

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TESIS

**Implementación del sistema de voladura agrupada con
detonadores electrónicos para mejorar la seguridad y
productividad en minería subterránea**

Para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas

Elaborado por

Junior Angel Flores Llerena

 [0009-0004-4557-9439](https://orcid.org/0009-0004-4557-9439)

Asesor

MBA. Eder León Salazar Dulanto

 [0000-0002-1400-3144](https://orcid.org/0000-0002-1400-3144)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Flores Llerena [1]
Referencia/Reference	[1] J. Flores Llerena, <i>“Implementación del sistema de voladura agrupada con detonadores electrónicos para mejorar la seguridad y productividad en minería subterránea”</i> [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Flores, 2025)
Referencia/Reference	Flores, J. (2025). <i>Implementación del sistema de voladura agrupada con detonadores electrónicos para mejorar la seguridad y productividad en minería subterránea</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

Dedicado a mis padres; Sonia y Ángel, por su amor incondicional y por siempre estar orgullosos de mí; a mi esposa; Grace, por su compañía; a mi pequeño Dariel, por motivarme a lograr mis objetivos y a mis hermanos, quienes siempre comparten mis logros.

Agradecimientos

Agradecido siempre con Dios, que siempre me acompaña y protege. A mis padres, Sonia y Ángel, quienes aportaron en mi educación y motivaron a seguir una meta. A mí esposa Grace e hijo Dariel, quiénes me motivaron a desarrollar este trabajo de investigación para terminar de formarme. Al ingeniero Juber Villanueva y al equipo de Raura por el soporte brindado.

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo evaluar la implementación de un sistema de iniciación electrónica alámbrica, denominado “Voladura Agrupada”, como alternativa a los métodos convencionales de disparo en minería subterránea. Este sistema se fundamenta en el uso de detonadores electrónicos conectados a una troncal de cableado principal y ramales secundarios, los cuales permiten iniciar de manera remota las mallas de voladura mediante un equipo Blaster ubicado en el nivel 4200 de la mina. La señal de disparo se transmite desde un entorno ventilado y alejado de la zona de influencia de la voladura, lo que contribuye a reducir la exposición del personal a riesgos operativos.

Para validar su desempeño se llevaron a cabo alrededor de diez pruebas de disparo en distintos frentes de producción. Durante estas pruebas se registraron indicadores de desempeño (KPI's) orientados a medir la eficiencia operativa de los equipos, la continuidad de las labores y la mejora en los estándares de seguridad. Los resultados demostraron el funcionamiento adecuado del sistema, evidenciando su capacidad para eliminar la necesidad de vigías y personal encargado del chispeo manual en los frentes, así como para optimizar los tiempos de preparación y ejecución de la voladura.

Adicionalmente, la implementación de la Voladura Agrupada fortalece la gestión de seguridad, ya que reduce de manera significativa la exposición de los trabajadores a gases residuales y a zonas de riesgo, mejorando las condiciones de trabajo en interior mina. A nivel operativo, se observa un impacto positivo en la productividad, al garantizar un control más preciso y seguro del inicio de la voladura.

En conclusión, la Voladura Agrupada se presenta como una alternativa viable para modernizar los procesos de voladura subterránea, aportando beneficios en seguridad, eficiencia y sostenibilidad de la operación minera.

Palabras clave — Voladura convencional, voladura electrónica, seguridad minera, productividad, gestión operativa.

Abstract

This research aims to evaluate the implementation of a wired electronic initiation system, known as “Group Blasting”, as an alternative to conventional blasting methods in underground mining. The system is based on the use of electronic detonators connected to a main trunk line and secondary branches, which allow remote initiation of blasting patterns through a Blaster device located at level 4200 of mine. The firing signal is transmitted from a ventilated area, away from the blasting influence zone, thereby reducing personnel exposure to operational risks.

To validate its performance, approximately ten blasting trials were carried out in different production faces. During these trials, key performance indicators (KPIs) were recorded to measure equipment efficiency, operational continuity, and improvements in safety standards. The results demonstrated the proper functioning of the system, highlighting its capacity to eliminate the need for guards and personnel in charge of manual ignitions at the faces, as well as to optimize preparation and blasting times.

Furthermore, the implementation of Grouped Blasting strengthens safety management by significantly reducing workers’ exposure to residual gases and hazardous areas, thereby improving working conditions in underground mining. At the operational level, the system has a positive impact on productivity by ensuring a safer and more precise control of the blasting initiation.

In conclusion, Grouped Blasting emerges as a viable alternative to modernize underground blasting processes, delivering benefits in terms of safety, efficiency, and sustainability of mining operations.

Keywords — Conventional blasting, electronic blasting, mining safety, productivity, operational management.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	xiv
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Descripción del problema de investigación.....	2
1.3 Objetivo.....	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivos específicos	3
1.4 Hipótesis	3
1.4.1 Hipótesis general	3
1.4.2 Hipótesis específicas.....	4
1.5 Operacionalización de variables.....	4
1.5.1 Variable independiente (V.I).....	4
1.5.2 Variable dependiente (V.D)	4
1.6 Antecedentes referenciales	6
1.6.1 Antecedentes internacionales	6
1.6.2 Antecedentes nacionales	8
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual.....	10
2.1 Marco teórico	10
2.1.1 Seguridad y salud ocupacional en minería	10
2.1.2 Accesorios de voladura	12
2.1.3 Voladura en subterránea.....	14
2.1.4 Sistemas de iniciación.....	15
2.1.5 Sistemas de comunicación en interior mina	19
2.1.6 Sistemas de iniciación electrónica.....	24

2.2	Marco conceptual.....	26
2.2.1	Accidente	26
2.2.2	Ciclo.....	26
2.2.3	Comunicación	26
2.2.4	Control	26
2.2.5	Detonador	26
2.2.6	Eficiencia.....	26
2.2.7	Energía	26
2.2.8	Explosivo.....	26
2.2.9	Fragmentación	26
2.2.10	Fragmento.....	27
2.2.11	GEBS.....	27
2.2.12	Gestión.....	27
2.2.13	Peligro.....	27
2.2.14	Retardo	27
2.2.15	Riesgo.....	27
2.2.16	Seguridad.....	27
2.2.17	Sistema	27
2.2.18	Trazabilidad	27
2.2.19	Ventilación	27
2.2.20	Voladura.....	28
	Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación	29
3.1	Recopilación de información	29
3.1.1	Unidad de estudio	29
3.1.2	Estándar de voladura e impacto en la operación.....	38
3.1.3	Diagnóstico del procedimiento de iniciación convencional.....	40
3.1.4	Propuesta técnica: sistema de voladura agrupada con iniciación electrónica	41
3.1.5	Verificación de la Infraestructura de Telecomunicaciones en Interior Mina.....	44

3.1.6 Metodología de implementación.....	45
3.1.7 Protocolos de seguridad y control operacional	48
3.1.8 Procedimientos post-voladura	49
3.1.9 Registro de datos e indicadores de control.....	52
3.2 Procesamiento de información	52
3.2.1 Organización de la información	52
3.2.2 Consolidación de indicadores técnicos y de seguridad.....	54
3.2.3 Verificación y trazabilidad de la información	55
Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados	57
4.1 Seguridad y salud ocupacional.....	57
4.1.1 Eliminación del riesgo de exposición.....	57
4.1.2 Control de acceso y autenticación.....	58
4.1.3 Ventilación y control de gases post-voladura	58
4.2 Análisis del sistema de funcionamiento del sistema electrónico	59
4.2.1 Incidentes operativos asociados a la voladura	59
4.2.2 Frentes no iniciados por el sistema electrónico.	60
4.2.3 Desvíos en la secuencia de disparo	61
4.2.4 Cancelación de voladura.....	62
4.3 Eficiencia y gestión del tiempo operativo.....	63
4.4 Evaluación técnica: fragmentación, daño y estabilidad.....	66
4.5 Análisis económico	66
4.6 Prueba de hipótesis.....	68
Conclusiones	72
Recomendaciones	73
Referencias bibliográficas	74
Anexos	75

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 : Matriz de consistencia.....	5
Tabla 2 : Cuadro resumen de voladuras centralizadas	47
Tabla 3 : Verificación de comunicación para voladura centralizada	49
Tabla 4 : Indicadores de seguridad y eficiencia.....	54
Tabla 5 : Indicadores de seguridad antes y después de la implementación	57
Tabla 6 : Indicadores de ventilación y consumo energético antes y después.....	59
Tabla 7 : Evaluación por cancelaciones del disparo.....	62
Tabla 8 : Beneficio en metros de avance	65
Tabla 9 : Beneficio en toneladas perforadas	65
Tabla 10: Comparación de indicadores operativos antes y después.....	66
Tabla 11: Análisis económico	67
Tabla 12: Indicadores de evaluación económica.....	68
Tabla 13: Resumen de consecuencias del Sistema de Voladura Electrónica	69
Tabla 14: Prueba de Wilcoxon usando software Minitab.....	71

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 : Distribución de los taladros en una malla de voladura	15
Figura 2 : Detonador	16
Figura 3 : Características del detonador eléctrico	17
Figura 4 : Características del detonador no eléctrico	18
Figura 5 : Componentes del detonador electrónico EVOLUTION.....	19
Figura 6 : Funcionamiento del Leaky Feeder	20
Figura 7 : Funcionamiento del sistema basado en nodos	21
Figura 8 : Funcionamiento del RF SIGNAL	22
Figura 9 : Funcionamiento del RFID	23
Figura 10: Topología del sistema inalámbrico “Mesh”	24
Figura 11: Ubicación de la mina.....	30
Figura 12: Columna estratigráfica local.....	33
Figura 13: Plano geológico local	35
Figura 14: Plano de ubicación de sectores unidad Minera Raura.....	38
Figura 15: Actividades del procedimiento estándar de chispeo.....	39
Figura 16: Esquema conceptual del sistema de voladura agrupada	42
Figura 17: Diseño general de red principal de comunicación subterránea	45
Figura 18: Configuración del sistema de voladura agrupada durante la prueba piloto	48
Figura 19: Reportes automático de voladura	50
Figura 20: Reportes automáticos de detonadores.....	51
Figura 21: Reportes automáticos de control diario	52
Figura 22: Protocolo de registro e iniciación de voladura agrupada	53
Figura 23: Pantalla de control de la BCU	55
Figura 24: Incidentes operativos asociados a la voladura	60
Figura 25: Fallas de iniciación de la malla electrónica.....	61
Figura 26: Desvíos en la secuencia de disparo.....	62

Figura 27: Cancelaciones del disparo	63
Figura 28: Monitoreo de voladuras agrupadas	64
Figura 29: Probabilidad de normalidad de datos sin implementar GEBS	70
Figura 30: Probabilidad de normalidad de datos implementando GEBS	70

Glosario

BCU:

Blast Control Unit (Unidad de Control de Voladura)

B/C:

Relación Beneficio/Costo

EBS:

Electronic Blasting System (Sistema de Voladura Electrónica)

GEBS:

Grouped Electronic Blasting System (Sistema de Voladura Electrónica Agrupada)

IPERC:

Identificación de Peligros, Evaluación de Riesgos y sus Controles

PETN:

Pentrita (Pentaeritrol tetranitrato)

PETS:

Procedimiento Escrito de Trabajo Seguro

RFID:

Radio Frequency Identification (Identificación por Radiofrecuencia)

SSO:

Seguridad y Salud Ocupacional

TIR:

Tasa Interna de Retorno

VAN:

Valor Actual Neto

Introducción

La minería subterránea moderna enfrenta el desafío constante de optimizar la seguridad y la eficiencia de sus operaciones. En este escenario, la voladura de roca es una de las etapas más críticas del ciclo de minado, ya que su ejecución impacta directamente en la productividad, los costos y, fundamentalmente, en la seguridad del personal. Los métodos de iniciación convencionales, como el encendido manual de mechas o "chispeo", exponen a los trabajadores a riesgos significativos, como detonaciones prematuras y la presencia de gases tóxicos. Frente a esta problemática, las tecnologías de iniciación electrónica remota, como los sistemas de voladura agrupada, surgen como una alternativa avanzada que permite centralizar y controlar los disparos desde una ubicación segura, abriendo un campo de análisis para identificar mejoras sustanciales en la gestión de riesgos y la continuidad operativa.

El presente trabajo de investigación se estructura en cuatro capítulos principales, organizados de forma secuencial para ofrecer una comprensión clara del problema, el marco conceptual, la metodología de implementación y los resultados obtenidos:

Capítulo I corresponde a la parte introductoria, donde se exponen las generalidades de la voladura en minería subterránea y se describe el problema de investigación, enfocado en los riesgos y limitaciones del método de iniciación convencional. Se formulan los objetivos generales y específicos que guían el estudio, orientados a evaluar cómo un sistema de voladura agrupada puede reducir riesgos y mejorar la eficiencia. Asimismo, se plantean las hipótesis que sostienen que la implementación de esta tecnología disminuirá la exposición del personal y optimizará los tiempos del ciclo de minado. Finalmente, se revisan antecedentes referenciales, tanto nacionales como internacionales, que contextualizan el estado del arte en el uso de sistemas de iniciación remota y electrónica, fundamentando la relevancia del estudio.

Capítulo II desarrolla el marco teórico y conceptual que sustenta la investigación. Se abordan los fundamentos de la Seguridad y Salud Ocupacional en minería, definiendo conceptos clave como accidente, incidente, peligro y riesgo según la normativa vigente. Se describen en detalle los accesorios de voladura convencionales y los diferentes sistemas de iniciación, desde los más básicos hasta los detonadores electrónicos, explicando sus componentes y principios de funcionamiento. Además, se explican las tecnologías de comunicación en interior mina, como las redes Leaky Feeder y Wi-Fi, que son la base para la operación de sistemas de disparo remoto.

Capítulo III se centra en el desarrollo del trabajo de investigación. Se describe la unidad de estudio, una operación minera subterránea donde se implementó el sistema, y se presenta el enfoque metodológico cuantitativo-aplicativo. Se detalla el diagnóstico del procedimiento de iniciación convencional y sus limitaciones, justificando la propuesta técnica del sistema de voladura agrupada con detonadores electrónicos. A continuación, se describe la metodología de implementación en sus cuatro fases: planificación, instalación de la infraestructura de comunicación, verificación y calibración del sistema, y la ejecución de las pruebas piloto controladas en frentes de avance seleccionados.

Capítulo IV presenta el análisis y la discusión de los resultados obtenidos. Se evalúa el desempeño técnico del sistema en términos de coordinación, precisión y trazabilidad, destacando la reducción de la dispersión temporal y el control de la comunicación. Se analiza la mejora en la eficiencia y la gestión del tiempo operativo, cuantificando la reducción en los periodos no productivos del ciclo de voladura. Se aborda el impacto en la seguridad y salud ocupacional, principalmente la eliminación del riesgo de exposición del personal. Finalmente, se realiza un análisis económico que demuestra la rentabilidad del sistema y se contrastan las hipótesis planteadas con la evidencia estadística recopilada.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

En la minería subterránea, la voladura constituye una de las operaciones esenciales dentro del ciclo de minado, siendo el método más empleado para la fragmentación del macizo rocoso y el avance de labores. Este proceso demanda una planificación técnica detallada que involucra el diseño del patrón de perforación, la selección del tipo de explosivo, el carguío de los taladros y la secuencia de iniciación, con el propósito de alcanzar una fragmentación controlada, eficiente y segura.

Tradicionalmente, el carguío se realiza introduciendo cartuchos de explosivo y accesorios de iniciación convencional como la mecha lenta, el cordón detonante y los detonadores comunes en los taladros, siguiendo un esquema secuencial preestablecido. La iniciación, conocida como chispeo, se efectúa manualmente mediante el encendido de la mecha lenta, lo que obliga al personal a permanecer en el frente hasta el momento de la ignición. Este procedimiento, aun ampliamente utilizado en minas subterráneas de pequeña y mediana escala, presenta limitaciones operativas y de seguridad, ya que implica la exposición directa del trabajador a explosivos activos, el riesgo de encendido prematuro y la presencia inmediata de gases tóxicos tras la detonación.

Con el avance tecnológico de los últimos años, la industria minera ha incorporado sistemas de iniciación más precisos y seguros, como los detonadores electrónicos y las plataformas de disparo remoto. Estas tecnologías permiten controlar con exactitud los tiempos de retardo, mejoran la fragmentación del material y reducen significativamente la exposición del personal a zonas de riesgo. Además, favorecen una integración más eficiente con las etapas de carguío, ventilación y transporte, optimizando el ciclo completo de minado.

En este contexto, el estudio de la voladura agrupada adquiere una relevancia estratégica, al representar una evolución del método convencional hacia un sistema de iniciación centralizado y controlado de forma remota. Su implementación contribuye a

fortalecer la gestión de seguridad, mejorar la eficiencia operativa y promover condiciones más seguras y sostenibles en la minería subterránea moderna.

1.2 Descripción del problema de investigación

La actividad de voladura en minería subterránea constituye una de las operaciones más sensibles y críticas del ciclo de minado debido al manejo de explosivos en espacios confinados con ventilación limitada. Los métodos de iniciación tradicionalmente empleados obligan al personal a mantenerse en zonas cercanas al frente de trabajo durante el chispeo, exponiéndolos a riesgos de encendidos prematuros, fallas de iniciación y contacto temprano con gases residuales. Esta exposición directa incrementa la probabilidad de accidentes y afecta la seguridad integral de la operación.

A ello se suma que la dispersión de los frentes de avance y la falta de un control centralizado durante el proceso de voladura generan mayores tiempos de evacuación, ventilación y verificación antes del reingreso a las labores. Estas condiciones no solo prolongan la interrupción del ciclo operativo, sino que también elevan los costos energéticos asociados al uso extendido de sistemas de ventilación. La acumulación de tiempos muertos y la necesidad constante de resguardar la integridad del personal impactan directamente en la continuidad y productividad de la operación subterránea.

Finalmente, la limitada incorporación de innovaciones y mejoras en los procesos de iniciación mantiene vigentes prácticas que ya no responden adecuadamente a las exigencias actuales de seguridad y eficiencia en interior mina. Esta brecha tecnológica evidencia una problemática estructural que afecta la gestión operativa y dificulta la reducción de riesgos inherentes al trabajo con explosivos en ambientes confinados. En conjunto, estos factores configuran un escenario donde la voladura representa un punto crítico que requiere atención prioritaria para garantizar operaciones más seguras y eficientes.

A partir de ello, se plantean las siguientes interrogantes de investigación:

¿En qué medida el uso inadecuado de la voladura tradicional con detonadores pirotécnicos aumenta el número de accidentes durante el proceso de voladura en una mina subterránea?

¿Cómo las condiciones actuales del proceso de voladura tradicional influyen en la ocurrencia de accidentes, considerando la exposición directa del personal a zonas de riesgo durante la voladura?

¿De qué manera los procedimientos operativos vigentes afectan la eficiencia del ciclo de minado, en relación con los tiempos de evacuación, ventilación y reingreso a la labor después del disparo?

1.3 Objetivo

1.3.1 Objetivo general

Evaluar la implementación de un sistema de voladura agrupada con detonadores electrónicos en minería subterránea, con el propósito de reducir los riesgos asociados a la iniciación convencional, mejorar la eficiencia operativa y optimizar la gestión de ventilación en interior mina.

1.3.2 Objetivos específicos

- Analizar el impacto del sistema de voladura agrupada en la reducción de accidentes durante la etapa de iniciación y disparo, mediante la eliminación de la exposición directa del personal en zonas de riesgo.
- Evaluar la influencia del sistema de voladura agrupada de iniciación remota en la eficiencia operativa y continuidad del ciclo de minado, considerando los tiempos de evacuación, ventilación y retorno a la labor.

1.4 Hipótesis

1.4.1 Hipótesis general

La implementación de un sistema de voladura agrupada con detonadores electrónicos en minería subterránea reduciría significativamente los riesgos asociados al método convencional de iniciación, mejoraría la eficiencia operativa del ciclo de minado y los tiempos de ventilación.

1.4.2 Hipótesis específicas

- El uso de un sistema de voladura agrupada con iniciación remota disminuiría la exposición directa del personal en la zona de disparo, reduciendo la probabilidad de accidentes durante la etapa de voladura.
- La centralización del proceso de iniciación mediante detonadores electrónicos incrementaría la continuidad operativa y reducirá los tiempos improductivos entre ciclos de disparo y ventilación.

1.5 Operacionalización de variables

1.5.1 Variable independiente (V.I)

X1: Sistema de voladura agrupada

- Detonadores electrónicos

1.5.2 Variable dependiente (V.D)

Y1: Seguridad

- Protocolo de voladura
- Tiempo de ventilación

Y2: Seguridad operacional

- Pruebas de detonadores inertes
- Distancia operativa del disparo

Y3: Eficiencia operativa del ciclo de minado

- Metraje del avance.
- Consumo energético ventilador

Tabla 1

Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLE	INDICADORES
<p>Problema general</p> <p>¿En qué medida el uso inadecuado de la voladura tradicional con detonadores pirotécnicos aumenta el número de accidentes durante el proceso de voladura en una mina subterránea?</p>	<p>Objetivo general</p> <p>Evaluar la implementación de un sistema de voladura agrupada con detonadores electrónicos en minería subterránea, con el propósito de reducir los riesgos asociados a la iniciación convencional, mejorar la eficiencia operativa y optimizar la gestión de ventilación en interior mina.</p>	<p>Hipótesis general</p> <p>La implementación de un sistema de voladura agrupada con detonadores electrónicos en minería subterránea reduciría significativamente los riesgos asociados al método convencional de iniciación, mejoraría la eficiencia operativa del ciclo de minado y los tiempos de ventilación.</p>	<p>Y1: Dependiente / Efecto</p> <p>Seguridad</p>	<p>- Cumplimiento de protocolos de disparo: 100%. - Tiempo de ventilación post-voladura: 45 min (antes: 65 min, mejora 31%).</p>
<p>Problema específico 1</p> <p>¿Cómo las condiciones actuales del proceso de voladura tradicional influyen en la ocurrencia de accidentes, considerando la exposición directa del personal a zonas de riesgo durante la voladura?</p>	<p>Objetivo específico 1</p> <p>Analizar el impacto del sistema de voladura agrupada en la reducción de accidentes durante la etapa de iniciación y disparo, mediante la eliminación de la exposición directa del personal en zonas de riesgo.</p>	<p>Hipótesis específica 1</p> <p>El uso de un sistema de voladura agrupada con iniciación remota disminuiría la exposición directa del personal en la zona de disparo, reduciendo la probabilidad de accidentes durante la etapa de voladura.</p>	<p>X1: Independiente / Causa</p> <p>Sistema de voladura agrupada con detonadores electrónicos</p>	<p>- Número de incidentes o eventos: 0 (reducción del 100%). - Distancia operativa entre operador y frente: 320 m (antes: 12 m).</p>
<p>Problema específico 2</p> <p>¿De qué manera los procedimientos operativos vigentes afectan la eficiencia del ciclo de minado, en relación con los tiempos de evacuación, ventilación y reingreso a la labor después del disparo?</p>	<p>Objetivo específico 2</p> <p>Evaluar la influencia del sistema de voladura agrupada de iniciación remota en la eficiencia operativa y continuidad del ciclo de minado, considerando los tiempos de evacuación, ventilación y retorno a la labor.</p>	<p>Hipótesis específica 2</p> <p>La centralización del proceso de iniciación mediante detonadores electrónicos incrementaría la continuidad operativa y reducirá los tiempos improductivos entre ciclos de disparo y ventilación.</p>	<p>Y3: Dependiente / Efecto</p> <p>Eficiencia operativa</p>	<p>-Avance promedio mensual: 142 m/mes (antes: 128 m/mes, mejora 10.9%). -Consumo energético de ventiladores: 102 kWh/voladura (antes: 125 kWh, ahorro 18%).</p>

Nota: Fuente elaboración propia.

1.6 Antecedentes referenciales

1.6.1 Antecedentes internacionales

Fundación UOCRA (2009). Salud y Seguridad en trabajos de minería. En OIT. Una de las aplicaciones de la iniciación remota con red Ethernet realizada en el exterior, se dio en la Minera Tizapa – Grupo Peñoles en México. La implementación se inició en el año 2019 con la instalación de la infraestructura necesaria a lo largo de la mina al igual que las configuraciones de la red y finalmente con la capacitación. Para inicios del año 2022 ya superaron las 6000 voladuras iniciadas desde un centro de operaciones seguras, ofreciendo mejoras en la seguridad del personal, al tener menos contacto con el material explosivo y exponerse mucho menos a riesgos tales como caída de roca, gaseamiento, entre otros.

Szumny, M., Mertuszka, P., Fulawka, K., Koziarz, E., & Saiang, D. (2020). Blasting Operations Using Different Initiation Methods in Deep Underground Mines. Este estudio, realizado en minas de cobre profundas en Polonia, tuvo como objetivo comparar los sistemas de iniciación no eléctricos con los electrónicos en el marco de operaciones de voladura múltiple o group blasting. La metodología incluyó la instrumentación de los frentes con sensores sísmicos y equipos de registro de vibraciones para evaluar el control del retardo y la respuesta dinámica del macizo rocoso frente a diferentes secuencias de disparo. Los resultados demostraron que los detonadores electrónicos permiten una sincronización mucho más precisa entre los tiempos de retardo, generando una reducción significativa en la magnitud y frecuencia de las vibraciones inducidas. Además, se comprobó que el uso de sistemas de iniciación electrónica mejora la estabilidad geomecánica de las labores profundas, al disminuir la probabilidad de eventos de rockburst y otros fenómenos asociados a liberaciones súbitas de energía. En conclusión, la investigación evidenció que la voladura agrupada con detonadores electrónicos constituye una alternativa tecnológica de alto valor para optimizar la seguridad y el control sísmico en operaciones subterráneas de gran profundidad.

Rapokhin, A., & Akgün, F. (2023). Blastweb Central Electronic Initiation System for Improving Safety and Efficiency. Presentado en el 5° Simposio Internacional de Excavaciones Subterráneas (Turquía), este trabajo analiza la aplicación del sistema centralizado de iniciación electrónica Blastweb, desarrollado para la gestión remota y simultánea de múltiples puntos de disparo en minas subterráneas. El estudio se enfocó en demostrar cómo la centralización de la iniciación contribuye a incrementar la seguridad operativa y reducir la exposición del personal a zonas críticas, además de optimizar la eficiencia global del ciclo de minado. El sistema Blastweb permite la comunicación bidireccional entre el centro de control y los detonadores, posibilitando la activación sincronizada de grupos de frentes desde una ubicación segura y ventilada. Los resultados indicaron mejoras significativas en la coordinación de las voladuras, reducción de tiempos de preparación y mayor confiabilidad en la secuencia de detonación. Aunque el término “voladura agrupada” no se menciona explícitamente, el principio de disparo remoto centralizado guarda estrecha relación con este concepto, consolidando su aplicación como una práctica moderna orientada a la seguridad y eficiencia en minería subterránea.

Dyno Nobel (2015). Aplicación de detonadores electrónicos DigiShot® Plus en minería subterránea de barrenos largos (Lac des Iles, Canadá). En la mina Lac des Iles, Canadá, se implementó el sistema de iniciación electrónica DigiShot® Plus de Dyno Nobel con el propósito de incrementar la tasa de producción y reducir los costos operativos en operaciones subterráneas de perforación de barrenos largos de hasta 50 metros de profundidad. El sistema, diseñado con cables de alta resistencia a la tracción y conectores herméticos de doble aislamiento, permite una comunicación bidireccional mediante chip electrónico y la iniciación remota desde superficie a través de cable radiante. Esta tecnología posibilitó la activación simultánea de hasta 7200 detonadores con retardos de alta precisión, reduciendo la necesidad de múltiples disparos y optimizando la economía de escala. Los resultados mostraron un aumento en la eficiencia de carga, mejoras en la fragmentación y una reducción del 10% en los costos de voladura, además de disminuir en un 5% el tiempo de preparación de los tajos. La experiencia de Lac des Iles constituye

un referente internacional en la aplicación de sistemas de detonación electrónica remota, evidenciando su potencial para optimizar la productividad y la seguridad en minería subterránea moderna.

1.6.2 Antecedentes nacionales

Orica (2010). Implementación de detonadores electrónicos en Hochschild (Pallancata). Durante el periodo comprendido entre agosto de 2010 y enero de 2011 se llevaron a cabo pruebas en la Unidad Minera Pallancata, perteneciente al Grupo Hochschild, con el objetivo de evaluar el desempeño del sistema de iniciación electrónica eDev (EBS). Se aplicaron esquemas mixtos con un 70% de detonadores electrónicos y un 30% no eléctricos, así como configuraciones con el 100% de iniciadores electrónicos, a fin de medir su impacto en la sobre-rotura, el avance efectivo por disparo y los costos operativos del proceso de perforación y voladura. Los resultados demostraron mejoras significativas en la seguridad operacional, una mayor flexibilidad en la programación de las voladuras y una reducción de costos asociada al control preciso de los tiempos de retardo. Esta experiencia constituye uno de los primeros antecedentes en el Perú sobre la adopción de sistemas de iniciación electrónica, sentando las bases para la posterior aplicación de voladuras agrupadas controladas de manera remota.

Nexa Resources — Unidad Cerro Lindo (s.f.). Iniciación remota de frentes de producción mediante red Leaky Feeder. En esta unidad minera se desarrollaron pruebas de iniciación remota de voladuras utilizando la infraestructura de comunicación de red Leaky Feeder, tanto en voladuras de producción tipo slot como en frentes mineralizados. El objetivo principal fue ejecutar disparos agrupados desde un centro de control seguro, reduciendo la exposición directa de los trabajadores al frente y optimizando el tiempo de disparo. Los resultados obtenidos evidenciaron una reducción considerable de los tiempos de espera entre detonaciones, una mejor coordinación operativa y una mayor continuidad en el ciclo productivo, consolidando esta experiencia como un referente nacional en la aplicación de tecnologías de voladura agrupada y control remoto en minería subterránea.

Sistema GEBS — Proyecto de Implementación Local (s.f.). Sistema de voladura electrónica agrupada (GEBS) en operaciones subterráneas peruanas. El proyecto GEBS (Grouped Electronic Blasting System) se desarrolló como una iniciativa tecnológica orientada a la automatización y centralización del proceso de voladura en minas subterráneas peruanas, permitiendo la iniciación agrupada y simultánea de múltiples frentes mediante comunicación electrónica bidireccional controlada desde un punto central. Las pruebas piloto realizadas en distintas operaciones reportaron incrementos en los metros de avance por ciclo, reducción de tiempos muertos y mejora sustancial de la seguridad al eliminar la exposición del personal durante la iniciación. Estos resultados evidencian que el uso de sistemas de voladura agrupada y remota constituye una evolución tecnológica clave en la gestión operativa y de seguridad en minería subterránea moderna, aportando una base empírica sólida para su aplicación en escenarios de producción continua y controlada.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 Seguridad y salud ocupacional en minería

La Seguridad y Salud Ocupacional (SSO) en minería tiene como propósito fundamental proteger la integridad física y mental de los trabajadores antes, durante y después del desarrollo de sus actividades. Busca prevenir la ocurrencia de incidentes, accidentes y enfermedades ocupacionales mediante la promoción de una cultura preventiva, basada en la identificación de peligros, evaluación de riesgos y la implementación de controles efectivos. En el contexto minero, donde las operaciones implican altos niveles de exposición a riesgos físicos, químicos y geomecánicos, la SSO se convierte en un pilar esencial para garantizar la sostenibilidad de las operaciones y el bienestar del personal.

2.1.1.1 Accidente de trabajo. Según el D.S. N.º 023-2017-EM, se considera accidente de trabajo a todo suceso repentino originado por la actividad laboral que ocasione en el trabajador una lesión orgánica, perturbación funcional, incapacidad o la muerte. También se incluyen los accidentes ocurridos durante la ejecución de órdenes del empleador o bajo su autoridad, incluso si acontecen fuera del lugar o del horario habitual de trabajo (2017:26).

Los accidentes laborales pueden clasificarse, según su gravedad, en las siguientes categorías:

Accidente leve:

El trabajador requiere un descanso con retorno máximo de un día.

Accidente incapacitante:

Implica un descanso mayor a un día y tratamiento médico.

- Parcial temporal: Incapacidad parcial y transitoria para realizar sus labores.
- Total temporal: Incapacidad total pero temporal.
- Parcial permanente: Pérdida definitiva de una parte o función corporal.

- Total permanente: Incapacidad total y definitiva del trabajador.

Accidente mortal:

Suceso que ocasiona la muerte del trabajador.

2.1.1.2 Incidente. De acuerdo con el D.S. N.º 023-2017-EM (2017:39), un incidente se define como “todo suceso con potencial de pérdidas acaecido en el curso del trabajo o en relación con este, en el que la persona afectada no sufre lesiones corporales”. En otras palabras, se trata de un evento no deseado que, de haber ocurrido en circunstancias ligeramente distintas, podría haber resultado en un accidente. El análisis de los incidentes es esencial para identificar fallas en los controles preventivos y fortalecer la gestión de riesgos antes de que se materialicen consecuencias mayores.

2.1.1.3 Enfermedad ocupacional. El mismo decreto establece que una enfermedad ocupacional es “el daño orgánico o funcional ocasionado al trabajador como resultado de la exposición a factores de riesgo físicos, químicos, biológicos, psicosociales o disergonómicos, inherentes a la actividad laboral” (D.S. N.º 023-2017-EM, 2017:34). Estas enfermedades suelen desarrollarse de manera progresiva y, en el ámbito minero, se asocian frecuentemente a condiciones de ruido excesivo, vibraciones, polvo respirable, gases tóxicos o esfuerzos físicos prolongados. La identificación temprana y el control de los factores de riesgo son claves para reducir su incidencia y proteger la salud a largo plazo de los trabajadores.

2.1.1.4 Peligro. El D.S. N.º 023-2017-EM (2017:43) define el peligro como la “situación o característica intrínseca de algo capaz de ocasionar daños a las personas, equipos, procesos o al ambiente”. En minería, los peligros pueden presentarse en diversas formas, como labores no desatadas, áreas desordenadas, manipulación inadecuada de explosivos o exposición a maquinaria en movimiento. Identificar correctamente los peligros constituye el primer paso en la gestión de riesgos laborales.

2.1.1.5 Riesgo. Por su parte, el D.S. N.º 023-2017-EM (2017:47) señala que el riesgo es la “probabilidad de que un peligro se materialice en determinadas condiciones y genere daños a las personas, equipos o al ambiente”. El riesgo combina tanto la posibilidad

de ocurrencia del evento como la magnitud de sus consecuencias. En minería, la evaluación de riesgos permite priorizar medidas de control y establecer estándares de seguridad proporcionales a la severidad de los escenarios identificados.

2.1.1.6 Estándar de trabajo. Los estándares de trabajo constituyen modelos o pautas que establecen los parámetros técnicos y operativos definidos por el titular de la actividad minera. Estos parámetros incluyen requisitos mínimos de medida, cantidad, calidad, valor, peso o extensión, determinados a partir de estudios técnicos, normativa vigente y avances tecnológicos. Su propósito es asegurar que las tareas se realicen de forma correcta y segura.

De acuerdo con el D.S. N.º 023-2017-EM (2017:36), los estándares responden a preguntas fundamentales como: ¿Qué debe hacerse?, ¿Quién lo ejecuta?, ¿Cuándo debe realizarse? y ¿Quién es responsable de garantizar que el trabajo se efectúe de manera segura? En suma, los estándares de trabajo son la base para uniformizar procedimientos, reducir la variabilidad operativa y fortalecer la cultura de prevención en el ámbito minero.

2.1.2 Accesorios de voladura

Los accesorios de voladura son componentes diseñados específicamente para transportar la señal o la onda de choque que permite activar una carga explosiva de manera controlada, efectiva y segura. Estos elementos cumplen una función esencial en el proceso de iniciación, garantizando la sincronización y la eficiencia de la detonación, aspectos críticos para la seguridad y el rendimiento en operaciones mineras subterráneas.

2.1.2.1 Mecha de seguridad. La mecha de seguridad es un accesorio que transmite la energía en forma de fuego hacia una carga explosiva de mayor potencia con una velocidad continua y uniforme. Está compuesta por un cordón flexible con un núcleo de pólvora negra recubierto por capas textiles protectoras e impermeables, que le otorgan resistencia a la abrasión y al contacto con el agua. Su velocidad de combustión es de aproximadamente 120 segundos por metro lineal.

Este tipo de accesorio se emplea principalmente en voladuras convencionales o de pequeño alcance, donde la precisión del retardo no es crítica, pero sí la fiabilidad y seguridad del encendido.

2.1.2.2 Fulminante. Según el D.S. N.º 023-2017-EM (2017:37), el fulminante es una cápsula cilíndrica de aluminio cerrada en un extremo, que contiene en su interior una cantidad precisa de explosivos primarios y secundarios. El explosivo primario, altamente sensible a la chispa proveniente de la mecha de seguridad, inicia la reacción, la cual se amplifica a través de una segunda carga que transforma la combustión en detonación. Finalmente, esta onda de choque activa la carga base de PETN (pentrita), generando la energía necesaria para detonar dinamita u otros explosivos de alto poder.

Los fulminantes se clasifican según el contenido de azida de plomo 6, 8 o 12 gramos, lo que determina su potencia. Se utilizan principalmente en labores de desarrollo y producción, siendo el nexo fundamental entre los sistemas de iniciación y el explosivo principal.

2.1.2.3 Cordón detonante. El cordón detonante, definido por el D.S. N.º 023-2017-EM (2017:32), es un cordón flexible con un núcleo sólido de alto poder explosivo (PETN) protegido por fibras sintéticas que le proporcionan resistencia a la tensión, abrasión y humedad. Su función principal es transmitir la onda detonante a través de la línea de carga o entre varios puntos de iniciación.

En minería subterránea, el cordón detonante se emplea ampliamente en labores de precorte y contorno, permitiendo obtener superficies más regulares y controladas, reduciendo sobre-excavaciones y mejorando la estabilidad del macizo rocoso.

2.1.2.4 Mecha armada. La mecha armada, conforme al D.S. N.º 023-2017-EM (2017:47), constituye un sistema de iniciación convencional compuesto por la mecha de seguridad, un fulminante corriente y un conector, ensamblados con máquinas neumáticas de alta precisión. Este conjunto garantiza una transmisión estable de la señal de iniciación y ofrece un sistema seguro y confiable para encender cargas explosivas en labores subterráneas.

Su uso es común en operaciones donde se requiere simplicidad operativa, robustez y bajo costo, aunque presenta limitaciones en precisión de retardo frente a los sistemas electrónicos modernos.

2.1.3 Voladura en subterránea

La voladura subterránea es una técnica minera esencial que utiliza explosivos para fragmentar la roca, permitiendo la excavación y el acceso a los cuerpos minerales. Este proceso es determinante en el avance de labores, la apertura de galerías y la preparación de cámaras de producción. La eficiencia de una voladura influye directamente en la productividad, la estabilidad geomecánica y los costos operativos de la mina.

2.1.3.1 Malla de perforación. La malla de perforación es la disposición geométrica de los taladros en un frente de voladura, diseñada en función de los parámetros burden, espaciamiento, dirección y profundidad de perforación.

- Burden: Distancia perpendicular desde el taladro hasta la cara libre o el taladro de alivio.
- Espaciamiento: Distancia entre taladros consecutivos dentro de la misma fila.

El diseño adecuado de la malla garantiza una fragmentación uniforme, un uso eficiente del explosivo y un control preciso del contorno del frente.

2.1.3.2 Diseño de malla de perforación. El diseño de la malla de perforación define la disposición de los taladros, su carga explosiva, el tipo de detonador y el secuenciamiento de iniciación. Cada tipo de roca o condición geológica requiere un diseño específico que optimice el rendimiento y reduzca los impactos indeseados, como la sobreexcavación o la sobre-rotura.

En la práctica, los taladros se clasifican según su función en el frente:

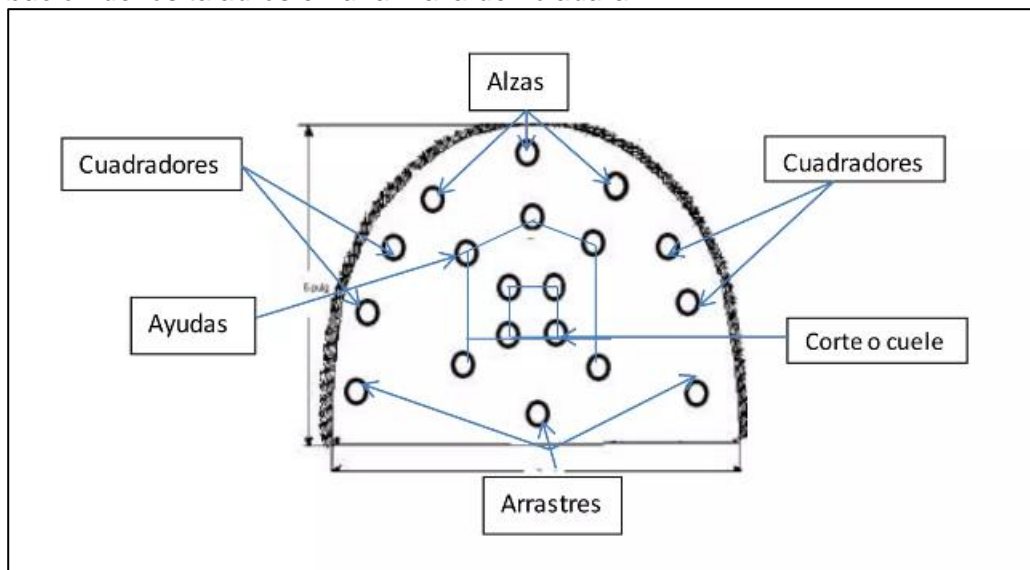
- Arranque: Taladros centrales disparados primero para generar la cavidad inicial o cara libre; suelen cargarse con mayor cantidad de explosivo.
- Ayuda de arranque: Taladros que rodean a los de arranque y facilitan la propagación del corte.

- Producción: Taladros principales de la malla, responsables del mayor volumen de fragmentación.
- Hastiales: Taladros laterales que delimitan los bordes del frente.
- Corona: Taladros superiores que definen el techo del frente y dan forma al túnel.
- Arrastre: Taladros ubicados en la parte inferior del frente, disparados generalmente al final de la secuencia.

En minería subterránea, la voladura inicia sin una cara libre natural; por ello, los taladros de arranque y corte son fundamentales para generar la cavidad inicial hacia donde romperán las demás cargas. La cantidad de explosivo por taladro depende de las dimensiones de la sección del frente y de la dureza del macizo rocoso.

Figura 1

Distribución de los taladros en una malla de voladura



Nota: Fuente Manual práctico de voladura – EXSA.

La evaluación del desempeño de una voladura se realiza mediante indicadores técnicos como fragmentación de la roca, volumen removido, avance real, factor de carga, sobreperforación y costos unitarios. Estos parámetros permiten ajustar el diseño y mejorar la eficiencia operativa en voladuras sucesivas.

2.1.4 Sistemas de iniciación.

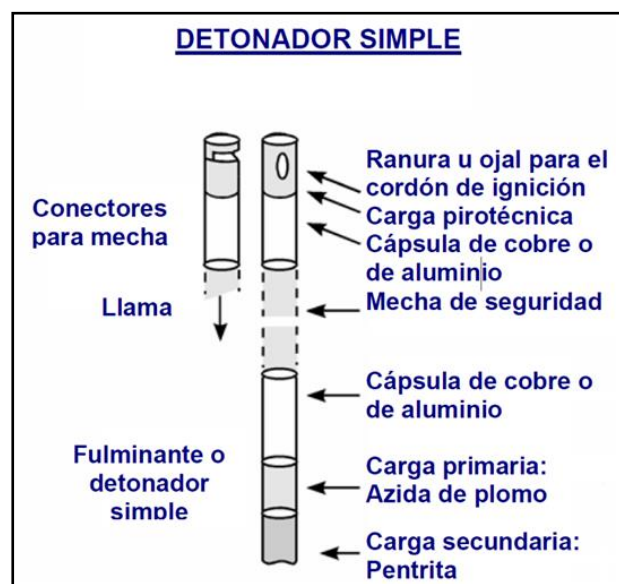
El sistema de iniciación comúnmente denominado detonador es el conjunto de elementos diseñados para generar la señal que activa la carga explosiva colocada en el

taladro, ya sea un cartucho cebador o un booster. Estos sistemas se utilizan tanto en minería a tajo abierto como subterránea y su selección depende de factores como las características del terreno, la logística de conexión, la precisión requerida en los retardos y las condiciones de seguridad de la operación. La diferencia esencial entre los tipos de sistemas radica en el modo de iniciación y en el mecanismo que define el tiempo de retardo entre detonaciones; en todos los casos la cápsula metálica (aluminio, cobre o aleaciones) aloja una carga base (generalmente PETN) y una carga de iniciación destinada a transformar la energía inicial en detonación.

2.1.4.1 Detonadores ordinarios o a mecha. Los detonadores ordinarios se inician mediante mecha lenta. La mecha se introduce en el extremo abierto de la cápsula y se asegura mecánicamente para evitar su extracción durante la manipulación (Bernaola, Castilla & Herrera, 2013). Al no incorporar un mecanismo de retardo fijo, la activación es dependiente únicamente del tiempo de combustión de la mecha, por lo que su uso es común en aplicaciones donde no se requiere precisión de sincronización. Debido a su simplicidad, son preferidos en voladuras ornamentales o en situaciones de bajo requerimiento técnico, pero presentan limitaciones en seguridad y control frente a sistemas modernos.

Figura 2

Detonador



Nota: Fuente Ficha técnica de conector de mecha rápida – FAMESA.

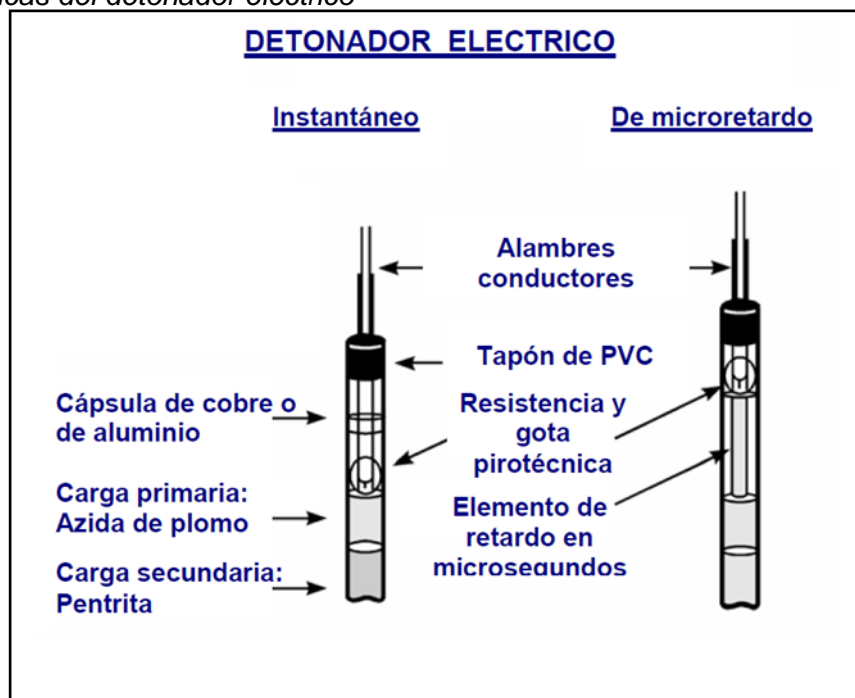
2.1.4.2 Detonadores eléctricos. El detonador eléctrico emplea energía eléctrica para iniciar la carga explosiva; dispone de un inflamador pirotécnico (conocido como “cerilla” o puente de incandescencia) que, al recibir corriente, se calienta hasta inflamar la pasta explosiva y provocar la iniciación. Existen dos grandes familias: detonadores instantáneos y detonadores temporizados. Entre las características eléctricas relevantes para su operación se incluyen:

- Intensidad de corriente recomendada: mínimo necesario para asegurar la iniciación fiable.
- Corriente de seguridad: umbral de encendido accidental (sensibilidad eléctrica).
- Resistencia del puente: resistencia eléctrica del puente o cerilla, medida en ohmios.

Estos parámetros condicionan la protección contra disparos inadvertidos y la compatibilidad con los sistemas de alimentación y control disponibles en mina.

Figura 3

Características del detonador eléctrico



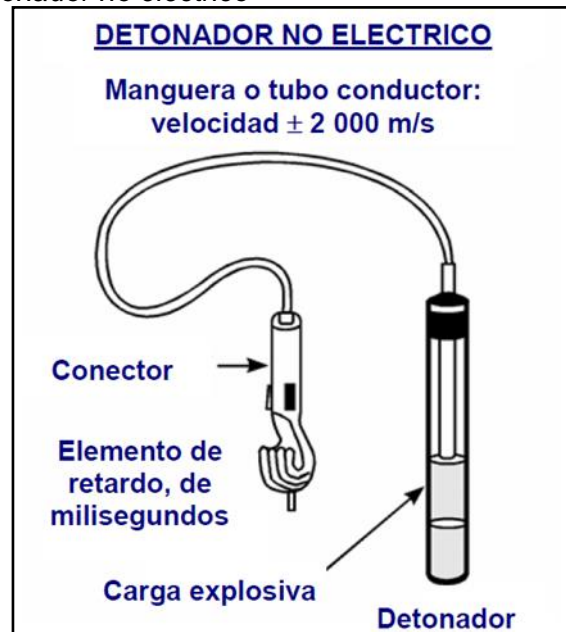
Nota: Fuente Manual de voladura – EXSA.

2.1.4.3 Detonadores no eléctricos. Los detonadores no eléctricos se basan en un tubo de choque (un cordón plástico con una pequeña carga interna de material detonante) ensamblado con un detonador de gran potencia que presenta un retardo

determinado. El tubo transmite una onda de baja energía que inicia la carga de retardo del detonador (Exsa et al., 2013). Este tipo de iniciación es apreciado por su simplicidad y por evitar la dependencia de energía eléctrica, aunque tiene limitaciones en precisión de retardos y vulnerabilidad a interferencias físicas durante la instalación.

Figura 4

Características del detonador no eléctrico



Nota: Fuente Manual de voladura – EXSA.

2.1.4.4 Detonadores electrónicos. Los detonadores electrónicos constituyen el avance más significativo en sistemas de iniciación. A diferencia de los detonadores eléctricos o no eléctricos, donde el retardo viene determinado por la combustión de una pasta pirotécnica, en los detonadores electrónicos el tiempo de retardo lo controla un circuito electrónico con un microchip que determina con alta precisión el instante de descarga de un condensador encargado de accionar el inflamador. Esta arquitectura reduce drásticamente la dispersión temporal, alcanzando precisiones del orden del 0.02 %, lo cual posibilita secuencias de iniciación extremadamente exactas.

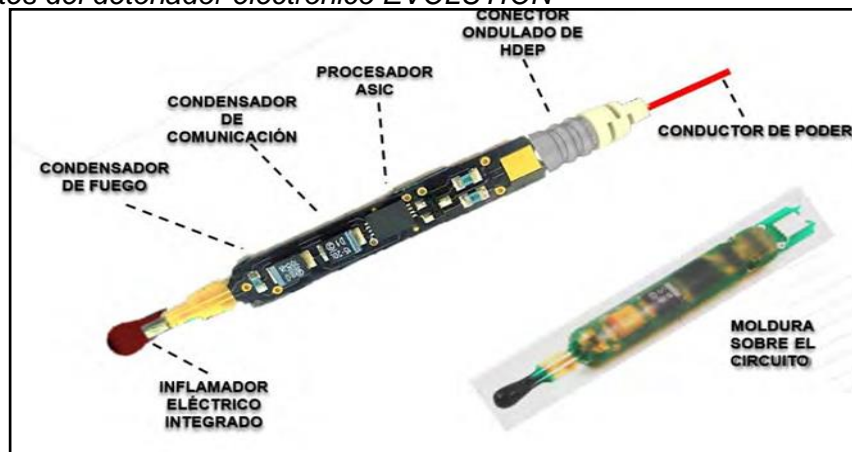
Un detonador electrónico típicamente integra: microchip de control, condensador(es) de almacenamiento de energía, circuito de seguridad y el inflamador eléctrico integrado (fuse head). Entre las características técnicas comunes se encuentran la existencia de doble condensador (separando energía para programación/testeo y

energía de iniciación), monitoreo continuo en línea (line cut monitoring) y vías de comunicación bidireccional que permiten programar retardos individuales con resolución de 1 ms en rangos amplios (p. ej. 0–14 000 ms). La carga base suele estar compuesta por PETN (aprox. 800 mg en algunos diseños comerciales) y una carga de iniciación primaria (p. ej. azida de plomo), alojadas en una cápsula metálica resistente.

Adicionalmente, los detonadores electrónicos incorporan elementos de diseño que aumentan la seguridad y la confiabilidad, tales como la Fuse Head aislada del circuito de iniciación (tecnologías tipo Smart Shunt), conectores herméticos de alta resistencia, y mecanismos de comunicación redundante que permiten controlar la energía hasta el último momento antes del disparo. Estas capacidades hacen de los detonadores electrónicos la opción preferente para esquemas avanzados como la voladura agrupada o disparos masivos controlados, donde la sincronización y la trazabilidad son críticas para la seguridad y el desempeño operacional. (Ver ANEXO A para especificaciones comerciales y diagramas).

Figura 5

Componentes del detonador electrónico EVOLUTION



Nota: Fuente Manual de Voladura – ENAEX

2.1.5 Sistemas de comunicación en interior mina

Durante las últimas décadas, los sistemas de comunicación en minería subterránea han evolucionado significativamente. Inicialmente, su propósito principal era facilitar la comunicación entre los trabajadores; sin embargo, con el avance de la tecnología, estos sistemas se han incorporado a la supervisión y control de equipos, gestión de emergencias

y, más recientemente, al soporte de operaciones críticas como los procedimientos de voladura, permitiendo una mayor seguridad y eficiencia operativa.

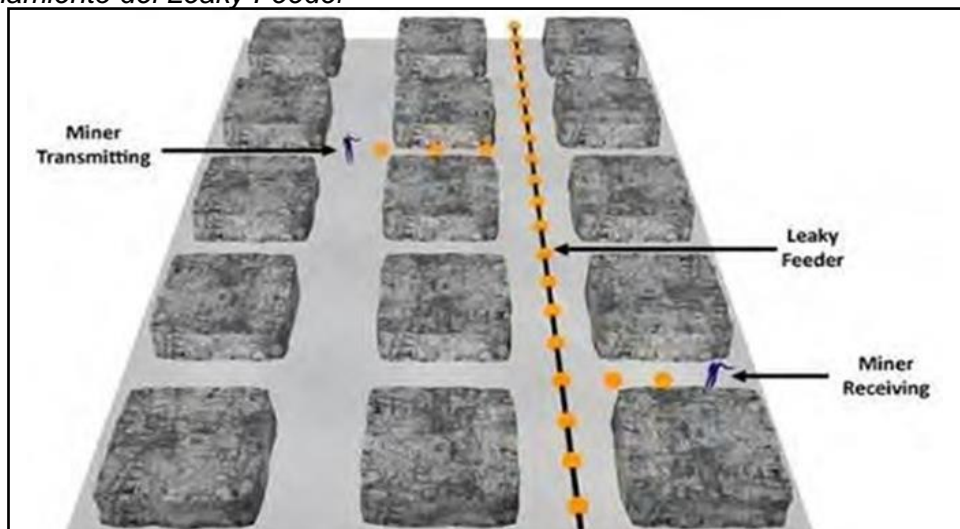
2.1.5.1 Cable antena o Leaky Feeder. El sistema Leaky Feeder se basa en un cable coaxial radiante que actúa simultáneamente como emisor y receptor de señales de comunicación. Este cable posee aberturas o ranuras distribuidas a lo largo de su cubierta externa que permiten la “fuga” controlada de señal, de ahí el término leaky (“fuga” o “filtrante”).

Dichas aberturas permiten que las ondas de radio que viajan dentro del cable se propaguen hacia el entorno, y que los equipos portátiles cercanos (radios, sensores o sistemas de monitoreo) puedan comunicarse bidireccionalmente con la red. En la práctica, el Leaky Feeder funciona como una antena extendida a lo largo de galerías y rampas, garantizando cobertura continua.

Este sistema puede ampliarse mediante amplificadores de señal, que refuerzan la potencia de transmisión y permiten cubrir extensas redes subterráneas. Su principal ventaja radica en la estabilidad de señal y en la posibilidad de integrar servicios adicionales como datos, voz, video o telemetría, siendo actualmente uno de los estándares más utilizados en minería subterránea moderna.

Figura 6

Funcionamiento del Leaky Feeder

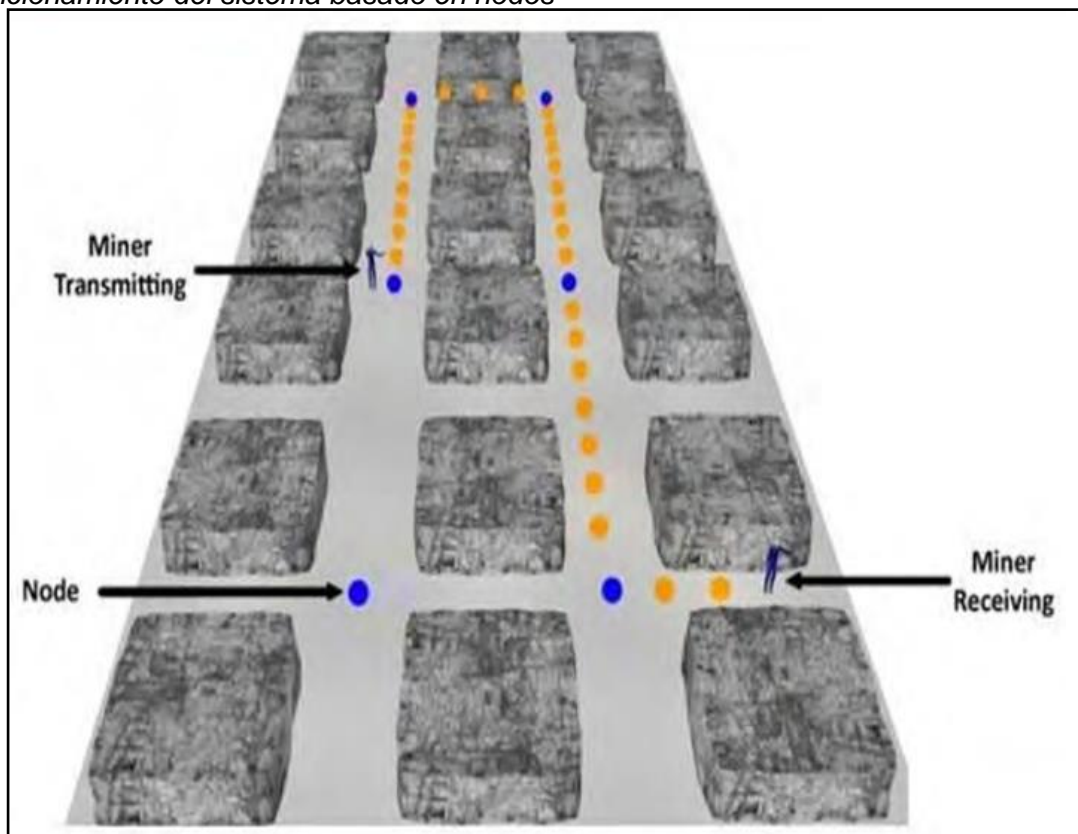


Nota: Fuente adaptado de “Las telecomunicaciones y sus desafíos en la minería subterránea”, por G. E. Badillo Astudillo, presentación en el 8º Congreso Iberoamericano de Minería Sustentable, Santiago, Chile, noviembre de 2013.

2.1.5.2 Sistema basado en nodos. En los sistemas basados en nodos, la comunicación se establece a través de un conjunto de antenas y transceptores (denominados “nodos”) distribuidos a lo largo de la mina. Cada nodo contiene microprocesadores encargados de gestionar la señal y retransmitirla al siguiente, formando así una red interconectada.

Figura 7

Funcionamiento del sistema basado en nodos



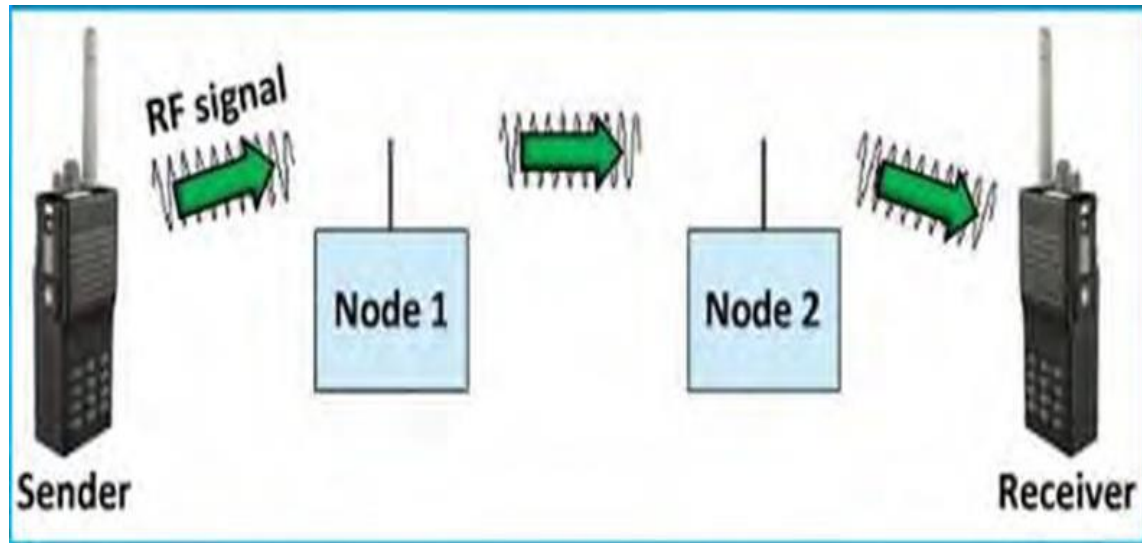
Nota: Fuente adaptado de “Las telecomunicaciones y sus desafíos en la minería subterránea”, por G. E. Badillo Astudillo, presentación en el 8º Congreso Iberoamericano de Minería Sustentable, Santiago, Chile, noviembre de 2013.

De acuerdo con Badillo (2013), estos sistemas emplean radiofrecuencia (RF), es decir, ondas del espectro electromagnético utilizadas para la radiocomunicación. Su estructura modular permite que la red se expanda fácilmente y que, ante la pérdida de un nodo, la señal pueda redirigirse por rutas alternativas, manteniendo la conectividad.

Este tipo de sistema es ideal para entornos de difícil acceso o zonas donde la instalación de cableado resulta costosa, ya que permite comunicación automática, flexible y adaptable entre operadores, equipos y centros de control.

Figura 8

Funcionamiento del RF SIGNAL



Nota: Fuente adaptado de “Las telecomunicaciones y sus desafíos en la minería subterránea”, por G. E. Badillo Astudillo, presentación en el 8º Congreso Iberoamericano de Minería Sustentable, Santiago, Chile, noviembre de 2013.

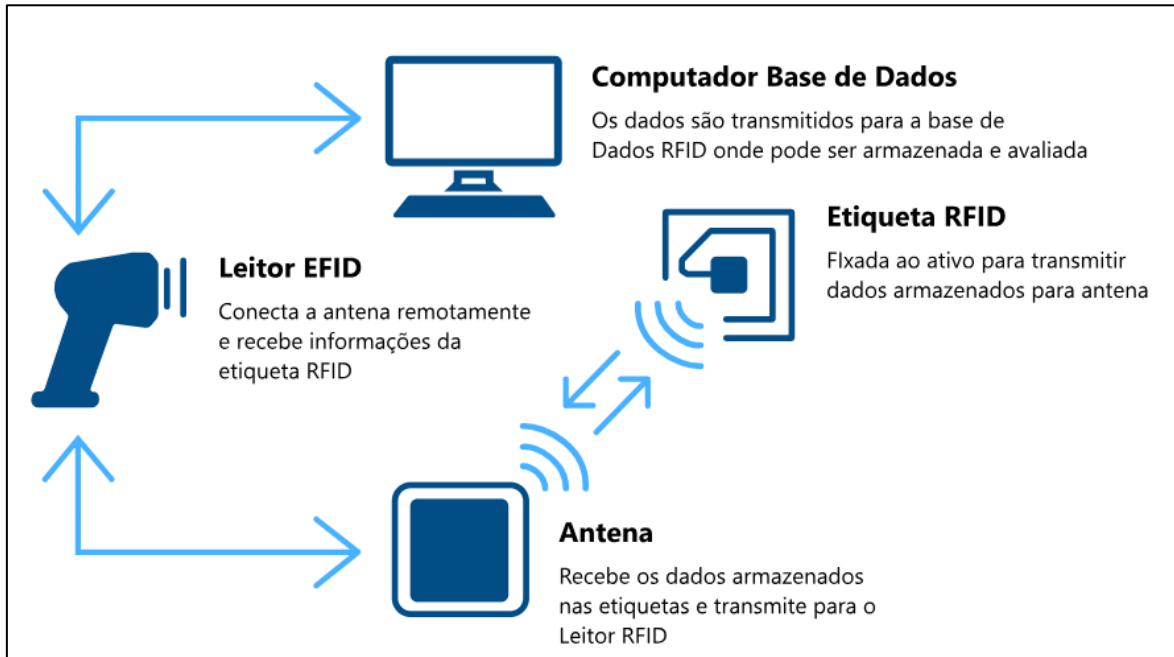
2.1.5.3 Identificación por Radiofrecuencia (RFID). La Identificación por Radiofrecuencia (RFID), también conocida como sistema de seguimiento o tracking, se utiliza para rastrear objetos o personas mediante la comunicación entre una etiqueta (tag) y un lector. En minería subterránea, este sistema ha evolucionado hasta permitir la localización en tiempo real del personal y equipos.

Según Badillo (2013), el sistema RFID subterráneo emplea tags activos, capaces de transmitir señales a mayor distancia que los pasivos. Cada tag posee un código único y emite señales periódicas que son detectadas por lectores instalados en puntos estratégicos de la mina. Estos lectores envían la información, por cable o de forma inalámbrica, a un centro de control, donde se calcula la posición del portador.

Este sistema incrementa la seguridad operacional, ya que permite conocer la ubicación de los trabajadores durante una emergencia o antes de una voladura, y también se integra con redes de comunicación (como Leaky Feeder o Wi-Fi) para complementar la gestión minera digital.

Figura 9

Funcionamiento del RFID



Nota: Fuente adaptado de “Las telecomunicaciones y sus desafíos en la minería subterránea”, por G. E. Badillo Astudillo, presentación en el 8º Congreso Iberoamericano de Minería Sustentable, Santiago, Chile, noviembre de 2013.

2.1.5.4 Comunicación inalámbrica o Red Wi-Fi. El desarrollo de redes inalámbricas tipo Wi-Fi ha permitido establecer sistemas de comunicación subterráneos más flexibles y escalables. Este tipo de red utiliza el principio de “mesh networking”, en el que múltiples nodos inalámbricos interconectados crean una red autorreconfigurable y redundante.

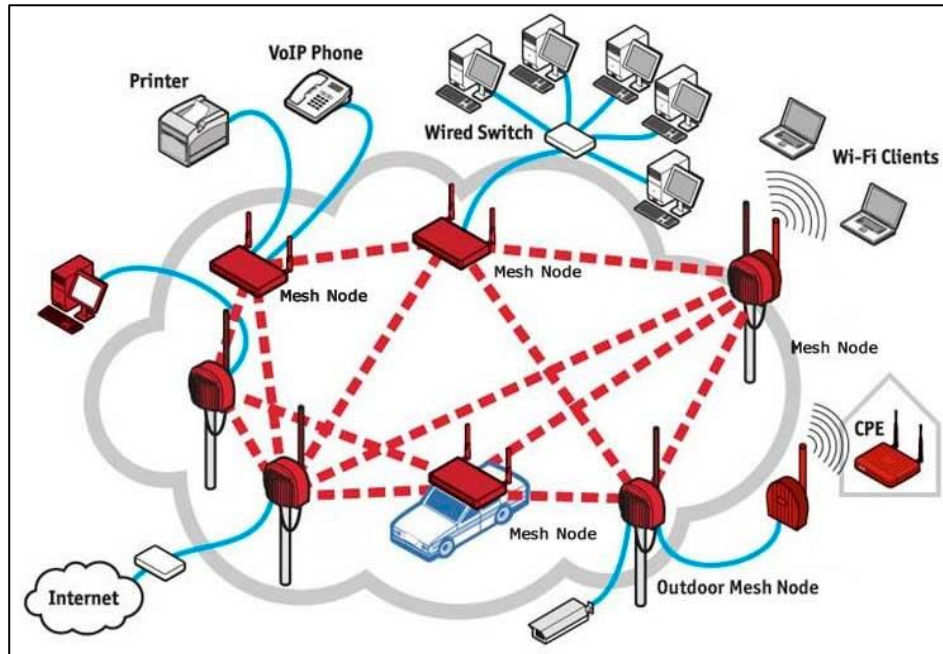
Según Cisco Systems Inc. (2002), las redes mesh garantizan que, si uno de los enlaces falla, la información puede seguir transmitiéndose a través de otros nodos, manteniendo la continuidad del servicio. En minería, estas redes permiten comunicación bidireccional en tiempo real, transmisión de datos, voz y video, y seguimiento del personal mediante etiquetas RFID.

La distancia típica entre nodos varía entre 450 y 900 metros, dependiendo de la geometría de la mina y las condiciones del terreno. Su instalación es sencilla y escalable, permitiendo ampliar la cobertura conforme avanza el desarrollo de galerías. Por estas razones, las redes Wi-Fi subterráneas constituyen la base tecnológica para operaciones

mineras inteligentes, integrando sistemas de monitoreo remoto, automatización de equipos y detonación electrónica centralizada (group blasting o disparos remotos).

Figura 10:

Topología del sistema inalámbrico "Mesh"



Nota: Fuente adaptado de "Las telecomunicaciones y sus desafíos en la minería subterránea", por G. E. Badillo Astudillo, presentación en el 8º Congreso Iberoamericano de Minería Sustentable, Santiago, Chile, noviembre de 2013.

2.1.6 Sistemas de iniciación electrónica

Los sistemas de iniciación electrónica representan el desarrollo más avanzado en la tecnología de voladura, tanto para operaciones a cielo abierto como para minería subterránea. Diversas empresas especializadas en explosivos han desarrollado sus propios sistemas, cada uno con características particulares en cuanto a diseño, robustez del detonador y facilidad de operación.

Estos sistemas ofrecen un alto nivel de seguridad en el proceso de detonación, permitiendo la verificación previa de las líneas de fuego y la detección de detonadores faltantes o adicionales antes del disparo. Una de sus principales ventajas es el mapeo continuo del plan de voladura, que permite visualizar en los equipos de disparo el comportamiento y estado de cada detonador antes de ejecutar la voladura. Los detonadores electrónicos pueden ser programados de forma individual o mediante la carga de datos en conjunto a través de tarjetas RFID.

El funcionamiento de los sistemas de iniciación electrónica se encuentra protegido por protocolos de autorización, de modo que los equipos no pueden ser activados sin el desbloqueo correspondiente mediante una llave de acceso, código o tarjeta. Es importante destacar que los detonadores electrónicos no son compatibles con otros sistemas de iniciación (eléctricos o no eléctricos), lo que refuerza la necesidad de su uso exclusivo dentro del circuito electrónico.

2.1.6.1 Equipos de programación. De acuerdo con el Institute of Makers of Explosives (IME), los equipos de programación, también denominados loggers o taggers, permiten al usuario realizar pruebas de comunicación en el circuito de detonadores para verificar su correcta conexión antes del disparo. Además, facilitan la programación de los tiempos de retardo y de la secuencia de iniciación.

La metodología, el tipo de comunicación y la forma de transferencia de datos varían según la tecnología empleada por cada fabricante. El uso de equipos de programación proporciona un nivel significativamente superior de control, diagnóstico y comunicación respecto a los sistemas eléctricos o no eléctricos tradicionales, contribuyendo a un proceso de voladura más preciso, seguro y trazable.

2.1.6.2 Equipos de disparo. El equipo de disparo es el componente central del sistema de iniciación electrónica, diseñado específicamente para ejecutar la voladura. Cada unidad cuenta con protocolos propios de comunicación y características de seguridad que deben cumplirse para garantizar la confiabilidad del proceso, tales como la verificación del sistema, la programación final, la carga y el comando de fuego.

La capacidad de carga de energía distingue a los diferentes equipos de disparo, determinando el número de detonadores que pueden conectarse simultáneamente. Estos equipos, además, permiten monitorear cada detonador de manera similar a los programadores, almacenar la información de las voladuras y gestionar múltiples eventos de disparo en forma independiente o simultánea en diferentes niveles de la mina.

El uso de estos sistemas centralizados contribuye significativamente al incremento de la seguridad durante el procedimiento de voladura, reduciendo la exposición del

personal a zonas de riesgo, y mejorando al mismo tiempo la productividad y la continuidad operativa de la mina.

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Accidente

Evento repentino vinculado a la actividad laboral que ocasiona daño o lesión al trabajador (MINEM, 2017).

2.2.2 Ciclo

Secuencia continua de etapas que componen un proceso operativo (SME, 2020).

2.2.3 Comunicación

Transmisión bidireccional de datos y señales entre sistemas en interior mina (Orica, 2018).

2.2.4 Control

Supervisión y regulación de parámetros técnicos durante una operación minera (ISEE, 2022).

2.2.5 Detonador

Dispositivo que transmite la señal inicial que activa la carga explosiva (Orica, 2018).

2.2.6 Eficiencia

Relación entre los recursos utilizados y los resultados obtenidos en un proceso (Dyno Nobel, 2015).

2.2.7 Energía

Capacidad de un sistema para realizar trabajo o producir movimiento, expresada en kWh en minería (MINEM, 2017).

2.2.8 Explosivo

Sustancia química capaz de liberar energía rápidamente en forma de gases y calor (Dyno Nobel, 2015).

2.2.9 Fragmentación

Resultado del proceso de voladura que determina el tamaño de las partículas del material roto (SME, 2020).

2.2.10 Fragmento

Porción de roca resultante de la acción de una voladura (Enaex, 2010).

2.2.11 GEBS

Sistema de voladura electrónica agrupada.

2.2.12 Gestión

Proceso sistemático de planificación, control y mejora continua de actividades (Roa & Cruz, 2022).

2.2.13 Peligro

Fuente o situación con potencial de causar daño físico, material o ambiental (ISEE, 2022).

2.2.14 Retardo

Intervalo de tiempo programado entre la detonación de taladros consecutivos (ISEE, 2022).

2.2.15 Riesgo

Probabilidad de que un peligro se materialice y cause consecuencias adversas (SME, 2020).

2.2.16 Seguridad

Estado en el cual los riesgos de daño están controlados hasta un nivel aceptable (SME, 2020).

2.2.17 Sistema

Conjunto de elementos interrelacionados que actúan coordinadamente para lograr un fin común (Orica, 2018).

2.2.18 Trazabilidad

Capacidad de registrar, seguir y verificar la secuencia completa de una operación técnica (ISEE, 2022).

2.2.19 Ventilación

Conjunto de operaciones destinadas a renovar el aire en las labores subterráneas y eliminar gases nocivos (MINEM, 2017).

2.2.20 Voladura

Proceso de fragmentación de roca mediante el uso controlado de explosivos (Enaex, 2010).

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Recopilación de información

3.1.1 *Unidad de estudio*

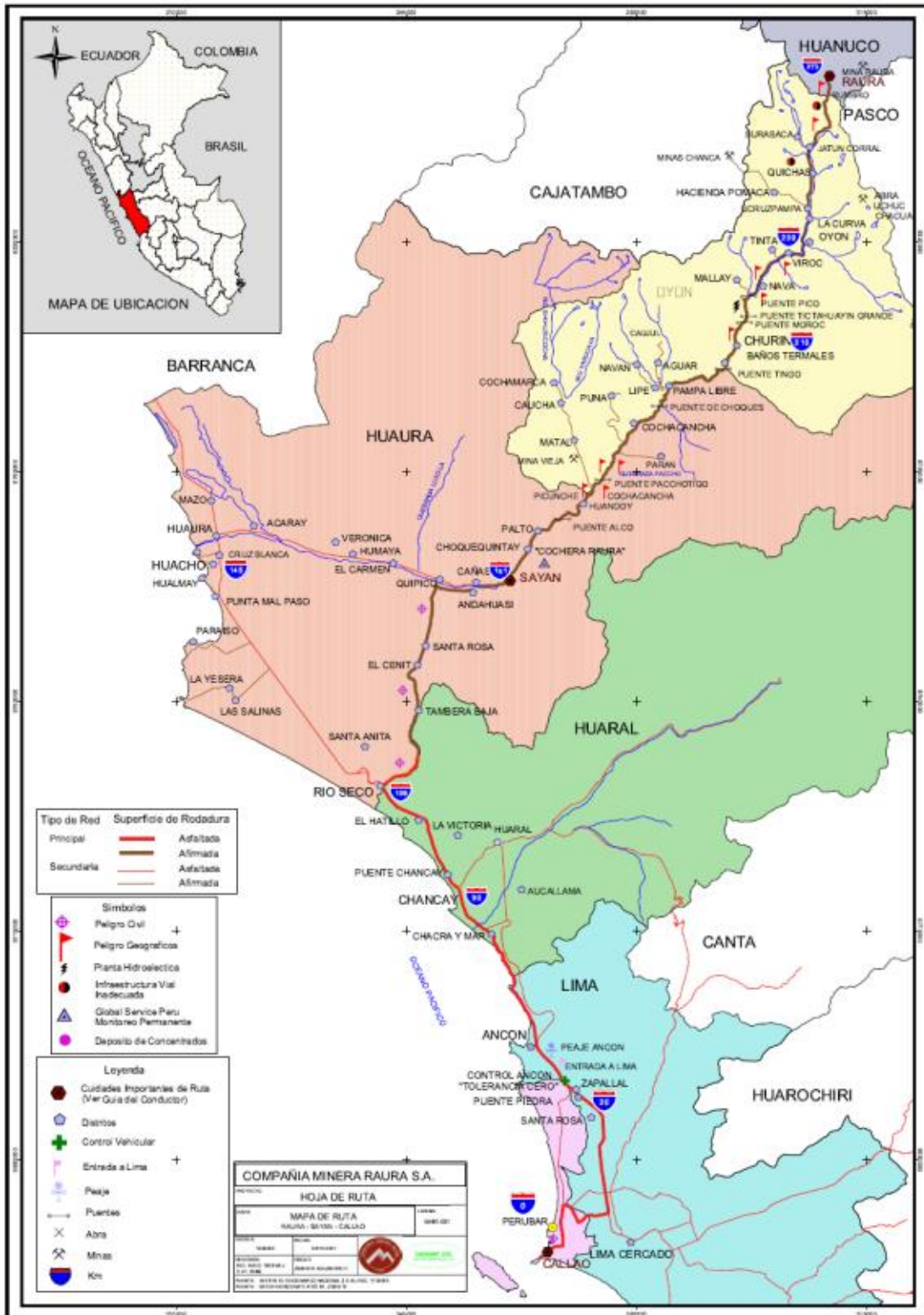
La Unidad Minera Raura está emplazada en la cumbre de la Cordillera Occidental Andina, funcionando como un hito de la divisoria continental de aguas que demarca las áreas de captación hidrológica de los ríos Huaura y Marañón.

Geográficamente, se encuentra en 10°26'30" Latitud Sur y 76°44'30" Longitud Oeste. Cartográficamente en las coordenadas UTM (Zona 18S): 8 845 500 N, 309 700E. La unidad se distribuye interdepartamentalmente entre el distrito de San Miguel de Cauri (Provincia de Lauricocha, Departamento de Huánuco) y el distrito y provincia de Oyón (Departamento de Lima).

El acceso a la Mina Raura requiere un recorrido terrestre total de 277 km. La ruta se inicia en la Carretera Panamericana Norte (103 km), prosigue con el desvío hacia Río Seco-Sayán (50 km), y concluye a través de la vía que conecta con Churín y Raura (124 km).

Figura 11

Ubicación de la mina



Nota: Fuente Unidad Minera - Departamento de Geología

3.1.1.1 Historia. El registro histórico de la Mina Raura comienza aproximadamente en 1890, cuando el Sr. Simeón Dustan operaba una planta de lixiviación y fundición en Quichas para el tratamiento del mineral extraído de Raura.

La propiedad experimentó varias transferencias corporativas significativas:

- 1928: Adquirida por VANADIUM CORPORATION OF AMERICA en asociación con la Cía. Minera Puquiococha.
- 1942–1970: La CERRO DE PASCO CORPORATION tomó la propiedad en opción en 1942, comprando una porción en 1945 y posteriormente vendiendo su participación al Grupo Marmon en 1970.
- 1987–Presente: La operación pasó a ser propiedad de Compañía Minera Raura S.A., la entidad actual.

3.1.1.2 Litología.

Rocas Sedimentarias

Las rocas sedimentarias que afloran en los alrededores de la Mina Raura pertenecen a la secuencia Estratigráfica del Cretáceo.

Las más antiguas se exponen al Suroeste y Oeste, que pertenecen al Cretáceo Inferior (Grupo Goyllarizquizga) y están representadas por las formaciones Chimú y Carhuáz. Por sobre escurrimiento se presentan la franja calcárea de las formaciones Parihuanca, Chulec, Pariatambo Jumasha y Celendín Inferior con potencia total de 1,200 m. La formación Jumasha es la de mayor espesor con 800 m y la de mayor importancia, alberga yacimientos minerales (Wilson 1963)

- **Formación Chimú**

(Neoconiano a Valanginiano Inferior): Constituida por cuarcitas de grano fino a medio (blancas y gris blanquecinas), interdigitadas con lutitas grises/negras y niveles de carbón. Es regionalmente significativa por formar parte de la Cuenca Carbonífera de Oyón (Wilson, 1963).

- **Formación Carhuaz**

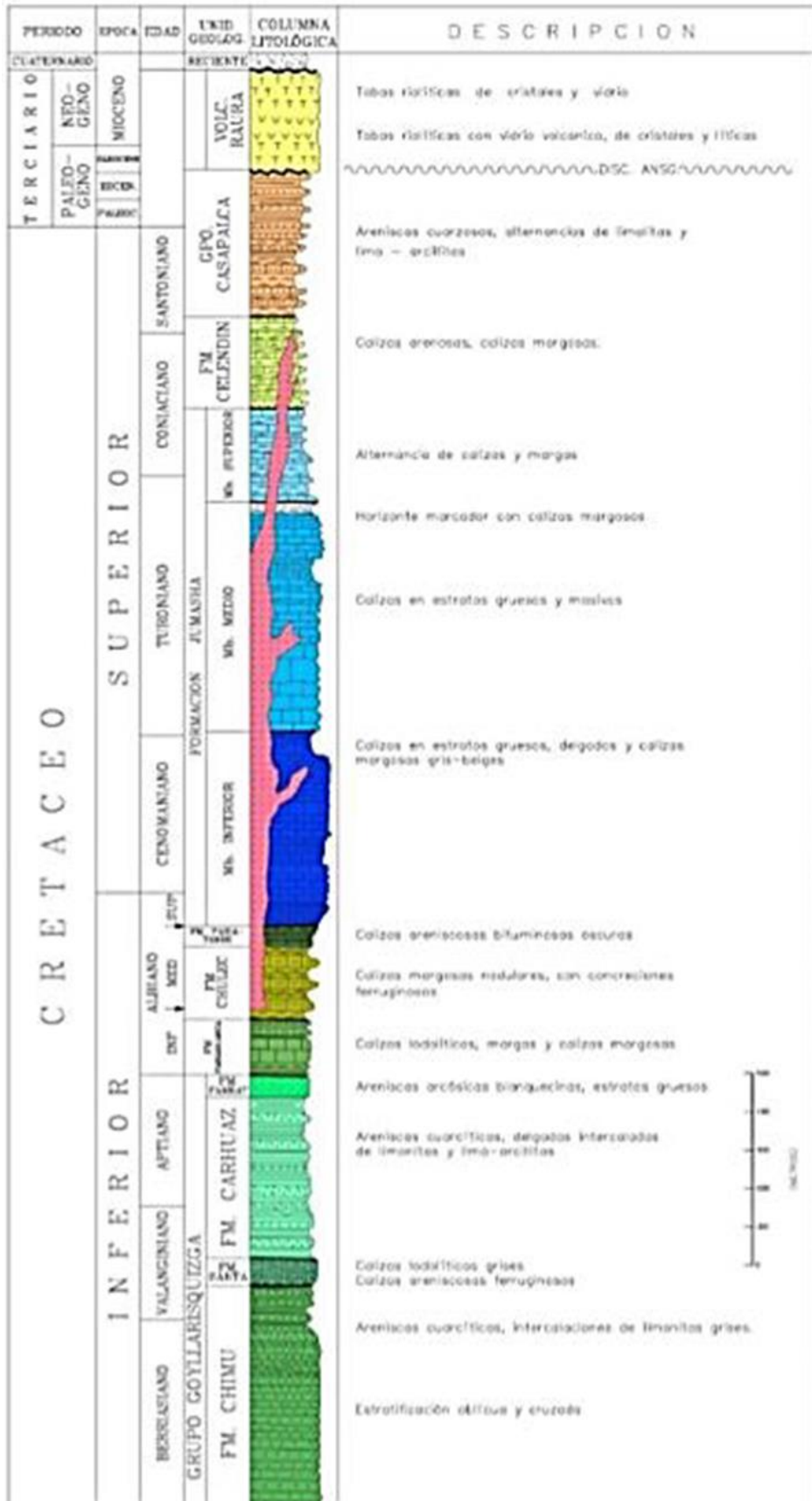
(Valanginiano Superior a Aptiano): Representa una fase de depósito continental, compuesta por areniscas, lutitas y cuarcitas, que yace concordantemente sobre la Formación Chimú. Contacta con las calizas Jumasha por un fenómeno de sobre-escurrimiento (Wilson, 1963).

- **Formación Jumasha**

(Albiano Superior a Turoniano): Aflora como calizas de edad Cretáceo medio a superior, exhibiendo capas medianas a gruesas de color gris (claro por meteorización). Se encuentra tectónicamente debajo de las rocas previamente mencionadas debido a un contacto por sobre-escurrimiento, manteniendo el rumbo regional andino (N 30° W). La Jumasha es crucial porque ha sido sometida a intensa alteración por la intrusión de cuerpos granodioríticos. Este proceso metamórfico de contacto generó grados variables de alteración, como marmolización, silificación, epidotización y, lo más importante, granatización (SKARN) (Laughin, 1924). La zona de SKARN es fundamental por ser el ambiente geológico que propició la formación de los principales cuerpos mineralizados de la unidad.

Figura 12

Columna estratigráfica local



Nota: Fuente Unidad Minera - Departamento de Geología

Rocas Ígneas

La actividad ígnea en el área de Raura se ha clasificado en tres pulsos principales que abarcan un lapso geológico de aproximadamente 3 millones de años (entre 8 y 11 Millones de años), según las reinterpretaciones que integran la geología de superficie y los estudios micropetrográficos del distrito (Candiotti, 1982).

Primera Fase (Fase Volcánica Explosiva):

Esta fase se manifiesta como una actividad volcánica explosiva, compuesta por rocas de composición andesítica, dacítica, riodacítica y tobas riodacíticas. En los contactos con las calizas de la Formación Jumasha, estas rocas presentan fragmentos asimilados de la caliza. Específicamente en la zona de Gretty-Brunilda, esta fase es responsable de importantes procesos de reemplazamiento que dieron origen a cuerpos mineralizados económicos de Plomo y Zinc (Candiotti, 1982).

Segunda Fase (Intrusión Granodiorítica):

Constituye la intrusión intrusiva más antigua identificada en el área, con una edad radiométrica de 11 millones de años. Litológicamente es una granodiorita, mapeada históricamente como "diorita cuarcífera Cerro Colorado" (Fernández C., 1964).

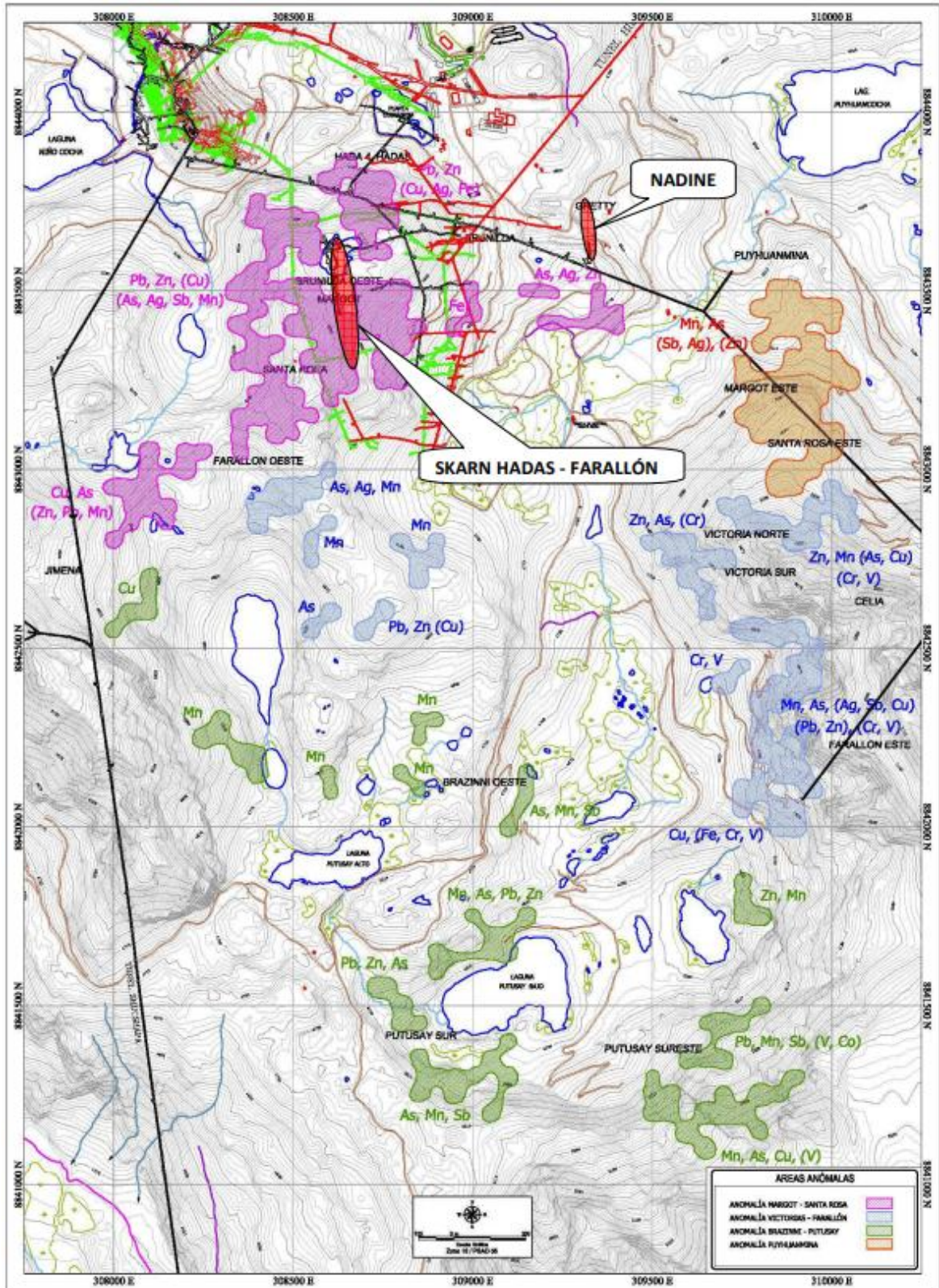
- **Distribución:** Aflora en el sector Sur, entre la Laguna Putusay Alta, Cerro Colorado y la Laguna Niñococha, y se extiende hacia el Norte sobre la Laguna Tinquicocha.
- **Significancia Metalogénica:** Los contactos de esta intrusión con la caliza sedimentaria promovieron una aureola de alteración que culminó en la formación de SKARN. Este fenómeno metamórfico es crucial, ya que representa la fase preliminar para la génesis de los cuerpos mineralizados. En superficie, la zona de contacto está caracterizada por limonitización y coloraciones ocre-amarillentas, producto de la meteorización, oxidación y lixiviación (Fernández C., 1964).

Tercera Fase (Pórfido Monzonítico):

Esta fase es la más joven, con una edad radiométrica de 7 millones de años. Está representada por la intrusión de un pórfido monzonítico que se asocia a la formación de columnas de brecha hidrotermal y a la propagación de diques a lo largo del sistema.

Figura 13

Plano geológico local



Nota: Fuente Unidad Minera - Departamento de Geología

3.1.1.3 Geología estructural. La estructura regional se alinea con el patrón de los Andes Centrales del Perú. Los rasgos de plegamiento principales en el área son el Anticlinal Santa Ana y el Sinclinal Caballococha, ambos orientados con un rumbo general N 20°30' W.

▪ **Tectónica de Cabalgamiento:**

Un mecanismo de sobre-escurrimiento hacia el Suroeste ha puesto en contacto directo las areniscas y cuarcitas del Grupo Goyllarizquizga con las calizas de la Formación Jumasha.

▪ **Sistemas de Fracturamiento:**

La compresión tectónica en el eje Este-Oeste (E-W) generó múltiples sistemas de fracturamiento, siendo el más prominente aquel con rumbo N 65°- 80° W (alojando vetas clave como Gianinna, Abundancia, Roxana, Torre de Cristal y Flor de Loto).

▪ **Fallamiento Local y Reactivación:**

El fallamiento local en bloques es un patrón estructural importante en la sección Catuva (referencia Anexo A). Las etapas más recientes de actividad tectónica, impulsadas por las mismas fuerzas compresivas, resultaron en la reactivación de un sistema regional NE, el cual trunca y desplaza los sistemas estructurales más antiguos de orientación NW y Norte a través del distrito minero.

3.1.1.4 Geología económica. El periodo de mineralización en el Distrito Minero de Raura, se estima entre los 8 a 10 millones de años en la formación de yacimientos de Cobre, Zinc, Plomo y Plata. La mineralización se manifiesta en tres estilos principales: relleno de fracturas preexistentes (vetas), reemplazamientos metasomáticos de contacto (bolsonadas en skarn) y depósitos tipo stockwork.

3.1.1.4.1 Mineralización en vetas. La mineralización filoniana se concentra en dos sistemas de fracturamiento:

- Sistema Principal: Rumbo dominante N 60° W a E-W.
- Sistema Secundario: Rumbo N 65° 80° E.

Existe un zonamiento metálico horizontal marcado: la mineralización al Norte de Raura se caracteriza por concentraciones de Cobre y Plata, mientras que hacia el Sur predominan los valores de Plomo y Zinc

3.1.1.4.2 Mineralización en cuerpos.

Cuerpo de Skarn Principal:

El cuerpo de reemplazamiento de Zinc y Plomo más significativo del distrito presenta un rumbo N30°W con un buzamiento de 70°W.

Dimensiones y Extensión:

El halo de alteración metasomática posee una potencia de 50 a 60 m y una longitud de 900 a 1000 m. A lo largo de esta alteración, se emplazan cuerpos mineralizados sucesivos de Sur a Norte (Primavera, Betsheva, Catuva, Niño Perdido).

Composición:

La mineralización incluye reemplazamiento de esfalerita (marmatita), galena, calcopirita y diseminación de pirita.

Zoneamiento Vertical:

Se observa un zoneamiento vertical dentro de este cuerpo:

- Nivel Superior: Alta concentración de Zinc, Plomo y Plata.
- Nivel Intermedio (Nv. 490): Máximos valores de zinc y disminución de Plomo.
- Profundidad: Incremento notable en los valores de Cobre

Texturas:

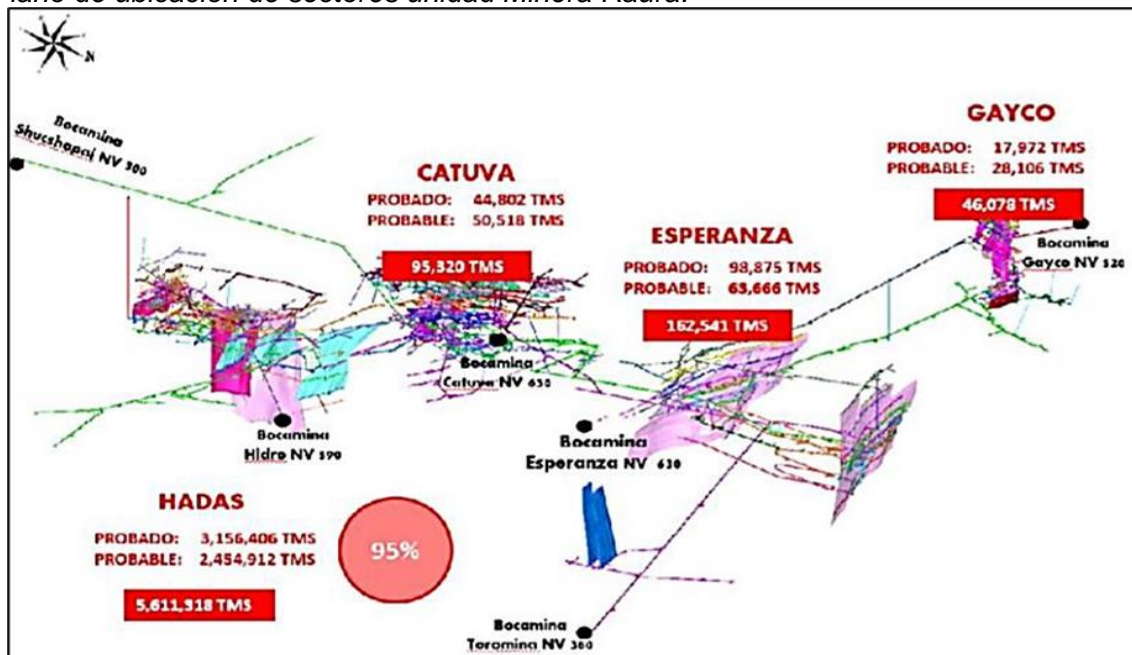
La mineralización se presenta en formas masivas, en brechas, parches y diseminada. La plata está estrechamente asociada a la galena. Al Norte, predominan galena y esfalerita, mientras que al Sur se registra un aumento de cobre (calcopirita), vinculado a una significativa cantidad de pirita sacaroidal de grano grueso en la franja de contacto entre el Skarn y el intrusivo.

3.1.1.4.3 Mineralización tipo stock work. Este estilo de mineralización está caracterizado por el relleno de fracturas menores, irregulares, acompañado de

diseminación y reemplazamientos masivos. Los stockworks han generado cuerpos mineralizados de importancia, generalmente relacionados con estructuras mayores. Su manifestación es notable en la Sección Hada, asociada a la Veta Sofía, en las zonas de mármol entre bolsonadas en la Sección Catuva, y en los afloramientos mineralizados del proyecto Gayco.

Figura 14

Plano de ubicación de sectores unidad Minera Raura.



Nota: Fuente Unidad Minera - Departamento de Planeamiento.

3.1.2 Estándar de voladura e impacto en la operación.

El Estándar de Voladura constituye una secuencia de eventos reglamentados, diseñados para la ejecución controlada y sistemática del proceso de perforación y tronadura dentro de la operación minera. Este procedimiento es de carácter corporativo y su implementación recae en una estructura de personal definida:

- **Jefe de Mina:**
Responsable de la coordinación general del proceso de detonación (Capitán de Mina y coordinador de chispeo y voladura).
- **Jefe de Guardia:**
Supervisor directo de las actividades.

- **Responsable de Chispeo y Voladura:**

Ejecutor directo de la voladura.

El procedimiento se segmenta en tres fases críticas que se desarrollan a lo largo de cada turno de guardia, involucrando al personal mencionado:

- Reunión de Inicio de Guardia.
- Reunión de Media Guardia.
- Procedimiento de Chispeo y Voladura.

La ejecución de este estándar está temporalmente sincronizada con el relevo de turnos, iniciando a las 6:30 a.m. / 18:30 p.m. y concluyendo con el reingreso de la guardia subsiguiente a las 7:15 a.m. / 19:15 p.m.

A continuación, se presenta un desglose detallado de las actividades específicas que se realizan en cada una de estas fases procedimentales, junto con la programación horaria establecida para garantizar la continuidad operativa.

Figura 15

Actividades del procedimiento estándar de chispeo

Reparto de guardia	Reparto de media guardia	Chispeo y voladura
<ul style="list-style-type: none"> • El Jefe de Guardia verifica que el personal encargado del chispeo y la voladura posea el carné SUCAMEC correspondiente. • El Jefe de Guardia registra al personal asignado en el formato de "secuencia de chispeo", junto con las labores planificadas para la guardia. 	<ul style="list-style-type: none"> • El Jefe de Guardia entrega al Jefe de Mina el formato actualizado de "secuencia de chispeo" con las labores programadas y se obtiene la aprobación respectiva. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se completa el "permiso de chispeo y voladura", donde se consigna la posición de los vigías; este documento es revisado y autorizado por el Jefe de Guardia. • Se confirma que todo el personal haya sido evacuado del área y, posteriormente, se inicia el periodo de silencio radial. • Durante el silencio radial solo se comunican el Jefe de Mina y el Jefe de Guardia para validar que el permiso de voladura esté debidamente firmado. • El Jefe de Guardia de cada zona coordina con el responsable de chispeo en sus labores, autorizando el inicio de la secuencia manual de iniciación. • Finalizado el chispeo, el Jefe de Guardia informa al Jefe de Mina y realiza la verificación del personal para asegurar su integridad. • Una vez concluido el procedimiento, se levanta el silencio radial y se retira el cordón de seguridad de la bocamina, quedando habilitado el ingreso para la siguiente guardia.

Nota: Fuente elaboración propia.

Aunque el actual procedimiento corporativo de chispeo y voladura integra medidas de control esenciales (como la comunicación radial continua entre el Jefe de Mina y los involucrados, la asignación de vigías y el uso de sistemas digitales para la contabilización

de personal) que garantizan la seguridad operativa, la práctica mantiene un riesgo intrínseco significativo. El factor de riesgo principal es la ejecución manual del chispeo, que requiere la permanencia del personal dentro de la mina al momento de la detonación. Esta exposición genera un peligro constante ante la posibilidad de fallas en la secuencia manual o una iniciación intempestiva del explosivo.

En la búsqueda por eliminar este factor de riesgo inherente al chispeo manual, se justifica la implementación de la iniciación electrónica remota. Esta tecnología tiene como objetivo fundamental retirar a todo el personal de interior mina durante el disparo. Al realizar las detonaciones desde un punto seguro en superficie, se logra una mitigación total del riesgo de exposición humana durante la fase crítica de la voladura.

3.1.3 Diagnóstico del procedimiento de iniciación convencional

3.1.3.1 Descripción del procedimiento tradicional. El sistema de iniciación tradicional analizado corresponde al empleo de mecha lenta y fulminante (mecha armada) para el chispeo manual en frentes de voladura. Dicho procedimiento requiere la conexión física de mechas y fulminantes a las cargas instaladas en los taladros y la posterior ignición manual en el frente, con desplazamiento y aproximación del personal encargado al punto de chispeo. El proceso incluye las etapas de carguío, verificación de taladros, ensamblado de iniciadores y comprobación de barreras de seguridad antes del chispeo.

3.1.3.2 Limitaciones observadas. Mediante revisión de procedimientos operativos y entrevistas técnicas se identificaron las siguientes limitaciones del método convencional:

- **Exposición directa del personal:**

El encendido en el frente obliga a la presencia humana en zonas con explosivos activos y posibles proyecciones, aumentando el riesgo de incidentes.

- **Variabilidad en el tiempo de iniciación:**

Los sistemas basados en mecha presentan dispersión en el tiempo de combustión, lo que genera incertidumbre sobre el instante real de detonación y obliga a prolongar tiempos de evacuación y ventilación.

- **Coordinación limitada entre frentes:**

La iniciación manual dificulta la ejecución sincronizada de múltiples frentes, limitando opciones de secuenciación y control energético.

- **Dependencia de condiciones ambientales:**

Humedad, deterioro del material o manejo inadecuado afectan la fiabilidad del chispeo.

- **Trazabilidad y registro insuficientes:**

El proceso tradicional no genera un registro digital confiable de la secuencia de disparos ni de la integridad de cada iniciador.

Estas observaciones justificaron la búsqueda de un sistema de iniciación que reduzca la exposición humana, aumente la precisión temporal y permita control y trazabilidad digital.

3.1.4 Propuesta técnica: sistema de voladura agrupada con iniciación electrónica

3.1.4.1 Concepto y objetivos técnicos. La voladura agrupada se define aquí como la iniciación controlada y centralizada de múltiples puntos de detonación (frentes o secciones de malla) desde una estación segura, empleando detonadores electrónicos programables para asegurar precisión en retardos y trazabilidad de eventos. Los objetivos técnicos primarios fueron:

- Eliminar la presencia de personal en el frente al momento de la iniciación.
- Lograr precisión temporal en los retardos (programación individual por detonador).
- Mejorar la coordinación energética entre taladros y frentes a través de secuencias programadas.
- Generar registros digitales automáticos del evento (logs de programación, verificación y disparo).

3.1.4.2 Arquitectura del sistema. El sistema técnico se compone de los siguientes subsistemas:

- **Detonadores electrónicos programables:**

Dispositivos con microprocesador y almacenamiento de retardo, capaces de comunicación bidireccional y de reportar estado (presencia, integridad, energía almacenada).

- **Logger / Tagger:**

Herramienta portátil de campo para verificación individual de cada detonador, asignación de retardo y lectura de parámetros eléctricos de la línea antes del cierre del sistema.

- **Red de comunicación troncal:**

Cable radiante (Leaky Feeder) o canal equivalente que asegura la transmisión de señal entre la estación de control y las derivaciones en los frentes.

- **Unidad de disparo central (Blaster / Blast Controller):**

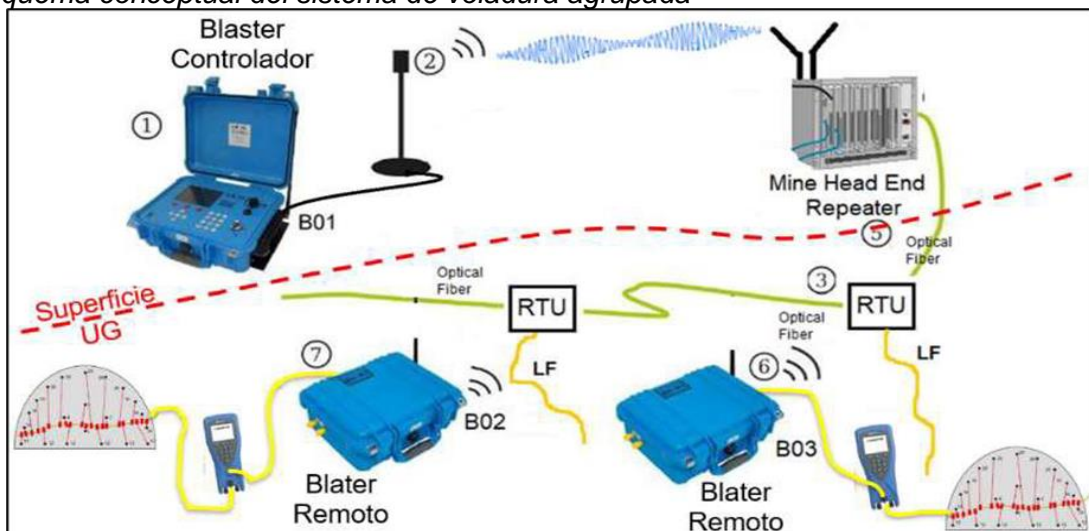
Equipo con interfaz segura para la gestión de accesos, armado y envío de la orden de disparo; registra la secuencia y actúa como coordinador maestro.

- **Software de gestión:**

Plataforma que permite diseñar secuencias, simular retardos y exportar/importar planes de voladura (compatible con formatos estándar de diseño).

Figura 16

Esquema conceptual del sistema de voladura agrupada



Nota: Fuente adaptada de mejoras en seguridad minera subterránea mediante la iniciación (aplicación) de voladura electrónica centralizada desde superficie, por N. A. Mayta Valle, 2022, Volcan Compañía Minera S.A.A.

3.1.4.3 Funcionalidad operativa principal. La operación típica del sistema sigue la secuencia:

- **Diseño de la malla y plan de retardos:**

En oficina se diseña el patrón (burden, espaciamiento, cargas por barrenos) y se asignan tiempos de retardo por taladro o por subgrupos.

- **Programación y verificación en campo:**

Con el logger cada detonador es probado y programado; se registra la identificación y el retardo asignado.

- **Conexión a la red troncal:**

Los ramales de cada frente se integran a la red troncal mediante cajas de distribución con protecciones físicas y eléctricas.

- **Bloqueo de seguridad y autorización:**

La unidad de disparo exige autorizaciones y verificaciones (llave física, códigos o token) para armar el sistema.

- **Armado final y verificación remota:**

Desde la estación se realiza la verificación en línea (estado de cada detonador, continuidad de la línea).

- **Ejecución del disparo:**

La orden de disparo se transmite y el controlador sincroniza la descarga de los condensadores de cada detonador según retardos programados.

- **Registro y trazabilidad:**

Se registra log digital del evento (instante de activación, secuencia real, estado post-disparo).

3.1.4.4 Requisitos técnicos y de instalación. Para asegurar el rendimiento esperado, la instalación del sistema consideró los siguientes requisitos técnicos mínimos:

- Cable radiante con la longitud y pérdida de señal evaluadas según el trazado (pérdidas compensadas con amplificadores y repetidores según diseño).
- Cajas de distribución IP/inmunizadas y conectores herméticos en derivaciones.

- Sistemas de puesta a tierra y protección contra sobretensiones en la estación de disparo.
- Procedimientos estandarizados de testeo de continuidad y resistencia (medida en ohmios por tramo) antes de armado final.
- Procedimientos de bloqueo y autenticación para el armado del equipo de disparo (doble autorización cuando proceda).

3.1.4.5 Seguridad eléctrica y lógicas de fail-safe. Se implementaron lógicas de seguridad eléctrica y procedimientos fail-safe que incluyen:

- Verificación de integridad de la línea previa al armado; cualquier corte o anomalía impide el armado.
- Monitorización continua (line cut monitoring) que detecta alteraciones y genera alarmas.
- Circuitos redundantes en control de acceso (autenticación por token + código) para prevenir activaciones no autorizadas.
- Mecanismos de descarga segura de energía en caso de interrupción durante la programación.

3.1.5 Verificación de la Infraestructura de Telecomunicaciones en Interior Mina.

Esta fase consistió en la inspección detallada de las infraestructuras clave dentro de la mina, realizada en conjunto con el personal especializado en perforación y voladura. El objetivo fue verificar y delimitar tres componentes esenciales para el proyecto:

- Los sectores actualmente equipados con la red de comunicaciones LAN.
- Los sectores de cobertura para la comunicación general en interior mina.
- Las áreas operacionales designadas para la realización de las pruebas piloto de iniciación electrónica.

3.1.5.1 Evaluación de Sectores con Conectividad LAN. Se procedió a mapear y recorrer las zonas que cuentan con la instalación de la red de área local (LAN), confirmando la integridad de la infraestructura desde su punto de origen hasta su

3.1.6.1 Etapa de planificación. Durante esta etapa se realizó el diagnóstico de la situación actual de las voladuras convencionales y se elaboró el plan de instalación del nuevo sistema de iniciación electrónica agrupada. Se definieron los componentes principales, la infraestructura requerida y los procedimientos operativos que permitirían su puesta en marcha.

Asimismo, se establecieron los criterios de seguridad y de control de riesgos específicos para el trabajo con sistemas electrónicos, con especial énfasis en la prevención de descargas eléctricas y en la protección de los componentes frente a la humedad y al polvo.

3.1.6.2 Etapa de instalación. La instalación comprendió el tendido de una red troncal de comunicación a lo largo de la rampa principal de la mina, desde la cual se derivaron ramales hacia los frentes de trabajo seleccionados. Estos ramales se conectaron mediante cajas de distribución selladas, con el fin de mantener la integridad del sistema en ambientes subterráneos de alta humedad.

Cada conexión fue verificada visualmente y se registró en los planos de instalación, con la finalidad de facilitar el control y trazabilidad del sistema. Las derivaciones fueron aseguradas mecánicamente a las estructuras del túnel, evitando interferencias con otras líneas de energía o servicios.

3.1.6.3 Etapa de verificación y calibración. Una vez completada la instalación del sistema, se realizaron pruebas de continuidad eléctrica y comunicación para comprobar la funcionalidad de la red.

Se verificó la transmisión de señal entre los puntos terminales de la red y la estación de control, así como la respuesta de los equipos de campo.

Las pruebas de calibración incluyeron la comprobación de integridad del cableado, la correcta identificación de los detonadores electrónicos y la revisión del software de programación. Todos los resultados fueron documentados en reportes técnicos y validados por el área de Seguridad Industrial y Control de Riesgos.

3.1.6.4 Etapa de ejecución de pruebas piloto. La prueba piloto se llevó a cabo en frentes de avance de la mina seleccionados por sus condiciones operativas representativas. En estas pruebas se implementó el sistema de iniciación electrónica con control remoto desde una estación segura, ubicada fuera del área de influencia directa del disparo.

Durante las pruebas, los detonadores fueron programados individualmente, asignándoles secuencias de retardo de acuerdo con el diseño de la malla de perforación. La información de configuración fue almacenada digitalmente y verificada antes de proceder con la voladura.

El proceso incluyó la evacuación del personal, el armado del sistema bajo supervisión técnica, la activación remota y el registro automatizado de los parámetros de disparo. Los datos recopilados fueron comparados posteriormente con los registros de las voladuras convencionales para evaluar los beneficios técnicos y de seguridad del nuevo sistema.

Tabla 2

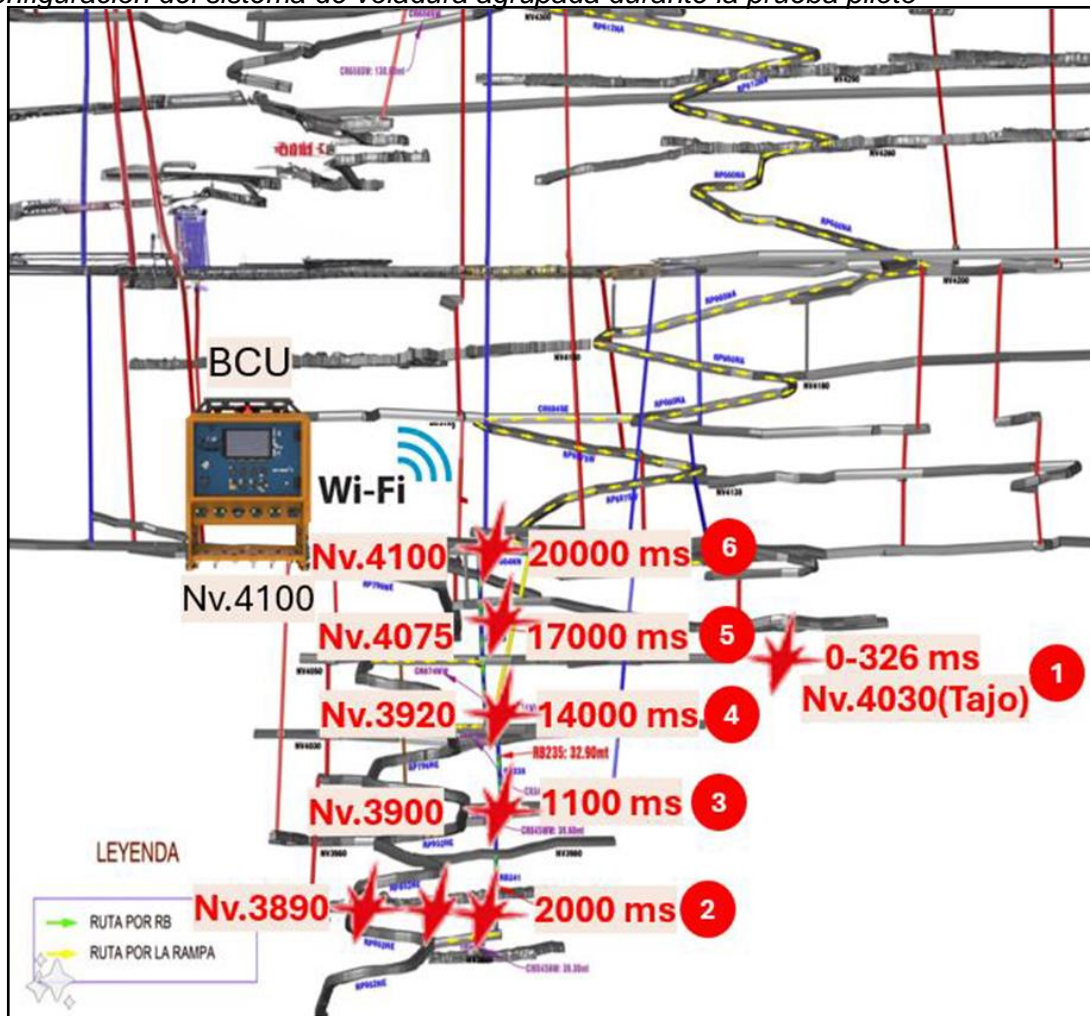
Cuadro resumen de voladuras centralizadas

N°	FECHA	TIPO DE LABOR	NIVEL	LABOR	RETARDO (Ms)	DETONADORES
1	28/07/2024	Frente	3890	RP214	2000	1
2	28/07/2024	Frente	3890	CM075	2000	1
3	28/07/2024	Frente	3890	CM777	2000	1
4	28/07/2024	Frente	3900	SN610	1100	1
5	28/07/2024	Frente	3920	BP925	14000	1
6	28/07/2024	Frente	4075	VE825	17000	1
7	28/07/2024	Frente	4100	BP499	20000	1
8	28/07/2024	Tajo	4030	TJ731	0 - 326	29

Nota: Fuente elaboración propia

Figura 18

Configuración del sistema de voladura agrupada durante la prueba piloto



Nota: Fuente elaboración propia.

3.1.7 Protocolos de seguridad y control operacional

3.1.7.1 Gestión de seguridad previa a la voladura. Previo a cada disparo, se realizaron reuniones de seguridad (charlas de 5 minutos) para reforzar las medidas preventivas y garantizar el cumplimiento del Procedimiento Escrito de Trabajo Seguro (PETS). Se confirmó la evacuación completa del personal mediante el sistema de monitoreo disponible en interior mina y se inspeccionaron las conexiones para descartar posibles daños.

Asimismo, se verificó la integridad de la comunicación entre los dispositivos del sistema de voladura y la estación central, y se validaron los permisos de disparo según el protocolo interno de la operación minera.

3.1.7.2 Seguridad durante la iniciación. Durante el disparo, la estación de control permaneció en modo bloqueado hasta que todas las verificaciones del sistema fueron confirmadas como correctas. El sistema cuenta con funciones de seguridad integradas que impiden la iniciación si se detectan anomalías eléctricas o fallas de comunicación.

Tabla 3

Verificación de comunicación para voladura centralizada

ITEM	COMUNICACIÓN	VERIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
1	Superficie-interior mina	Comunicación entre equipos	Verificar que el porcentaje de message ratio se encuentre por encima de 80%
2	Superficie-interior mina	Cantidad de detonadores	Verificar que la cantidad de detonadores visualizados en superficie coincida con interior mina
3	Superficie-interior mina	Encriptación de BCU	Proceder con el bloqueo del BCU en interior mina y la programación del BCU para disparo centralizado
4	Superficie-interior mina	Confirmación final desde superficie	Confirmar estado de BCU desde superficie, para evacuar la mina
5	Superficie-superficie	Confirmación de personal en zona segura	Verificar que el personal de interior mina se encuentra en superficie
6	Superficie-superficie	Confirmación para voladura centralizada	Solicitar autorización para inicio de proceso de voladura en superficie
7	Superficie-superficie	Reporte de voladura finalizada	Reportar los resultados de voladura de acuerdo con el reporte inmediato de voladura

Nota: Fuente elaboración propia.

Solo el personal autorizado, previamente registrado en la unidad de control, tuvo acceso al sistema de disparo. El proceso se desarrolló bajo supervisión directa del ingeniero de voladura y con comunicación permanente con las áreas adyacentes.

3.1.8 Procedimientos post-voladura

Una vez completada la voladura, se realizó la verificación del registro digital del evento, comprobando la secuencia de iniciación, los tiempos de respuesta y la finalización correcta de los detonadores programados.

El reingreso al área de trabajo fue autorizado únicamente después de la medición de gases residuales y la ventilación correspondiente. Posteriormente, se llevó a cabo la inspección del frente para evaluar la fragmentación y detectar posibles sobre-roturas o zonas inestables.

Reporte de voladura.

Documenta la ejecución de la voladura centralizada y contiene información detallada sobre el ID del BCU utilizado en la mina y su ubicación, la fecha y hora de ejecución de la voladura, la supervisión encargada del disparo, y la cantidad de detonadores conectados al equipo antes y después del disparo. Este último dato actúa como un indicador de seguridad, asegurando que ingresar a la mina después de la voladura es seguro.

Figura 19

Reportes automático de voladura

1 Blast Report						detnet
BCU:	505					
Location:	PROTOCOLO DE VOLADURA NV4100					
Date:	2024-07-28 18:35:27					
Operator:	CHRISTIAN CHAVEZ					
Supervisor:	RAI QUINTASI					
Notes:						
Date	Panels	Location	Detonators Before	Detonators After	State	
2024-07-28 18:35:27	2	CANAL 2	36	0	Blasted with no errors	

Nota: Fuente elaboración propia.

Reporte de detonador.

Presenta un registro detallado de cada detonador utilizado durante la voladura, donde incluye datos como, el identificador único del detonador (ID), tiempo en milisegundos programado en cada detonador, el número de taladro y la cantidad de detonadores por taladro.

Este reporte provee una visión clara y organizada de los detalles operativos de la voladura, permitiendo un análisis detallado de la secuencia y sincronización de los detonadores en el proceso.

Figura 20

Reportes automáticos de detonadores

Detonator ID	Time	Row	Hole	Det
4dcf	2000	1853189228	1853189228	12
4dd0	2000	1853189228	1853189228	11
4dd8	11000	1853189228	1853189228	13
4dd9	2000	1853189228	1853189228	10
4ddc	14000	1853189228	1853189228	14
53d8	20000	1853189228	1853189228	2
53d9	17000	1853189228	1853189228	1
53da	0	1853189228	1	1
53db	0	1853189228	1	2
53dc	7	1853189228	2	1
53dd	7	1853189228	2	2
53de	14	1853189228	3	1
53df	14	1853189228	3	2
53e0	121	1853189228	4	1
53e1	121	1853189228	4	2
53e2	128	1853189228	5	1
53e3	128	1853189228	5	2
53e4	135	1853189228	6	1
53e5	135	1853189228	6	2

Nota: Fuente elaboración propia.

Reporte de comunicación.

Correspondiente al rendimiento diario de la red WiFi IOT, destaca la cantidad de mensajes enviados y recibidos, así como los ratios de comunicaciones. Mostrando si la red está en uso activo y si muestra una alta eficiencia en términos de comunicaciones correctas, y que no existan cortes o los ratios de comunicaciones perdidas muy bajos.

Figura 21

Reportes automáticos de control diario

3 Daily Network Report

Network Id: 2
Network Name: Ethernet
In Use: true

Network Id	Date	Messages Out	Messages In	Bad Replies	Good Comms Ratio	Bad Comms Ratio	Lost Comms Ratio
2	2024-07-25 18:59:59	173075	160230	0	92	0	8
2	2024-07-26 18:59:59	744847	744257	0	99	0	1
2	2024-07-27 18:59:59	431132	413754	0	95	0	5
2	2024-07-28 18:59:59	568001	566724	0	99	0	1

Nota: Fuente elaboración propia.

3.1.9 Registro de datos e indicadores de control

Durante la fase de pruebas, se emplearon formatos de registro estandarizados para recopilar información sobre los tiempos operativos, las condiciones de disparo y los aspectos de seguridad. Los principales parámetros observados fueron los tiempos de armado, los intervalos de evacuación, las condiciones de ventilación y los resultados cualitativos del avance.

Estos registros fueron almacenados en soporte digital, con respaldo en la base de datos del área de Planeamiento y Seguridad. Los informes permitieron evaluar la confiabilidad del sistema, la secuencia de detonación y la efectividad de la comunicación entre equipos.

3.2 Procesamiento de información

3.2.1 Organización de la información

La información técnica fue organizada de acuerdo con la naturaleza de los datos obtenidos, clasificándolos en tres categorías principales que se nombran a continuación:

- **Datos operativos:**

Incluyen los tiempos de ventilación post-voladura, número de detonadores por disparo, distancia operativa y consumo energético.

- **Datos de seguridad:**

Comprenden el número de incidentes, observaciones SSOMA, cumplimiento de estándares de seguridad, y exclusión de personal durante la detonación.

- **Datos normativos y ambientales:**

Abarcan los reportes de medición de gases (CO y NOx) y la verificación del cumplimiento del D.S. N.º 023-2017-EM.

El periodo de registro comprendió entre noviembre de 2023 y junio de 2024, abarcando tanto las operaciones con voladura convencional como las realizadas bajo el nuevo sistema centralizado. Los reportes originales fueron extraídos de los formatos SSOMA y del sistema GEBS (Global Electronic Blasting System), el cual permitió obtener de manera digital la secuencia de disparo, continuidad de línea y estado de cada detonador. En la siguiente imagen, se muestra el formato estándar utilizado para la toma de datos y el registro de observaciones durante las pruebas.

Figura 22

Protocolo de registro e iniciación de voladura agrupada

ORICA PROTOCOLO DE REGISTRO E INICIACIÓN eDev™ & BLAST BOX **ANEXOS**
 CÓDIGO: 000000

IDENTIFICACIÓN DEL DISPARO
 NOMBRE: EL ALBA A
 NÚMERO: 4100
 FECHA: 21-08-2023-07A
 TIPO DE VOLADURA: Efectivo Cx

eDevII
 Electronic Blasting System

CANTIDAD TOTAL DE CARGOS
 CARGO APLICADO (KG):
 CARGO TOTAL APLICADO (KG): 400
 Nº DE CARGOS: 6

SECCIÓN LLAMADO SOLO POR LA PERSONA ENCARGADA DEL REGISTRO DE DETONADORES

APERTURAS DE CARGO	SECCIÓN CON DETONADOR CONVENCIONAL							
Nº	Libra	Grain	Nº	Libra	Grain	Nº	Libra	Grain
1	1000	3400	0	0	0	1	1000	3400
2	1000	3400	1	1000	3400	2	1000	3400
3	1000	3400	2	1000	3400	3	1000	3400
4	1000	3400	3	1000	3400	4	1000	3400
5	1000	3400	4	1000	3400	5	1000	3400
6	1000	3400	5	1000	3400	6	1000	3400

INDICIO TESTEO: 6:00 **FIN TESTEO: 6:30**

RESUMEN DE PROGRAMACIÓN Y DISPARO

BLAST BOX #1	ON	BLAST BOX #2	ON
FRECUENCIA UTILIZADA		ENCARGADO DEL DISPARO	
DETONACIONES PROGRAMADAS	6	NOMBRE: Juan Villanueva	
Tiempo de programación	15000 ms	FECHA: 21/08/2023	
FECHA DEL DISPARO	7:00 pm	NOMBRE: Juan Villanueva	
		FECHA: 21/08/2023	

CONSEJOS:
 Durante el último testeo se observó que al momento de la detonación el cable no responde al control remoto, se debe verificar que no permita la comunicación hacia el control remoto, se debe verificar la conexión de los cables de la línea de disparo y al mismo tiempo al cable de detonación. El resto de la línea se inicia normal, un punto aparte en el día 11/08/2023

Nota: Fuente elaboración propia.

Cada conjunto de registros fue codificado con un identificador que permitiera diferenciar las operaciones “convencionales” (antes del cambio) y “centralizadas” (después de la implementación).

Este sistema de organización facilitó la comparación directa entre ambos métodos, garantizando la coherencia de los indicadores analizados.

3.2.2 Consolidación de indicadores técnicos y de seguridad

Los datos organizados fueron consolidados mediante la elaboración de tablas comparativas, siguiendo la metodología de análisis operativo empleada por el área de Planeamiento de Raura.

El objetivo de esta consolidación fue identificar las variaciones reales en los indicadores de seguridad y eficiencia, y cuantificar la magnitud de mejora alcanzada tras la migración tecnológica.

La siguiente Tabla 4 resume los indicadores consolidados obtenidos de los reportes:

Tabla 4

Indicadores de seguridad y eficiencia

INDICADOR	SISTEMA CONVENCIONAL	SISTEMA CENTRALIZADO	VARIACIÓN (%)
Tiempo de ventilación	65 min	45 min	-31
Consumo energético	125 kWh	102 kWh	-18
Distancia operativa	12 m	320 m	+2567
Incidentes mensuales	3	0	-100
Cumplimiento normativo	72 %	100 %	+39

Nota: Fuente elaboración propia

La información fue procesada mediante cálculos de promedios simples y variaciones porcentuales, sin aplicar estadística inferencial, ya que los registros corresponden a datos operativos reales verificados en campo.

Figura 23

Pantalla de control de la BCU



Nota: Fuente elaboración propia.

Este procesamiento permitió observar de forma clara las diferencias entre ambos sistemas, destacando principalmente la eliminación de la exposición directa del personal y la reducción del tiempo de ventilación como los avances más relevantes.

3.2.3 Verificación y trazabilidad de la información

Para asegurar la confiabilidad de los datos procesados, se aplicó un sistema de validación cruzada entre las fuentes operativas, ambientales y de seguridad.

Cada registro fue verificado con los documentos de respaldo correspondientes:

- Los tiempos de ventilación se contrastaron con las hojas de monitoreo de gases del área SSOMA.
- Los consumos energéticos se validaron con las lecturas de amperímetros del tablero principal.
- Las distancias operativas fueron corroboradas con planos de ubicación de cámaras de disparo y zonas seguras

Estas evidencias confirman la correcta implementación del sistema y respaldan la veracidad de los datos utilizados en el análisis posterior.

Se elaboró un registro de control interno con la trazabilidad de cada conjunto de datos, permitiendo identificar la fecha, turno, ingeniero responsable y condiciones operativas de cada voladura.

Esta práctica se ajusta a los lineamientos de control documental establecidos en el D.S. N.º 023-2017-EM (MINEM, 2017).

Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados

4.1 Seguridad y salud ocupacional

4.1.1 Eliminación del riesgo de exposición

La principal mejora de la voladura agrupada es la eliminación de la exposición del personal al peligro directo durante la iniciación. En el método tradicional, el operador debía manipular mechas encendidas y permanecer cerca de los taladros durante los segundos iniciales de combustión, etapa donde ocurrían los accidentes más frecuentes por fallas de chispeo, retrocesos o encendidos prematuros.

El nuevo sistema desplaza la etapa de activación fuera del frente, ejecutándose desde una cámara segura con comunicación cableada o inalámbrica. Esta medida cumple con el principio jerárquico de control “eliminar el peligro en su origen”, promovido por la normativa peruana de seguridad minera (D.S. N° 024-2016-EM).

Para visualizar y sustentar cuantitativamente el impacto del sistema en la seguridad operacional, se elaboró el siguiente cuadro comparativo, que resume los principales indicadores antes y después de la implementación. Los datos muestran mejoras sustanciales en incidentes, cumplimiento normativo, distancia operativa y niveles de gases post-disparo.

Tabla 5

Indicadores de seguridad antes y después de la implementación

INDICADOR DE SEGURIDAD	CONVENCIONAL	CENTRALIZADA
Incidentes mensuales de voladura	3	0
Distancia del operador al frente	12 m	320 m
Cumplimiento PETS (%)	72 %	100 %
Personal en zona de riesgo	1–2 personas	0 personas
Fallas de chispeo / ignición	4 por mes	0
NOx previo al reingreso	18–22 ppm	6–10 ppm

Nota: Fuente elaboración propia.

4.1.2 Control de acceso y autenticación

Cada unidad de disparo requiere la autenticación de usuario mediante tarjeta RFID o código de acceso.

Esto evita activaciones no autorizadas y establece un registro digital del responsable de la voladura. El sistema también bloquea el encendido si detecta alguna falla de conexión o error en la programación, impidiendo cualquier riesgo de detonación accidental.

La función de monitoreo continuo (line-cut monitoring) verifica en tiempo real el estado del circuito, suspendiendo automáticamente el proceso si una línea se desconecta o sufre daño.

4.1.3 Ventilación y control de gases post-voladura

Con la programación remota, la hora exacta del disparo queda registrada, facilitando la coordinación del ciclo de ventilación y reingreso.

Los reportes mostraron una reducción en el tiempo de incertidumbre tras la detonación, optimizando los protocolos de seguridad para el control de gases tóxicos y el reinicio de labores.

De acuerdo con los registros operativos, el tiempo promedio de reingreso se redujo entre 10 y 15 %, sin comprometer los límites de exposición establecidos por la normativa vigente.

Para evaluar este impacto, se analizan los tiempos de ventilación, consumos energéticos y niveles de gases obtenidos durante la operación convencional y la operación con voladura centralizada.

La tabla siguiente evidencia una reducción consistente del tiempo total de ventilación y del consumo energético asociado a los ventiladores principales.

Tabla 6*Indicadores de ventilación y consumo energético antes y después*

INDICADOR	CONVENCIONAL	CENTRALIZADA
Tiempo de ventilación	65 min	45 min
NOx (minuto 15)	14 ppm	7 ppm
Tiempo de reingreso total	95 min	75 min
Energía por disparo (kWh)	125 kWh	102 kWh
Caudal requerido (m ³ /s)	180	155
Ciclos ventilados por guardia	1	2

Nota: Fuente elaboración propia.

4.2 Análisis del sistema de funcionamiento del sistema electrónico

Durante la fase de validación operativa se ejecutaron once disparos controlados utilizando el sistema electrónico de voladura agrupada. Cada prueba fue monitoreada en tiempo real mediante el panel de control CEBS, permitiendo evaluar el desempeño del sistema frente a los principales criterios de confiabilidad: incidentes operativos asociados a la voladura, fallas de iniciación de la malla electrónica, desvíos en la secuencia de disparo y cancelaciones del disparo por falla de sistema.

Estos parámetros permiten valorar la robustez tecnológica del sistema y su capacidad para integrarse sin interrupciones al ciclo de minado subterráneo.

4.2.1 Incidentes operativos asociados a la voladura

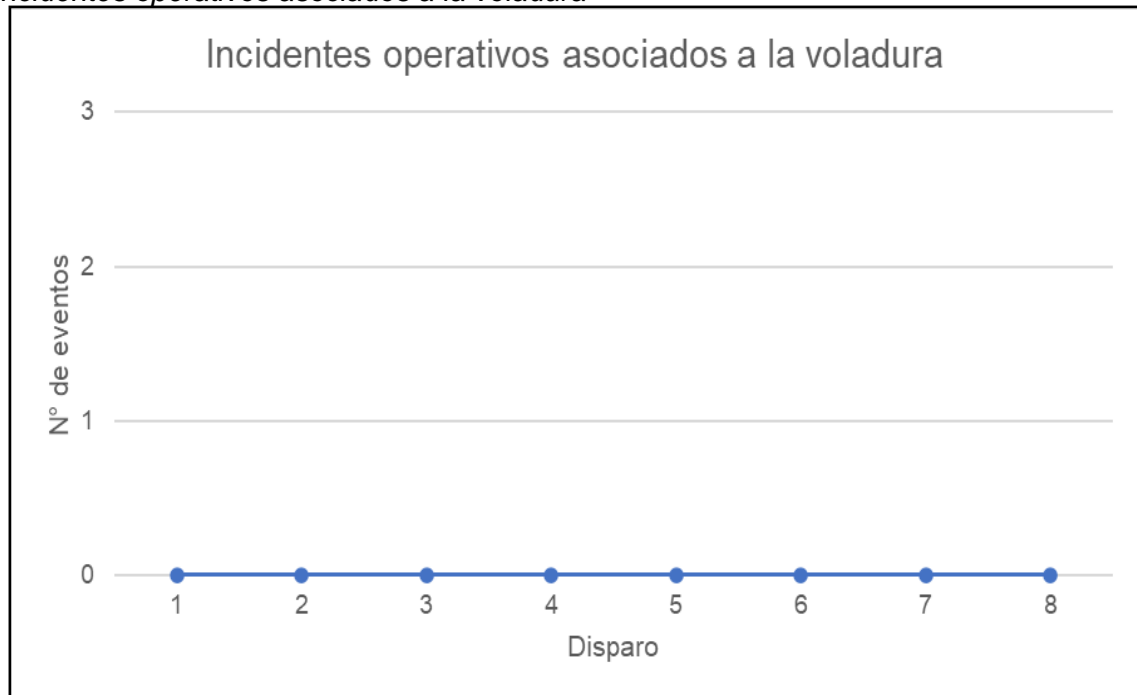
Este indicador comprende cualquier suceso que comprometa la seguridad del personal o la integridad del proceso durante la etapa de disparo. Dado que el objetivo principal del sistema centralizado es eliminar la exposición directa al riesgo, la meta establecida es registrar un valor igual a cero incidentes.

En las diez voladuras ejecutadas no se identificó ningún evento que pudiera ser catalogado como incidente operacional. Esto confirma que el sistema mantuvo condiciones estables, operó dentro de los parámetros esperados y redujo completamente la interacción humana con los elementos activos de la voladura.

El resultado obtenido se considera “Excelente”, y constituye evidencia central de la mejora en la gestión de seguridad.

Figura 24

Incidentes operativos asociados a la voladura



Nota: Fuente elaboración propia.

4.2.2 Frentes no iniciados por el sistema electrónico.

Este indicador evalúa la cantidad de frentes o taladros que no lograron iniciar durante el disparo debido a fallas en el detonador, problemas en la línea troncal, desperfectos en los conectores o interrupciones en la transmisión de señal. Para garantizar la confiabilidad del sistema, el valor esperado es cero fallas.

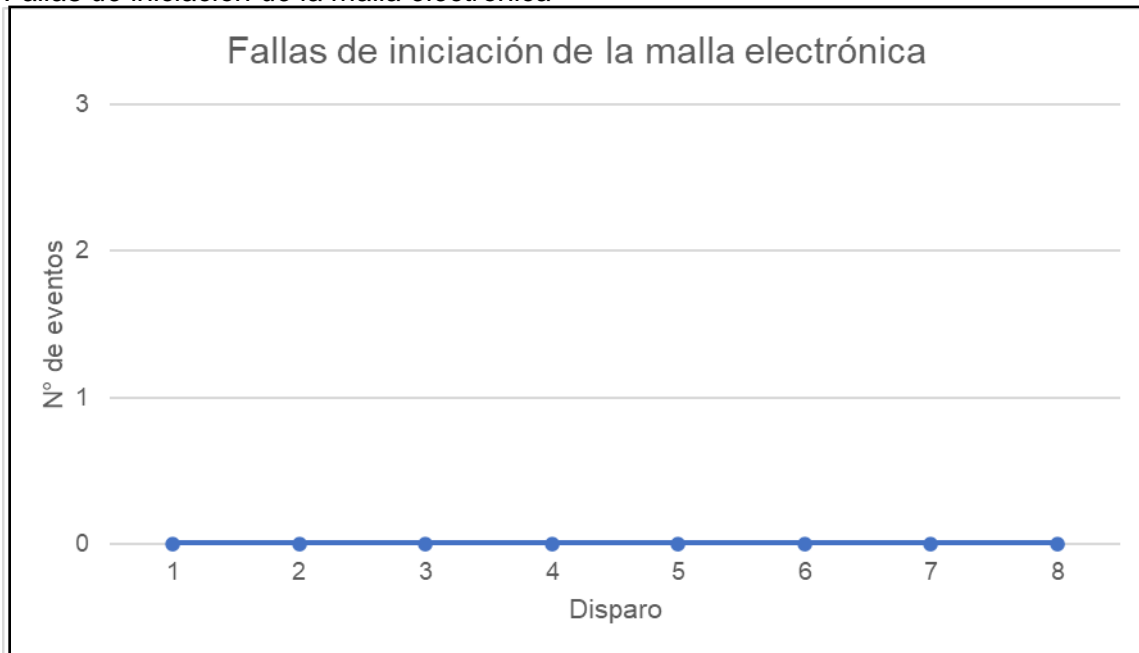
Durante el periodo de evaluación no se registraron frentes incompletos ni mallas sin iniciar.

Todos los detonadores respondieron adecuadamente a la programación electrónica y la transmisión de señal se mantuvo estable durante todo el proceso.

Este desempeño confirma la precisión del sistema y su capacidad para evitar situaciones críticas como tiros cortados, cargas activas remanentes o necesidad de retrabajos.

Figura 25

Fallas de iniciación de la malla electrónica



Nota: Fuente elaboración propia.

4.2.3 Desvíos en la secuencia de disparo

Los desvíos en la secuencia de disparo corresponden a cualquier variación respecto al tiempo programado para la activación del sistema. Un desvío puede afectar la coordinación operativa y comprometer la ventilación, la estabilidad del macizo o el rendimiento del ciclo de minado.

Por esta razón, el valor aceptable para este indicador es cero.

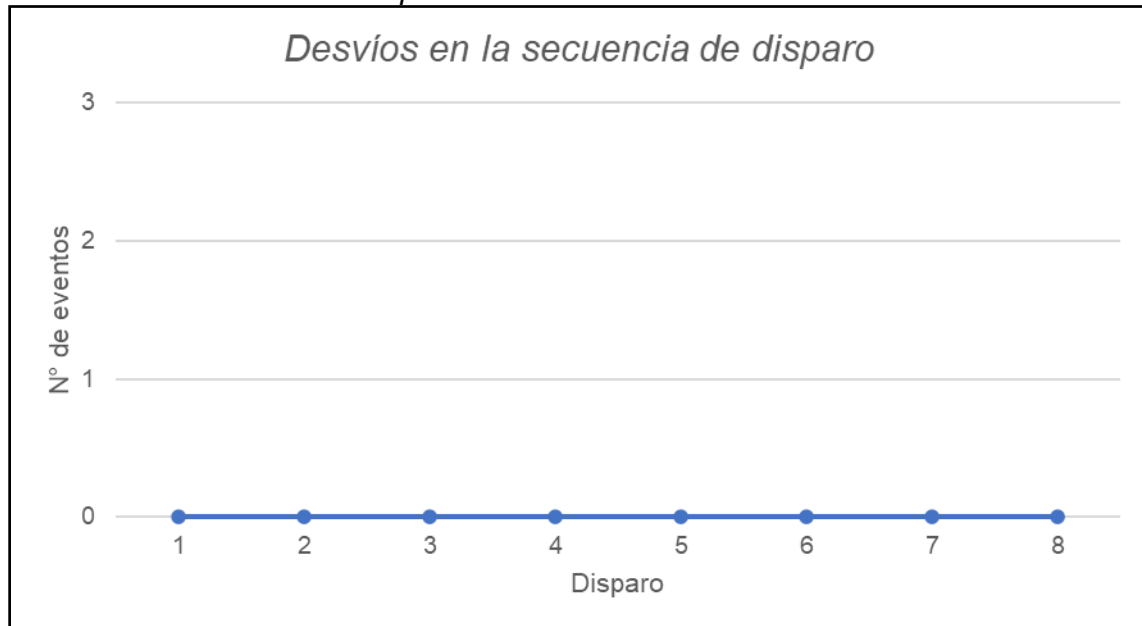
En ninguna de las voladuras evaluadas se presentaron alteraciones en los tiempos de retardo ni discrepancias en la secuencia programada.

El sistema ejecutó los disparos conforme a los retardos establecidos, lo cual demuestra la confiabilidad del microcontrolador interno de los detonadores y del proceso de verificación previa al disparo.

Esta precisión temporal es una de las ventajas más relevantes del sistema centralizado frente al método convencional.

Figura 26

Desvíos en la secuencia de disparo



Nota: Fuente elaboración propia.

4.2.4 Cancelación de voladura

Este indicador se asocia a voladuras que deben ser anuladas debido a fallas detectadas durante las verificaciones finales: pérdida de continuidad, errores en la comunicación del circuito, códigos no reconocidos o fallas electrónicas. Una cancelación implica pérdida de tiempo, reprocesamiento y retraso del ciclo de minado, por lo que la meta es registrar cero eventos. La Tabla 12 establece el criterio de evaluación para ese KPI.

Tabla 7

Evaluación por cancelaciones del disparo

DATOS	VERIFICACION
0	Aceptable
≥ 1	Inaceptable

Nota: Fuente elaboración propia.

Durante las once pruebas no se produjo ninguna cancelación del disparo por falla del sistema. El proceso de verificación previa confirmó en todos los casos la continuidad del circuito, la correcta programación de cada detonador y la disponibilidad del equipo de disparo.

Este desempeño refleja un nivel de confiabilidad que supera ampliamente al método convencional, donde son frecuentes las suspensiones por chispeo defectuoso o mechas inestables

Figura 27

Cancelaciones del disparo



Nota: Fuente elaboración propia.

4.3 Eficiencia y gestión del tiempo operativo

El registro comparativo de tiempos operativos mostró una disminución notable en los periodos no productivos asociados al armado, evacuación y reingreso.

En el sistema convencional, el proceso de chispeo implicaba:

- Ingreso del personal al frente,
- Encendido manual de mechas,
- Evacuación total del área,
- Espera de extinción y ventilación, y
- Verificación posterior de seguridad.

Con la voladura agrupada, las fases 1 y 2 se eliminan. El disparo se realiza desde una estación remota protegida, mediante autorización electrónica, reduciendo los tiempos muertos por coordinación y exposición.

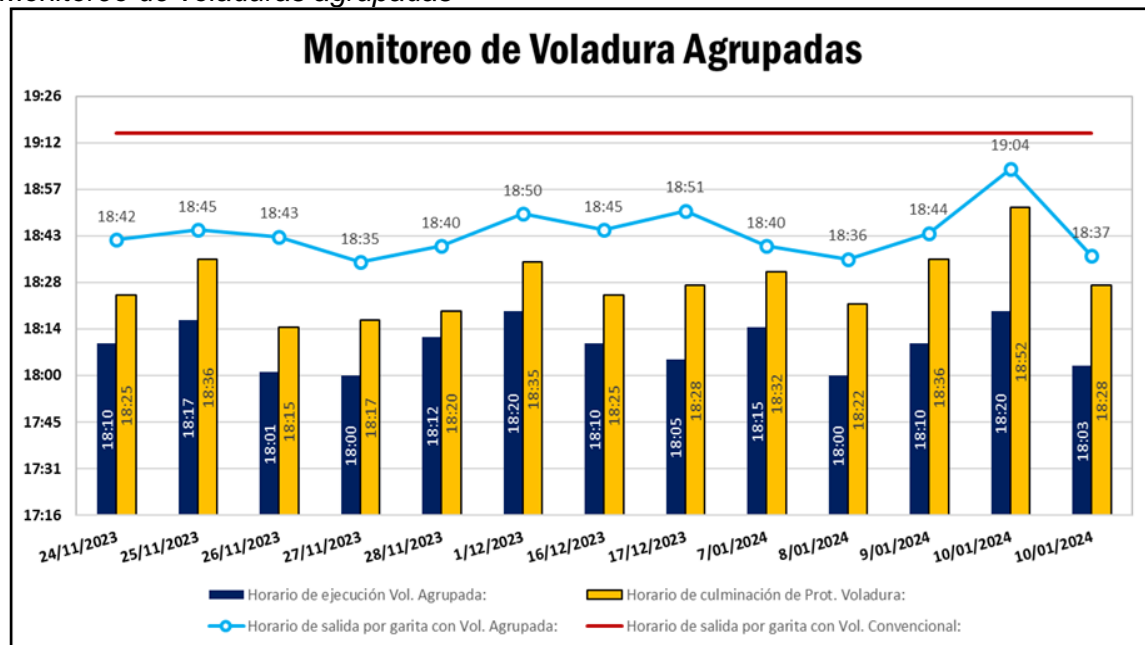
Los registros del estudio indican una reducción promedio del 20 % en el tiempo total del ciclo de voladura, reflejando una mejora sustancial en la continuidad del ciclo de minado.

Esta eficiencia temporal tiene una correlación directa con la productividad, ya que permite programar más disparos en una misma jornada o recuperar tiempo en operaciones afectadas por retrasos logísticos.

Registro de voladura agrupadas con detonadores electrónicos, monitoreando los tiempos de culminación del protocolo de voladura y salida de personal chispero a superficie

Figura 28

Monitoreo de voladuras agrupadas



Nota: Fuente elaboración propia.

Se logró reducir el tiempo de demora en 30 min (0.5 h) para la ejecución de disparos de los frentes iniciados con GEBS (sistema de voladura electrónica agrupada), pasando de culminar de 7:15 am/pm a 6:40 am/pm en referencia al protocolo de voladura donde el personal ejecutor de disparo ya se encuentra en garita de control - superficie. Se observa que se tiene aproximada.

A partir de esto, se desprenden los siguientes análisis

Beneficio en metros de avance

Tabla 8

Beneficio en metros de avance

ITEM	UNIDAD	VALOR
Tiempo de Perforación de frente	h/frente	2.25
Rendimiento de perforación	m/h	0.58
Tiempo adicional efectivo	h	0.5
Días por mes	días	30
Guardias por día	N°	2
Metros adicionales	m/mes	17.31

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 9

Beneficio en toneladas perforadas

ITEM	UNIDAD	VALOR
Rendimiento Raptor	m/h	18
Tiempo adicional efectivo	h	0.5
Días por mes	días	30
Guardias por día	N°	2
Metros adicionales	m/mes	540
Toneladas perforadas	Ton/mes	1782

Nota: Fuente elaboración propia.

Para sustentar el impacto del sistema en la productividad y continuidad operativa, se presenta la siguiente tabla comparativa, en la que se analizan los principales indicadores asociados al ciclo de minado: tiempos operativos, avance mensual, frentes disparados y retrabajos. Los datos evidencian una mejora significativa en la eficiencia general del proceso.

Tabla 10*Comparación de indicadores operativos antes y después*

INDICADOR OPERATIVO	CONVENCIONAL	CENTRALIZADA
Tiempo total del ciclo	180 min	144 min
Avance mensual	128 m	142 m
Metros adicionales	-	17.31 m
Toneladas adicionales	-	1782 ton/mes
Frentes disparados/guardia	1	2

Nota: Fuente elaboración propia.

4.4 Evaluación técnica: fragmentación, daño y estabilidad

El análisis visual posterior a las voladuras agrupadas indicó una fragmentación más uniforme y una reducción de la sobrerotura, particularmente en hastiales y coronas. Este efecto se asocia a la sincronización precisa del sistema, que evita detonaciones simultáneas desfasadas que concentren energía en zonas críticas del macizo.

Asimismo, el menor nivel de vibración observada contribuye a la estabilidad geomecánica, reduciendo el riesgo de microfracturas o desprendimientos secundarios.

4.5 Análisis económico

Se realizó el análisis económico de la implementación del Sistema de Voladura Electrónica Agrupada (GEBS), también denominado voladura alámbrica con detonadores electrónicos, el cual demostró su rentabilidad y justificación financiera en el marco de la tesis. Esta evaluación se centró en la correlación entre la inversión inicial, los egresos operativos recurrentes y los ingresos generados por el aumento de la productividad en los primeros seis meses de operación.

Tabla 11*Análisis económico*

		-	1	2	3	4	5	6
EGRESOS	USD/mes	24,414	17,778	17,233	18,154	18,077	18,109	18,023
Alquiler de equipo	USD		2,200	2,200	2,200	2,200	2,200	2,200
Mantenimiento de equipo	USD		400					
Certificación Personal	USD	9,800						
Alquiler camioneta y ATS* Referencial	USD		8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000
Detonadores EdeV US\$ (14.76 USD/PZA)	USD		8,251	7,838	8,959	8,915	8,900	8,841
Conector Empalme Eléctrico	USD	1,224	-	-	-	-	-	-
Cable Troncal US\$ (0.630 USD/m)	USD	8,555	-				-	
Cable Mellizo total US\$ (0.2572 USD/m)	USD	1,029	276	321	343	332	343	332
Cable Arnes total US\$ (0.24USD/m)	USD	3,806	748	867	927	897	927	897
Costo Voladura alambrica USD/mes	USD	24,414	19,875	19,226	20,429	20,344	20,370	20,270
Descuento Costo Detonador ensamblado	USD		-2,098	-1,993	-2,276	-2,267	-2,262	-2,247
INGRESOS	USD/mes		27,900	27,900	27,900	27,900	27,900	27,900
Flujo de fondos netos económicos	USD/mes	-24,414	10,122	10,667	9,746	9,823	9,791	9,877

Nota: Fuente elaboración propia.

Tabla 12*Indicadores de evaluación económica*

VAN	USD	19,290
TIR	%	34%
B/C	-	2.41
Payback	meses	2.42

Nota: Fuente elaboración propia.

El análisis económico mostró que, si bien la inversión inicial del sistema electrónico es superior al método convencional debido al costo de los detonadores y equipos de programación, los beneficios operativos compensan progresivamente la diferencia.

El ahorro se materializa en tres áreas principales:

- **Reducción del tiempo improductivo:**

Menor tiempo de armado, evacuación y ventilación genera un incremento en la disponibilidad operacional.

- **Disminución de pérdidas por fallas de iniciación:**

La confiabilidad electrónica elimina repeticiones de disparos y retrabajos.

- **Optimización del consumo de explosivo:**

La distribución uniforme de energía mejora la fragmentación, reduciendo la sobrecarga de explosivos por taladro.

La evaluación costo–beneficio sugiere una recuperación del costo adicional en menos de un año operativo, dependiendo del número de disparos mensuales y del tamaño de la operación.

Estos resultados coinciden con estudios de casos internacionales —como Szumny et al. (2020) y Rapokhin & Akgün (2023)— donde la adopción de sistemas electrónicos en minería subterránea ha generado incrementos en productividad de entre 8 y 15 % y reducciones de costo unitario en torno al 10 %.

4.6 Prueba de hipótesis

La hipótesis inicial de la investigación es: “La implementación de un sistema de voladura agrupada con detonadores electrónicos en minería subterránea reducirá

significativamente los riesgos asociados al método convencional de iniciación, mejorará la eficiencia operativa del ciclo de minado y optimizará los tiempos de ventilación”.

Para comprobar la validez de la hipótesis, se aplicó un enfoque comparativo entre el desempeño del sistema convencional y el comportamiento posterior a la implementación del sistema de voladura centralizada. Este análisis se basa en la observación del mismo grupo operativo antes y después del cambio tecnológico, permitiendo evaluar de manera directa los efectos atribuibles a la incorporación del sistema electrónico.

La evaluación considera el comportamiento de los principales indicadores asociados a la confiabilidad y seguridad del proceso de voladura, entre ellos:

- Incidentes operativos asociados a la voladura.
- Fallas de iniciación de la malla electrónica.
- Desvíos en la secuencia de disparo.
- Cancelaciones del disparo por falla del sistema.

Tabla 13

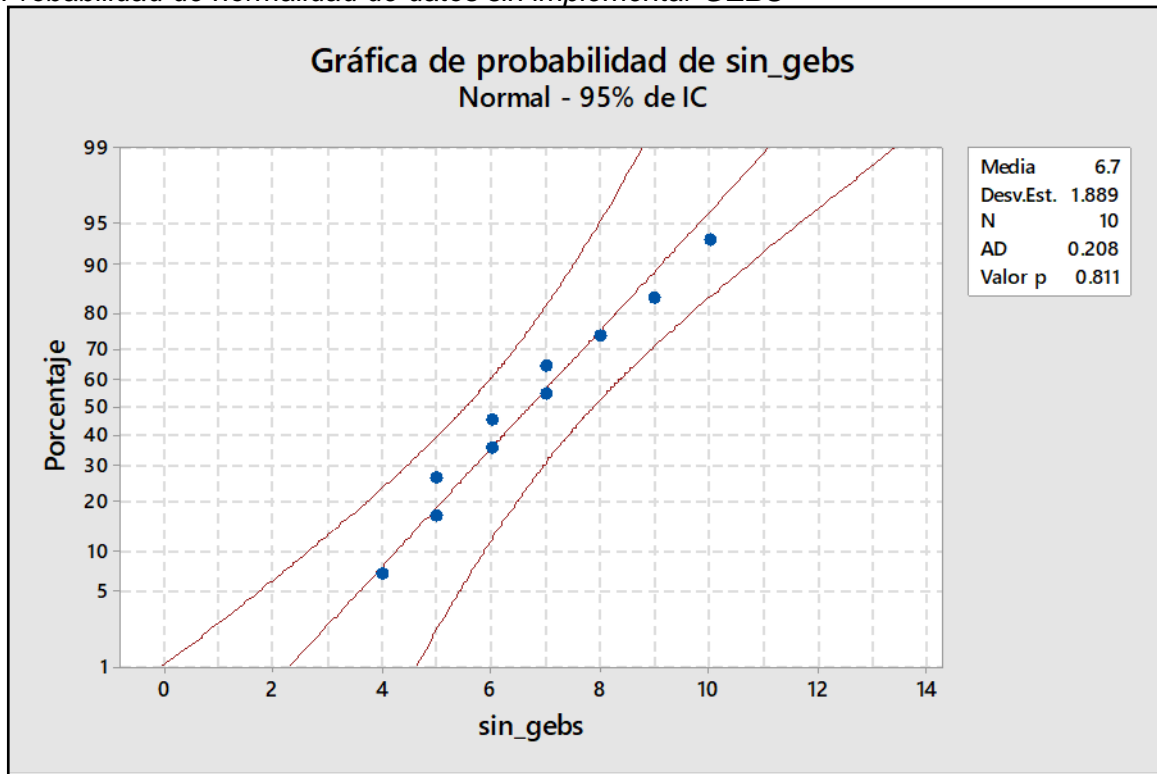
Resumen de consecuencias del Sistema de Voladura Electrónica

Nº de Voladura	Antes de Implementar Voladura Agrupada	Después de Implementar Voladura Agrupada
Nº 1	5	0
Nº 2	8	0
Nº 3	7	0
Nº 4	4	0
Nº 5	6	0
Nº 6	6	0
Nº 7	5	0
Nº 8	10	0
Nº 9	9	0
Nº10	7	0

Nota: Fuente elaboración propia.

Figura 29

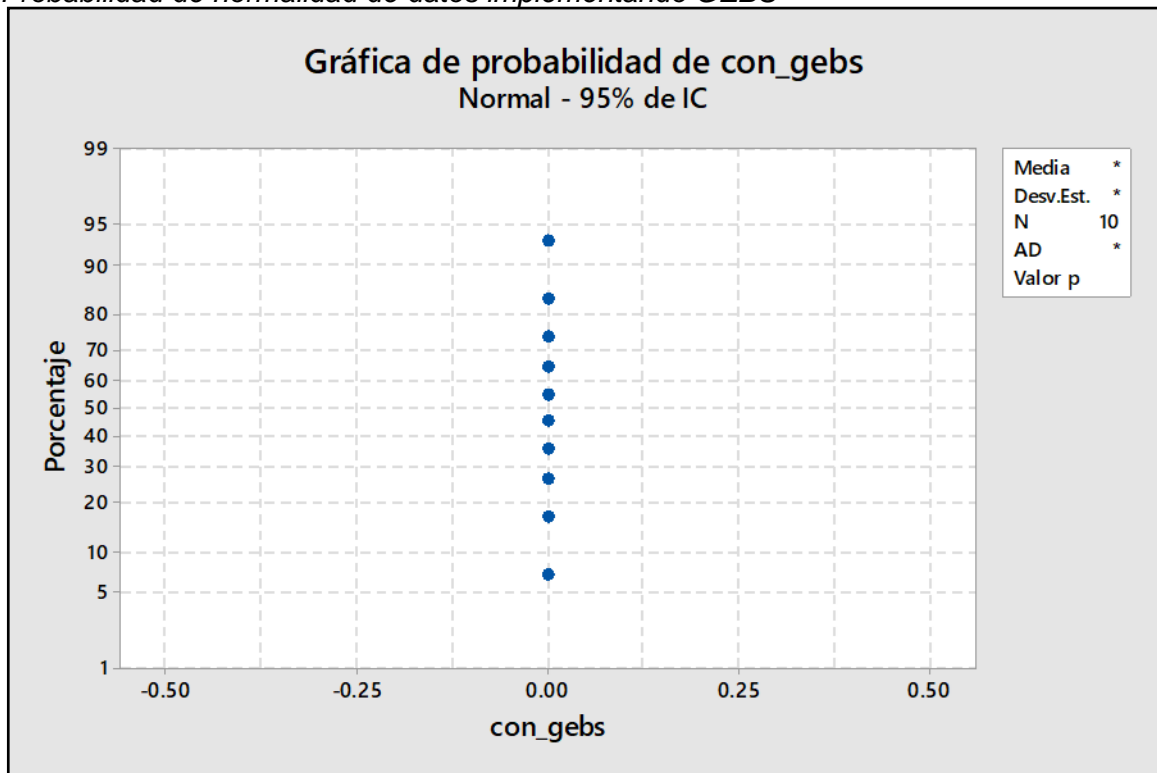
Probabilidad de normalidad de datos sin implementar GEBS



Nota: Fuente elaboración propia.

Figura 30

Probabilidad de normalidad de datos implementando GEBS



Nota: Fuente elaboración propia.

Debido a que únicamente los valores registrados antes de la implementación presentan indicios de ajustarse a una distribución normal, el análisis estadístico se realizará mediante la prueba no paramétrica de Wilcoxon para muestras relacionadas, empleando un nivel de significancia del 5 %. Bajo este enfoque, se establecen las siguientes hipótesis

Si: $p > 0.05$ se acepta la H_0 y se rechaza la H_a

$p < 0.05$ se rechaza la H_0 y se acepta la H_a

Tabla 14

Prueba de Wilcoxon usando software Minitab

PRUEBA			
Hipótesis nula	$H_0: n < 0.05$		
Hipótesis alterna	$H_1: n > 0.05$		
Muestra	Número de prueba	Estadística de Wilcoxon	Valor p
Pre Test – Post Test	14	105.00	0.001

Nota: Fuente elaboración propia.

Resultando que $p = 0.001 < 0.05$, se rechaza la H_0 y se acepta la H_a que indica que “La implementación de un sistema de voladura agrupada con detonadores electrónicos en minería subterránea reducirá significativamente los riesgos asociados al método convencional de iniciación, mejorará la eficiencia operativa del ciclo de minado y optimizará los tiempos de ventilación”.

Conclusiones

En función del análisis técnico y operativo, se concluye que la implementación de un sistema de voladura electrónica agrupada (GEBS) representa una mejora fundamental en la gestión de seguridad de las operaciones mineras subterráneas, superando significativamente al método de iniciación convencional. Desde la perspectiva de la seguridad y salud ocupacional, el aporte más relevante del sistema es la eliminación total de la exposición del personal a los peligros directos en el frente durante la iniciación. Al ejecutar el disparo desde una estación remota y segura, se erradica el riesgo de accidentes por encendidos prematuros, manipulación de mechas o exposición inmediata a gases tóxicos y proyecciones de roca, lo cual constituye el avance más importante de esta tecnología. Adicionalmente, los protocolos de control de acceso y autenticación del sistema aseguran que solo personal autorizado pueda realizar la detonación, estableciendo una trazabilidad clara del responsable y evitando activaciones no autorizadas.

Desde el punto de vista técnico, la precisión del sistema electrónico y la comunicación bidireccional para el diagnóstico de cada detonador refuerzan la seguridad del proceso. Estas características garantizan que la voladura se ejecute según el diseño, minimizando la probabilidad de tiros fallidos y controlando la vibración para proteger la estabilidad geomecánica de las labores. La capacidad de registrar digitalmente cada evento proporciona una herramienta de verificación post-voladura que confirma la detonación de todas las cargas, haciendo más seguro el reingreso a las labores. Aunque los beneficios en eficiencia operativa son notables con una reducción de 30 minutos por ciclo que permite un mayor avance mensual, su principal valor radica en que esta optimización se logra como resultado de un proceso más seguro y controlado. La viabilidad económica, demostrada con un periodo de recuperación de 2.42 meses y una relación Beneficio/Costo de 2.41, justifica plenamente la inversión en una tecnología que prioriza la integridad de los trabajadores y la sostenibilidad de la operación.

Recomendaciones

Para consolidar y expandir los avances en seguridad logrados, se recomienda planificar la ampliación de la infraestructura de comunicación subterránea a otras áreas críticas de la operación. Esto permitirá estandarizar el procedimiento de iniciación remota como la práctica más segura en toda la unidad minera, maximizando el impacto positivo en la reducción de riesgos.

Resultaría igualmente fundamental establecer un programa robusto y continuo de capacitación y certificación para todo el personal involucrado. Un entrenamiento enfocado en los protocolos de seguridad, la gestión de accesos y la correcta operación del sistema es crucial para minimizar el riesgo asociado al factor humano y asegurar la fiabilidad del proceso.

Con el objetivo de seguir fortaleciendo la seguridad geomecánica, se aconseja utilizar la data generada por el sistema para realizar análisis cuantitativos de vibración. El ajuste preciso de las secuencias de retardo permitirá un mejor control del macizo rocoso, contribuyendo a la estabilidad a largo plazo de las labores. Para garantizar la confiabilidad del sistema, que es la base de la seguridad en la iniciación remota, se debe implementar un protocolo de mantenimiento preventivo para la red de comunicación, protegiendo sus componentes de las exigentes condiciones del ambiente subterráneo.

Finalmente, se recomienda integrar los reportes automáticos de voladura con el software de gestión de seguridad de la mina, lo que permitirá un análisis de tendencias y una verificación documental de cada disparo, fortaleciendo así la cultura de prevención y la toma de decisiones basada en datos.

Referencias bibliográficas

- Badillo Astudillo, G. E. (2013, noviembre). *Las telecomunicaciones y sus desafíos en la minería subterránea*. [Presentación de congreso]. 8º Congreso Iberoamericano de Minería Sustentable, Santiago, Chile.
- Bernaola, J., Castilla, J. & Herrera, J. (2013). *Manual de voladura*. EXSA.
- Cisco Systems, Inc. (2002). *Cisco Aironet Access Point*.
- Dyno Nobel. (2015). *Aplicación de detonadores electrónicos DigiShot® Plus en minería subterránea de barrenos largos* (Lac des Iles, Canadá).
- Fundación UOCRA. (2009). *Salud y Seguridad en trabajos de minería*. OIT.
- Nexa Resources. (s.f.). *Iniciación remota de frentes de producción mediante red Leaky Feeder*. Unidad Cerro Lindo.
- Orica. (2010). *Implementación de detonadores electrónicos en Hochschild (Pallancata)*.
- Rapokhin, A., & Akgün, F. (2023). *Blastweb Central Electronic Initiation System for Improving Safety and Efficiency*. [Presentación de simposio]. 5º Simposio Internacional de Excavaciones Subterráneas, Turquía.
- Sistema GEBS. (s.f.). *Sistema de voladura electrónica agrupada (GEBS) en operaciones subterráneas peruanas*. Proyecto de Implementación Local.
- Szumny, M., Mertuszka, P., Fulawka, K., Koziarz, E., & Saiang, D. (2020). *Blasting Operations Using Different Initiation Methods in Deep Underground Mines*.

Anexos

	Pág.
Anexo 1 : Proceso de voladura agrupada	1
Anexo 2 : Detonador Intellishot	2
Anexo 3 : Cable Jumper	3
Anexo 4 : Conexión y amarre de cable	4
Anexo 5 : Conexión cable duplex a Intellishot.....	5
Anexo 6 : Instructivo voladura centralizada.....	6
Anexo 7 : Capacitación Personal de Carguío Raura	8
Anexo 8 : Unidad de Control de Voladura BCU instalado en interior mina	9
Anexo 9 : Controlador de Detonación de Superficie SBC instalado en oficina mina.....	10
Anexo 10: VNC Microsímico y Blast Web software en la PC de Oficina Mina	11
Anexo 11: Reporte de detonadores	12

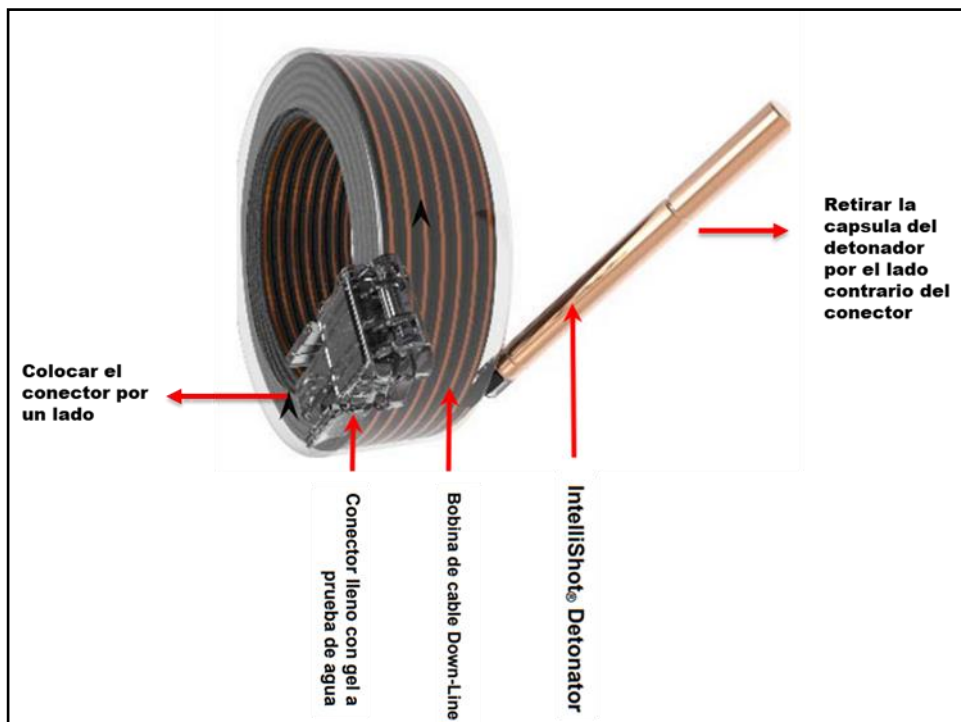
Anexo 1: Proceso de voladura agrupada



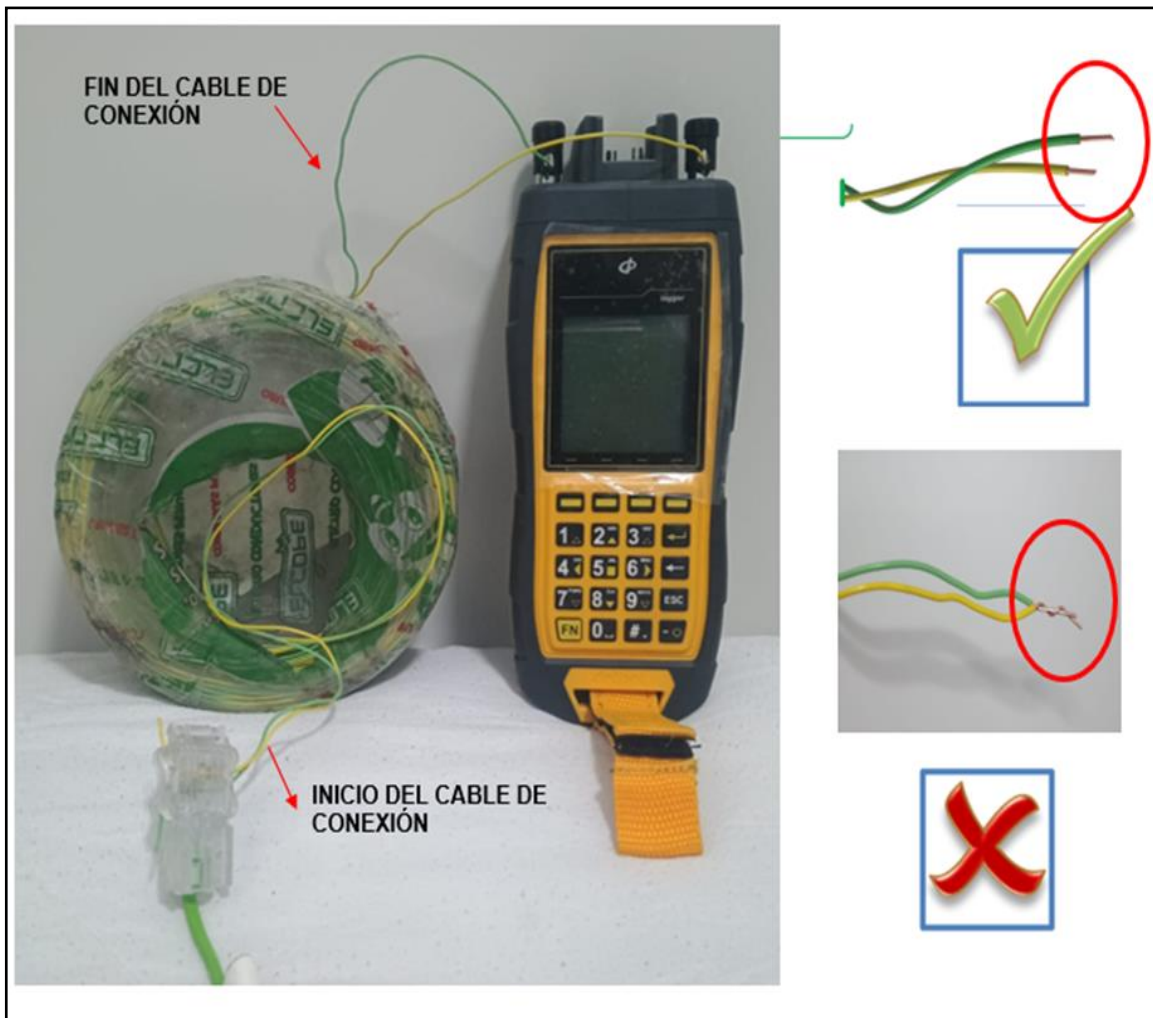
Anexo 2: Detonador Intellishot

CARACTERISTICAS	
Cápsula	Cobre
Color del cable	Verde de alta visibilidad
Resistencia a la tracción, cable de hierro	>500 N / 112 lbs
Resistencia a la tracción, cable de cobre	>200 N / 45 lbs @ 21°C / 70°F
Temperatura de funcionamiento (rango)	-40° a +80°C / -40° a +176°F
Fuerza del Detonador	#12
Cantidad neta de explosivo (por 100 units)	0,10 kg / 0,22 lbs
Retardo máximo	20,000 ms
Máximo Detonadores por Bench Box	1800 (DSP 1800 Bench Box)
Máxima Longitud del cable de superficie	2,5 km / 1,55 mi

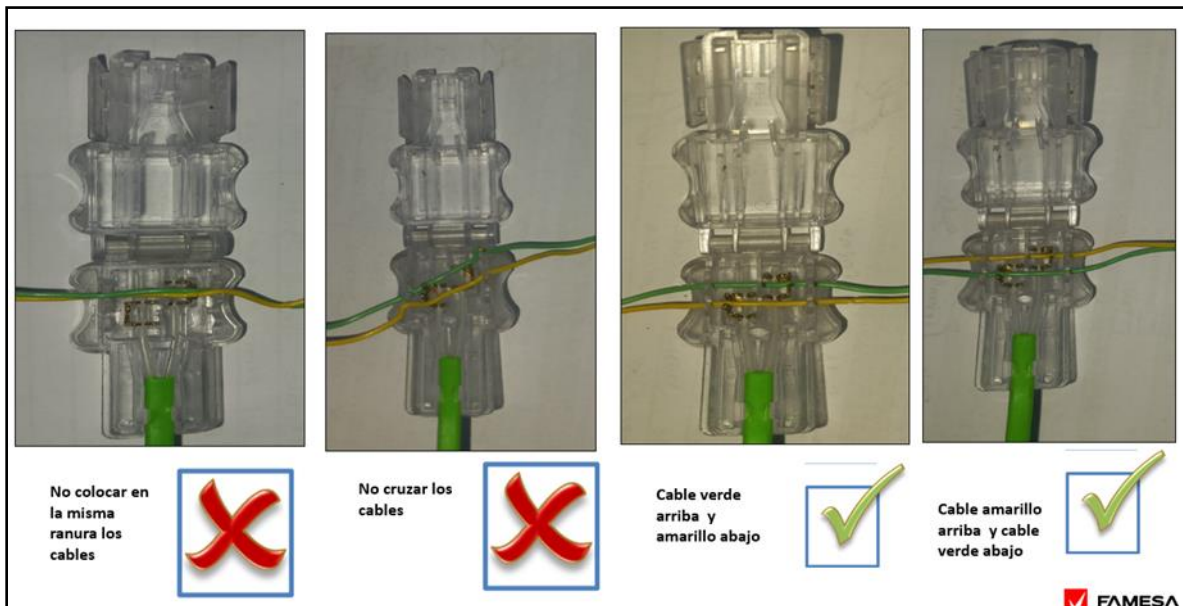
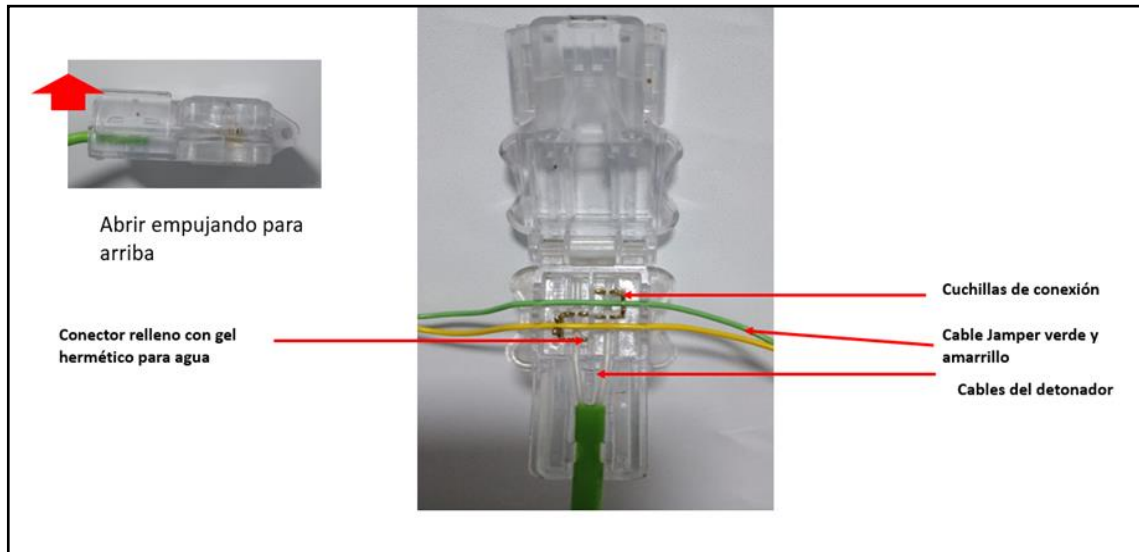
Es un dispositivo programable de precisión para iniciación y está compuesto de 2 vías de acero y el detonador propiamente dicho.
El Detonador INTELLISHOT está alojado en un tubo de cobre, que protege la placa del circuito y la carga base. El Detonador 4G está unido a un robusto cable descendente de dos filamentos negro y rojo que finalizan en un conector lleno de gel que se sujeta a la superficie del cable de amarre.



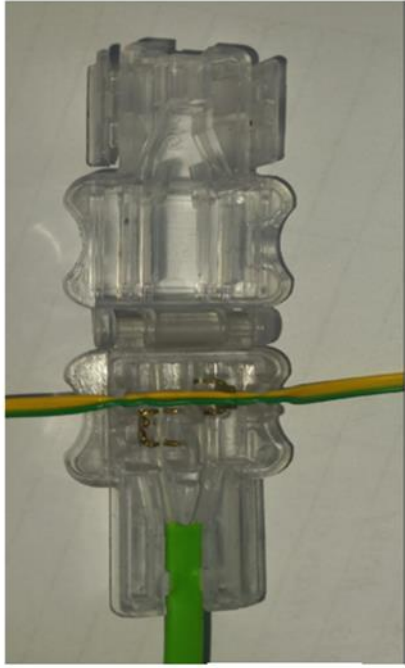
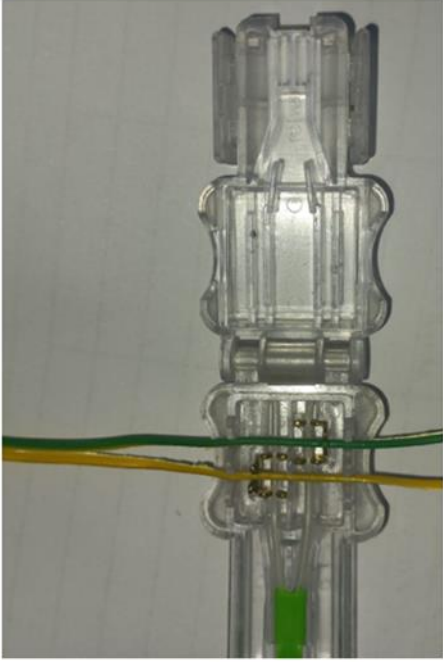


Anexo 3: Cable Jumper

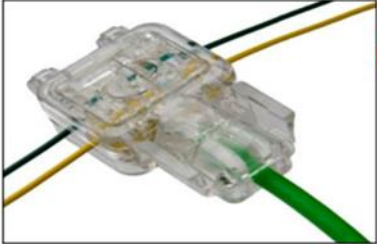

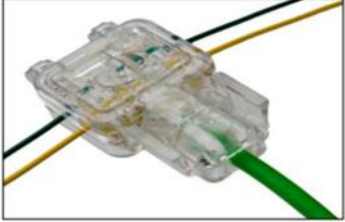



Anexo 4: Conexión y amarre de cable




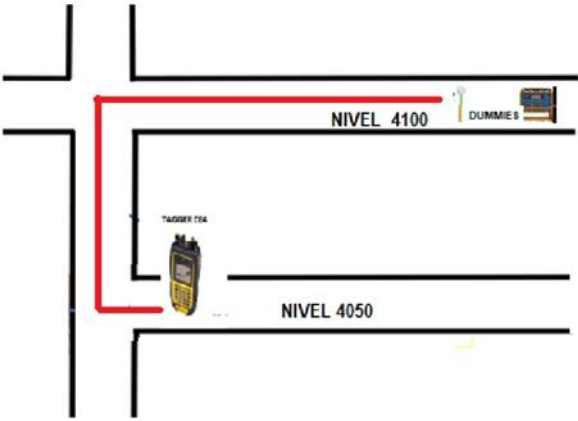


Anexo 5: Conexión cable duplex a Intellishot

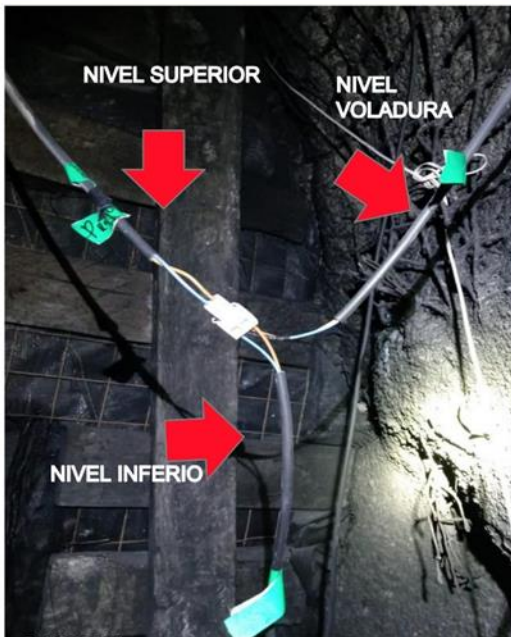
	
<p>No colocar en la misma ranura los cables</p>	<p>Separar los cables de conexión</p>
	

	<p>CLICK cerrado correcto</p>
	
	<p>NO CLICK cerrado incorrecto</p>
	

Anexo 6: Instructivo voladura centralizada

INSTRUCTIVO VOLADURA CENTRALIZADA		DELIMITACIÓN DEL CIRCUITO DE CABLEADO.	
	Código: INS-AT-001-RA	Versión: 0	Páginas: 1 de 2
	Área: Operaciones Mina	Fecha: 15/11/2024	
			
Objetivo	Responsable	Documentos referencia	Parámetro de fugas de energía
Evitar el uso de materiales metálicos y/o con punta en los procesos de carguío de taladros largos positivos	Técnico de FAMESA	<ul style="list-style-type: none"> PETS-AT-004-RA. Etiquetado de detonadores Intellishot, mantenimiento de red de cableado. 	Menor a 0.5 mA fugas bajas Mayor a 1 Ma fugas altas
	Ejecutor:		
	Técnico de voladura centralizada		
EPP's a utilizar:	Equipos o herramientas:	Riesgos	
<ul style="list-style-type: none"> Casco (ANSI Z89). Chaleco con Cinta Reflectiva (Clase 2). Botas metatarsal ANSI Z41). Gafas de Seguridad (ANSI Z87 	<ul style="list-style-type: none"> Overol drill. Tapones Auditivos (ANSI S3.19-1974). Respirador y cartucho para polvo. 	<ul style="list-style-type: none"> Conectores de energía . Cinta aislante Alicate pelacables 	<ul style="list-style-type: none"> Caída a mismo y distinto nivel. Golpes. Cortes
INSTRUCTIVO PASO A PASO			
1 COLOCAR DUMMIES EN NIVEL 4100 (SALA DE PROTOCOLO)			
		<ul style="list-style-type: none"> Para verificar continuidad de la red de cable entre el dummies y las labores de voladura 	
2 VERIFICACIÓN DE COMUNICACIÓN CON DUMMIES NIVEL POR NIVEL .			
		<ul style="list-style-type: none"> Del nivel donde se programa la voladura verificar la comunicación del dummies mediante el cable. 	

3 CONEXIÓN DE CABLE TRONCAL AL NIVEL



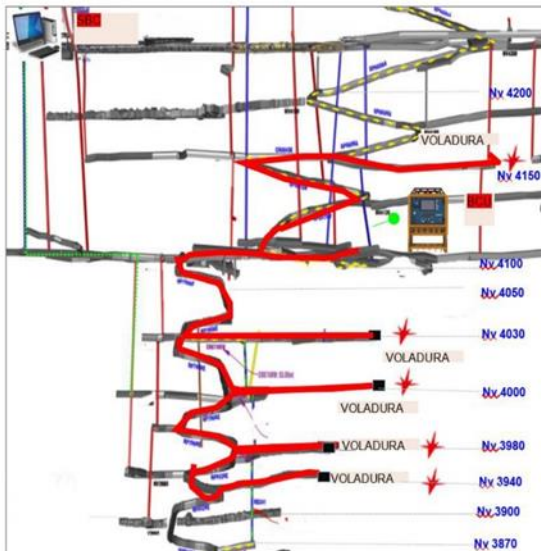
- Se conectará el cable del nivel donde se programa voladura.

4 DESCONEXIÓN DE CABLE TRONCAL A NIVEL



- Se desconectará el cable del nivel donde no se programa voladura.

5 CONEXIÓN FINAL DE NIVELES



En el ultimo nivel donde se programa la ultima voladura se realizará la conexión final.

— Circuito de voladura

6 VERIFICACIÓN FINAL DE COMUNICACIÓN CON DUMMIES



Comunicación final entre el ultimo nivel de voladura y el dummies del nivel 4100 .
Revisar fuga de energía y comunicación.

Anexo 7: Capacitación Personal de Carguío Raura



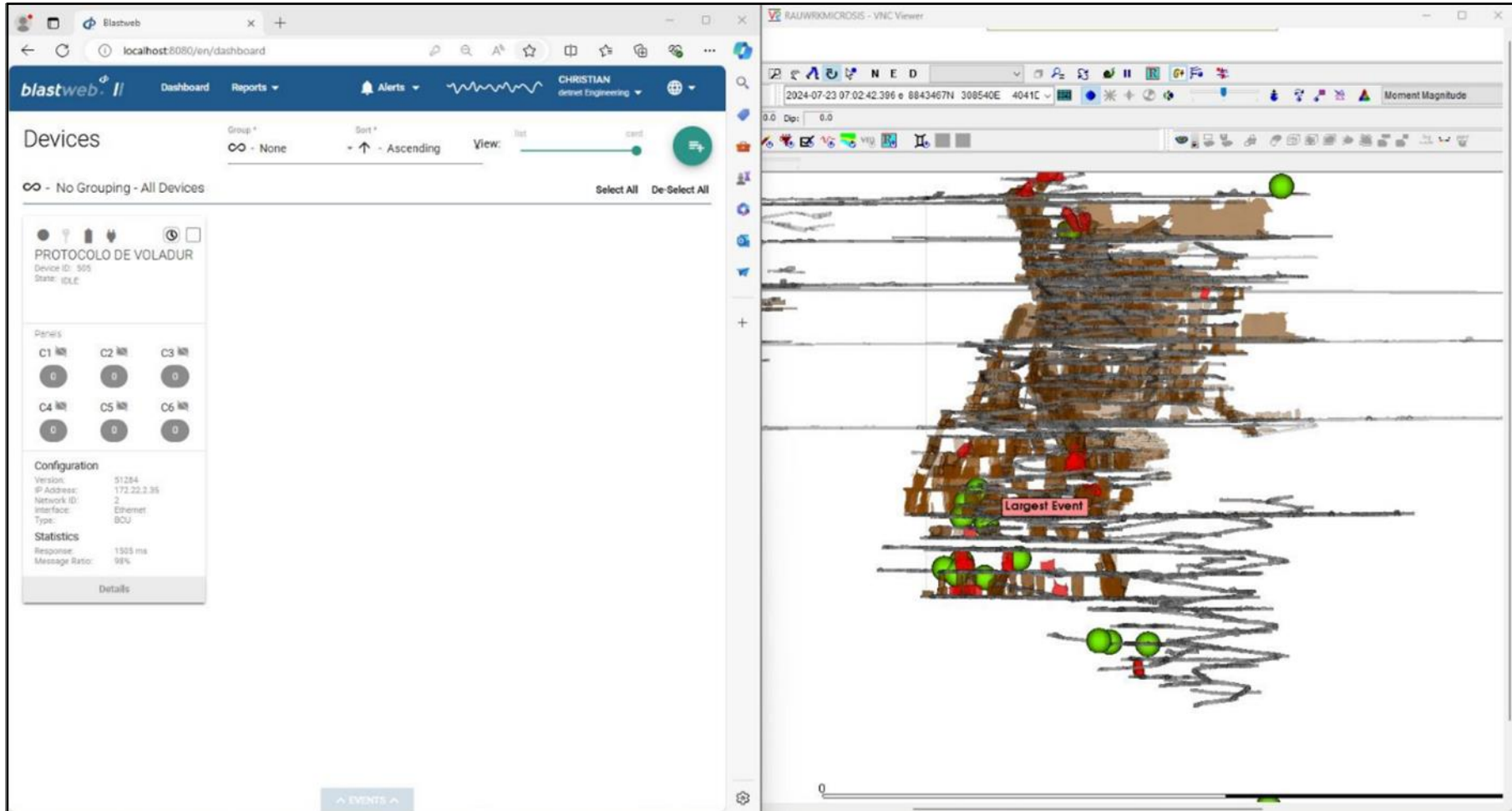
Anexo 8: Unidad de Control de Voladura BCU instalado en interior mina




Anexo 9: Controlador de Detonación de Superficie SBC instalado en oficina mina



Anexo 10: VNC Microsímico y Blast Web software en la PC de Oficina Mina



Anexo 11: Reporte de detonadores

Detonator Report				detnet 
BCU:	505			
Date:	2024-07-28 18:35:27			
Panels:	2			
Location:	CANAL 2			
Detonator ID	Time	Row	Hole	Det
4dcf	2000	1853189228	1853189228	12
4dd0	2000	1853189228	1853189228	11
4dd8	11000	1853189228	1853189228	13
4dd9	2000	1853189228	1853189228	10
4ddc	14000	1853189228	1853189228	14
53d8	20000	1853189228	1853189228	2
53d9	17000	1853189228	1853189228	1
53da	0	1853189228	1	1
53db	0	1853189228	1	2
53dc	7	1853189228	2	1
53dd	7	1853189228	2	2
53de	14	1853189228	3	1
53df	14	1853189228	3	2
53e0	121	1853189228	4	1
53e1	121	1853189228	4	2
53e2	128	1853189228	5	1
53e3	128	1853189228	5	2
53e4	135	1853189228	6	1
53e5	135	1853189228	6	2
53e6	142	1853189228	7	1
53e7	142	1853189228	7	2
53e8	149	1853189228	8	1
53e9	156	1853189228	9	1
53ea	263	1853189228	10	1
53eb	263	1853189228	10	2
53ec	270	1853189228	11	1
53ed	270	1853189228	11	2
53ee	277	1853189228	12	1