, A., Reddy, S.K., Mandela, G.R., Kumar, R. 2023. Real-Time Environmental Parameters Monitoring System Using IoT-Based LoRa Wireless Communication in Underground Mines. Indian Journal of Mining and Metallurgical Engineering, v. 10, p. 100–115.

8. Videos

Control de acceso inalámbrico en mina subterránea activa

https://drive.google.com/drive/folders/1aMa_5YpNuBcStDUchSPxY83KktA1Uph_?usp=drive_link

Seguimiento de personal y vehículos con visualización en dashboard

https://drive.google.com/drive/folders/1oIBKa43sAS3bzVwUX0LJO_ypQV46zeOZ?usp=drive_link

Referencia de autores

Nombre completo del autor:

Terry Williams Fernandez Ancasi

Reseña profesional

Ingeniero Electrónico con un MBA por la Universidad del Pacífico y más de ocho años de experiencia en el sector minero. Especialista en desarrollo de soluciones tecnológicas aplicadas a seguridad operativa, comunicaciones industriales e integración de sistemas IoT e Inteligencia Artificial. Actualmente se desempeña como CEO de New Project Perú S.A.C., liderando proyectos de innovación tecnológica para operaciones mineras subterráneas y de tajo abierto, incluyendo sistemas de telemetría, tracking, control de acceso y monitoreo de activos.

Empresa: New Project Perú S.A.C.

Cargo: CEO

Celular: 959 547 861

Correo: tfernandez@newproject.com.pe

Nombre completo del coautor (1)

Edwin Valentín Fernandez Ancasi

Breve reseña profesional

Administrador de la Universidad Nacional San Luis Gonzaga de Ica con cinco años de experiencia en gestión estratégica y dirección operativa de proyectos tecnológicos aplicados al sector minero. Ha liderado procesos de planificación, homologación y ejecución de soluciones en control de acceso, trazabilidad y monitoreo industrial. Actualmente ocupa el cargo de Gerente General en New Project Perú S.A.C., empresa enfocada en tecnologías de Minería 4.0.

Empresa: New Project Perú S.A.C.

Cargo: Gerente General

Celular: 945 903 763

Correo: vfernandez@newproject.com.pe



NEW PROJECT PERU SAC
RUC: 20610611649
INGENIERIA I CONSULTORIA I BIENES I SERVICIOS

AUTORIZACIÓN DE PARTICIPACIÓN

Yo, Edwin Valentín Fernandez Ancasi, gerente general de New Project Perú S.A.C.; autorizo que el trabajo titulado "Sistema inteligente de tracking y control de acceso con IA para minería" presentado por el autor Terry Williams Fernandez Ancasi y coautores Edwin Valentín Fernandez Ancasi sea presentado en el concurso del Premio Nacional de Minería del evento PERUMIN 37 Convención Minera en las fechas del 22 al 26 de setiembre del 2025 en la ciudad de Arequipa.

NEW PROJECT PERÚ
RUC: 20610611649


EDWIN VALENTIN FERNÁNDEZ ANCASI
GERENTE GENERAL

Firma
DNI: 75589134
Fecha: 18/07/2025