



Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

**Implementación de un sistema de iniciación centralizado para la
reducción del tiempo de chispeo y la exposición del personal en voladuras
subterráneas en una mina de la sierra sur del Perú, 2025.**

Tesis presentada por:

Molina Machaca, Sandra Maria

ORCID: 0009-0006-1657-7017

para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas

Asesor:

Mg. Paredes Salas, Omar Willy

ORCID: 0009-0000-9860-6630

Arequipa - Perú

2026

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA DE MINAS

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 15 de Julio del 2026

Dictamen: 018714-C-EPIM-2026

Visto el borrador del expediente 018714, presentado por:

2019200322 - MOLINA MACHACA SANDRA MARIA

Titulado:

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE INICIACIÓN CENTRALIZADO PARA LA REDUCCIÓN DEL
TIEMPO DE CHISPEO Y LA EXPOSICIÓN DEL PERSONAL EN VOLADURAS SUBTERRÁNEAS EN
UNA MINA DE LA SIERRA SUR DEL PERÚ, 2025.**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Titulo Profesional/Titulo de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO DE MINAS

**29635304 - MORALES VALDIVIA JAVIER ANTONIO
DICTAMINADOR**



**29640854 - MONTESINOS SOLORZANO CESAR GERARDO
DICTAMINADOR**



**46969384 - TICONA CORRALES SERGIO
DICTAMINADOR**



IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE INICIACIÓN CENTRALIZADO PARA LA REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE CHISPEO Y LA EXPOSICIÓN DEL PERSONAL EN VOLADURAS SUBTERRÁNEAS EN UNA MINA DE LA SIERRA SUR DEL PERÚ, 2025.

INFORME DE ORIGINALIDAD

15%	14%	4%	6%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Católica de Santa María	3%
	Trabajo del estudiante	
2	repositorio.ucsm.edu.pe	3%
	Fuente de Internet	
3	hdl.handle.net	1%
	Fuente de Internet	
4	www.coursehero.com	1%
	Fuente de Internet	
5	repositorioacademico.upc.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
6	gee.bccr.fi.cr	<1%
	Fuente de Internet	
7	repository.unad.edu.co	<1%
	Fuente de Internet	
8	app.ingemmet.gob.pe	<1%
	Fuente de Internet	
9	repositorio.unjbg.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	
10	www.buenastareas.com	<1%
	Fuente de Internet	
11	repositorio.uia.ac.cr:8080	<1%
	Fuente de Internet	
12	docs.google.com	<1%
	Fuente de Internet	
13	Submitted to uni	<1%
	Trabajo del estudiante	
14	repositorio.untumbes.edu.pe	<1%
	Fuente de Internet	

DEDICATORIA

A Dios, por darme la fortaleza y sabiduría para seguir adelante.

A mi madre, Clemencia Machaca, por ser mi mayor inspiración y mi mejor amiga, la mujer más brillante de quien recibí el nombre y la vida. Mi madre siempre me hizo creer que podía ser y lograr todo aquello que me propusiera, a mi manera.

Se esforzó incansablemente por sacarme adelante, me sostuvo, me enseñó y me guio a través de estos increíbles 24 años.

Un día lo soñaste, mamá, y hoy lo lograste... lo logramos.

A mi padre, Juan Molina, por su confianza incondicional, sus enseñanzas y consejos que me han guiado en este camino, gracias por acompañarme en cada paso de mi vida, hoy el orgullo no es solo mío, es el tuyo también.

A mi hermano Alexander, gracias por tu apoyo, tus palabras de aliento y por impulsarme a no rendirme cuando las fuerzas parecían faltar, eres increíble y sé que lograras grandes cosas.

A Santiago, mi hermanito, porque representa la felicidad, la unión y el amor de nuestra familia. Sé que algún día te convertirás en nuestro mayor orgullo, y deseo que sigas creciendo rodeado de sueños, fortaleza y felicidad.

A mi familia, por y para siempre.

AGRADECIMIENTOS

A la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, por la formación académica, técnica y humana recibida a lo largo de mi carrera.

A la empresa que creyó en mí desde mis primeros pasos después de culminar la universidad, por abrirme las puertas del ámbito profesional, permitirme asumir nuevos desafíos, brindarme experiencias valiosas y hacerme parte de un proyecto innovador con gran potencial para contribuir al desarrollo y modernización de la minería peruana.

Gracias al Ing. John Cheppe Aguirre y a mi equipo de trabajo, por su confianza, liderazgo, apoyo y por impulsarme a presentar parte de este gran proyecto que, con esfuerzo y compromiso seguimos sacando adelante.

A los líderes y mentores que confiaron en mí y me brindaron la oportunidad de crecer, aprender y descubrir mis capacidades dentro de esta profesión.

A Gean, por celebrar cada uno de mis logros como si fueran propios, por su cariño, por escucharme, acompañarme y motivarme en los momentos de incertidumbre.

Finalmente, agradezco a mis amigos y compañeros, quienes fueron una fuente constante de apoyo y compañerismo.

Compartimos risas, retos y aprendizajes que siempre llevaré conmigo.

Gracias a todos por ser parte de este viaje inolvidable.

EPÍGRAFE

"El éxito no es la clave de la felicidad. La felicidad es la clave del éxito.

Si amas lo que haces, tendrás éxito."

Albert Schweitzer



RESUMEN

La presente investigación se desarrolló en una operación minera subterránea, donde se implementó un sistema de iniciación centralizado que permite ejecutar el disparo de manera centralizada desde superficie, mediante la integración de componentes como la unidad de disparo (SBC), unidades de control de voladura (BCU) y una infraestructura de comunicación con sistema leaky feeder y radios industriales tipo Ripex.

Como parte de la metodología, se realizó el análisis de indicadores operativos y de seguridad, tales como el tiempo de chispeo, la cantidad de personal expuesto durante el proceso, la confiabilidad del sistema y el comportamiento de las voladuras ejecutadas. Los resultados evidencian una reducción significativa del tiempo de chispeo de 30 minutos a 5 minutos, así como una disminución de la exposición del personal encargado de la iniciación.

Se obtuvo una cobertura operativa progresiva del sistema, alcanzando un 32.59% durante el periodo de evaluación, con un total de 274 voladuras ejecutadas. Los indicadores de seguridad registraron valores óptimos, con ausencia de eventos, frecuencia y severidad de accidentes. Adicionalmente, se identificaron oportunidades de mejora en la eficiencia energética y operativa, como la reducción del tiempo de funcionamiento de ventiladores y el incremento en el rendimiento del ciclo de perforación.

En conclusión, la implementación del sistema de voladura centralizada permite mejorar significativamente la seguridad, reducir la exposición del personal, optimizar los tiempos operativos y generar beneficios adicionales en la eficiencia de la operación minera. Estos resultados validan la viabilidad del sistema como una alternativa tecnológica efectiva en minería subterránea.

Palabras clave: Sistema de iniciación centralizado, exposición del personal, seguridad minera.

ABSTRACT

The present research was carried out in an underground mining operation, where a centralized initiation system was implemented, allowing blasting to be executed remotely from the surface through the integration of components such as the Surface Blasting Controller (SBC), Blast Control Units (BCU), and a communication infrastructure based on a leaky feeder system and RipEX industrial radios.

As part of the methodology, an analysis of operational and safety indicators was conducted, including firing time, the number of personnel exposed during the process, system reliability, and the performance of the executed blasts. The results showed a significant reduction in firing time from 30 minutes to 5 minutes, as well as a decrease in the exposure of personnel responsible for blast initiation.

Likewise, a progressive operational coverage of the system was achieved, reaching 32.59% during the evaluation period, with a total of 274 blasts executed. Safety indicators recorded optimal values, with no incidents and no accident frequency or severity reported. Additionally, opportunities for improvement in energy and operational efficiency were identified, such as reducing fan operating time and increasing drilling cycle performance.

In conclusion, the implementation of the centralized blasting system significantly improves safety, reduces personnel exposure, optimizes operational times, and generates additional benefits in mining operation efficiency. These results validate the feasibility of the system as an effective technological alternative for underground mining operations.

Keywords: Centralized initiation system, personnel exposure, mining safety.

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

EPÍGRAFE

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN..... 1

CAPÍTULO I..... 2

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN..... 2

1.1 Planteamiento del Problema 2

1.2 Objetivos..... 3

1.2.1 Objetivo General..... 3

1.2.2 Objetivos Específicos 3

1.3 Preguntas de Investigación 3

1.3.1 Pregunta Principal 3

1.3.2 Preguntas Secundarias 4

1.4 Línea de Investigación..... 4

1.5 Palabras Clave 4

1.6 Solución Propuesta 5

1.6.1 Justificación e Importancia..... 5

CAPÍTULO II..... 7

FUNDAMENTOS TEÓRICOS 7

2.1 Estado del arte 7

2.1.1 Antecedentes Nacionales y locales..... 8

2.1.2 Antecedentes Internacionales 10

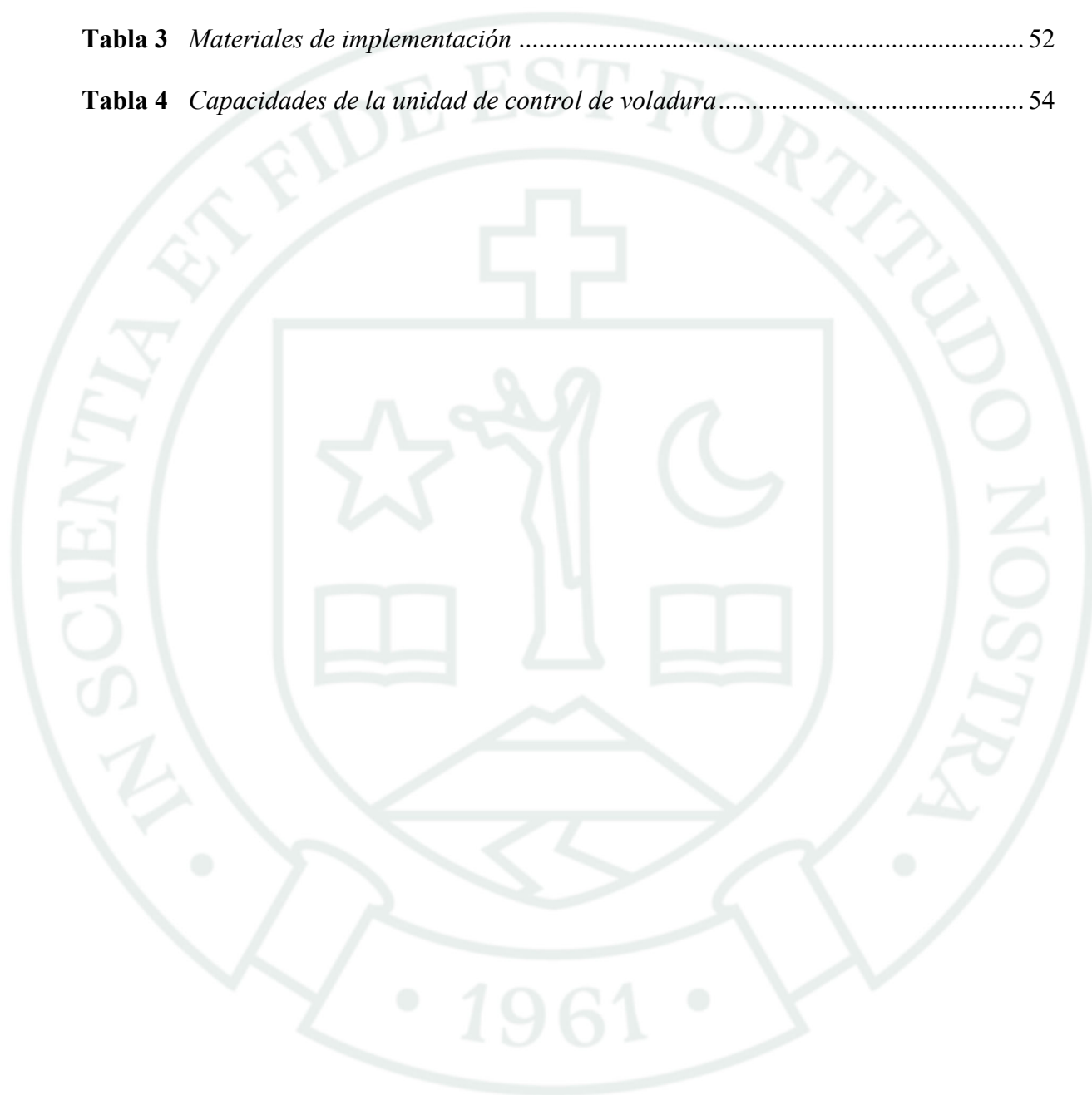
2.2 Bases Teóricas de la Investigación..... 11

2.2.1	Ubicación.....	11
2.2.2	Ubicación en Coordenada UTM.....	11
2.2.3	Seguridad y Salud ocupacional.....	16
2.2.4	Sistemas de iniciación.	17
2.2.5	Sistemas de comunicación en mina.....	23
2.2.6	Desarrollo del problema	28
2.2.7	Equipos y accesorios utilizados en el sistema centralizado.....	32
2.3	Hipótesis de Investigación.....	41
2.3.1	Hipótesis General	41
2.3.2	Hipótesis Específica	41
2.4	Variables.....	42
2.4.1	Variable Independiente.....	42
2.4.2	Variable Dependiente	42
2.4.3	Operacionalización de Variables	43
CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO		44
3.1	Alcances y Limitaciones.....	44
3.1.1	Alcances.....	44
3.1.2	Limitaciones	44
3.2	Tipo y Nivel de Investigación	45
3.2.1	Tipo de Investigación	45
3.2.2	Nivel de Investigación	45
3.3	Población y Muestra	46
3.3.1	Población	46
3.3.2	Muestra	46
3.4	Métodos, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....	46
3.4.1	Métodos	46
3.4.2	Técnicas:.....	47

3.4.3	Instrumentos de recolección de datos.....	47
3.4.4	Tratamiento de los datos.....	47
3.5	Plan de análisis de los datos	48
3.6	Fases del proyecto	49
3.7	Implementación del sistema	50
3.7.1	Actividades previas.....	50
3.7.2	Esquema funcional	51
3.7.3	Distribución de las unidades de control de voladura.....	55
3.7.4	Control desde el SBC	62
3.7.5	Planes de Contingencia.....	65
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIONES		68
4.1	Análisis e interpretación de resultados	68
4.1.1	Adaptabilidad del personal involucrado.....	68
4.1.2	Presentación de los datos recolectados.....	71
4.1.3	Análisis del avance de implementación	75
4.1.4	Análisis del tiempo de chispeo	77
4.1.5	Análisis de la exposición del personal.....	81
4.1.6	Oportunidades del proceso en el ciclo de ventilación.	84
4.1.7	Oportunidades del proceso en el ciclo de perforación.....	87
CONCLUSIONES.....		89
RECOMENDACIONES		90
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Coordenadas UTM</i>	12
Tabla 2	<i>Variables operacionales</i>	43
Tabla 3	<i>Materiales de implementación</i>	52
Tabla 4	<i>Capacidades de la unidad de control de voladura</i>	54



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	<i>Ubicación de la unidad minera.....</i>	11
Figura 2	<i>Sección longitudinal y transversal de la veta principal.....</i>	15
Figura 3	<i>Detonador Convencional</i>	18
Figura 4	<i>Detonador no eléctrico</i>	20
Figura 5	<i>Detonador eléctrico</i>	21
Figura 6	<i>Detonador electrónico</i>	22
Figura 7	<i>Fibra Óptica.....</i>	25
Figura 8	<i>Leaky Feeder.....</i>	26
Figura 9	<i>Tiempos de coordinación de Disparo</i>	30
Figura 10	<i>Unidades de etiquetado.....</i>	33
Figura 11	<i>Verificación de conexión.....</i>	34
Figura 12	<i>Unidades de control de voladura.....</i>	35
Figura 13	<i>Radio Modem</i>	36
Figura 14	<i>Tarjetas o llaves de confirmación</i>	39
Figura 15	<i>Unidad de disparo.....</i>	40
Figura 16	<i>Fases del proyecto</i>	49
Figura 17	<i>Esquema del sistema</i>	53
Figura 18	<i>Amarre de iniciación en frentes</i>	55
Figura 19	<i>Implementación del BCU</i>	56
Figura 20	<i>Ubicación del BCU en el Nv 3950</i>	58
Figura 21	<i>Ubicación del BCU en el Nv 4131</i>	59
Figura 22	<i>Ubicación del BCU en el Nv 4230</i>	60
Figura 23	<i>Ubicación del BCU en el Nv 4350</i>	61
Figura 24	<i>Visualización de canales por BCU</i>	62

Figura 25	<i>Validación de credenciales para detonación.....</i>	63
Figura 26	<i>Reporte de voladura.....</i>	64
Figura 27	<i>Reportes de eventos y detonadores</i>	65
Figura 28	<i>Gráfico de capacitaciones ECM.....</i>	69
Figura 29	<i>Gráfico de capacitaciones U.M.</i>	70
Figura 30	<i>Capacitaciones realizadas</i>	71
Figura 31	<i>Cobertura del sistema</i>	72
Figura 32	<i>Consumo de detonadores en frentes y tajos.....</i>	73
Figura 33	<i>Tendencia de disparos en el sistema de iniciación centralizado</i>	74
Figura 34	<i>Implementación en la zona X.....</i>	76
Figura 35	<i>Implementación en la zona Y</i>	76
Figura 36	<i>Implementación general.....</i>	77
Figura 37	<i>Diferencia de tiempo vs Target.....</i>	78
Figura 38	<i>Tiempo de chispeo.....</i>	79
Figura 39	<i>Personas en el proceso de chispeo</i>	82
Figura 40	<i>KPI's de Seguridad</i>	83
Figura 41	<i>Consumo Actual vs Proyectado</i>	85

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1	<i>Ficha técnica del detonador electrónico utilizado</i>	90
----------------	--	-----------



INTRODUCCIÓN

La minería subterránea es una de las actividades más complejas dentro de la industria extractiva, caracterizada por condiciones operativas exigentes y un alto nivel de riesgo, especialmente en procesos críticos como la voladura. Tradicionalmente, los sistemas de iniciación han dependido de métodos pirotécnicos, los cuales requieren la intervención directa del personal en interior mina durante el proceso de chispeo, incrementando la exposición a riesgos y limitando la eficiencia operativa.

Esta medida está diseñada con el propósito de disminuir la exposición del personal a actividades de alto riesgo. Considerando que diariamente ingresan alrededor de 650 trabajadores a la operación minera y se realizan en promedio 28 voladuras por día, resulta fundamental contar con estrategias que promuevan la seguridad y la eficiencia de las operaciones.

El avance tecnológico ha permitido el desarrollo de sistemas de iniciación electrónica y centralizada, los cuales ofrecen mayores niveles de control, precisión y seguridad. Este sistema permite ejecutar el disparo desde superficie, eliminando la necesidad de intervención directa del personal en zonas de riesgo y reduciendo significativamente el tiempo requerido para la ejecución de la voladura.

El desarrollo de esta investigación responde a la necesidad de modernizar los procesos de voladura en minería subterránea, priorizando la seguridad operativa, eliminando la exposición del personal al chispeo manual y mitigando riesgos a la manipulación de explosivos. El estudio considera la evaluación de indicadores operativos y de seguridad, así como la identificación de oportunidades de mejora en la eficiencia del proceso, tales como la optimización del ciclo de perforación y la reducción del consumo energético en sistemas de ventilación, frente a la reducción de tiempo en el proceso de chispeo.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del Problema

En la minería subterránea, las operaciones de perforación y voladura constituyen una de las etapas más importantes dentro del ciclo productivo, ya que permiten la fragmentación del macizo rocoso para la extracción del mineral. No obstante, estas actividades implican riesgos significativos para el personal, especialmente durante la etapa de iniciación de voladuras, donde la intervención directa del trabajador en zonas cercanas al frente de disparo incrementa la probabilidad de accidentes.

En algunas operaciones mineras subterráneas del Perú, el proceso de iniciación de voladuras aún se realiza mediante sistemas convencionales, los cuales requieren la ejecución manual del chispeo en interior mina. Esta práctica genera una alta exposición del personal a peligros como errores en la conexión de los accesorios de voladura, fallas en la secuencia de disparo, detonaciones no controladas y condiciones inseguras propias del entorno subterráneo.

El uso de sistemas convencionales limita el control del proceso de iniciación, debido a la menor precisión en los tiempos de retardo y a la dependencia de la intervención humana, lo que puede afectar la confiabilidad del disparo. A ello se suma el tiempo requerido para la ejecución del chispeo, el cual prolonga la permanencia del personal en zonas de riesgo, incrementando la probabilidad de incidentes y accidentes laborales.

Si bien existen medidas de control como la comunicación radial, la presencia de vigías y el control de acceso del personal, estas no eliminan completamente la exposición durante el proceso de iniciación. En estas condiciones, surge la necesidad de implementar

tecnologías que permitan mejorar las condiciones de seguridad y eficiencia en las operaciones de voladura.

Ante esta problemática, surge la necesidad de evaluar tecnologías como los sistemas de iniciación centralizado mediante detonadores electrónicos que permite realizar el disparo desde una ubicación segura en superficie, eliminando la necesidad de intervención directa en interior mina durante el chispeo, reduciendo la exposición del personal y optimizando el control del proceso de iniciación.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Implementar un sistema de iniciación centralizado de voladuras para reducir el tiempo de chispeo y la exposición del personal en una mina subterránea de la sierra sur del Perú, 2025.

1.2.2 Objetivos Específicos

Evaluar el proceso actual de chispeo en voladuras subterráneas, identificando el tiempo de ejecución y el nivel de exposición del personal.

Adecuar el sistema de iniciación centralizado a las condiciones operativas de la mina subterránea.

Evaluar la reducción del tiempo de chispeo y de la exposición del personal, tras la implementación del sistema de iniciación centralizado.

1.3 Preguntas de Investigación

1.3.1 Pregunta Principal

- ¿De qué manera la implementación de un sistema de iniciación centralizado de voladuras permite reducir el tiempo de chispeo y la exposición del personal en una mina subterránea?

1.3.2 Preguntas Secundarias

- ¿Cuál es el tiempo de ejecución del chispeo y el nivel de exposición del personal en el sistema convencional de voladuras subterráneas?
- ¿Cómo debe adecuarse el sistema de iniciación centralizado a las condiciones operativas de la mina subterránea?
- ¿Qué diferencia se presenta en el tiempo de chispeo y en la exposición del personal después de la implementación del sistema de iniciación centralizado?

1.4 Línea de Investigación

La presente investigación se alinea con la línea de Seguridad Minera, ya que tiene como objetivo el estudio y análisis de la implementación de un sistema de iniciación centralizada en el proceso de voladura subterránea, orientado a reducir la exposición del personal durante la etapa de chispeo. Esto contribuye a disminuir la probabilidad de incidentes asociados a detonaciones prematuras, fallas de encendido y exposición a gases peligrosos.

Así mismo, se busca también optimizar el proceso de disparo, reduciendo el tiempo de ejecución del procedimiento de voladura, lo cual permitirá optimizar los tiempos de los ciclos operativos posteriores.

1.5 Palabras Clave

Sistema de iniciación centralizado, exposición del personal, seguridad minera.

1.6 Solución Propuesta

1.6.1 Justificación e Importancia

1.6.1.1 Justificación Social

La presente investigación se justifica por la necesidad de mejorar las condiciones de seguridad y eficiencia en las operaciones de voladura en minería subterránea, específicamente en la etapa de iniciación, la cual representa uno de los momentos de mayor riesgo para el personal. Según las indicaciones del Decreto Supremo N.º 024-2016-EM, las actividades mineras deben ejecutarse bajo condiciones seguras, minimizando la exposición de los trabajadores a peligros que puedan afectar su integridad (MINEM, 2016).

Los sistemas de iniciación convencional, que requieren la intervención directa del personal durante el chispeo, incrementan la probabilidad de accidentes y de incidentes debido a factores como errores humanos, fallas en la conexión y condiciones propias del entorno subterráneo. Frente a esta problemática, el uso de sistemas de iniciación electrónica centralizada permite realizar el disparo desde ubicaciones seguras, reduciendo significativamente la exposición del personal y mejorando el control del proceso de voladura (Kuru & İlik, 2023).

Desde el punto de vista técnico, la implementación de este tipo de sistema contribuye a optimizar los tiempos de ejecución del chispeo, así como a mejorar la precisión en la secuencia de disparo, lo que incrementa la confiabilidad de la operación (Orica, 2018). Asimismo, desde el enfoque de gestión de seguridad, esta investigación aporta al fortalecimiento de la cultura preventiva en minería, promoviendo el uso de tecnologías que permitan eliminar o reducir riesgos en actividades críticas,

contribuyendo a la mejora continua de los procesos de voladura, alineados con los estándares de seguridad establecidos en la normativa vigente peruana.

1.6.1.2 Justificación Económica

Si bien la implementación de un sistema de iniciación centralizada requiere inversión en infraestructura tecnológica, sistemas de comunicación y equipos especializados, la presente investigación muestra propuestas de optimización derivados de la mejora en seguridad operacional y eficiencia del proceso de voladura.

Desde una perspectiva económica, los eventos de alta severidad pueden generar costos directos e indirectos considerablemente elevados para la organización, tales como atención médica, indemnizaciones, investigaciones de incidentes, paralizaciones operativas, sanciones, pérdida de continuidad del proceso productivo y afectación de la reputación empresarial. Así mismo, los accidentes con incapacidad temporal o fatalidad pueden traducirse en días perdidos, reducción de horas hombre disponibles, interrupciones en las actividades operativas y disminución de horas efectivas de producción y extracción.

Es por ello que la implementación de medidas orientadas a reducir la exposición del personal no solo responde a criterios de seguridad, sino también a una estrategia de sostenibilidad operacional y optimización de recursos. La prevención de eventos no deseados y la reducción de tiempos improductivos pueden contribuir al mantenimiento de la continuidad operativa, permitiendo que los beneficios obtenidos en términos de productividad, disponibilidad de personal y estabilidad del ciclo minero compensen, en el largo plazo, la inversión asociada a la implementación del sistema.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Estado del arte

La implementación de sistemas de iniciación centralizada con detonadores electrónicos en minería subterránea representa una tendencia tecnológica orientada a mejorar la seguridad y el control del proceso de voladura. A diferencia de los sistemas convencionales, estos sistemas permiten programar detonadores electrónicos, verificar la red de disparo y ejecutar la voladura desde zonas seguras, reduciendo la exposición directa del personal durante la etapa de chispeo.

Austin Powder (2021) presenta el sistema E*STAR CUBE como un equipo de voladura centralizada para minería subterránea que utiliza fibra óptica y Ethernet para la comunicación. La empresa resalta que este sistema permite iniciar disparos desde un punto de control seguro o desde superficie, sin necesidad de mantener personal dentro de la mina durante la voladura.

Iwano et al. (2020) desarrollaron un estudio sobre el uso de detonadores electrónicos avanzados para reducir vibraciones inducidas por voladura en túneles. Aunque su enfoque principal fue ambiental y vibracional, el estudio demuestra que los detonadores electrónicos permiten programar tiempos de iniciación con mayor precisión, lo que contribuye al control del proceso de voladura.

Sarma et al. (2016) analizaron el uso de detonadores electrónicos como herramienta para reducir costos y mejorar el control de las operaciones mineras. Los autores sostienen que la precisión en los tiempos de retardo permite mejorar el control de la voladura y reducir efectos no deseados, lo cual se relaciona con la confiabilidad del disparo planteada en esta investigación.

Brunhoferová et al. (2025) compararon detonadores electrónicos, eléctricos y no eléctricos desde un enfoque de ciclo de vida. El estudio muestra que los detonadores electrónicos pueden reducir impactos asociados a voladura, polvo, ruido y proyección de roca. Este antecedente complementa la investigación al mostrar que la tecnología electrónica no solo aporta seguridad operativa, sino también beneficios ambientales.

Por último, BME (2024) presentó el sistema AXXIS CEBS, diseñado para minería subterránea, el cual permite comunicación bidireccional en tiempo real entre la voladura y superficie. Esta tecnología confirma la tendencia internacional hacia sistemas centralizados que priorizan seguridad, monitoreo y control del proceso de disparo.

En conjunto, los antecedentes revisados evidencian que los sistemas de iniciación electrónica y centralizada constituyen una alternativa tecnológica moderna para mejorar la seguridad en minería subterránea. Si bien en el Perú existen pocos estudios aplicados sobre el tema, la literatura internacional demuestra que estos sistemas permiten reducir la exposición del personal, mejorar la precisión del disparo y refuerza la confiabilidad operativa.

2.1.1 Antecedentes Nacionales y locales

En la ponencia titulada *“Mejoras en seguridad minera subterránea mediante la iniciación (aplicación) de voladura electrónica centralizada desde superficie”*, presentada en el marco del Foro de Tecnología de PERUMIN 35, se analiza la aplicación de un sistema de iniciación electrónica centralizada en operaciones mineras subterráneas, con el objetivo de mejorar los niveles de seguridad durante el proceso de voladura. En este estudio se destaca que la implementación de este sistema permite ejecutar el disparo desde un punto seguro en superficie, reduciendo significativamente la exposición del personal

durante el chispeo y minimizando la intervención directa en zonas de alto riesgo. Así también, se evidencia una mejora en el control del proceso de disparo y en la sincronización de la voladura, lo cual contribuye a optimizar los tiempos de ejecución y disminuir la probabilidad de incidentes asociados a fallas de encendido o detonaciones prematuras. Estos resultados demuestran que la iniciación centralizada constituye una alternativa viable para incrementar la seguridad y eficiencia en operaciones subterráneas (Mayta Valle, 2022).

En la tesis titulada *“Implementación de voladura centralizada en unidad minera subterránea para la mejora del sistema de gestión de seguridad en el procedimiento de voladura”*, se evalúa la aplicación de un sistema de iniciación electrónica centralizada en una operación minera subterránea, con el objetivo de mejorar los estándares de seguridad en el proceso de voladura. La investigación se enfoca en el uso de detonadores electrónicos y en la implementación de un sistema de comunicación bidireccional que permite realizar el disparo desde superficie, eliminando la necesidad de presencia directa del personal en el frente de trabajo durante el chispeo. Asimismo, se realizaron múltiples disparos experimentales que permitieron medir indicadores de rendimiento y seguridad, evidenciando una mejora en la operatividad del proceso y en la gestión de riesgos. Como resultado, se concluye que la voladura centralizada reduce significativamente la exposición del personal, optimiza el control del disparo y contribuye a mejorar la seguridad en la operación minera subterránea (Roa Pérez & Girón Merino, 2022).

2.1.2 Antecedentes Internacionales

En el ámbito internacional, se han desarrollado avances significativos en la implementación de sistemas de voladura centralizada en minería subterránea. Estos sistemas permiten mejorar la seguridad, precisión y eficiencia de las operaciones de voladura mediante la digitalización de los procesos de iniciación. Además, facilitan la ejecución de disparos desde múltiples puntos a través de redes de comunicación, principalmente cableadas, lo que garantiza una transmisión de datos más confiable en entornos subterráneos donde las condiciones limitan el uso de tecnologías inalámbricas. De este modo, la aplicación de estos sistemas contribuye a reducir riesgos asociados a la manipulación directa de explosivos y optimizar el control de las voladuras en operaciones mineras modernas (Kuru & İlik, 2023).

Rapokhin y Akgün (2023) analizan la aplicación del sistema electrónico de iniciación centralizado BlastWeb como una solución tecnológica para mejorar la seguridad y eficiencia en operaciones de voladura, tanto en minería subterránea como a cielo abierto. Los autores señalan que los avances en sistemas de iniciación electrónica han permitido optimizar el control de las voladuras, reducir riesgos asociados a la detonación y mejorar la productividad en el proceso minero. A su vez, destacan que estos sistemas permiten realizar voladuras desde zonas seguras, minimizando la exposición del personal a peligros operacionales. En consecuencia, concluyen que la implementación de sistemas de iniciación electrónica centralizada contribuye a la mejora del rendimiento operativo y a la seguridad en las actividades de voladura moderna (Rapokhin & Akgün, 2023).

2.2 Bases Teóricas de la Investigación

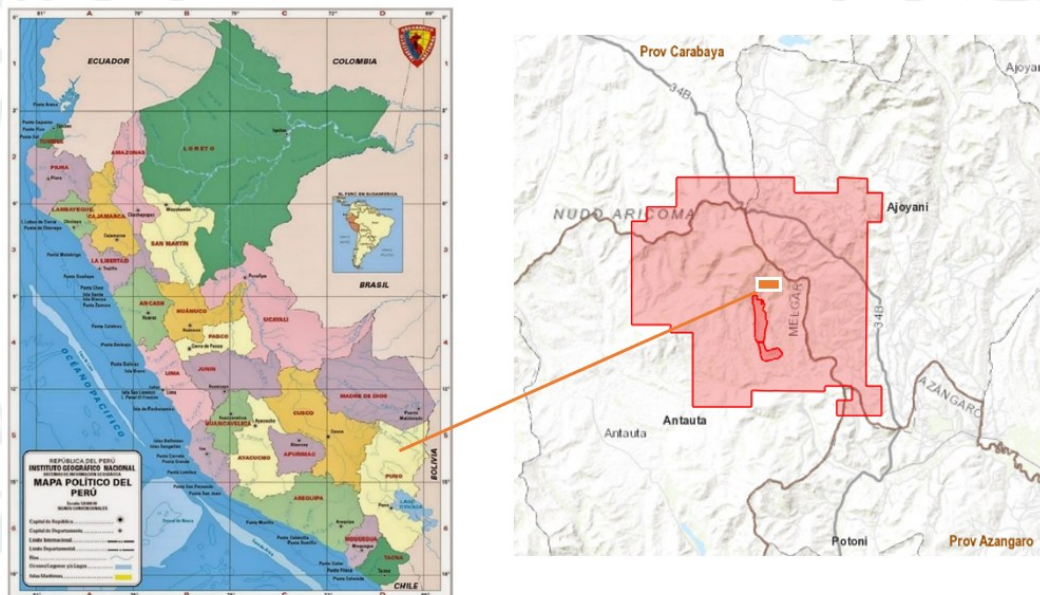
2.2.1 Ubicación

2.2.1.1 Ubicación Política

La unidad minera se encuentra ubicada en la zona sur del Perú, en el departamento de Puno, a una altura entre los 4500 y 4800 m.s.n.m en una zona montañosa de difícil acceso, lo que representa retos técnicos importante para la operación minera.

Figura 1

Ubicación de la unidad minera



Nota: Imagen referencial de la ubicación del área de estudio.

Fuente: Tomado de (INGEMMET, s.f.).

2.2.2 Ubicación en Coordenada UTM

El área de operaciones de la unidad minera se ubica dentro de su concesión minera con las siguientes coordenadas UTM:

Tabla 1*Coordenadas UTM*

Vértice	Coordenada NORTE	Coordenada ESTE
1	8 426 338.71	357 378.10
2	8 426 333.65	357 678.07
3	8 426 133.65	357 674.69
4	8 426 138.73	357 374.69
5	8 425 626.01	357 811.79
6	8 423 625.98	357 811.81
7	8 423 625.98	357 311.81
8	8 425 626.00	357 311.80
9	8 426 711.02	357 046.76
10	8 426 711.02	357 326.77
11	8 426 339.57	357 326.77
12	8 426 338.71	357 378.10
13	8 426 138.73	357 374.72
14	8 426 133.67	357 674.69
15	8 426 046.01	357 673.20

Nota: Datos recuperados de INGEMMET

2.2.2.1 Geología Regional

La propiedad minera está ubicada dentro de la Cordillera de Carabaya, que forma parte del segmento oriental de la cordillera de los Andes del Perú. Esta región se caracteriza por estar compuesta principalmente por una potente secuencia de rocas sedimentarias de origen marino. A lo largo del Fanerozoico, esta zona ha sido escenario de procesos geodinámicos complejos, incluyendo subducción, eventos orogénicos sucesivos y fases de magmatismo de doble origen, derivado del manto y la corteza. (Clark et al., 1990).

Los niveles más profundos de esta sucesión, de entre 10 a 15 kilómetros de espesor, están constituidos por unidades de pelitas y psamitas del Paleozoico temprano, correspondientes a las formaciones San José, Sandía y Ananea. Estas formaciones se consideran superpuestas sobre un basamento precámbrico de gneises, aunque este no aflora en la zona. Las primeras rocas paleozoicas experimentaron deformación tectónica y metamorfismo que las llevó a condiciones de facies subgneis, asociado a un evento orogénico que tuvo lugar entre el Devónico tardío y el Carbonífero temprano.

Encima de estas unidades, y de forma inconforme, se encuentra una secuencia sedimentaria de entre 3 a 4 kilómetros de espesor, compuesta por psamitas y carbonatos depositados durante el Paleozoico tardío. Esta incluye al Grupo Ambo (Mississipiano), Grupo Tarma (Pensilvánico) y Grupo Copacabana (Pérmico). Posteriormente, tras una fase de deformación de bajo impacto estructural y sin evidencia de metamorfismo regional asociado, se dio paso a una etapa de sedimentación continua y episodios de volcanismo alcalino, intermitente, que se prolongaron desde el Pérmico medio hasta el

Triásico. Esta etapa originó el Grupo Mitu, representado por aproximadamente 3 km de rocas volcánicas intercaladas con depósitos continentales de color rojo.

2.2.2.2 Geología Local

La mina se asienta sobre un depósito singular de estaño y cobre de alta ley, ubicado en la Cordillera Oriental de los Andes Centrales del Perú. El cuerpo mineralizado está asociado a un pequeño stock granitoide del Oligoceno tardío, emplazado a poca profundidad dentro de unidades metasedimentarias del Paleozoico temprano. Este yacimiento posee una continuidad vertical superior a los 1200 metros y presenta una zonificación vertical de metales bien definida, con cobre concentrado en los niveles superiores y estaño en los inferiores.

El estaño se presenta mayoritariamente en forma de vetillas compuestas por casiterita, cuarzo y clorita, además de ocurrencias dentro de brechas mineralizadas. Este tipo de mineralización se encuentra concentrada en un leucomonzogranito megacrystalino, caracterizado por la presencia de feldespato potásico, biotita y cordierita, siendo esta litología la más representativa del Plutón mineralizado de la zona.

Por su parte, el cobre se concentra en vetas ubicadas preferentemente en los contactos entre las rocas sedimentarias y el intrusivo, o completamente dentro de las pizarras. Ambas mineralizaciones, tanto de estaño como de cobre, están asociadas a una intensa alteración clorítica, que sobreimprime una fase previa dominada por sericitización y vetillas de turmalina-cuarzo.

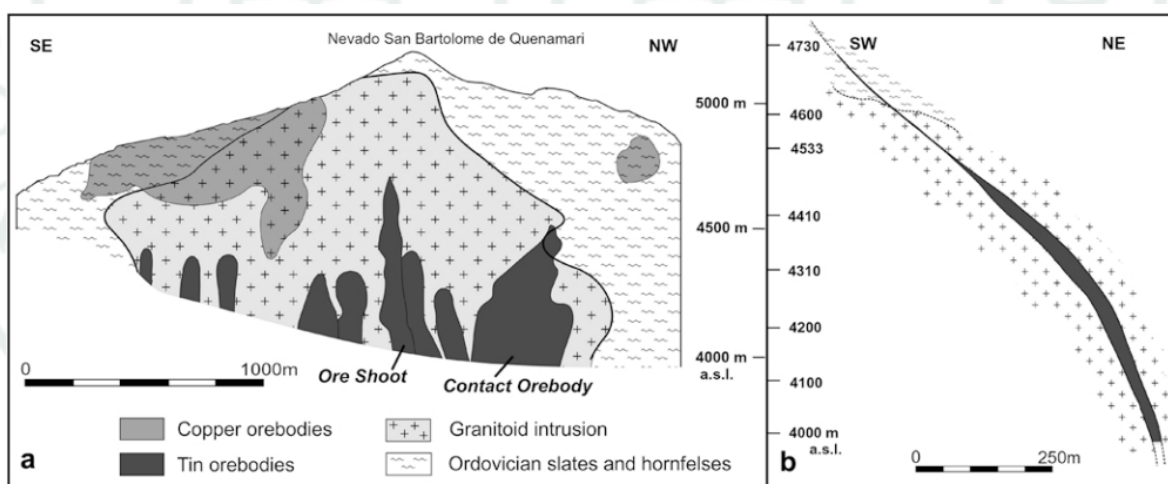
El patrón de alteración y la secuencia de mineralización sugieren que tanto la casiterita como la calcopirita se precipitaron durante un mismo proceso hidrotermal prolongado. Se considera que los metales provienen de un magma

peraluminoso evolucionado, relacionado directamente con la fase leucomonzogranítica del Plutón mineralizado de la zona.

La generación de espacios favorables para la circulación de fluidos estuvo controlada por fracturas y jogs formados en el granito, el cual actúa como una roca huésped más competente frente a la deformación, a diferencia de las pizarras adyacentes. Estas zonas de dilatación facilitaron la formación de densas redes de fracturas extensionales, donde se concentró la deposición de minerales. La geometría de las vetas y las texturas observadas evidencian que la actividad hidrotermal ocurrió de manera sincinemática, aprovechando los espacios generados por la deformación activa para canalizar los fluidos mineralizantes.

Figura 2

Sección longitudinal y transversal de la veta principal



Nota: Esta mineralización de gran extensión vertical supera los 1200 m y alberga el 98% de las reservas de estaño del yacimiento.

Fuente: Tomado de (Mlynarczyk et al., 2002)

La anchura de la veta es de < 2 m en la parte superior del yacimiento, pero en profundidad la estructura se dilata en una serie de brotes subverticales, algunos de los cuales alcanzan los 50 m de anchura.

2.2.3 Seguridad y Salud ocupacional

En el marco de la Seguridad y Salud Ocupacional en el Perú, es fundamental comprender los conceptos básicos establecidos en la normativa vigente, principalmente en la Ley N.º 29783, Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo, los cuales proporcionan definiciones clave para la identificación y control de riesgos en actividades mineras.

Esta implementación contribuirá al cumplimiento del Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería (D.S. N° 024-2016-EM y sus modificatorias), asegurando el control adecuado de los procesos de voladura conforme a lo establecido en los artículos 242 y 243.

Incidente de trabajo

Es un suceso no deseado que ocurre en el entorno laboral y que, si bien no genera daño o lesión, tiene el potencial de ocasionarlo. En el contexto minero, los incidentes representan alertas importantes que permiten prevenir accidentes mayores, especialmente en procesos críticos como la iniciación de explosivos (MINEM, 2016)

Accidente de trabajo

El accidente de trabajo se define como todo suceso repentino que sobreviene por causa o con ocasión del trabajo, y que produce en el trabajador una lesión orgánica, perturbación funcional, invalidez o muerte. Este concepto es fundamental

en minería, debido a la alta exposición a condiciones de riesgo durante actividades como la preparación y ejecución de voladuras (Ley N.º 29783, 2011).

Enfermedad ocupacional

Es aquella contraída como resultado de la exposición a factores de riesgo inherentes a la actividad laboral. En minería subterránea, estas pueden estar asociadas a agentes físicos, químicos o ergonómicos presentes en el ambiente de trabajo (Ley N.º 29783, 2011).

Peligro

En actividades de voladura subterránea, los peligros pueden estar relacionados con explosivos, gases post voladura, energía no controlada o errores de conexión. (MINEM, 2016)

Riesgo

Se entiende como riesgo a la combinación entre la probabilidad de ocurrencia de un evento peligroso y la magnitud de sus posibles consecuencias sobre las personas, equipos o procesos. (MINEM, 2016)

2.2.4 Sistemas de iniciación.

2.2.4.1 Iniciación convencional

El sistema convencional de iniciación se basa en el uso de elementos pirotécnicos para la transmisión de la señal de detonación, con limitada precisión en los tiempos de disparo (MINEM, 2016).

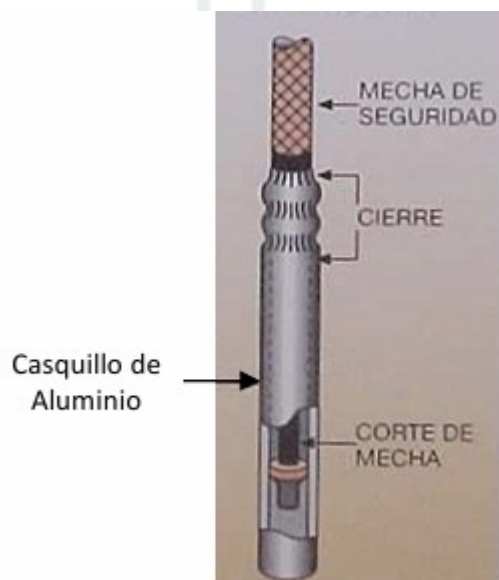
Dentro de las operaciones subterráneas, la iniciación convencional continúa siendo utilizada debido a su simplicidad operativa; sin embargo,

depende de procedimientos manuales de conexión y chispeo que requieren mayor presencia del personal en campo.

En este sistema, el fulminante convencional contiene explosivos primarios altamente sensibles, como el azida de plomo, la cual es activada mediante la chispa generada durante el encendido de la mecha, y así iniciar la secuencia de detonación hacia la carga explosiva principal.

Figura 3

Detonador Convencional



Nota: Partes del detonador a mecha. Tomado de (ENAE S.A., s.f.)

El sistema convencional requiere una mayor intervención del personal en campo, lo que incrementa la exposición a riesgos durante el proceso de conexión y preparación de la voladura. Entre las principales desventajas se encuentran la menor precisión en la secuencia de disparo, la posibilidad de errores humanos en el armado de la malla y una menor capacidad de control del proceso de iniciación, estando sujeto a demoras operativas e incertidumbres durante la ejecución del disparo.

Sin embargo, este sistema sigue siendo utilizado en muchas operaciones mineras debido a su facilidad de implementación y accesibilidad.

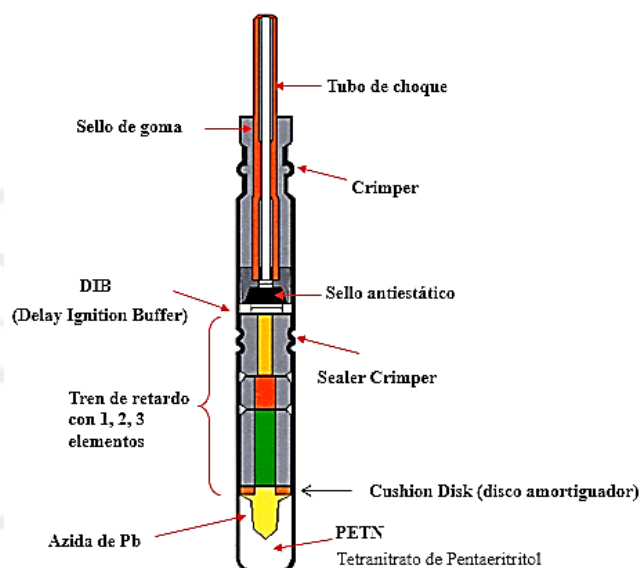
2.2.4.2 *Iniciación no eléctrica*

Los sistemas no eléctricos emplean tubos de choque para transmitir la señal de iniciación, reduciendo los riesgos asociados a la electricidad, aunque mantienen variabilidad en los tiempos de retardo (MINEM, 2016). Utiliza accesorios como el tubo de choque, el cual transmite una señal de baja energía a través de un tubo plástico hasta el detonador. Este sistema no emplea corriente eléctrica, lo que lo hace más seguro frente a interferencias electromagnéticas, descargas eléctricas o corrientes parásitas.

Incorpora retardos pirotécnicos predeterminados dentro de los detonadores, lo que permite establecer una secuencia de disparo, aunque con menor precisión en comparación con los sistemas electrónicos.

Figura 4

Detonador no eléctrico



Nota: Figura referencial para representar la configuración del detonador no eléctrico (adoptado de Orica Mining Services, 2018).

El sistema no eléctrico presenta una implementación relativamente sencilla y un menor costo en comparación con los sistemas electrónicos, siendo ampliamente utilizado en operaciones mineras debido a su facilidad de uso y confiabilidad en diferentes condiciones de trabajo. Sin embargo, presenta un margen de varianza en la precisión de los tiempos de retardo y en el control de la secuencia de disparo, debido a la dispersión natural de los retardos pirotécnicos.

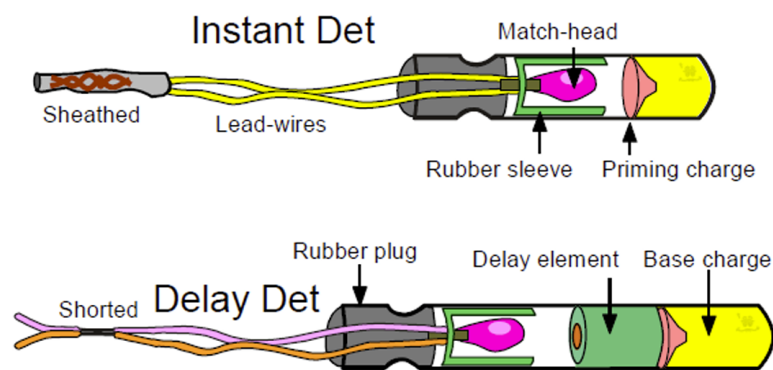
2.2.4.3 Iniciación eléctrica

Los detonadores eléctricos son activados por corriente eléctrica, lo que permite su iniciación a distancia, pero implica riesgos frente a corrientes erráticas y descargas externas (MINEM, 2016). Se basa en el

uso de detonadores eléctricos activados mediante una fuente de energía, como una batería o un explosor. En este sistema, la señal de iniciación se transmite a través de cables eléctricos que conducen corriente hacia los detonadores.

Figura 5

Detonador eléctrico



Nota: Tomado de Miller & Martin (2007)

Este tipo de detonador permite un mayor control en comparación con los sistemas convencionales; sin embargo, presenta riesgos asociados a interferencias eléctricas, corrientes inducidas y descargas atmosféricas, lo que puede generar detonaciones no deseadas si no se aplican adecuados controles de seguridad.

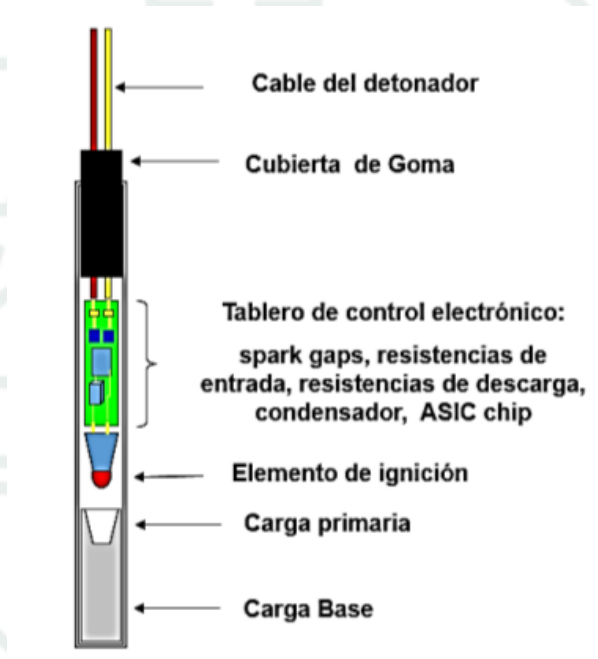
2.2.4.4 Iniciación Electrónica

Los sistemas de iniciación electrónica permiten la programación individual de detonadores con alta precisión y confiabilidad, mejorando el control del proceso de voladura (Kuru & İlik, 2023). Este sistema utiliza equipos de programación (tagger) y unidades de disparo que controlan la secuencia de detonación de manera remota, mediante la

transmisión de señales digitales hacia cada detonador electrónico. Cada uno de estos dispositivos incorpora un microchip que ejecuta la detonación en el tiempo previamente asignado, lo que permite establecer retardos con exactitud en milisegundos y reducir significativamente la dispersión en los tiempos de iniciación en comparación con los sistemas convencionales.

Figura 6

Detonador electrónico



Nota: Tomado de (Orica Mining Services, 2018).

Una de las principales ventajas de este sistema es la posibilidad de realizar pruebas de continuidad y verificación del circuito antes del disparo, lo cual permite identificar errores en la conexión, detonadores defectuosos o interrupciones en la línea, incrementando la confiabilidad del sistema. Esta capacidad de diagnóstico previo reduce la

probabilidad de fallas de iniciación, contribuyendo a una ejecución más segura y controlada del proceso de voladura (Dyno Nobel, 2020).

Desde el punto de vista operativo, la iniciación electrónica también permite una mayor flexibilidad en el diseño de la secuencia de disparo, ya que los tiempos de retardo pueden ser ajustados de manera precisa según los requerimientos de la operación. Esto facilita la optimización del proceso de voladura y mejora la eficiencia en la ejecución de las actividades.

Por otro lado, el detonador electrónico tiene alta compatibilidad con el sistema centralizado debido a su iniciación mediante pulsos eléctricos enviados por el sistema de iniciación, el cual recibe la energía necesaria enviada mediante el sistema centralizado, lo que reduce significativamente la exposición del personal, ya que elimina la necesidad de realizar el chispeo manual en interior mina. La posibilidad de ejecutar el disparo desde ubicaciones centrales o seguras, como superficie o zonas protegidas, disminuye la presencia de trabajadores en áreas críticas durante la voladura.

2.2.5 *Sistemas de comunicación en mina*

2.2.5.1 *Comunicación por Fibra Óptica*

La fibra óptica es un medio de transmisión que utiliza pulsos de luz para enviar información a altas velocidades y con mínima pérdida de señal, lo que la convierte en una tecnología altamente eficiente para sistemas de comunicación. En el contexto de la minería subterránea, la fibra óptica permite interconectar distintos niveles y áreas operativas de

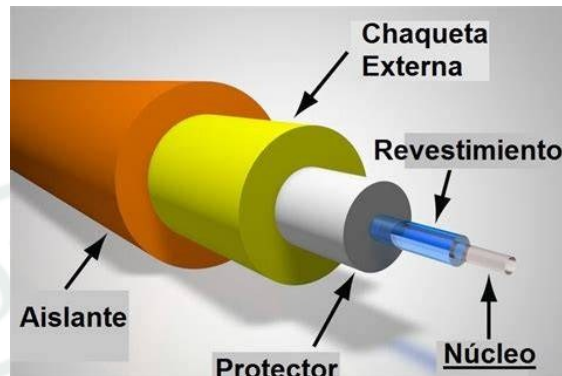
la mina, facilitando la transmisión de grandes volúmenes de datos de manera rápida, estable y confiable.

A diferencia de los sistemas tradicionales de transmisión, la fibra óptica presenta una alta inmunidad a interferencias electromagnéticas, lo cual resulta especialmente importante en ambientes mineros donde existen equipos eléctricos y condiciones que pueden afectar otros tipos de comunicación. Dentro de operaciones subterráneas, su aplicación resulta particularmente útil en sistemas que requieren transmisión continua entre superficie e interior mina. Adicionalmente, su capacidad de transmisión a largas distancias de la señal la convierte en el medio ideal para ser utilizado como red principal o “backbone” en sistemas de comunicación subterráneos.

En minería, la fibra óptica es empleada para integrar diferentes sistemas tecnológicos, tales como monitoreo en tiempo real, control de equipos, sistemas de ventilación, comunicaciones operativas y sistemas de iniciación electrónica centralizada. Esto permite mejorar la eficiencia operativa, optimizar la toma de decisiones y garantizar una mayor continuidad en las operaciones.

Figura 7

Fibra Óptica



Nota: Elaboración propia basada en literatura técnica de fibra óptica.

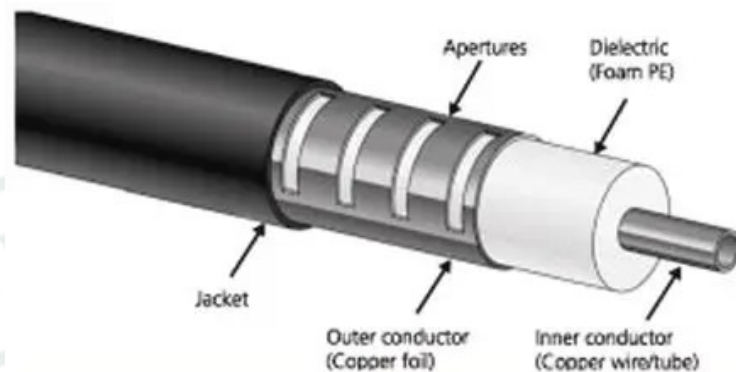
Además, la implementación de redes de fibra óptica contribuye a reducir costos a largo plazo, debido a su durabilidad, menor necesidad de mantenimiento y alta capacidad de adaptación a nuevas tecnologías. En ese sentido, la fibra óptica se ha convertido en un componente fundamental en la modernización de las operaciones mineras, permitiendo la digitalización y automatización de procesos críticos (Mestanza, 2011).

2.2.5.2 Sistema de radio tipo Leaky Feeder

El sistema Leaky Feeder (cable radiante) es una tecnología ampliamente utilizada en minería subterránea para una mejor comunicación. Consiste en un cable coaxial instalado a lo largo de los túneles que actúa como una antena continua, facilitando la transmisión y recepción de señales de radio.

Figura 8

Leaky Feeder



Nota: Estructura referencial de un sistema de cable radiante (Leaky Feeder). Tomado de Wall to Wall Communications (2019).

En minería subterránea, el Leaky Feeder permite establecer comunicación continua y segura, siendo utilizado también para la iniciación remota de voladuras desde superficie.

Este sistema ha sido implementado en minas como MARSA para mejorar la disponibilidad y confiabilidad de las comunicaciones internas (Murga Sagástegui & Salvatierra Ulloa, 2015)

2.2.5.3 *Sistemas de comunicación híbridos*

En minería subterránea, la infraestructura de comunicaciones se caracteriza por el uso de múltiples tecnologías de transmisión de información, las cuales son implementadas de manera conjunta para cubrir los distintos requerimientos operativos de la mina. Debido a las limitaciones propias del entorno subterráneo, tales como la variabilidad de las labores, la profundidad, la presencia de interferencias físicas y la necesidad de comunicación en zonas móviles, en muchas unidades no es común el uso de un único sistema de comunicación de forma integral.

En tal caso, se emplean sistemas de comunicación híbridos, entendidos como la combinación de dos o más tecnologías de comunicación dentro de una misma operación minera. Estas configuraciones permiten establecer una red de comunicaciones más flexible y adaptativa, capaz de garantizar la conectividad tanto en zonas fijas como en áreas de constante avance.

En diversas minas subterráneas se implementan configuraciones mixtas de comunicación, entre las cuales destacan la combinación de sistemas de leaky feeder con fibra óptica, leaky feeder con redes Ethernet, así como fibra óptica con Ethernet en tramos específicos de la operación. En algunas operaciones se incorporan tecnologías inalámbricas complementarias, como redes Wi-Fi industriales, principalmente en zonas estratégicas donde se requiere transmisión de datos a equipos móviles o sistemas de monitoreo en tiempo real.

La fibra óptica suele emplearse como medio principal de transmisión de datos en largas distancias, debido a su alta capacidad y estabilidad, mientras que las redes Ethernet permiten la conexión de equipos fijos y sistemas de control en puntos específicos de la operación. Por otro lado, los sistemas de leaky feeder facilitan la comunicación inalámbrica en interior mina, especialmente en labores donde el tendido de cableado resulta limitado o inviable. La integración de estas tecnologías permite cubrir de manera eficiente las distintas necesidades de comunicación dentro de la mina.

En este sentido, el uso de sistemas de comunicación híbridos responde a la necesidad de garantizar la continuidad operativa y la confiabilidad de la transmisión de información en entornos complejos. La combinación de tecnologías cableadas e inalámbricas permite mejorar la cobertura, reducir interrupciones y asegurar la comunicación en procesos críticos. Es por ello, que la integración de diferentes sistemas de comunicación en minería subterránea constituye una práctica ampliamente adoptada para optimizar la conectividad y asegurar la seguridad en las operaciones.

2.2.6 Desarrollo del problema

La implementación de tecnologías que permitan mejorar la seguridad y eficiencia del proceso, como un sistema de iniciación centralizado desde superficie, permite reducir la exposición del personal y optimiza el control de los tiempos de retardo, la secuencia de disparo y la confiabilidad de la voladura, contribuyendo a una operación más segura, precisa y eficiente en minería subterránea.

2.2.6.1 *Protocolo de voladura*

El protocolo de voladura comprende un conjunto estructurado de actividades y coordinaciones que permiten ejecutar de manera segura y ordenada el proceso de iniciación y disparo en una operación minera subterránea. Este procedimiento es definido a nivel organizacional y es desarrollado por personal clave, entre ellos el jefe de mina, el jefe de guardia y el responsable del proceso de iniciación de voladura.

El desarrollo del protocolo se distribuye a lo largo de la guardia de trabajo, iniciando con la reunión de coordinación al comienzo del turno, seguida de una verificación intermedia del avance de las actividades, y culminando con la ejecución del proceso de iniciación y disparo. Estas etapas permiten organizar al personal, coordinar las condiciones operativas y garantizar el cumplimiento de los estándares establecidos antes, durante y después de la voladura.

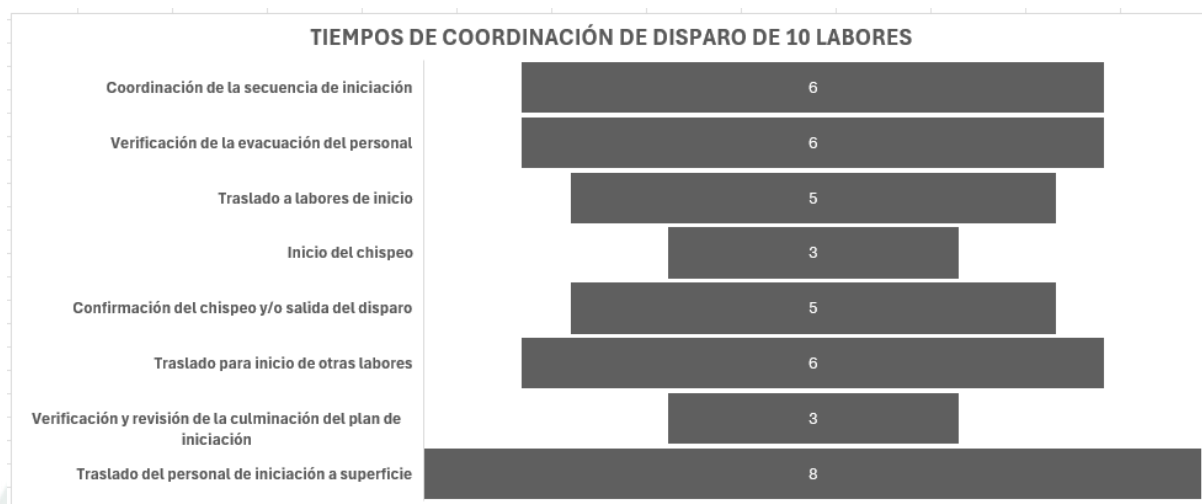
Durante la ejecución del procedimiento convencional, se aplican medidas de control como la comunicación permanente vía radio, la asignación de vigías en zonas estratégicas y el control del ingreso del personal mediante sistemas de registro. No obstante, a pesar de estas medidas, el proceso aún requiere la presencia de trabajadores en interior mina durante la etapa de iniciación, especialmente en el chispeo manual, lo cual incrementa la exposición a riesgos como errores en la conexión, fallas en la secuencia de disparo o detonaciones no controladas.

2.2.6.2 *Tiempos de coordinación de disparo*

En las operaciones de voladura en minería subterránea, el proceso de ejecución de voladuras presenta demoras significativas debido a la alta dependencia de actividades previas al disparo, las cuales no están directamente relacionadas con la iniciación, pero condicionan su realización. Entre estas actividades se encuentran la coordinación de la secuencia de iniciación, la verificación de la evacuación del personal, los traslados entre labores y el retorno del personal a superficie.

Figura 9

Tiempos de coordinación de Disparo



Nota: Registro operacional

Tal como se muestra en la figura, estos procesos previos demandan tiempos considerables, siendo el traslado del personal a superficie y la coordinación general de la secuencia de disparo los que generan mayor impacto. Esta situación evidencia que el inicio del chispeo no depende únicamente de la preparación técnica del disparo, sino de una serie de factores logísticos y operativos que deben cumplirse previamente.

El esquema convencional obliga al personal a permanecer en interior mina hasta completar todas las condiciones necesarias para el disparo, incluyendo la evacuación total, validaciones en campo y disponibilidad de transporte. Esta dependencia genera tiempos de espera innecesarios, incrementando los tiempos muertos y reduciendo la eficiencia del ciclo de voladura.

Por otro lado, la confirmación del chispeo y la salida del disparo se realiza de manera directa en campo, lo que introduce variabilidad en los tiempos debido a la necesidad de coordinación entre el personal involucrado. Esta situación limita la

capacidad de ejecutar disparos de manera oportuna, especialmente cuando se trabaja con múltiples labores.

2.2.6.1 Riesgo operacional durante el proceso de chispeo

En el proceso de iniciación convencional de voladuras subterráneas, el personal encargado del chispeo debe acercarse a las labores previamente cargadas con explosivos con la finalidad de verificar las conexiones y esperar la hora establecida de chispeo.

Según los procedimientos establecidos en la unidad minera, se contemplan la asignación de un vigía por cada chispeador; sin embargo, en la práctica operativa, un mismo vigía puede supervisar hasta tres labores cercanas, considerando que en promedio se disparan alrededor de quince labores por guardia.

Este proceso implica que el personal permanezca durante un tiempo determinado en zonas cargadas con explosivos, lo cual incrementa su nivel de exposición a riesgos propios de la operación minera subterránea. Entre los principales riesgos se encuentran la caída de rocas durante el recorrido, la interacción con equipos móviles en tránsito, la presencia de gases residuales, así como condiciones geomecánicas variables que pueden afectar la estabilidad de las labores. A ello se suma la manipulación directa del sistema de iniciación, lo que incrementa la probabilidad de ocurrencia de incidentes si no se cumplen adecuadamente los procedimientos.

Desde un enfoque de seguridad, la exposición del personal puede entenderse como el tiempo durante el cual los trabajadores permanecen realizando actividades en zonas de riesgo. Una forma de representar esta condición es mediante el concepto de horas - hombre de exposición, el cual relaciona el número de trabajadores involucrados con el tiempo que permanecen en dichas condiciones. En este sentido, mientras mayor sea el

tiempo requerido para completar el chispeo y mayor sea la cantidad de personal involucrado, mayor será el nivel de exposición al riesgo operacional.

Con la implementación del sistema de iniciación centralizado, el proceso de chispeo deja de requerir el desplazamiento de múltiples trabajadores en interior mina. En lugar de ello, la coordinación del disparo se realiza mediante comunicación radial entre el jefe de guardia de la empresa contratista minera y el jefe de guardia de la unidad minera, quienes validan la evacuación del personal y autorizan la ejecución del disparo a través del operador del Sistema de control de Voladura (SBC). Este esquema reduce considerablemente el numero de personas involucradas en zonas cargadas con explosivos.

2.2.7 Equipos y accesorios utilizados en el sistema centralizado

El sistema de iniciación electrónica centralizada está conformado por un conjunto de equipos que permiten la verificación, programación y ejecución de la voladura, mejorando la precisión en los tiempos de retardo y reduciendo la intervención directa del personal en zonas de riesgo (Dyno Nobel, 2020)

2.2.7.1 Unidad de etiquetado (tagger)

La unidad de etiquetado es un dispositivo utilizado para asignar una identificación única a cada detonador electrónico, registrando parámetros como tiempos de retardo y secuencia de disparo. Este proceso garantiza la correcta configuración del diseño de voladura y facilita la trazabilidad de cada elemento dentro del sistema.

Figura 10

Unidades de etiquetado



Nota: Unidades de etiquetado de detonadores electrónicos.

Una de las principales ventajas de la unidad de etiquetado es que permite realizar una programación individualizada de cada detonador, lo que proporciona un alto nivel de control sobre la secuencia de disparo. Esto representa una mejora significativa respecto a los sistemas convencionales, donde los tiempos de retardo están predeterminados y no pueden ser modificados con precisión en campo.

A su vez, la unidad de etiquetado permite realizar verificaciones preliminares del sistema, como la comprobación del estado del detonador y la correcta asignación de los parámetros, lo cual reduce la probabilidad de errores humanos durante la preparación de la voladura. Esta funcionalidad contribuye a incrementar la confiabilidad del sistema de iniciación y a optimizar el proceso operativo.

Figura 11

Verificación de conexión



Nota: Verificación del sistema en campo

En el sistema de iniciación centralizado, la unidad de etiquetado cumple un rol clave, ya que garantiza que todos los detonadores estén correctamente configurados antes de ser integrados al sistema de control. De esta manera, se asegura que la ejecución del disparo se realice de forma sincronizada, precisa y segura, además de una adecuada trazabilidad de los elementos utilizados en cada voladura. El uso de esta unidad reduce errores en la conexión y programación, mejorando la confiabilidad del sistema de iniciación.

2.2.7.2 Unidad de Control de Voladura

La unidad de control de voladura es el equipo desde el cual se realiza la programación, verificación del circuito y ejecución del disparo. Permite cargar el diseño de voladura, comprobar la integridad del sistema y activar la iniciación desde una ubicación segura.

La unidad de control incorpora sistemas de seguridad que restringen la ejecución del disparo únicamente a personal autorizado, mediante el uso de claves, tarjetas encriptadas o protocolos de validación. Esto evita activaciones accidentales o no autorizadas, garantizando que la voladura se realice bajo condiciones controladas. De igual manera, el sistema registra información relevante del proceso, como parámetros de programación, estado del circuito y confirmación del disparo, lo que permite contar con trazabilidad y respaldo de la operación (Dyno Nobel, 2020).

Figura 12

Unidades de control de voladura



Nota: Imagen referencial de distintas unidades portátiles

En sistemas de iniciación centralizada, la unidad de control adquiere un rol aún más relevante, ya que permite ejecutar el disparo desde superficie o desde zonas seguras, eliminando la necesidad de intervención directa en interior mina. Para ello, se integra con sistemas de comunicación, como fibra óptica, Ethernet o radio módem, que transmiten la señal de iniciación hacia los dispositivos ubicados en campo.

Otra característica importante es su capacidad de integración con otros equipos del sistema, como la unidad de etiquetado (tagger) y módulos intermedios, lo que permite una gestión completa del proceso desde la

programación inicial hasta la ejecución final. Esto facilita la estandarización de los procedimientos y mejora la eficiencia operativa.

En términos de ventajas, la unidad de control de voladura contribuye a mejorar la precisión en la secuencia de disparo, reducir la variabilidad en los tiempos de retardo, minimizar errores humanos y aumentar la seguridad del proceso. No obstante, su correcta operación depende de una adecuada capacitación del personal y del cumplimiento de los procedimientos establecidos.

2.2.7.3 Radio Modem

Dentro de la arquitectura del sistema implementado, el radio modem cumple la función de mantener el intercambio de información entre superficie e interior mina, permitiendo la transmisión inalámbrica de datos.. Su uso es fundamental en sistemas centralizados, ya que garantiza la comunicación continua para la programación y ejecución del disparo.

Este tipo de tecnología permite operar en condiciones subterráneas donde otros medios de comunicación pueden ser limitados (Sanchidrián, 2015).

Figura 13

Radio Modem



Nota: Tomado del portal de RACOM

El radio módem permite la transmisión de datos entre la unidad de control y los equipos ubicados en interior mina, asegurando la comunicación necesaria para la ejecución del disparo en sistemas de voladura centralizada.

Los radios Ripex son equipos de comunicación de datos diseñados para operar en bandas de radiofrecuencia, comúnmente en rangos de UHF o 900 MHz, lo que les permite transmitir información a largas distancias con alta estabilidad. Estos dispositivos funcionan como nodos dentro de una red de comunicación, facilitando la interconexión entre equipos ubicados en diferentes puntos de la operación minera, mediante enlaces inalámbricos confiables.

En la implementación del sistema de voladura centralizada, los radios Ripex son utilizados como parte de la red de comunicación que conecta la unidad de disparo en superficie (SBC) con las unidades de control de voladura (BCU) ubicadas en interior mina. Esta conexión es esencial para la transmisión de la señal de disparo, así como para el monitoreo del estado del sistema previo a la ejecución de la voladura.

El funcionamiento del sistema se basa en la integración de los radios Ripex con la infraestructura de comunicación existente, como sistemas tipo leaky feeder. En este esquema, los radios actúan como enlaces de respaldo o como medio principal de comunicación, asegurando la continuidad de la transmisión de datos.

Los radios Ripex permiten la creación de redes tipo punto a punto o punto multipunto, facilitando la comunicación entre múltiples unidades BCU distribuidas en diferentes niveles de la mina. Esta capacidad resulta

fundamental en sistemas de voladura centralizada, donde es necesario garantizar que la señal de disparo llegue de manera simultánea y confiable a todos los puntos de iniciación.

2.2.7.4 Tarjetas y/o llaves de voladura

En los sistemas de voladura remota y centralizada, la ejecución del disparo no depende únicamente de la conectividad entre los equipos de campo y los sistemas de control, sino también de mecanismos de autorización que garanticen la seguridad del proceso. En este contexto, las unidades de control de voladura, comúnmente denominadas BCU (Blast Control Unit), incorporan dispositivos físicos de habilitación, tales como tarjetas electrónicas o llaves de voladura, los cuales permiten validar y autorizar la secuencia de disparo.

Las tarjetas o llaves de voladura constituyen elementos de seguridad diseñados para evitar activaciones no autorizadas del sistema. Estos dispositivos funcionan mediante tecnologías de identificación, como radiofrecuencia (RFID) o comunicación de campo cercano (NFC), las cuales permiten que la unidad de control reconozca una credencial válida previamente configurada dentro del sistema. Solo después de esta validación, la BCU queda habilitada para recibir la señal de disparo proveniente del sistema de control en superficie.

El proceso de autorización mediante tarjetas o llaves se desarrolla como parte de una secuencia de seguridad previamente establecida. En primer lugar, el personal autorizado inserta o aproxima la tarjeta de voladura a la unidad de control, lo que permite la verificación del credencial. Posteriormente, una vez que el sistema valida la autenticidad de la tarjeta, la unidad queda en estado

habilitado, asegurando la recepción de la orden de disparo desde el controlador principal.

Figura 14

Tarjetas o llaves de confirmación



Nota: Imagen referencial de distintos sistemas

Es importante señalar que estas llaves no ejecutan directamente el disparo, sino que cumplen la función de habilitar el sistema, formando parte de un esquema de seguridad basado en múltiples niveles de autorización. Este enfoque reduce significativamente el riesgo de activaciones accidentales o manipulaciones indebidas, ya que el disparo solo puede realizarse cuando se cumplen simultáneamente las condiciones de programación, verificación y autorización.

En los sistemas modernos de voladura centralizada, las tarjetas de voladura también permiten la gestión de accesos y el control de responsabilidades, ya que cada credencial puede estar asociada a un usuario específico. Esto facilita la trazabilidad de las operaciones y el registro de eventos dentro del sistema, contribuyendo a una mayor transparencia y control en el proceso de voladura.

2.2.7.5 Unidad de disparo

La unidad de disparo en superficie, comúnmente denominada SBC (Surface Blast Controller), constituye el componente encargado de emitir la orden de disparo hacia las unidades de control ubicadas en interior mina. Este equipo forma parte del sistema de iniciación y se encuentra generalmente instalado en superficie o en una sala de control, desde donde se supervisa y ejecuta la secuencia de voladura de manera remota.

El SBC cumple la función de coordinar la comunicación entre el sistema de programación de detonadores y las unidades de control de voladura (BCU), asegurando que la señal de disparo sea transmitida únicamente cuando se han verificado todas las condiciones de seguridad. Para ello, el sistema requiere que previamente se haya realizado la programación de los detonadores electrónicos, la verificación de la red de conexión y la habilitación de las unidades de campo mediante los mecanismos de autorización correspondientes.

Figura 15

Unidad de disparo



Nota: Computadora de detonación en superficie (SBC)

Desde el punto de vista operativo, la unidad de disparo permite al personal autorizado ejecutar el disparo sin necesidad de encontrarse en las proximidades

del frente de voladura, lo cual representa una mejora significativa en términos de seguridad. Cabe mencionar que, el SBC incorpora sistemas de control y monitoreo que permiten verificar el estado de la red, la conexión con las unidades BCU y la disponibilidad de los dispositivos antes de emitir la señal de activación.

El SBC integra mecanismos de seguridad que restringen el acceso y la ejecución del disparo únicamente a personal autorizado. Entre estos mecanismos se incluyen sistemas de autenticación, como el uso de tarjetas o llaves de voladura, así como protocolos de verificación que aseguran que todas las condiciones operativas han sido cumplidas antes de proceder con la activación del sistema. De esta manera, se establece un control riguroso sobre el proceso de disparo, minimizando riesgos asociados a errores humanos o activaciones indebidas.

2.3 Hipótesis de Investigación

2.3.1 Hipótesis General

La implementación de un sistema de iniciación centralizado en minería subterránea mejora la seguridad y confiabilidad del proceso de disparo, reduciendo fallas de iniciación y permitiendo un control más eficiente de las voladuras.

2.3.2 Hipótesis Específica

La aplicación de un sistema de iniciación centralizada optimizara los tiempos operativos del proceso, el cual se reflejarán en una reducción de tiempos muertos y un mejor aprovechamiento de las etapas posteriores.

La implementación del sistema de iniciación centralizada permitirá reducir la exposición del personal en interior mina durante el proceso de voladura, mejorando las condiciones de seguridad y disminuyendo la permanencia en zonas de alto riesgo.

El uso de un sistema centralizado permitirá mejorar el control y la precisión de la secuencia de disparo, reportando la ocurrencia de fallas de iniciación y detonaciones no controladas en comparación con sistemas convencionales.

2.4 Variables

2.4.1 *Variable Independiente*

- Sistema de iniciación

2.4.2 *Variable Dependiente*

- Confiabilidad del disparo
- Seguridad Operativa

2.4.3 Operacionalización de Variables

Tabla 2
Variables operacionales

Variables	Definición Conceptual	Indicador	Medición	Unidad
SISTEMA DE INICIACIÓN CENTRALIZADA	Sistema basado en detonadores electrónicos que permite la programación, verificación y ejecución remota del disparo, mejorando el control del proceso de voladura y reduciendo la intervención directa del personal en interior mina.	Tipo de sistema	Comparación (Convencional / Centralizado)	-
		Capacidad del sistema	Número de detonadores programados	Unidades
		Nivel de implementación	Relación entre el número de labores que operan con el sistema centralizado y el total de labores programados para la implementación	%
CONFIABILIDAD Y SEGURIDAD DEL PROCESO DE DISPARO	Nivel de desempeño del proceso de voladura en términos de reducción de exposición del personal, optimización del tiempo de chispeo y confiabilidad del disparo.	Tiempo de chispeo	Duración de la ejecución del proceso de iniciación de voladura.	min.
		Exposición del personal	Número de trabajadores involucrados x tiempo de permanencia durante el proceso de iniciación	Horas - hombre

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Alcances y Limitaciones

3.1.1 Alcances

La presente investigación se enfoca en evaluar la implementación de un sistema de iniciación centralizado de voladura en minería subterránea, analizando su impacto en la seguridad, confiabilidad y control del proceso de disparo. El estudio comprende la comparación entre el sistema convencional y el sistema centralizado, considerando indicadores como la reducción de fallas de iniciación, el nivel de exposición del personal y la reducción en los tiempos de chispeo. Así mismo se presenta una predicción de los beneficios que puede implicar a largo plazo.

3.1.2 Limitaciones

La investigación presenta limitaciones relacionadas con la disponibilidad de información operativa, ya que se basa principalmente en reportes de voladura y registros del sistema de iniciación. Por otra parte, no se consideran variables geomecánicas del macizo rocoso ni parámetros de resultados post voladura, como fragmentación, vibraciones o desplazamiento del material, debido a que el estudio se centra exclusivamente en la implementación del proceso de iniciación.

El estudio fue desarrollado durante la etapa de implementación del sistema de iniciación centralizado, los resultados obtenidos corresponden a la información recopilada durante un periodo de cuatro meses, en el cual la cobertura del sistema alcanzo un 32.6% respecto a la implementación proyectada, por lo que refleja las condiciones operativas observadas en dicho intervalo de tiempo.

3.2 Tipo y Nivel de Investigación

3.2.1 Tipo de Investigación

La presente investigación es de tipo aplicada, debido a que busca dar solución a un problema específico en el ámbito de la minería subterránea, mediante la implementación de un sistema de iniciación electrónica centralizada orientado a mejorar la seguridad y eficiencia del proceso de voladura. Este tipo de investigación se enfoca en la aplicación práctica del conocimiento para optimizar condiciones reales de operación.

La investigación presenta un enfoque cuantitativo, ya que se basa en la recolección y análisis de datos medibles, como tiempos de chispeo, número de disparos realizados y nivel de exposición del personal, con el fin de evaluar el impacto del sistema implementado.

3.2.2 Nivel de Investigación

El nivel de dicha investigación es explicativo, debido a que no solo describe el comportamiento del proceso de voladura, sino que busca determinar la relación causa y efecto entre la implementación del sistema de iniciación centralizada y la mejora en la seguridad, confiabilidad y eficiencia del proceso.

De manera complementaria, también presenta un nivel descriptivo, ya que se analizan y caracterizan las condiciones del proceso de voladura antes y después de la implementación del sistema, evidenciando los cambios generados en la operación.

3.3 Población y Muestra

3.3.1 Población

La población está conformada por todas las voladuras subterráneas realizadas en la unidad minera de la sierra sur del Perú durante el periodo de estudio, así como por el personal involucrado en el proceso de iniciación de voladuras, incluyendo operadores, técnicos y supervisores.

3.3.2 Muestra

La muestra estará constituida por un conjunto representativo de voladuras subterráneas en las cuales se aplicarán tanto el sistema convencional como el sistema de iniciación centralizada. Se considerarán registros de voladuras ejecutadas en la etapa de implementación del sistema, seleccionadas mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia, en función de la disponibilidad de datos operativos y accesibilidad a la información

3.4 Métodos, Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

3.4.1 Métodos

3.4.1.1 Análisis Comparativo

El método principal utilizado en la investigación será el método comparativo, el cual permitirá analizar las diferencias entre el sistema de iniciación convencional y el sistema de iniciación centralizada en términos de tiempo de chispeo, exposición del personal y confiabilidad del disparo.

Se empleará el método descriptivo, con el propósito de caracterizar las condiciones operativas del proceso de voladura y describir el comportamiento de las variables en estudio.

3.4.2 Técnicas:

3.4.2.1 Revisión documental

Se analizarán reportes de voladura, registros operativos y reportes de seguridad para obtener información sobre fallas de iniciación, tiempos y exposición del personal.

3.4.2.2 Registro de datos operativos

Se recopilarán datos proporcionados por los equipos de iniciación electrónica (tagger, BCU, SBC) y reportes del sistema.

3.4.3 Instrumentos de recolección de datos

Se utilizó el registro de voladuras, mediante el cual se recopiló información relacionada con el número de disparos ejecutados, disparos no ejecutados y tiempos de chispeo, evaluando la confiabilidad del sistema de iniciación.

Se realizó la observación directa en campo, como instrumento complementario, se permitió verificar las condiciones reales de operación y validar la información recolectada durante la ejecución de las voladuras.

3.4.4 Tratamiento de los datos

Por motivos de confidencialidad y seguridad operacional de la unidad minera, los horarios de iniciación presentados en tablas y figuras fueron anonimizados antes de su incorporación a la presente investigación. Esta adecuación se realizó únicamente sobre la referencia horaria absoluta, manteniendo inalterables los intervalos de tiempo, las diferencias registradas y los resultados obtenidos durante el análisis.

3.5 Plan de análisis de los datos

El análisis de los datos se realizará mediante herramientas de estadística descriptiva, comparativa e inferencial, con el propósito de evaluar el efecto de la implementación del sistema de iniciación centralizado en las variables de estudio relacionadas con el tiempo de chispeo, la exposición del personal y la confiabilidad del proceso de disparo.

Etapas del análisis

a) Organización y tabulación de datos

Se realizará la organización y clasificación de los datos obtenidos antes y después de la implementación del sistema de iniciación centralizado, utilizando hojas de cálculo en Microsoft Excel y análisis del avance en Power BI.

La información será clasificada según:

- Tipo de sistema de iniciación empleado (convencional y centralizado).
- Tiempo de chispeo.
- Número de personas expuestas durante el proceso de disparo.
- Numero de voladuras exitosas.

b) Análisis descriptivo

Se aplicará estadística descriptiva mediante el cálculo de promedios, frecuencias y porcentajes para las variables de estudio, tales como:

- Tiempo promedio de chispeo.
- Número promedio de personas expuestas.
- Numero de voladuras exitosas.

Los resultados serán presentados mediante tablas y gráficos para facilitar la interpretación de la información obtenida.

c) Análisis comparativo

Se realizará una comparación entre los resultados obtenidos antes y después de la implementación del sistema de iniciación centralizado, con la finalidad de identificar variaciones relacionadas con:

- La reducción del tiempo de chispeo.
- La disminución de la exposición del personal.
- La mejora en la confiabilidad del disparo.

d) Interpretación de resultados

Los resultados obtenidos serán interpretados considerando aspectos relacionados con la adaptabilidad operativa del sistema, el comportamiento del tiempo de chispeo, la exposición del personal durante el proceso de iniciación y las oportunidades de mejora del sistema centralizado en su interacción con otras etapas del ciclo minero.

El procesamiento y organización de los datos se realizará mediante Microsoft Excel para la tabulación, elaboración de tablas y representación gráfica de los resultados.

3.6 Fases del proyecto

Previo a la implementación del sistema de iniciación centralizado, se desarrollaron diversas fases orientadas a evaluar las condiciones de la unidad minera. Estas fases permitieron garantizar la viabilidad técnica y operativa del sistema antes de su incorporación a la operación minera.

Figura 16

Fases del proyecto



Las fases del proyecto comprendieron la evaluación de las condiciones operativas y de los recursos de la unidad minera, la identificación de la infraestructura y requerimientos técnicos necesarios para la implementación del sistema, el establecimiento de la

comunicación bidireccional entre interior mina y superficie para garantizar la transmisión segura y confiable de datos, la ejecución de pruebas en vacío operativas para validar el funcionamiento del sistema y, finalmente, la implementación progresiva del sistema de iniciación centralizado hasta su integración en la operación minera.

Las fases mencionadas son de suma importancia previo a una licitación en una unidad minera, ya que permiten evaluar de manera integral las condiciones operativas, validar el funcionamiento del sistema propuesto y asegurar la cobertura de comunicación y control sea la adecuada para las labores consideradas.

De igual manera, el desarrollo de estas fases permite anticipar posibles limitaciones en infraestructura o comunicación, contribuyendo a una adecuada planificación del proyecto. Esto resulta fundamental para optimizar recursos, reducir riesgos durante la implementación y asegurar la continuidad operativa del sistema desde sus etapas iniciales.

3.7 Implementación del sistema

3.7.1 Actividades previas

Previo a la implementación del sistema de iniciación centralizado, se desarrollaron diversas actividades preparatorias destinadas a asegurar las condiciones técnicas, operativas y logísticas necesarias para su adecuada puesta en funcionamiento dentro de la operación minera.

Como primera etapa, se efectuó la movilización del personal especializado, así como de los equipos, herramientas y materiales requeridos para la ejecución de las actividades vinculadas al proyecto. De manera complementaria, se realizaron coordinaciones con las áreas involucradas para definir los accesos autorizados, las zonas de intervención, la programación de trabajos y los lineamientos operativos aplicables durante la implementación.

Se llevo a cabo la revisión y validación de los equipos, materiales y componentes del sistema, verificando el cumplimiento de los requisitos técnicos, operacionales y normativos establecidos para su aplicación. Se realizó la evaluación y el mapeo de la infraestructura de comunicaciones existentes en interior mina, con el objetivo de identificar las condiciones de conectividad y determinar la factibilidad de integración del sistema dentro del entorno operativo.

Como parte del proceso de implementación, se efectúa la instalación de la infraestructura requerida para la operación centralizada, incluyendo la configuración y acondicionamiento de los componentes involucrados en el sistema. De igual manera, se ejecutaron pruebas de comunicación y operatividad entre los distintos equipos, con la finalidad de validar la estabilidad de la transmisión de datos, la continuidad de las comunicaciones y el correcto funcionamiento del sistema.

Por último, se elaboraron y coordinaron los protocolos asociados a la ejecución del servicio, estableciendo criterios técnicos, procedimientos operativos y responsabilidades para garantizar una implementación segura, controlada y alineada con los estándares internos de la operación.

3.7.2 Esquema funcional

Para la implementación del sistema fue necesario la adquisición e incorporación de diversos materiales, equipos y componentes de infraestructura, con la finalidad de establecer la conectividad requerida entre las distintas labores de la unidad minera y garantizar la operatividad del sistema dentro del entorno subterráneo. Estos elementos permitieron conformar la red de comunicación,

alimentación e integración necesaria para el intercambio de información entre los componentes instalados en superficie e interior mina, asegurando la continuidad operacional y el correcto funcionamiento del sistema de disparo centralizado.

Tabla 3

Materiales de implementación

SBC (surface Blast Control)	1
Blast Control Unit (BCU) Fijo	4
Radio Modem y Router RipEX2	7
Antena Ripex DummyLoad	1
Antena omnidireccional 132-174 Mhz	5
Antena omnidireccional VHF, G.:2dbi	5
Atenuador 30 dbm + accesorios	1
Cable de Red de 2m	5
Terminador	15
BCU portatil	1
Equipo de voladura electronica intellishot (Tagger CE4)	5
Blast Card (Red)	1
Blast Card (Yellow)	4
Blast card (Orange)	1
Blast Card (Encrytation Cards)	1
BW II Contactless Reader NFC	1
Fuente de alimentacion Dell Inc. AC/DC 240 W para Ripex	7

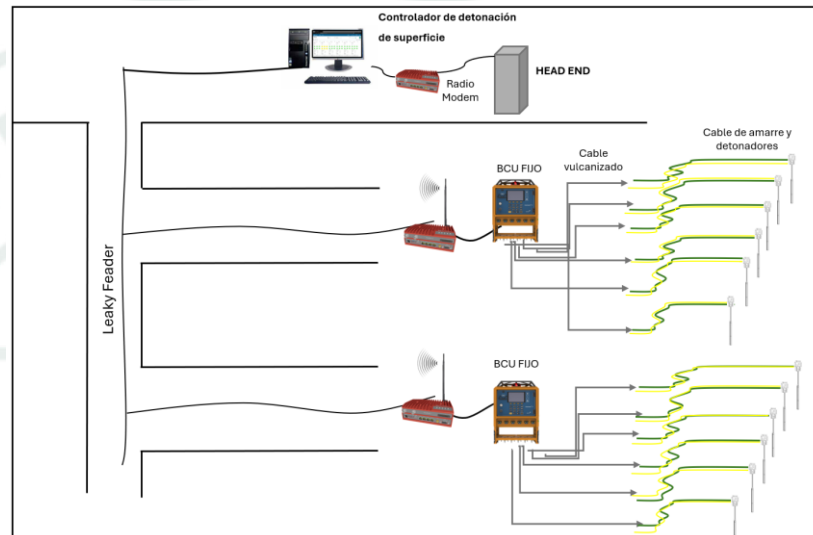
A partir de la integración de estos componentes, se estructuro el esquema funcional del sistema, influyendo en la conexión de las labores involucradas, la interacción entre los equipos instalados y la ejecución segura y controlada del proceso de disparo centralizado.

Las funciones de control, monitoreo y ejecución se concentran en una única unidad de operación. Este enfoque permite establecer una arquitectura

organizada y jerárquica, facilitando la coordinación de múltiples puntos de iniciación bajo parámetros previamente definidos.

Figura 17

Esquema del sistema



Nota: Esquema funcional del sistema de iniciación centralizado.

La figura 16 presenta el esquema funcional del sistema, este enfoque responde a la necesidad de maximizar la seguridad operativa y garantizar una sincronización precisa en sistemas de voladura de mediana y gran escala.

En la parte superior del esquema se identifica el controlador de detonación en superficie (head-end), el cual constituye la unidad maestra del sistema. Desde este punto se configuran los parámetros de disparo, se valida la continuidad del circuito y se emiten las órdenes de iniciación. La transmisión de dichas órdenes se realiza mediante radio módem, integrándose con el sistema de comunicación tipo leaky feeder, el cual permite la propagación de señales electromagnéticas en entornos subterráneos, donde las condiciones geométricas limitan el uso de comunicaciones convencionales.

A nivel de campo, las señales son recibidas por unidades de control de voladura fijas (BCU), que operan como nodos secundarios dentro de la arquitectura del sistema. Estas unidades cumplen funciones críticas, tales como la recepción, decodificación y distribución de la señal de disparo, además de permitir la verificación local de integridad de las líneas conectadas. La disposición de múltiples BCU en paralelo evidencia una estrategia de segmentación del sistema, lo cual incrementa la redundancia operativa y reduce la probabilidad de falla global ante interrupciones puntuales.

Tabla 4

Capacidades de la unidad de control de voladura

Nº Canales	6
Detonadores/canal	400
Nº de detonadores por BCU	2400
Max. Longitud de cable	2000 m

Desde cada BCU se extienden circuitos de iniciación a través de cables vulcanizados, los cuales alimentan los ramales donde se encuentran conectados los detonadores mediante cables de amarre. Esta configuración permite estructurar la voladura en múltiples frentes o secciones, manteniendo un control centralizado pero con distribución descentralizada de la energía de iniciación.

Desde un punto de vista funcional, la arquitectura presentada corresponde a un sistema jerárquico, en el que un nodo principal gobierna múltiples nodos subordinados, optimizando tanto la gestión de señales como la coordinación temporal de las detonaciones. Este diseño no solo facilita la programación de secuencias complejas de disparo, sino que también mejora la trazabilidad y el

diagnóstico del sistema mediante la retroalimentación de estado desde las BCU hacia el controlador central.

Figura 18

Amarre de iniciación en frentes



Nota: Reemplazo del carmex por un detonador electrónico

En el presente sistema de iniciación, el amarre en frentes se realiza reemplazando el uso del carmex por un detonador electrónico, el cual actúa como elemento iniciador principal de la malla de voladura. Este detonador se conecta al cordón detonante y transmite la señal de iniciación de manera precisa hacia los detonadores encebados en el resto de la carga. De esta forma, se logra un mejor control de la secuencia de disparo, reduciendo la variabilidad en los tiempos de retardo y minimizando los riesgos asociados al chispeo manual.

3.7.3 *Distribución de las unidades de control de voladura*

La distribución de las unidades de control de voladura (BCU) dentro de la operación minera constituye un aspecto fundamental para garantizar la

cobertura, continuidad y confiabilidad del sistema de iniciación centralizada. La ubicación estratégica de estos equipos permite optimizar la comunicación con los detonadores electrónicos, así como asegurar la correcta recepción de la señal de disparo desde la unidad de control en superficie.

En el presente estudio, se ha implementado un total de 4 unidades de control de voladura, las cuales han sido distribuidas en dos zonas operativas de la mina, denominadas zona X y zona Y. Esta configuración responde a criterios operativos y de cobertura, considerando la extensión de las labores, la ubicación de los frentes de voladura y la necesidad de mantener una comunicación estable dentro de cada sector.

Figura 19

Implementación del BCU



Nota: La imagen muestra la respectiva implementación del BCU y su configuración con la radio ripex.

Cada zona cuenta con 2 unidades BCU, las cuales han sido posicionadas de manera estratégica para abarcar las labores activas y facilitar la conexión con los sistemas de iniciación. Esta distribución permite reducir distancias de conexión, mejorar la calidad de la señal y asegurar la redundancia operativa dentro de cada zona, de modo que, ante la eventual falla de una unidad, otra pueda mantener la continuidad del sistema.

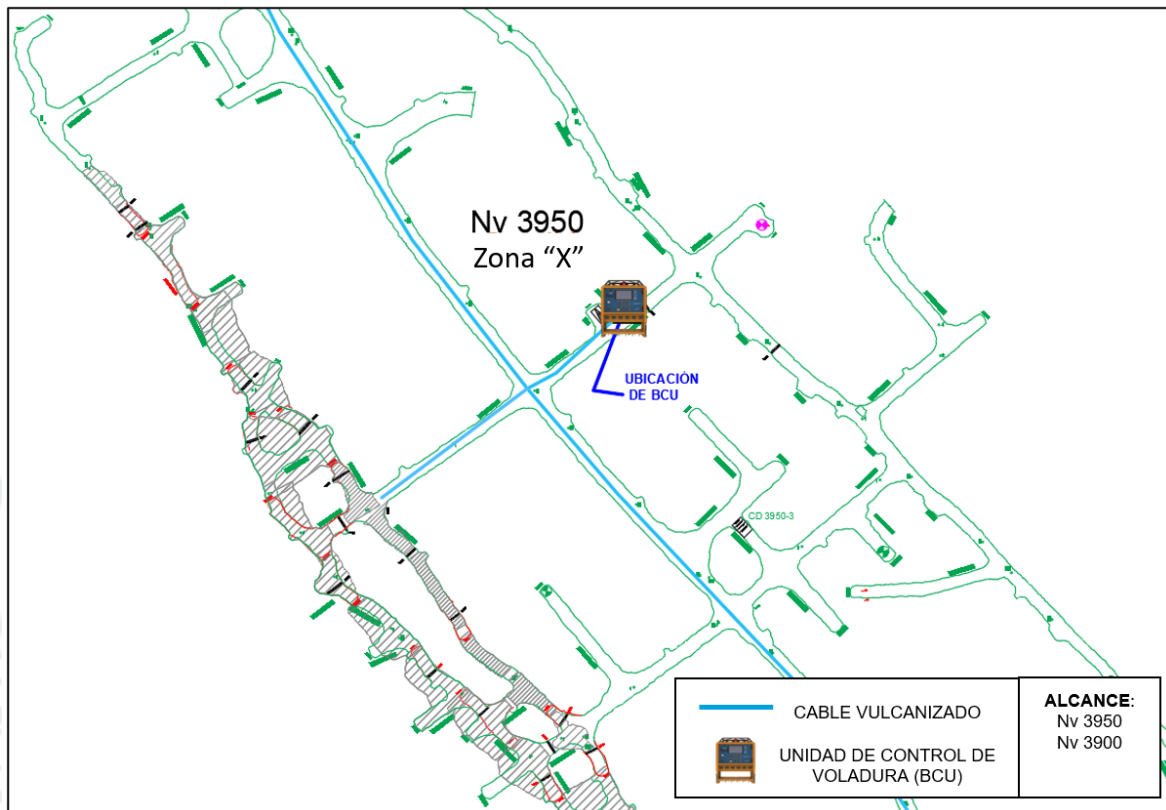
Adicionalmente se ha planteado la incorporación de 6 BCU adicionales a los que ya se tienen a medida de dar cobertura a las 10 zonas que comprenden la unidad según el plan de minado 2026.

3.7.3.1 Zona X

La zona X constituye uno de los sectores operativos considerados dentro de la implementación del sistema de voladura centralizada. En esta zona se han dispuesto 2 unidades de control de voladura (BCU), ubicadas en los niveles 3950 y 4131, las cuales actúan como puntos estratégicos para la recepción de la señal de disparo y su posterior transmisión hacia los detonadores electrónicos instalados en interior mina.

Figura 20

Ubicación del BCU en el Nv 3950

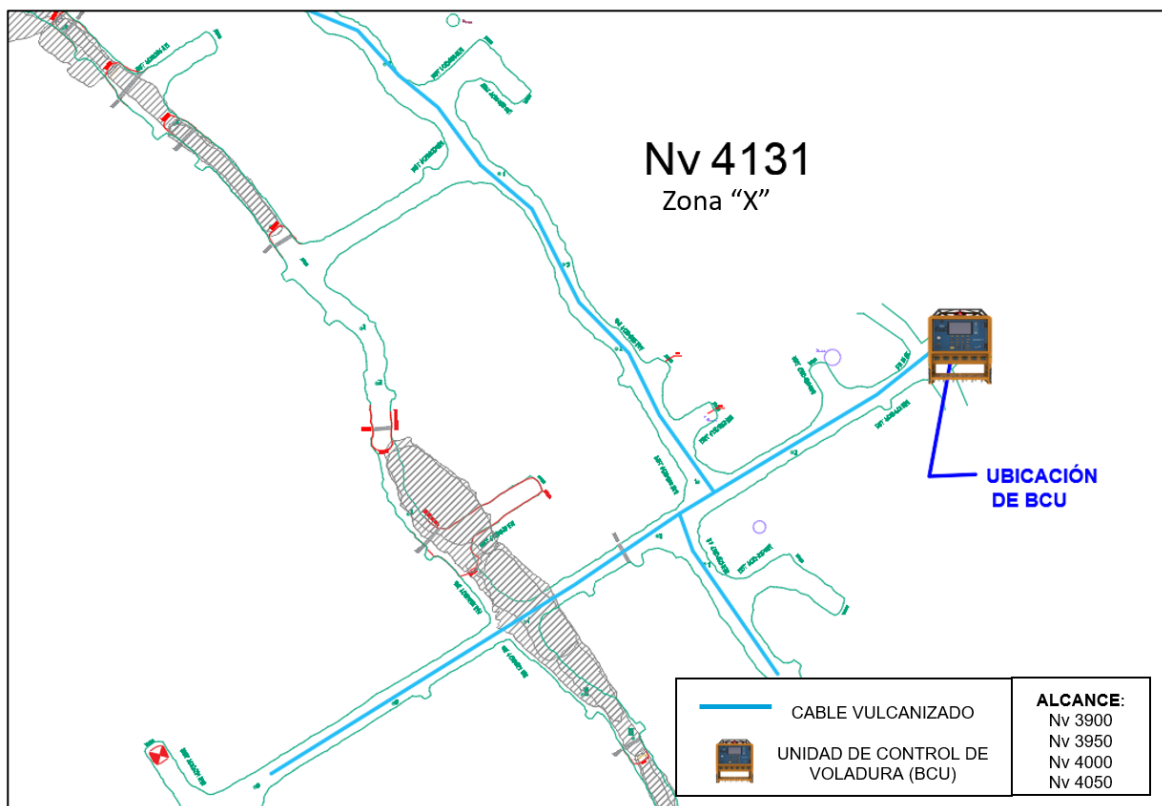


Nota: Alcance a 2 niveles desde el BCU principal.

El primer BCU se encuentra ubicada en el nivel 3950, desde donde se establece la conexión con las labores desarrolladas en los niveles 3950 y 3900. Esta configuración permite integrar distintos frentes de trabajo dentro de un mismo sistema de iniciación, destacando el tajo 1450 VIVI, ubicado en el nivel 3900, en el cual se han realizado detonaciones mediante el sistema de voladura centralizada. La ubicación de esta unidad responde a criterios de cobertura y accesibilidad, facilitando la comunicación entre los equipos de campo y el sistema de control en superficie.

Figura 21

Ubicación del BCU en el Nv 4131



Nota: Alcance a más de 4 niveles desde el BCU principal.

Por otro lado, el segundo BCU ha sido instalado en el nivel 4131, lo que permitió ampliar la cobertura del sistema hacia niveles superiores e inferiores, estableciendo conexión con los niveles 3900 al 4050. En este último nivel se concentran diversas labores operativas, entre las cuales se incluyen sectores como BP, CX, DS, EST, GA, SN y TJ, donde se desarrollan diferentes frentes de trabajo distribuidos en orientaciones NW, NE, SE y SW. De la misma forma, en el nivel 4185 se identifican cerca de 16 labores, así como accesos asociados a los tajos 2100 CSGE, 2100 MALU y 2100 P08.

La implementación de ambas unidades de control dentro de la zona X permite una mayor cobertura del sistema de voladura centralizada, facilitando la

integración de múltiples niveles y frentes de trabajo bajo una misma infraestructura de comunicación. Esta configuración contribuye a mejorar la continuidad operativa, optimizar los tiempos de ejecución de las voladuras y reducir la exposición del personal en interior mina, garantizando un proceso de disparo más seguro y eficiente.

3.7.3.2 Zona Y

La zona Y constituye el segundo sector operativo considerado dentro de la implementación del sistema de voladura centralizada. En esta zona se han dispuesto 2 unidades de control de voladura (BCU), ubicadas en los niveles 4230 y 4350, las cuales permiten ampliar la cobertura del sistema hacia distintos niveles y frentes de trabajo, asegurando la continuidad de la comunicación y la correcta ejecución de los disparos.

Figura 22

Ubicación del BCU en el Nv 4230

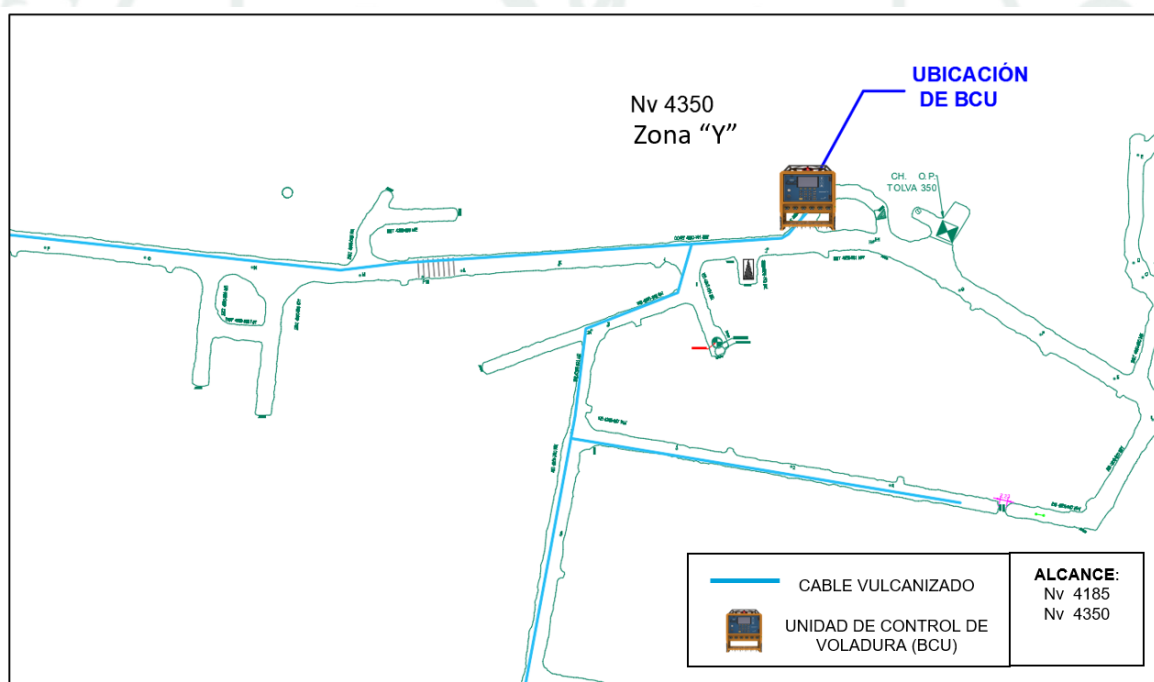


Nota: Alcance a 4 niveles desde el BCU principal.

La primera BCU se encuentra instalada en el nivel 4230, desde donde se establece la conexión con un conjunto de niveles adyacentes, comprendiendo los niveles 4245, 4230, 4215 y 4180. Esta unidad permite integrar aproximadamente 17 labores operativas distribuidas en distintos sectores, entre las cuales destacan DS, EST, RF, SN, así como un tajo en producción. La ubicación estratégica de esta BCU permite cubrir una amplia extensión de la zona, facilitando la interconexión entre los diferentes frentes de trabajo y el sistema de control en superficie.

Figura 23

Ubicación del BCU en el Nv 4350



Nota: Alcance a 2 niveles desde el BCU principal.

Por otro lado, la segunda BCU ha sido implementada en el nivel 4350, la cual brinda cobertura a labores del mismo nivel, donde se identifican 3 frentes de trabajo activos. Esta unidad complementa la cobertura de la zona Y, lo que

permitirá segmentar la operación y asegurar una mejor gestión de la comunicación y del sistema de iniciación en niveles superiores.

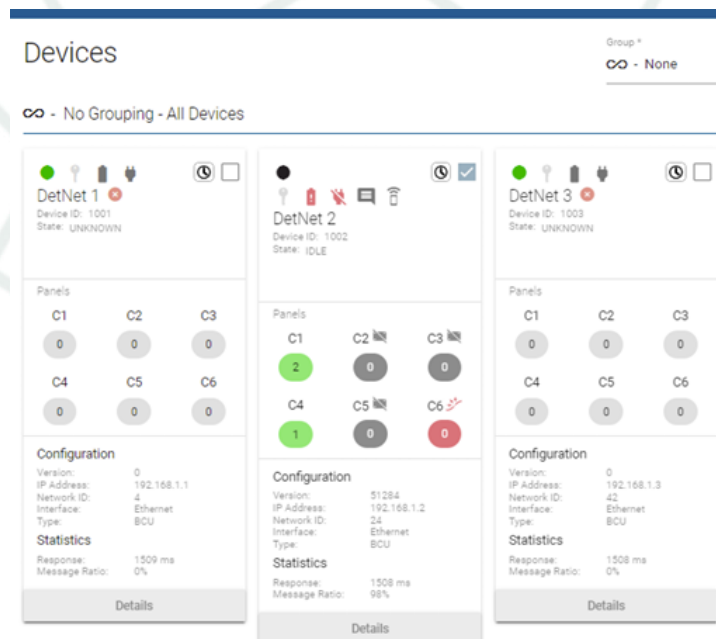
3.7.4 Control desde el SBC

La ejecución del proceso de detonación desde superficie mediante la unidad de disparo de superficie (SBC), la cual actúa como elemento principal de control, monitoreo y gestión de las voladuras conectadas al sistema.

A través del software asociado al SBC, el operador puede visualizar en tiempo real todos los frentes, labores o áreas de voladura conectadas a la red de iniciación centralizada, realizando un seguimiento continuo del estado operativo de cada punto vinculado al sistema. Esta interfaz facilita la identificación inmediata de frentes con condiciones normales de comunicación, así como la detección temprana de anomalías, interrupciones o eventos asociados a la conectividad del sistema.

Figura 24

Visualización de canales por BCU

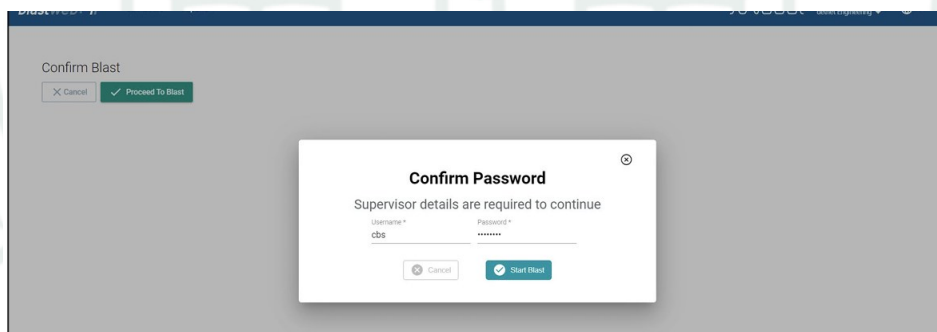


Nota: Dashboard estado de BCU

La plataforma emplea una representación gráfica basada en códigos de color para mostrar el estado de los diferentes canales asociados a cada BCU, Cada color corresponde a un canal específico y refleja su condición operativa dentro del sistema de comunicación del canal se encuentra en condiciones adecuadas y operativas; el color rojo evidencia la presencia de fallas o problemas de comunicación; mientras que el color amarillo permite identificar problemas posibles fugas, anomalías o condiciones que requieren verificación y evaluación técnica antes de proceder con la detonación. Esta metodología visual permite al operador interpretar rápidamente el estado general del sistema y tomar acciones correctivas oportunas.

Figura 25

Validación de credenciales para detonación



Nota: Confirmación de contraseña

El proceso de detonación desde superficie incorpora múltiples mecanismos de seguridad orientados a restringir el acceso y garantizar la integridad operacional del sistema. El acceso al software se encuentra limitado únicamente a personal capacitado, entrenado y autorizado, siendo indispensable

el uso de credenciales de acceso previamente configuradas mediante usuarios creados dentro de la plataforma.

Figura 26

Reporte de voladura

Blast Report					
BCU:	04				
Location:	NV 4350				
Date:	2025-10-26 06:46:43				
Operator:	ANTONIO RIVERA				
Supervisor:	JUAN REYES				
Notes:					
Date	Panels	Location	Detonators Before	Detonators After	State
2025-10-26 06:46:43	2	CANAL 2	6	0	Blasted with no errors

Nota: Visualización de reporte

Así mismo, el procedimiento de disparo contempla diversos niveles de validación y filtros de seguridad antes de autorizar la ejecución de una voladura desde superficie, reduciendo la probabilidad de accesos no autorizados, errores operativos o ejecuciones involuntarias del sistema.

Posterior a la ejecución de la voladura, el software genera automáticamente reportes post voladura, los cuales se encuentran disponibles aproximadamente cinco minutos después del disparo. Estos reportes constituyen una herramienta de trazabilidad y seguimiento operacional, ya que permiten registrar información relacionada con el consumo de detonadores, los frentes efectivamente disparados, el historial de eventos presentados durante la ejecución, así como la fecha y hora exacta asociadas a cada proceso realizado.

Figura 27

Reportes de eventos y detonadores

Events Report				detnet 	
Date	Device	Category	Description		
2020-08-04 11:14:03	401	1	BCU TimeSync delta_T=Server-Device 1 seconds		
2020-08-04 11:14:03	411	1	BCU TimeSync delta_T=Server-Device 0 seconds		
2020-08-04 11:14:03	407	1	BCU TimeSync delta_T=Server-Device 0 seconds		
2020-08-04 11:14:03	405	1	BCU TimeSync delta_T=Server-Device 0 seconds		
2020-08-04 11:14:03	409	1	BCU TimeSync delta_T=Server-Device 0 seconds		
2020-08-04 11:01:35	403	4	IO 5 Internal error detected on det(s)- Misfire expected E:0x00000008		
2020-08-04 11:01:34	403	4	IO 4 Internal error detected on det(s)- Misfire expected E:0x00000008		
2020-08-04 11:01:34	403	4	IO 3 Internal error detected on det(s)- Misfire expected E:0x00000008		
2020-08-04 11:01:34	403	4	IO 2 Internal error detected on det(s)- Misfire expected E:0x00000008		
2020-08-04 11:01:34	403	4	IO 1 Internal error detected on det(s)- Misfire expected E:0x00000008		
2020-08-04 11:01:33	403	4	IO 6 Internal error detected on det(s)- Misfire expected E:0x00000008		
2020-08-04 11:01:15	403	1	BCU TimeSync delta_T=Server-Device 0 seconds		
2020-08-04 11:01:14	403	144	device reply intercepted on - msgId 7877 Ticks 481997656		
2020-08-04 11:00:25	403	18	server lost connection with this device command - ShortStatus msgId 7876		
2020-08-04 11:00:15	403	64	Device bootloading started		
2020-08-04 10:59:02	411	1	BCU TimeSync delta_T=Server-Device 1 seconds		

Detonator Report		detnet 	
BCU: 600			
Date: 2020-07-07 17:26:05			
Panels: 1			
Location: XCUT1			
Detonator ID	Time		
405e	7800		
4052	4000		
4044	500		
405f	7250		
4053	4250		
4047	1250		
4043	250		
405a	6000		
4054	4500		
4048	1500		
4059	5750		
4049	1750		
4058	5500		

Nota: Reportes emitidos

La disponibilidad automática de esta información favorece el control operativo, la gestión de inventarios, la trazabilidad de las detonaciones ejecutadas y el análisis de eventos asociados al desempeño del sistema de iniciación centralizada.

3.7.5 Planes de Contingencia

3.7.5.1 Cortes de energía

En caso de presentarse un corte de energía programado o no programado que imposibilite la alimentación eléctrica del punto remoto asociado a la unidad de control de voladura, se dispone de un plan de contingencia que garantiza la continuidad operativa del sistema de iniciación centralizada.

Cada unidad de control de voladura se encuentra equipada con un sistema interno compuesto por baterías, las cuales proporcionan una autonomía aproximada de hasta 24 horas. Esta configuración permite mantener la

operatividad del equipo y ejecutar detonaciones dentro de dicho periodo sin requerir suministro eléctrico externo.

Durante este escenario, la iniciación centralizada puede continuar ejecutándose mediante un procedimiento de contingencia basado en el uso de tarjetas temporizadas desde los BCU afectados. Estas tarjetas poseen una ingeniería diseñada para programar el disparo en tiempos de cautela variables, permitiendo parametrizar los tiempos de espera correspondientes antes de la ejecución del disparo.

3.7.5.2 *Cortes o seccionamiento de cables*

En caso de presentarse un corte, daño o seccionamiento en la infraestructura de comunicación del sistema, ya sea en cable vulcanizado o cable jumper, se dispone de mecanismos de diagnóstico y contingencia que permiten mantener la continuidad operativa de las voladuras identificando y localizando la zona afectada dentro de la red de comunicación, facilitando la detección del tipo de falla y del segmento comprometido. Esta funcionalidad posibilita realizar una reparación in situ, realizando una corrección inmediata del elemento dañado y reduciendo los tiempos de indisponibilidad del sistema.

En situaciones donde el daño imposibilite la comunicación entre la superficie y el BCU correspondiente, se cuenta con métodos alternativos de disparo que aseguran la continuidad de las operaciones de voladura, entre los cuales consideran:

Disparo local: Consiste en ejecutar la detonación directamente desde el BCU ubicado en interior mina, prescindiendo temporalmente de la comunicación con la unidad de disparo en superficie.

Disparo cronometrado: Consiste en la utilización de tarjetas temporizadas compatibles con el sistema, las cuales permiten programar el disparo en un tiempo de cautela previamente definido, garantizando la ejecución segura de la voladura aun ausencia de comunicación activa con superficie.

La aplicación de estas medidas de contingencia permite mantener la confiabilidad del sistema frente a fallas en la red de comunicación, reduciendo interrupciones operativas y asegurando la continuidad del proceso de iniciación



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Análisis e interpretación de resultados

4.1.1 *Adaptabilidad del personal involucrado*

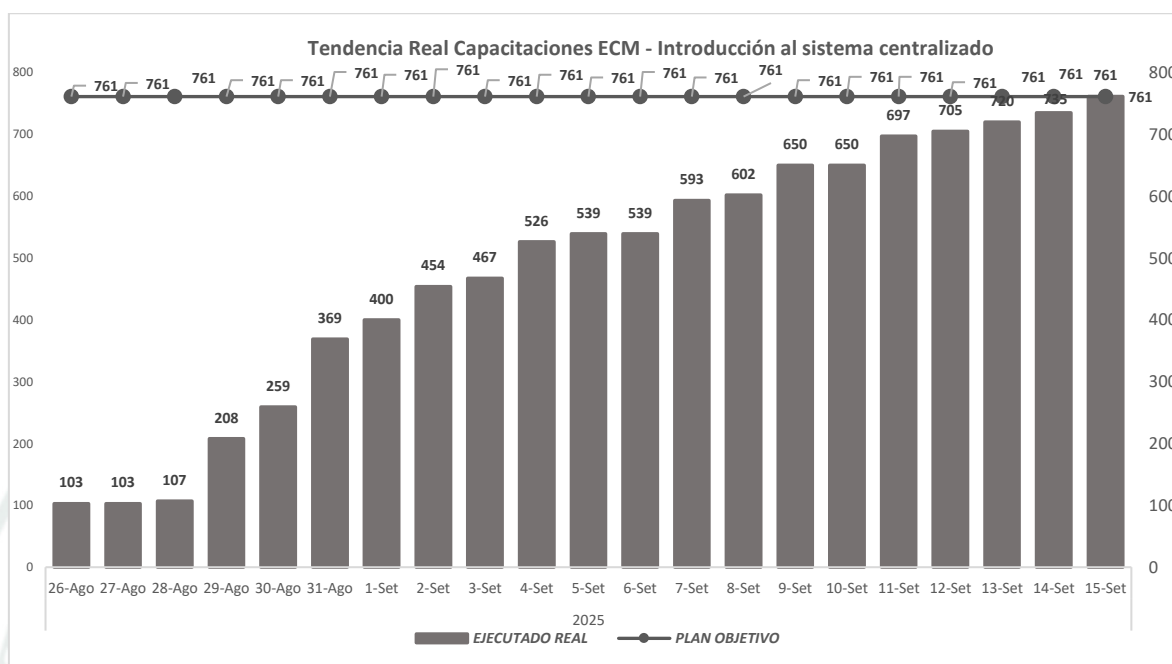
En el proceso de implementación del sistema de voladura centralizada, la adaptabilidad del personal constituye un factor importante para el éxito de la operación, debido a que la incorporación de nuevas tecnologías implica cambios en los procedimientos tradicionales de trabajo, así como en las responsabilidades del personal involucrado.

Es por ello, que se desarrolló un programa de capacitaciones dirigido al personal de la unidad minera y empresa contratista minera, con el objetivo de brindar los conocimientos necesarios sobre el funcionamiento, operación y medidas de seguridad asociadas al nuevo sistema, incluyendo a todo el personal operativo y administrativo. A fin de asegurar el uso correcto del sistema, equipos y las herramientas, minimizando los errores operativos del proceso de conexión e iniciación y previniendo incidentes en conexión y disparo centralizado.

Como resultado de estas actividades, se logró impactar al 100% del personal operativo, considerando un universo total de 761 trabajadores, lo cual evidencia una cobertura completa en el proceso de capacitación.

Figura 28

Gráfico de capacitaciones ECM



El gráfico presentado muestra la tendencia real de las capacitaciones realizadas en distintos días, evidenciando un incremento progresivo en la cantidad de personal capacitado hasta alcanzar la totalidad del grupo objetivo. Este resultado refleja una adecuada planificación y ejecución de las actividades de formación, permitiendo que el personal adquiriera los conocimientos necesarios de manera gradual y organizada.

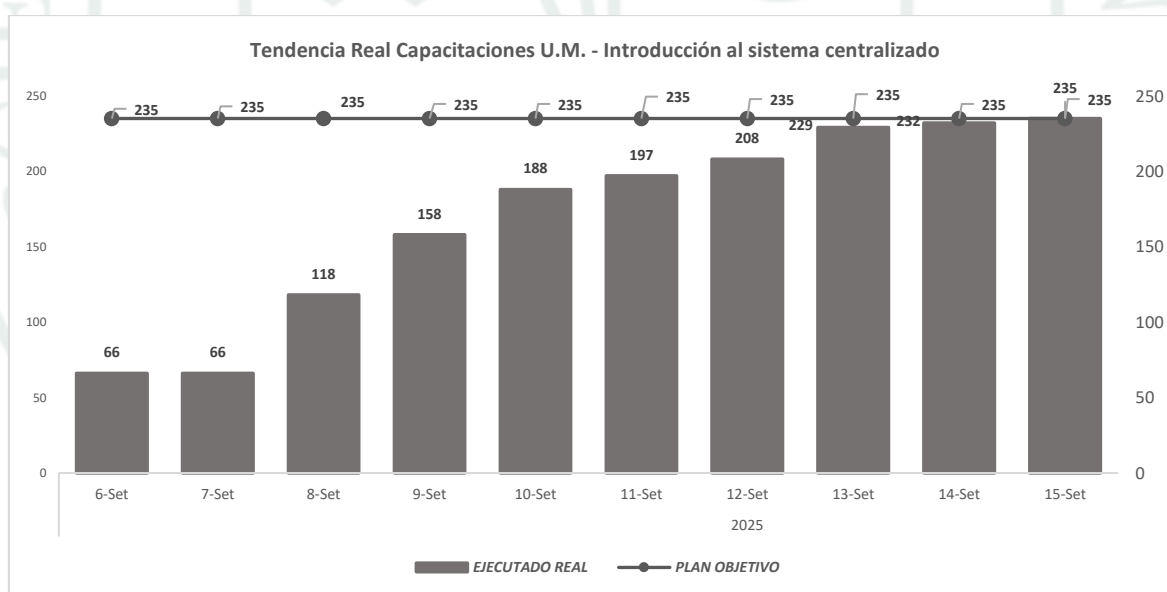
La importancia de este resultado radica en que la correcta comprensión del sistema de voladura centralizada por parte del personal reduce significativamente los riesgos asociados al factor humano, tales como errores operativos, uso inadecuado de los equipos o incumplimiento de los protocolos de seguridad. Asimismo, una adecuada capacitación facilita la adaptación del personal a los nuevos procedimientos, promoviendo una transición eficiente

desde los métodos convencionales hacia el uso de tecnologías de iniciación electrónica y remota.

En este sentido, la capacitación del personal no solo contribuye a la correcta implementación del sistema, sino que también fortalece la cultura de seguridad dentro de la operación minera, asegurando que todos los trabajadores comprendan su rol dentro del proceso de voladura y actúen conforme a los estándares establecidos. Por lo tanto, la adaptabilidad del personal, evidenciada a través del alcance total de las capacitaciones, representa un elemento clave para la sostenibilidad y éxito del sistema de voladura centralizada en la operación.

Figura 29

Gráfico de capacitaciones U.M.



De manera complementaria, se presenta un segundo gráfico correspondiente al personal de la compañía minera, el cual considera un total de 235 trabajadores pertenecientes al área de operaciones, incluyendo jefes de guardia. La inclusión de este grupo resulta fundamental, ya que son los

responsables directos de la supervisión, control y toma de decisiones durante el proceso de voladura. La capacitación de este personal permite asegurar una correcta gestión del sistema de voladura centralizada, así como una adecuada coordinación con el personal contratista.

Figura 30

Capacitaciones realizadas



Nota: Introducción al sistema de iniciación centralizado

Una adecuada capacitación facilita la adaptación del personal a los nuevos procedimientos, promoviendo una transición eficiente desde los métodos convencionales hacia el uso de tecnologías de iniciación centralizada.

Lo cual fortalece una cultura organizacional orientada a la innovación, mejora continua y adaptación a los cambios tecnológicos dentro de los procesos de la unidad minera.

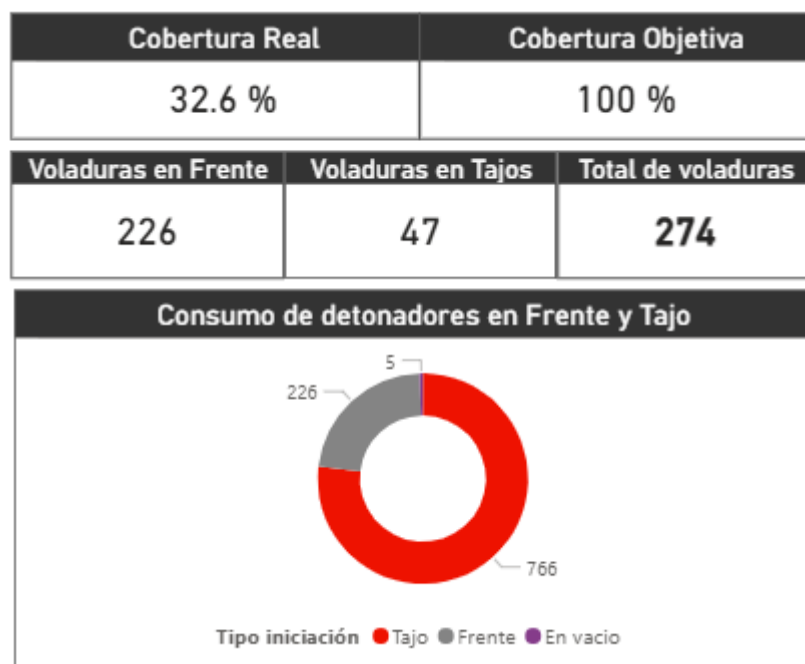
4.1.2 Presentación de los datos recolectados

En la presente investigación se recopilaron datos correspondientes a la ejecución de voladuras en frentes y tajos durante el periodo de evaluación del sistema de voladura centralizada. Los resultados obtenidos se resumen en la

Figura 26, donde se presenta la cobertura alcanzada, la cantidad de voladuras ejecutadas y el consumo de detonadores según el tipo de labor.

Figura 31

Cobertura del sistema



Nota: Elaboración Propia

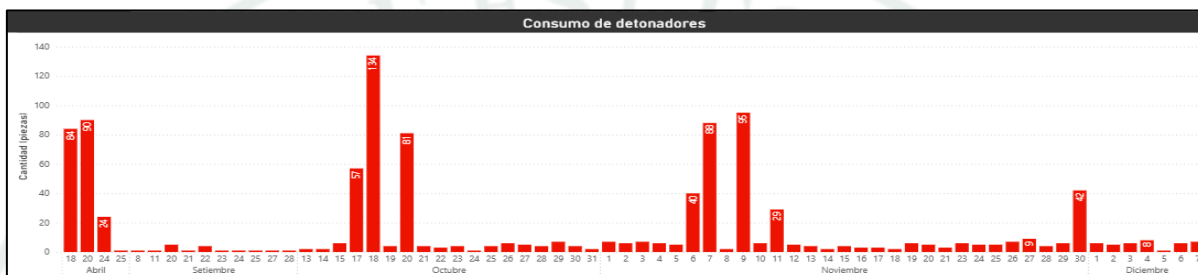
En primer lugar, se observa que la cobertura real alcanzada corresponde al 32.59%, en comparación con una cobertura objetivo del 100%. Este resultado indica que el sistema de voladura centralizada aún se encuentra en una etapa de implementación progresiva dentro de la operación, lo cual es consistente con procesos de adopción tecnológica en minería subterránea, donde la integración total del sistema se realiza de manera gradual.

En cuanto a la ejecución de voladuras, se registra un total de 274 disparos, de los cuales 226 corresponden a voladuras en frentes y 47 a voladuras en tajos, mientras que 5 detonadores fueron utilizados para pruebas en vacío. Esta distribución evidencia que la mayor parte de las actividades de

voladura se concentran en labores de desarrollo (frentes), lo cual es característico en operaciones subterráneas donde el avance de labores tiene alta frecuencia operativa.

Figura 32

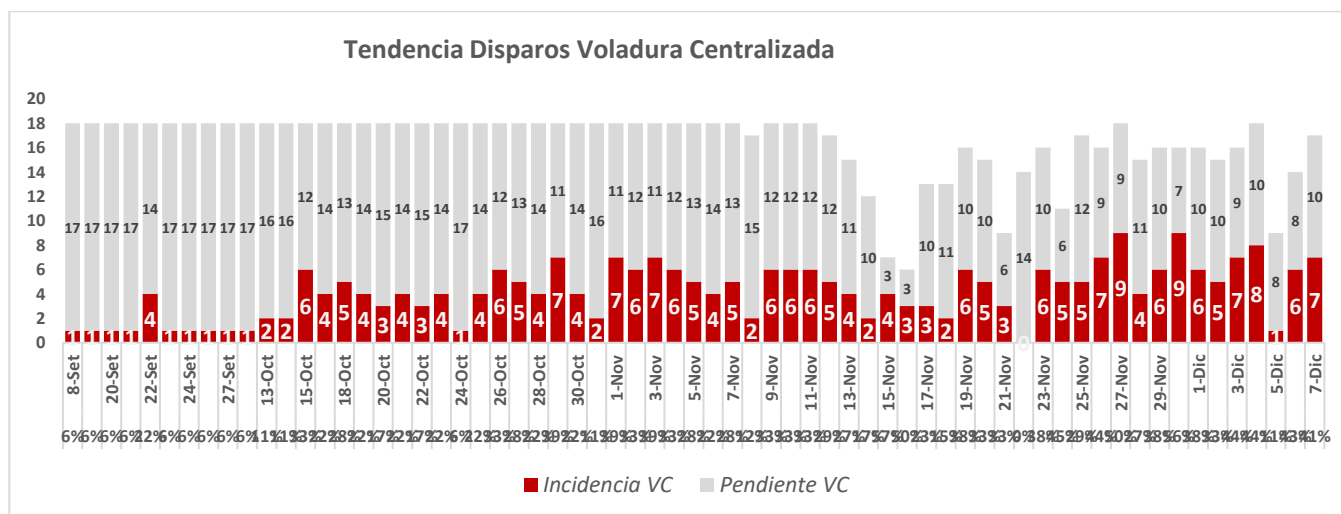
Consumo de detonadores en frentes y tajos



Respecto al consumo de detonadores, se observa una diferencia entre los utilizados en tajos y en frentes. En tajos se registra un consumo de 766 detonadores, mientras que en frentes el consumo alcanza los 226 detonadores. Este comportamiento refleja la naturaleza de cada tipo de labor, ya que los tajos, al estar asociados a producción, requieren una mayor cantidad de explosivos y, por ende, un mayor número de detonadores en comparación con los frentes de desarrollo. Las figuras 30 y 31 muestran que la realización de voladuras en tajo se realizan con detonadores 100% electrónicos, por lo que difiere de la utilización en frentes donde solo se utiliza 1 detonador electrónico para ejecutar la iniciación centralizada.

Figura 33

Tendencia de disparos en el sistema de iniciación centralizado



En la Figura 27 se presenta la relación entre las voladuras programadas y las voladuras ejecutadas mediante el sistema de iniciación centralizada (VC) durante el periodo de evaluación. El gráfico muestra la cantidad diaria de labores programadas (representadas en color gris) y aquellas que fueron efectivamente disparadas utilizando el sistema centralizado (representadas en color rojo).

A partir de los datos observados, se evidencia que existe una diferencia significativa entre el número de labores programadas y aquellas ejecutadas mediante iniciación centralizada. En la mayoría de los días evaluados, el total de labores programadas oscila entre aproximadamente 15 y 20, mientras que las labores disparadas con VC presentan valores considerablemente menores, variando generalmente entre 5 y 9.

Este comportamiento es consistente con el resultado de cobertura real previamente presentado (32.59%), lo cual indica que el sistema de voladura centralizada aún no ha sido implementado en la totalidad de las

labores programadas. La diferencia observada entre ambas variables responde a diversos factores operativos propios de la etapa de implementación, tales como limitaciones en la infraestructura de comunicación, disponibilidad de equipos, condiciones de accesibilidad en los frentes de trabajo, así como el proceso progresivo de adaptación del personal al nuevo sistema.

El gráfico permite identificar una tendencia relativamente constante en la ejecución de voladuras con VC, lo cual evidencia que, a pesar de no alcanzar aún la cobertura total, el sistema mantiene una aplicación continua y sostenida a lo largo del tiempo. Esto refleja una integración gradual del sistema dentro de la operación minera, permitiendo su validación en condiciones reales de trabajo.

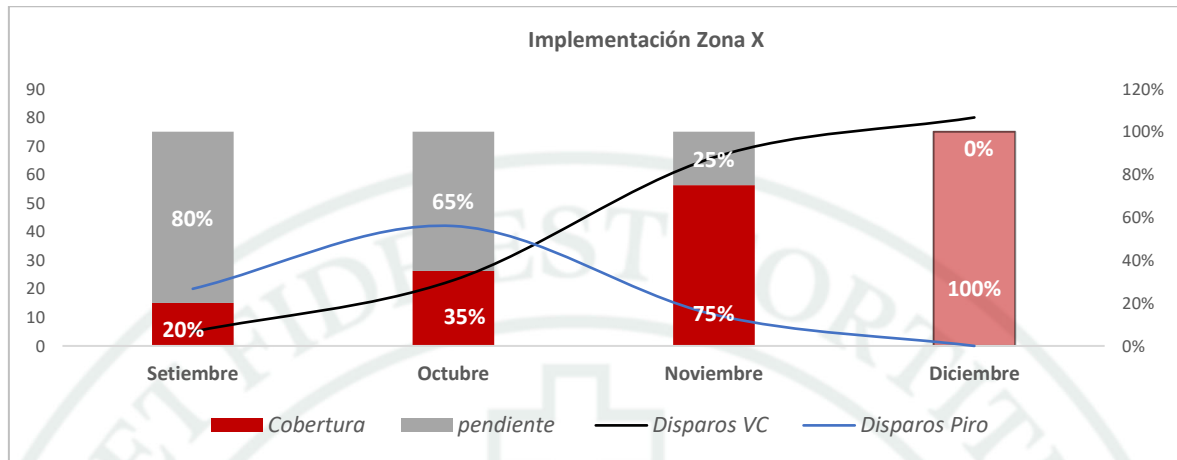
4.1.3 Análisis del avance de implementación

Se presenta la evolución de la implementación del sistema de iniciación centralizada en las zonas X y Y, así como el comportamiento general durante el periodo evaluado.

En la zona X se observa un incremento progresivo en la cobertura del sistema de iniciación centralizada, pasando de un 20% en septiembre a un 100% en diciembre. De manera paralela, el porcentaje de trabajos pendientes disminuye progresivamente hasta alcanzar el 0%, lo que evidencia una implementación completa del sistema en dicha zona.

Figura 34

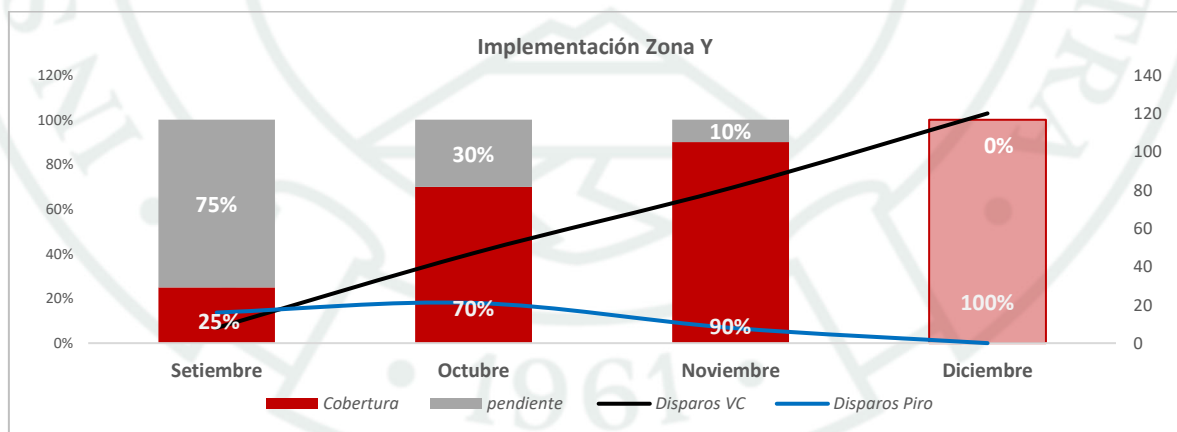
Implementación en la zona X



En la grafica, se aprecia un incremento en el número de disparos realizados mediante voladura centralizada (VC), mientras que los disparos con sistema pirotécnico (piro) disminuyen progresivamente, lo que indica una transición efectiva del sistema convencional hacia el sistema centralizado.

Figura 35

Implementación en la zona Y

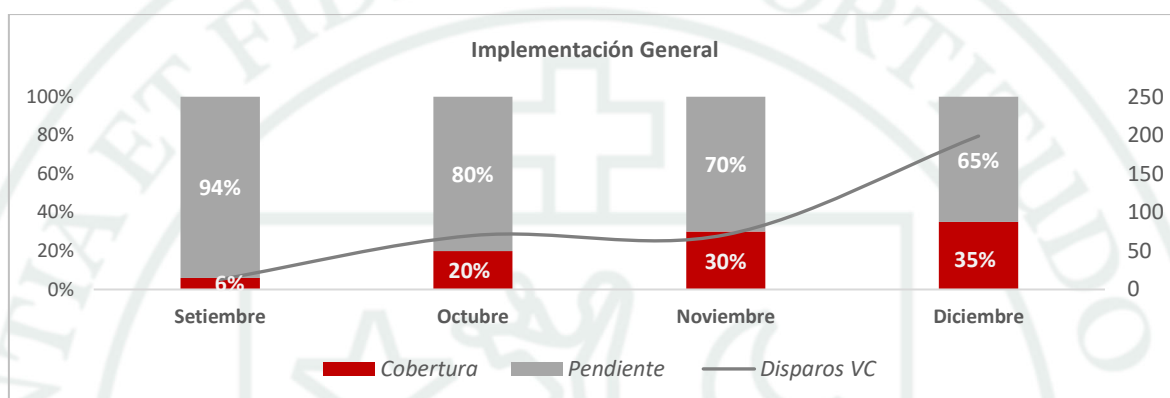


En la zona Y se evidencia un comportamiento similar, donde la cobertura del sistema se incrementa de 25% a 100% en el periodo analizado. La reducción de trabajos pendientes confirma la consolidación de la implementación.

Adicionalmente, se observa un aumento sostenido de los disparos realizados con voladura centralizada, acompañado de una disminución de los disparos pirotécnicos, lo que refuerza la transición hacia un sistema más seguro y controlado.

Figura 36

Implementación general



A nivel general, se evidencia un incremento progresivo en la cobertura del sistema de iniciación centralizada, pasando de aproximadamente 6% en septiembre a 35% en diciembre. Esto indica que, si bien la implementación es progresiva, aún se encuentra en fase de expansión.

El número de disparos con voladura centralizada presenta una tendencia creciente, lo que confirma la adopción del sistema en la operación. Paralelamente, el porcentaje de trabajos pendientes disminuye, lo cual evidencia una mejora en la planificación y ejecución del proceso.

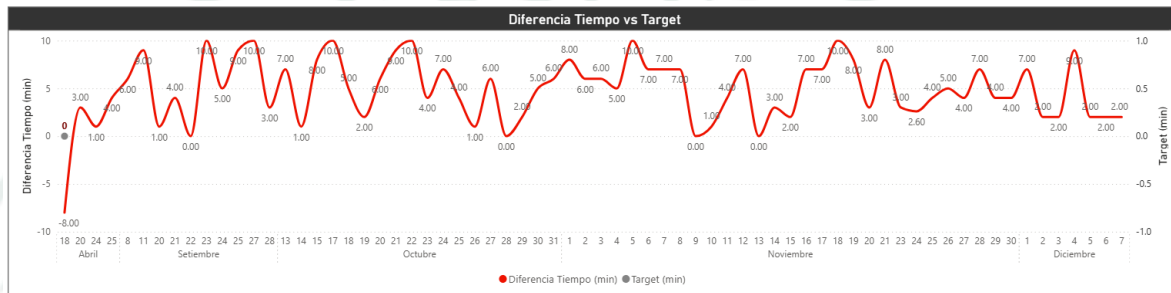
4.1.4 Análisis del tiempo de chispeo

Con el propósito de evaluar el tiempo requerido para la iniciación de las voladuras mediante el sistema de iniciación centralizado, se realizó el seguimiento de cada disparo ejecutado durante los primeros meses de

implementación. Los tiempos registrados permitieron identificar el comportamiento del proceso en condiciones reales de operación y determinar el tiempo promedio de iniciación alcanzado en esta etapa.

Figura 37

Diferencia de tiempo vs Target



Como se observa en la Figura 37, durante los primeros meses de implementación el tiempo de iniciación presento algunas variaciones, propias del proceso de adaptación del sistema y de la coordinación previa a cada disparo. Sin embargo, la mayor parte de los registros se concentro alrededor de los 5 minutos, obteniéndose este valor como el promedio de iniciación de las voladuras ejecutadas durante el periodo evaluado.

Si bien existen variaciones entre 0 y 10 minutos, estas corresponden a las condiciones propias de cada disparo, como la coordinación entre las áreas involucradas, las verificaciones previas del sistema, las autorizaciones para la iniciación y las condiciones de comunicación antes de ejecutar la voladura.

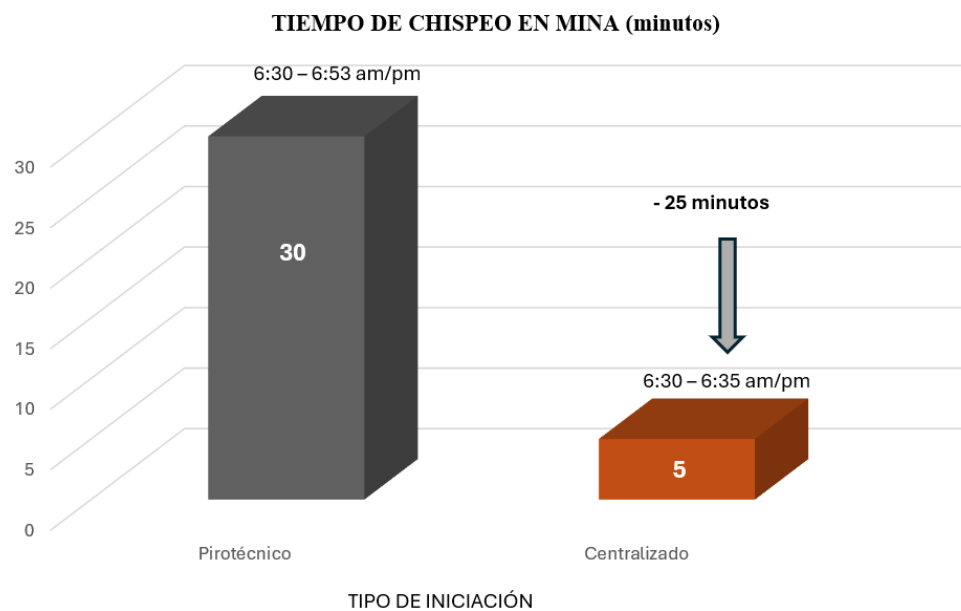
Asimismo, en los primeros registros se observa un valor cercano a -8 minutos, correspondiente a un caso puntual ocurrido durante la etapa inicial de prueba, cuando aun se realizaban ajustes en el procedimiento y en la operación del sistema.

Con la finalidad de evaluar el impacto de la implementación , se comparo el tiempo de chispeo registrado del sistema convencional pirotecnico con el sistema de iniciación centralizado. Esta comparación permitió determinar la diferencia en el tiempo requerido para ejecutar el disparo bajo ambos métodos.

Los resultados evidencian una diferencia significativa en los tiempos requeridos para la ejecución del disparo.

Figura 38

Tiempo de chispeo



De acuerdo con los datos obtenidos, el tiempo de chispeo utilizando el sistema pirotécnico es de aproximadamente 30 minutos, comprendido entre las 6:30 y 6:53 (am/pm). En contraste, el sistema de voladura centralizada presenta un tiempo de chispeo de aproximadamente 5 minutos, dentro del mismo rango horario, lo cual representa una reducción de 25 minutos en el proceso de disparo.

Esta disminución significativa del tiempo de chispeo se debe principalmente a la eliminación de actividades manuales propias del método convencional, tales como el encendido individual de los elementos de iniciación y la permanencia del personal en interior mina durante la ejecución del disparo. En el sistema centralizado, el proceso se realiza de manera remota desde superficie, lo que permite una activación más rápida, precisa y controlada.

Desde el punto de vista operativo, la reducción del tiempo de chispeo impacta directamente en la optimización del ciclo de minado, ya que permite liberar antes las labores para las siguientes actividades, tales como ventilación, limpieza y sostenimiento. De esa forma, contribuye a una mejor planificación de las operaciones, al reducir los tiempos improductivos asociados al proceso de voladura.

Desde el enfoque de seguridad, la reducción del tiempo de chispeo implica una reducción considerable en la exposición del personal a zonas de riesgo, especialmente durante la etapa crítica previa al disparo. Al minimizar la permanencia de trabajadores en interior mina durante este proceso, se disminuye la probabilidad de incidentes relacionados con la manipulación de sistemas de iniciación. En el sistema convencional, el proceso de chispeo requería la participación de aproximadamente 30 trabajadores durante un tiempo promedio de 30 minutos, lo que representaba un mayor tiempo de permanencia en labores cargadas con explosivos, exposición a caída de rocas durante el recorrido, interacción con equipos móviles en tránsito, presencia de gases residuales o condiciones geomecánicas variables que pueden afectar la estabilidad de las labores.

Es por ello, que los resultados evidencian que la implementación del sistema de voladura centralizada no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también fortalece las condiciones de seguridad en la operación minera. La reducción de 25 minutos en el tiempo de chispeo representa un indicador clave del impacto positivo del sistema, alineándose con los objetivos de optimización de procesos y reducción de la exposición del personal establecidos en la presente investigación.

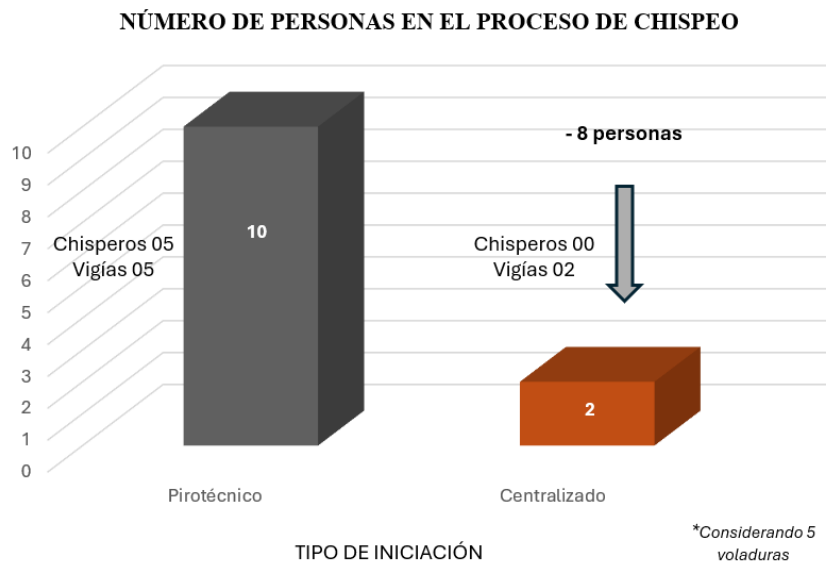
4.1.5 Análisis de la exposición del personal

La exposición del personal durante el proceso de chispeo constituye uno de los principales factores de riesgo en las operaciones de voladura subterránea, especialmente cuando se emplean sistemas de iniciación convencionales. En este sentido, se realizó un análisis comparativo considerando el número de personas involucradas en el proceso de chispeo bajo el método pirotécnico y el sistema de voladura centralizada.

De acuerdo con los datos presentados en la Figura 32, en el método pirotécnico se ha considerado un total de 5 voladuras que requiere la participación de un total de 10 personas durante el proceso de chispeo, distribuidas en 5 chispeadores y cuatro 5 vigías. Esta configuración implica una mayor presencia de personal en interior mina durante una etapa crítica del proceso de voladura, incrementando el nivel de exposición a riesgos operacionales.

Figura 39

Personas en el proceso de chispeo



En contraste, al emplear el sistema de voladura centralizada, el número de personas involucradas se reduce a 2, el proceso de iniciación se realiza mediante la coordinación vía radial entre el jefe de la empresa contratista y el jefe de guardia quienes brindan el aseguramiento total del personal a los operadores del Sistema de Control de Voladura (SBC), eliminándose completamente la necesidad de chispeadores en campo. Esto representa una reducción de 6 personas expuestas directamente al proceso de chispeo en un promedio de 5 voladuras establecidas como muestreo.

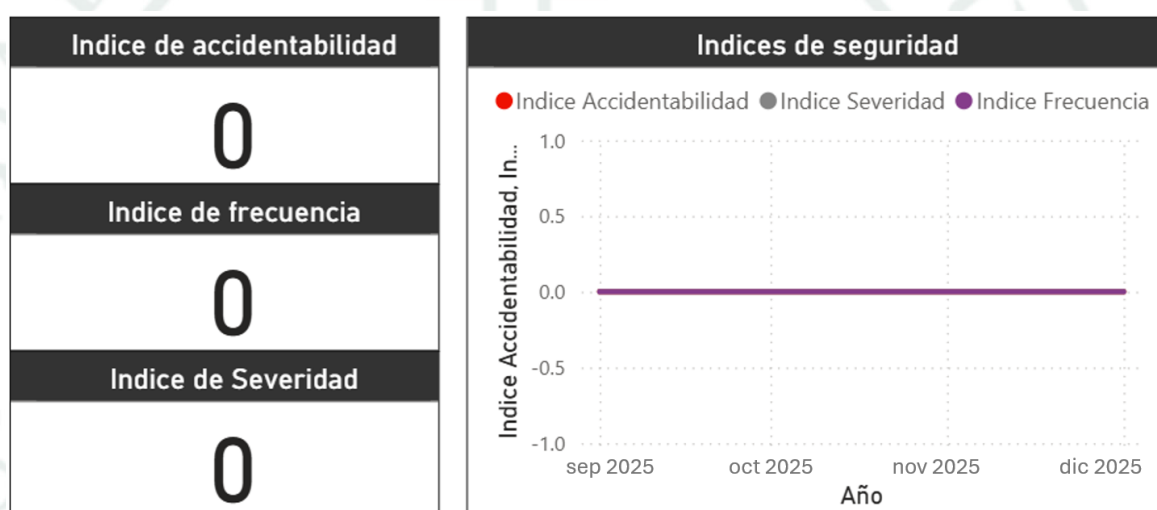
Esta reducción se refleja en la disminución de las horas hombre de exposición, pasando de un valor aproximado de 15 horas – hombre en el sistema convencional a 0.17 horas hombre en el sistema centralizado. En consecuencia, se evidencia una disminución significativa del nivel de exposición del personal, lo cual se traduce en una reducción efectiva del riesgo

operacional, al limitar tanto la cantidad de trabajadores expuestos como el tiempo durante el cual permanecen en condiciones de riesgo.

Algunos de los KPI's de seguridad evaluados durante la etapa de estudio se muestran en la Figura 38 reflejando el comportamiento de los indicadores en el transcurso de la ejecución de voladuras iniciadas con el sistema centralizado.

Figura 40

KPI's de Seguridad



Esta reducción se ve reforzada por los resultados presentados en los índices de seguridad, donde se observa que el índice de accidentabilidad, índice de frecuencia e índice de severidad se mantienen en valores de cero durante el periodo evaluado. Este comportamiento indica que, bajo las condiciones de implementación del sistema de voladura centralizada, no se registraron incidentes ni accidentes asociados al proceso de voladura, lo cual puede estar directamente relacionado con la disminución de la presencia de personal en zonas de riesgo.

La reducción del personal expuesto se debe principalmente a la eliminación de actividades manuales propias del chispeo convencional, ya que el sistema

centralizado permite ejecutar el disparo de manera remota desde superficie. Esto no solo disminuye la cantidad de trabajadores en interior mina durante el proceso, sino que también reduce el tiempo de permanencia en dichas zonas, contribuyendo a una mejora integral en las condiciones de seguridad.

En este sentido, los resultados evidencian que la implementación del sistema de voladura centralizada tiene un impacto directo en la reducción de la exposición del personal, constituyéndose como una medida efectiva para minimizar riesgos asociados al proceso de chispeo. La disminución de 6 personas por evento de voladura, sumada a la ausencia de incidentes registrados, refuerza la importancia de adoptar tecnologías que prioricen la seguridad del personal en operaciones mineras subterráneas.

4.1.6 Oportunidades del proceso en el ciclo de ventilación.

A partir del análisis del proceso operativo de voladura y de la secuencia de actividades desarrolladas al término de cada guardia, se identificó una oportunidad de mejora vinculada a la gestión del sistema de ventilación en interior mina, específicamente en relación con el tiempo de operación de los ventiladores principales posteriores al proceso de chispeo.

Bajo un escenario de evacuación anticipada del personal previo al disparo, se identificó la posibilidad de optimizar el tiempo de operación de ventiladores, el proceso de chispeo se realiza a las 6:30 a.m. / p.m., y el apagado de los ventiladores se efectúa en el mismo horario, manteniendo los equipos en funcionamiento hasta el momento en que se completa el proceso convencional. Bajo estas condiciones, el consumo energético promedio diario de un ventilador

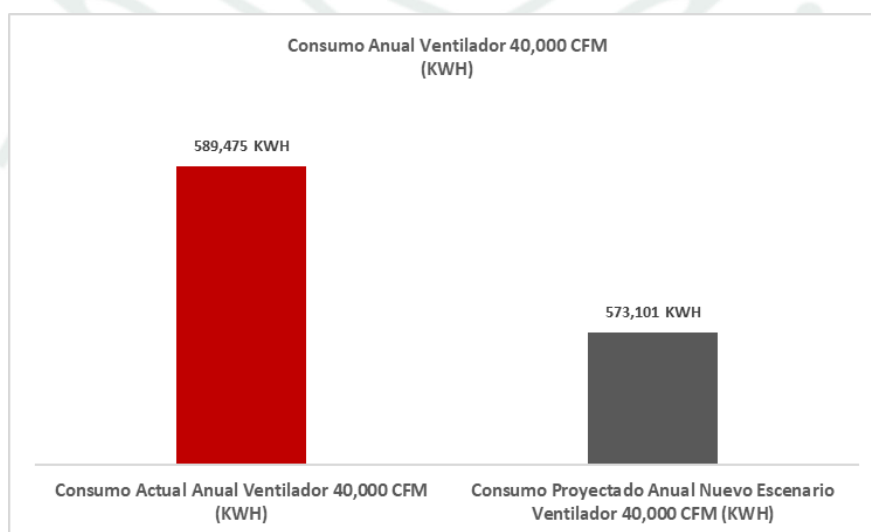
de 40,000 CFM asciende a 1615.00 kWh, lo cual representa un gasto significativo dentro de los costos operativos asociados a la ventilación de la mina.

Sin embargo, con la implementación del sistema de voladura centralizada, se ha evidenciado una reducción considerable en el tiempo de chispeo y, por consiguiente, en el tiempo de permanencia del personal en interior mina. Esta mejora permite plantear un nuevo escenario operativo en el cual las actividades de evacuación se realizan de manera más anticipada y ordenada, generando la posibilidad de optimizar el uso de los sistemas de ventilación.

En este nuevo escenario propuesto, el proceso de chispeo se mantiene a las 6:30 a.m. / p.m.; no obstante, el apagado de los ventiladores se adelanta a las 6:10 a.m. / p.m., considerando que la evacuación del personal se inicia aproximadamente a las 6:00 am/p.m. Este ajuste operativo se fundamenta en la reducción del tiempo de exposición del personal y en la eliminación de actividades manuales propias del método convencional, lo que permite disponer de condiciones seguras para realizar el apagado anticipado de los ventiladores.

Figura 41

Consumo Actual vs Proyectado



Como consecuencia de esta optimización, el consumo energético promedio diario se reduce a 1570.14 kWh por ventilador de 40,000 CFM, lo que representa un ahorro energético diario de 44.83 kWh. Este ahorro, proyectado a lo largo de un año de operación, equivale a un ahorro energético aproximado de 16,373.9 kWh por ventilador, lo cual constituye un impacto significativo en la eficiencia energética de la operación minera.

Desde el punto de vista económico, esta reducción en el consumo energético se traduce en un ahorro anual estimado de 1368.86 dólares por cada ventilador de 40,000 CFM. Si se considera la existencia de múltiples ventiladores en la operación, el impacto económico total podría ser considerable, contribuyendo a la reducción de los costos operativos asociados al sistema de ventilación.

Adicionalmente, es importante resaltar que esta optimización no compromete las condiciones de seguridad en la operación, ya que se encuentra directamente vinculada a la implementación del sistema de voladura centralizada, el cual permite una evacuación más rápida, una menor exposición del personal y una mayor confiabilidad en la ejecución del disparo. En este sentido, la reducción del tiempo de funcionamiento de los ventiladores se realiza bajo un enfoque controlado, alineado con los protocolos de seguridad establecidos.

En consecuencia, los resultados obtenidos evidencian que la implementación del sistema de voladura centralizada no solo genera beneficios en términos de seguridad y optimización del tiempo de chispeo, sino que también abre oportunidades para mejorar la eficiencia energética del proceso. La integración entre la gestión de la voladura y la operación de los sistemas de ventilación

permite maximizar el aprovechamiento de los recursos, consolidando un enfoque más eficiente y sostenible dentro de la operación minera.

4.1.7 Oportunidades del proceso en el ciclo de perforación.

En un escenario alternativo de reestructuración operativa, la reducción del tiempo de chispeo podría permitir ampliar el tiempo efectivo disponible para perforación,

Se identificó que el ciclo de perforación por frente presenta un tiempo promedio de 1 hora con 20 minutos, logrando un rendimiento aproximado de 3 frentes por jumbo por guardia. Este rendimiento se encuentra condicionado por la evacuación del jumbo de mina, la cual se realiza alrededor de las 5:40 a.m. / p.m., limitando el tiempo efectivo disponible para el desarrollo de las actividades de perforación.

Sin embargo, con la implementación del sistema de voladura centralizada, se plantea un escenario tentativo en el cual la evacuación del jumbo de mina se realiza a las 6:10 a.m. / p.m., se mantiene el horario de apagado de los ventiladores y el horario de chispeo a las 6:30 am/pm aprovechando la reducción del tiempo de chispeo y la eliminación de actividades manuales en interior mina. Esta modificación permite generar un intervalo adicional de tiempo operativo, el cual puede ser utilizado para incrementar la productividad del equipo de perforación.

Como resultado, se estima un incremento en el rendimiento del ciclo de perforación, pasando de 3 frentes a tres y medio 3.5 frentes por jumbo por guardia. Este aumento representa una mejora en la eficiencia del ciclo de minado, facilitando avanzar en mayor cantidad de labores dentro del mismo periodo de tiempo, sin necesidad de incrementar recursos adicionales.

Adicionalmente, la optimización del tiempo operativo genera oportunidades para el desarrollo de otras actividades complementarias dentro de la mina. Entre estas se consideran el raspado de frentes, el sostenimiento mediante la instalación de pernos y/o malla, el cantoneo de vías y la estandarización de labores. Estas actividades, que en muchos casos se ven limitadas por la disponibilidad de tiempo, pueden ser ejecutadas de manera más eficiente al aprovechar los intervalos generados por la implementación del sistema de voladura centralizada.

Es importante destacar que estas oportunidades corresponden a escenarios tentativos que deben ser evaluados en función de las condiciones específicas de la operación; sin embargo, el principal aporte del sistema radica en el mejor aprovechamiento del tiempo disponible dentro de la guardia. La reducción del tiempo de chispeo y la evacuación anticipada del personal permiten optimizar la secuencia de actividades, minimizando tiempos improductivos y mejorando la continuidad del ciclo de minado.

En tal caso, la implementación de la voladura centralizada no solo impacta directamente en la seguridad y en la ejecución del disparo, sino que también genera beneficios indirectos en la productividad de la operación. La posibilidad de aprovechar tiempos previamente no utilizados permite incrementar la eficiencia de los equipos, mejorar la planificación operativa y fortalecer el desempeño global de la mina.

CONCLUSIONES

La evaluación del proceso convencional de chispeo permitió determinar que, dependiendo del número de voladuras ejecutadas diariamente, participan aproximadamente 17 chispeadores, quienes intervienen en las actividades de iniciación, revisión y evacuación del proceso de voladura. Asimismo, se identificó que la confirmación del procedimiento convencional demanda alrededor de 30 minutos, representando una mayor permanencia del personal en interior mina y, por consiguiente, un incremento en la exposición a riesgos operacionales asociados a la actividad.

La adecuación del sistema de iniciación centralizado a las condiciones operativas de la unidad minera fue técnicamente viable, mediante el aprovechamiento del sistema leaky feeder, infraestructura de comunicación propia de la operación minera. El uso de este medio permitió establecer la conectividad necesaria entre superficie e interior mina para la transmisión de información, programación y control del disparo, logrando compatibilidad con las condiciones reales de operación y con la infraestructura existente de la unidad.

Tras la implementación del sistema, se evidenció una reducción significativa del tiempo de chispeo, pasando aproximadamente de 30 minutos a 5 minutos, optimizando el proceso de confirmación y ejecución de voladuras subterráneas. Así mismo, la implementación permitió eliminar la participación de aproximadamente 17 chispeadores asociados al proceso convencional, reduciendo además la exposición del personal mediante la disminución de 2 vigías dentro del procedimiento operativo, debido a la ejecución del disparo desde superficie. Durante el periodo de evaluación, el sistema alcanzó una cobertura operativa de 32.59% con un total de 274 voladuras ejecutadas, evidenciando un avance importante dentro del proceso de implementación y validando su funcionamiento bajo condiciones reales de operación.

RECOMENDACIONES

Continuar con la implementación progresiva del sistema de iniciación centralizado en otras zonas operativas de la mina, con la finalidad de ampliar los beneficios relacionados con la seguridad y eficiencia del proceso de voladura.

Reforzar la capacitación del personal involucrado en el proceso de iniciación centralizada, especialmente en programación, operación y control del sistema, a fin de garantizar un uso adecuado de los equipos, minimizar errores operativos y reforzar la adaptación del personal a nuevas tecnologías aplicadas en minería subterránea.

Realizar evaluaciones periódicas del desempeño del sistema de iniciación centralizado, considerando indicadores como tiempos de chispeo, exposición del personal, confiabilidad del disparo, continuidad operativa y desempeño de los sistemas de comunicación utilizados durante el proceso.

Implementar programas de mantenimiento preventivo y verificación continua de los equipos de comunicación y control utilizados en el sistema centralizado, con el objetivo de asegurar la estabilidad y confiabilidad del proceso de disparo.

Evaluar la incorporación de tecnologías complementarias de geolocalización y monitoreo de personal, tales como sistemas o tecnologías equivalentes de posicionamiento en interior mina, con la finalidad de identificar, monitorear y cuantificar la presencia, desplazamiento y salida del personal en las diferentes zonas operativas.

Considerar futuras investigaciones relacionadas con la integración del sistema de iniciación centralizado con otras etapas del ciclo minero, tales como ventilación, monitoreo operativo y automatización de procesos subterráneos, buscando ampliar el alcance y los beneficios de la transformación tecnológica en minería subterránea.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Austin Powder. (2021). ESTAR CUBE: Underground electronic blasting system. Austin Powder Company.
- BME. (2024). AXXIS Centralised Blasting System (CEBS). BME Mining.
- Brunhoferová, M., et al. (2025). Environmental and operational comparison of electronic, electric, and non-electric detonators. *Heliyon*.
- Congreso de la República del Perú. (2011). *Ley N.º 29783, Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo*.
- DetNet South Africa. (2024). *BlastWeb II & Blast Control Unit II (BCU II) user training manual (UTM-00364 Rev 6, SVN 51285)*.
- Dyno Nobel. (2020). *Electronic detonator systems: Technical guide*. Dyno Nobel Inc.
- Dyno Nobel. (2018). *BlastWeb II electronic blasting system: Technical manual*. Dyno Nobel Inc.
- Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. (s.f.). *Resumen del derecho minero* [Base de datos]. INGEMMET. <https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/>
- Iwano, K., et al. (2020). Reduction of blast-induced vibration using electronic detonators in tunneling. *Tunnelling and Underground Space Technology*.
- Kuru, A. T., & İlik, Ö. G. (2023). *Centralized blasting system technology in underground blasting applications [Yeraltı patlatma uygulamalarında merkezi patlatma sistemi teknolojisi]*. En *Proceedings of the 28th International Mining Congress and Exhibition of Turkey (IMCET 2023)* (pp. 322–330).

- Mayta Valle, N. A. (2022). *Mejoras en seguridad minera subterránea mediante la iniciación (aplicación) de voladura electrónica centralizada desde superficie*. En Perumin 35 Convención Minera – Foro de Tecnología, Innovación y Sostenibilidad. Instituto de Ingenieros de Minas del Perú.
- Mestanza Mendoza, J. L. (2011). *Propuesta de diseño de un sistema de fibra óptica OPGW para la conectividad de red en minera Yanacocha*. Universidad Privada del Norte.
- Ministerio de Energía y Minas. (2016). *Decreto Supremo N.º 024-2016-EM: Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería* (Anexo 5)
- Mlynarczyk, M., Sherlock, R., & Williams-Jones, A. E. (2002). *San Rafael, Peru: Geology and structure of the world's richest tin lode*. *Mineralium Deposita*, 38(5), 555–567. <https://doi.org/10.1007/s00126-002-0334-z>
- Murga Sagástegui, L. E., & Salvatierra Ulloa, R. O. (2015). *Estudio de la mejora de disponibilidad del sistema de comunicación subterráneo de minera aurífera Retamas S.A. mediante el empleo de un anillo de cable radiante* [Tesis de grado, Universidad Privada Antenor Orrego]. Repositorio Institucional UPAO.
- Orica. (2018). *i-kon™ electronic blasting system: Technical manual*. Orica Limited.
- Rapokhin, A., & Akgün, F. (2023). *Improve safety and efficiency by the Blastweb central electronic initiation system*. En *Proceedings of the 5th International Underground Excavations Symposium* (pp. s/n). Istanbul, Turkey.
- Roa Pérez, P. C., & Cruz Girón Merino, R. (2022). *Implementación de voladura centralizada en unidad minera subterránea para la mejora del sistema de gestión de seguridad en el procedimiento de voladura* [Tesis de ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú].

Sanchidrián, J. A. (2015). *Fragmentación de rocas con explosivos*. Universidad Politécnica de Madrid.

Sarma, D., et al. (2016). *Electronic detonators: A tool for better control in mining operations*. Atlantis Press.

Wall to Wall Communications. (2019). *Leaky feeder communication and installation guide for business*.



ANEXOS



TECHNICAL SPECIFICATIONS

Temperature Limitations	The following temperature limitations apply to the shock-resistant detonators: -40°C to +80°C -40°F to +176°F 100°C for 8 hours for extreme temperature application
Wire Type	- Steel - Bimetal
Capacity	400 detonators per channel on IntelliShot and SmartShot Nano equipment 300 detonators per channel on DigiShot Ranger - The system can accommodate decking applications to a maximum of six decks and three detonators per deck. - Detonator can be programmed to a maximum of 26 000 ms
Dynamic Shock Resistance	- The shock resistant detonator in a copper shell performs 80% better compared to the standard product range. (122 MPa) - The shock resistant detonator in a copper alloy shell performs 12.5% better compared to its copper shell counterpart. (140MPa)
Detonator Shell	Copper L: 88.9mm, OD: 7.49mm - 7.54mm
Detonator Strength	- Detonator Strength 8D (South African Strength Definition) #12 (North American Strength Definition)
Base Charge	PETN / Lead Azide
Connectors	Connector rugged and water-resistant
Net Explosives Quantity (NEQ)	1 g / detonator
In-Hole Sleep Time (Polyethylene)	A maximum of 7 days (when tested in 100% diesel, 500 kPa pressure and starting temperature of 60°C / 140°F - end temperature of (25°C / 77°F)