UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

TESIS

"DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LOS DETONADORES ELECTRÓNICOS FRENTE A LOS CONVENCIONALES EN LA ZONA DE DESMONTE DE LA UNIDAD MINERA SHOUGANG HIERRO PERÚ"

PRESENTADO POR:

BACH. JOSE MIGUEL FERNANDEZ MAMANI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

MOQUEGUA - PERÚ

2024

UNAM
UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

Folio N° 043

ACTA DE SUSTENTACIÓN

I. Modalidad:

Tesis : [X]

Trabajo de Suficiencia Profesional : [ ]

Otro: ..... : [ ]

II. Documento de aprobación para la sustentación:

Resolución de Facultad N° 254 - 2024 - FACIA - UNAM

Fecha: 26 / 12 / 2024

III. El Jurado ha dictaminado la (el) TESIS, TITULADO:

"Determinación de la eficiencia de los detonadores electrónicos frente a los convencionales en la zona de desmonte de la Unidad Minera Shougang Hierro Perú"

Bachiller: Jose Miguel Fernandez Mamani

Asesor Principal: Dr Arquimedes Leon Vargas Luque

Co-Asesor : .....

IV. Se dictamina:

Como: APROBADO por UNANIMIDAD la sustentación de manera:

Presencial [X] Virtual [ ]

Con nota: CATORCE (14) por lo que; Sí [X] No [ ]

Opta el Título Profesional de INGENIERO DE MINAS.

Siendo las 12:00 horas, del 26 de diciembre del año 2024 se procede con la firma en conformidad de lo dictaminado por el Jurado.

Presidente
Dr. Christ Barriga Pavia
(Nombres y Apellidos)

Primer Miembro
MSC. JORGE LUIS FLOREZ SOTO
(Nombres y Apellidos)

Segundo Miembro
MSc AGAPITO FLORES JUSTO
(Nombres y Apellidos)

Bachiller
Jose Miguel Fernandez Mamani
(Nombres y Apellidos)

DEDICATORIA

A mis padres, cuya guía y amor incondicional han sido el pilar fundamental en mi vida. Dedico este esfuerzo también a mis maestros y compañeros, quienes con su conocimiento y experiencia han dejado una huella imborrable en mi formación profesional.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más profundo agradecimiento a la Universidad Nacional de Moquegua y a la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas por brindarme las herramientas necesarias para mi crecimiento académico. Extiendo también mi reconocimiento a Shougang Hierro Perú por facilitarme la realización de este estudio, y a mi asesor, cuya valiosa guía y sabios consejos fueron fundamentales para llevar a cabo esta investigación. Asimismo, el agradecimiento por el apoyo al proyecto de investigación “Piroclasto pumicita del volcán Ticsani en el proceso de tratamiento de aguas residuales de una población” resolución de C.O. N° 637-2022-UNAM. A todos ellos, mi más sincera gratitud.

Resumen

La presente investigación evaluó la implementación de detonadores electrónicos frente a detonadores convencionales en la zona de desmonte de la unidad minera Shougang Hierro Perú, con el objetivo de mejorar la eficiencia operativa y optimizar la granulometría resultante de las actividades de perforación y voladura. Se llevó a cabo un estudio experimental y aplicado, con un enfoque cuantitativo y diseño de caso, analizando dos proyectos específicos de voladura en la unidad minera. El análisis se centró en comparar la granulometría del material, los costos operativos por taladro y la vibración por carga operante, bajo condiciones similares para ambos tipos de sistemas de iniciación. Los resultados demostraron que los detonadores electrónicos ofrecen una mayor precisión y control en las operaciones. La granulometría del material fragmentado mejoró significativamente, con un P80 de 6.63 pulgadas frente a las 8.42 pulgadas obtenidas con detonadores convencionales, representando un incremento del 21.2 % en la fragmentación. Además, la vibración por carga operante se redujo en un 32.3 %, con valores máximos de 1.89 mm/s en las voladuras electrónicas, frente a 2.79 mm/s en las pirotécnicas, mejorando las condiciones de seguridad y reduciendo el impacto ambiental. En términos económicos, los detonadores electrónicos resultaron ser hasta 4.1 % más económicos que los convencionales, alcanzando un costo promedio de $817.94 por taladro, en comparación con $852.7 por taladro en diseños tradicionales. Se demostró que la implementación de detonadores electrónicos no solo mejora la calidad y seguridad de las operaciones mineras, sino que también proporciona beneficios económicos tangibles.

Palabras clave: Detonadores electrónicos, fragmentación, vibración, costo por taladro.

Abstract

The present research evaluated the implementation of electronic detonators compared to conventional detonators in the waste dump area of the Shougang Hierro Perú mining unit, aiming to enhance operational efficiency and optimize the granulometry resulting from drilling and blasting activities. An experimental and applied study was conducted with a quantitative approach and case-study design, analyzing two specific blasting projects within the mining unit. The analysis focused on comparing material granulometry, operational costs per drill, and vibration per operational charge under similar conditions for both initiation systems. The results demonstrated that electronic detonators provide greater precision and control in operations. The granulometry of the fragmented material improved significantly, with a P80 of 6.63 inches compared to 8.42 inches achieved with conventional detonators, representing a 21.2% increase in fragmentation. Additionally, vibration per operational charge decreased by 32.3%, with maximum values of 1.89 mm/s in electronic blasting versus 2.79 mm/s in pyrotechnic blasting, improving safety conditions and reducing environmental impact. Economically, electronic detonators proved to be up to 4.1% more cost-effective than conventional ones, achieving an average cost of $817.94 per drill compared to $852.70 per drill in traditional designs. It was demonstrated that the implementation of electronic detonators not only improves the quality and safety of mining operations but also provides tangible economic benefits.

Keywords: Electronic detonators, fragmentation, vibration, cost per drill.

Índice

I. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 7

1.1. Descripción y formulación del problema 7

1.2. Justificación e importancia 11

1.3. Objetivos 13

1.3.1. Objetivo general 13

1.3.2. Objetivos específicos 13

1.4. Hipótesis 13

1.4.1. Hipótesis general 14

1.4.2. Hipótesis específicas 14

1.5. Variables 14

1.5.1. Variable dependiente 14

1.5.2. Variable independiente 15

II. MARCO TEÓRICO 17

2.1. Antecedentes 17

2.1.1. Antecedentes internacionales 17

2.1.2. Antecedentes nacionales 21

2.1.3. Antecedentes regionales 26

2.2. Bases teóricas 29

2.2.1. Detonadores electrónicos en minería superficial 29

2.2.1.1. Explosivos en minería a tajo abierto 32

2.2.1.2. Ventajas de los detonadores electrónicos frente a los convencionales 39

2.2.1.3. Diferencias entre detonadores electrónicos y convencionales 40

2.2.1.4. Principales factores para la eficiencia de la voladura 42

2.2.1.5. Efecto de la precisión de los detonadores en la eficiencia de las voladuras 44

2.2.2. Eficiencia operativa de las actividades de perforación y voladura en minería a cielo abierto 46

2.2.2.1. Granulometría 46

2.2.2.2. Fragmentación 47

2.2.2.3. Costo de voladura 47

2.2.2.4. Impacto en la seguridad y el ambiente 48

2.2.2.5. Detonadores y vibraciones 50
2.2.2.6. Proyección de rocas.....50
2.2.2.7. Influencia de la geología 51
2.3. Definición de términos 53
III. MÉTODOLOGIA 59
3.1. Tipo y nivel de investigación.....59
3.2. Ámbito temporal y espacial.....60
3.2.1. Ubicación del complejo minero metalúrgico de Shougang Hierro Perú S.A.A.....60
3.2.2. Shougang Hierro Perú S.A.A.....61
3.3. Población y Muestra 63
3.3.1. Población 63
3.3.2. Muestra 63
3.4. Instrumentos 63
3.4.1. WipFrag™ 4 63
3.4.2. O-Pitblast 64
3.4.3. Sistema de iniciación electrónica DaveyTronic OP.....65
3.4.4. Sistema de iniciación no electrónica Brinel.....66
3.4.5. ANFO Pesado 68
3.5. Procedimientos.....69
3.5.1. Técnica de recolección de datos 69
3.5.1.1. Observación directa. 69
3.5.1.2. Análisis documental. 70
3.5.1.3. Equipos para seguridad 70
3.6. Análisis de Datos.....71
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 72
4.1. Resultados 72
4.1.1. Objetivo Específico 1 - Uso de detonadores electrónicos y convencionales en la optimización de la granulometría 72
4.1.1.1. Descripción del Proyecto de Voladura M14 Nv 650 Py 115.....73
4.1.1.2. Diseño y Parámetros del Proyecto de Voladura M14 Nv 650 Py 115 73
4.1.1.3. Resultados del Uso de Detonadores Electrónicos en la Granulometría del Material 77

4.1.2. Objetivo Específico 2 - Detonadores Electrónicos y Vibración por Carga Operante 83
4.1.2.1. Descripción del Proyecto de Voladura M14 Nv 650 Py 117 83
4.1.2.2. Diseño y Parámetros del Proyecto de Voladura M14 Nv 650 Py 117 86
4.1.2.3. Resultados del Uso de Detonadores Electrónicos en la Vibración por Carga Operante 91
4.1.3. Objetivo Específico 2 - Detonadores Electrónicos y Costo por Taladro 94
4.1.3.1. Costos Unitarios para Taladros de Voladura con y sin Detonadores Electrónicos 94
4.1.3.2. Comparación de Costos por Taladro con y sin Detonadores Electrónicos. 96
4.2. Discusión 99
V. CONCLUSIONES 101
VI. RECOMENDACIONES 103
VII. REFERENCIAS 105
VIII. ANEXOS 111
Anexo 1. Matriz de Consistencia 111
Anexo 2. Ficha técnica del sistema de iniciación electrónica DaveyTronic OP 112
Anexo 3. Ficha técnica del sistema de iniciación no electrónica Brinel 114
Anexo 4. Estándares y PETS 116

Índice de Tablas

Pág.

Tabla 1 Operacionalización de variables 16
Tabla 2 Comparación de distintos sistemas de detonación.....41
Tabla 3 Características del sistema de iniciación electrónica DaveyTronic OP 66
Tabla 4 Características del sistema de iniciación no eléctrica Brinel.....68
Tabla 5 Comparación de mezclas de ANFO utilizadas 69
Tabla 6 Parámetros de perforación y voladura del Diseño 1 sin detonadores electrónicos. 74
Tabla 7 Parámetros de perforación y voladura del Diseño 2 con detonadores electrónicos. 75
Tabla 8 Granulometría de voladura con detonadores convencionales. 78
Tabla 9 Granulometría de voladura con detonadores electrónicos. 80
Tabla 10 Comparación de resultados de granulometría de voladura con detonadores electrónicos y con detonadores convencionales. 82
Tabla 11 Parámetros de perforación y voladura del proyecto M14 Nv 650 Py 117 87
Tabla 12 Parámetros de control del taco de producción 89
Tabla 13 Costos unitarios para el cálculo del costo por taladro de voladura 95
Tabla 14 Costo comparativo por taladro según diseños con y sin detonadores electrónicos.....97
Tabla 15 Porcentaje de ahorro de diseños con detonadores electrónicos frente a diseños con detonador pirotécnicos.....98

Índice de Figuras

Pág.

Figura 1 Generación de bolones y material grueso producto de la ineficiencia en el proceso de voladura. 10
Figura 2 Esquema de la estructura interna de un detonador electrónico .31
Figura 3 Vista de las operaciones a tajo abierto de SHP en Marcona.....32
Figura 4 Clasificación de explosivos industriales 35
Figura 5 Estructura general del ANFO pesado de Bampfield y Morrey 36
Figura 6 Esquema de una malla de perforación para producción en minería a cielo abierto 38
Figura 7 Análisis de la granulometría a través de WipFragTM.....46
Figura 8 Mapa de ubicación de la unidad minera Shougang Hierro Perú.60
Figura 9 Zona de estudio de la unidad minera Shougang Hierro Perú.....61
Figura 10 Sistema de iniciación electrónica DaveyTronic OP 65
Figura 11 Sistema de iniciación no eléctrica Brinel 67
Figura 12 Diseño de voladura con y sin detonadores electrónicos.....72
Figura 13 Diseño de carga de taladros de producción ER 12 ¼" para Diseño 2 de voladura con detonadores electrónicos.....76
Figura 14 Vista fotográfica de la zona de voladura con y sin detonadores electrónicos 77
Figura 15 Distribución granulométrica del Diseño 1 con detonadores convencionales.....79
Figura 16 Resultado de la granulometría del Diseño 1 con detonador convencional.....79
Figura 17 Distribución granulométrica del Diseño 2 con detonadores electrónicos 80
Figura 18 Resultado en campo de la granulometría del Diseño 2 con detonador electrónico 81
Figura 19 Vista fotográfica del proyecto voladura M14 Nv 650 Py 117 83
Figura 20 Plano de ubicación de la voladura M14 Nv 650 Py 117 84
Figura 21 Secuencia de Iniciación de la voladura M14 Nv 650 Py 117 84
Figura 22 Distribución de taladros de voladura pirotécnica y electrónica. 85
Figura 23 Diseño de carga de taladros de producción ER 12 ¼" 88

Figura 24 Isotiempos de la voladura M14 Nv 650 Py 117. 90
Figura 25 Desplazamiento del material voladura M14 Nv 650 Py 117. 90
Figura 26 Burden de alivio de la voladura electrónica del M14 Nv 650 Py 117. 91
Figura 27 Carga operante de la voladura M14 Nv 650 Py 117. 92
Figura 28 Registros de vibraciones de la voladura pirotécnica y voladura electrónica. 92
Figura 29 Vista fotográfica del resultado del disparo de la voladura pirotécnica y electrónica 93
Figura 30 Vista fotográfica de la comparación de la fragmentación resultante de voladura con detonadores pirotécnicos y con detonadores electrónicos. 94
Figura 31 Comparación de costo por taladro de diseños con y sin detonadores electrónicos 98

Introducción

La minería superficial, como una de las actividades industriales más importantes a nivel global, ha adoptado la voladura como uno de sus métodos más utilizados para la fragmentación de roca. Esta técnica ha sido generalizada por su eficiencia, economía y capacidad de fragmentar incluso las rocas más duras, lo que la convierte en una herramienta principal en la industria.

Sin embargo, uno de los desafíos principales en este proceso es la ineficiencia en la utilización de la energía de los explosivos, ya que gran parte de esta se disipa sin cumplir su función principal de fracturar la roca. Esta ineficacia no solo causa costos evitables, sino que también genera problemas operativos y ambientales, especialmente en zonas cercanas a poblaciones humanas, donde las vibraciones resultantes de las explosiones pueden causar daños estructurales y molestias a las comunidades. En respuesta a estos desafíos, la industria minera ha comenzado a adoptar nuevas tecnologías, entre las cuales destacan los detonadores electrónicos. Esta innovación ha permitido un control más preciso de los tiempos de retardo de las explosiones, mejorando la eficiencia del uso de los explosivos y mitigando los impactos ambientales.

En este contexto, los detonadores electrónicos han adquirido mayor relevancia en las últimas décadas, debido a las ventajas que ofrecen en comparación con los sistemas de detonación convencionales. La precisión en la configuración de los tiempos de retardo no solo optimiza el uso de la energía explosiva, reduciendo los niveles de vibración, sino que también aumenta la seguridad y facilita el diseño de redes de voladura más

simples y eficientes. Sin embargo, a pesar de los beneficios que estos dispositivos brindan, se han presentado desafíos en su implementación a gran escala, como una tasa de fallos considerable en algunos proyectos de voladura.

En el Perú, donde la minería representa un pilar fundamental de la economía nacional, la adopción de tecnologías como los detonadores electrónicos se ha convertido en un factor clave en la competitividad. Con una inversión minera significativa y un amplio número de proyectos en curso, la incorporación de estas tecnologías no solo podría mejorar la eficiencia operativa y reducir los impactos ambientales, sino que también respondería a las crecientes demandas de sostenibilidad y creciente competitividad en el sector.

En la Unidad Minera Shougang Hierro Perú (SHP), se ha identificado un problema significativo relacionado con la eficiencia operativa y la calidad de la granulometría en la zona de desmonte, derivado del uso de detonadores convencionales en las voladuras. La falta de precisión en estas prácticas genera fragmentación inconsistente del material, lo que impacta negativamente en el rendimiento de las operaciones de carga, transporte y procesamiento del mineral. La variabilidad en el tamaño del material extraído crea ineficiencias que no solo afectan el tiempo y los costos de operación, sino también la calidad del mineral para su posterior procesamiento. Además, las voladuras inexactas incrementan el riesgo de tiros cortados, desperdician recursos valiosos y elevan los costos operativos al generar material no deseado o inadecuado para los procesos posteriores.

Ante esta problemática, surge la necesidad de investigar la implementación de detonadores electrónicos como una alternativa para mejorar tanto la eficiencia operativa como la granulometría resultante en la zona de desmonte. El objetivo general de esta investigación es identificar los efectos de dicho cambio en las actividades de perforación y voladura, buscando optimizar los procesos y reducir los impactos negativos asociados al uso de detonadores convencionales. Los objetivos específicos se centran en comparar la granulometría obtenida con ambos tipos de detonadores y analizar los costos y la eficiencia de cada opción.

La justificación de este estudio radica en su potencial para mejorar significativamente la eficiencia en las operaciones mineras, optimizando los procesos de fragmentación de roca y aumentando la rentabilidad al reducir los costos operativos y los desperdicios asociados a los tiros cortados. Además, este enfoque no solo responde a la necesidad de mejorar la competitividad del sector, sino también a la creciente demanda de prácticas mineras más seguras y sostenibles. En seguridad laboral, el uso de tecnologías avanzadas puede mitigar riesgos relacionados con las vibraciones y la proyección de rocas, protegiendo a los trabajadores y garantizando un entorno laboral más seguro. En lo ambiental, la adopción de detonadores electrónicos contribuiría a reducir la huella ecológica de las actividades mineras, alineándose con los esfuerzos globales para promover una industria más responsable con el medio ambiente. beneficios tangibles a nivel social, académico y práctico.

La implementación de detonadores electrónicos en lugar de detonadores convencionales en la zona de desmonte de la unidad minera

Shougang Hierro Perú generará una mejora significativa en varios aspectos operativos. Se espera que los detonadores electrónicos permitan una mayor precisión en el diseño y ejecución de las voladuras, lo que resultará en una mejor fragmentación del material, lo cual, a su vez, optimizará el proceso de minado. Esto podría traducirse en menores costos operativos por tonelada debido a una mayor eficiencia en el uso de explosivos y en una reducción de las vibraciones generadas durante las voladuras. Además, se anticipa que esta tecnología reducirá los impactos ambientales y de seguridad asociados a la operación minera, proporcionando un mejor control de la granulometría y una mayor eficiencia operativa en comparación con los detonadores convencionales.

Se identificaron y midieron dos variables principales: el diseño de carga explosiva con detonadores electrónicos (variable independiente) y la eficiencia operativa y granulometría de las actividades de perforación y voladura (variable dependiente). La variable independiente se conceptualiza como el proceso mediante el cual se planifica y configura la disposición de explosivos, con especial atención a parámetros de diseño como el espaciamiento, el *burden*, el diámetro de la broca, y el tiempo entre taladros, entre otros. Esta variable se medirá de forma numérica a través de indicadores como el peso de explosivos (kg), la distancia entre cargas (m), y los tiempos de detonación (ms). Por su parte, la variable dependiente se desglosa en dos dimensiones: granulometría y eficiencia operativa. La granulometría se evaluará mediante el análisis del tamaño de los fragmentos resultantes (P80) en pulgadas, mientras que la eficiencia operativa es medida en términos del costo de voladura ($/t) y la vibración

generada por cada carga operante (kg), permitiendo evaluar el impacto económico y ambiental del uso de detonadores electrónicos en las operaciones mineras.

El estudio fue tipo experimental y se aplicó un enfoque cuantitativo para evaluar el impacto de los detonadores electrónicos en la operación minera. Se empleó la observación directa y el análisis documental como técnicas de recolección de datos, utilizando WipFragTM 4 para el análisis granulométrico y O-Pitblast para el diseño y ejecución de voladuras. Este fue aplicado la unidad minera Shougang Hierro Perú, donde se compararon los resultados de voladuras realizadas bajo condiciones similares, pero utilizando sistemas de iniciación electrónica y convencional. Se realizó la observación de campo de las voladuras seleccionadas, en las cuales se han implementado diferentes tipos de detonadores. Con información del tercer trimestre de 2024, se realizaron análisis detallados de los datos recolectados, como fragmentación de rocas, eficiencia operativa y costos, con el fin de generar conocimientos para mejorar la operación. Además, se realizó análisis documental de informes de producción y seguridad, que permitieron contrastar los resultados de las tecnologías de detonadores utilizados.

Esta tesis se estructura en capítulos que abarcan desde la definición del problema hasta las conclusiones y recomendaciones. En el Capítulo I se desarrolla el Planteamiento del problema, donde se describen y formulan las preguntas de investigación relacionadas con la influencia de los detonadores electrónicos en la optimización de la granulometría y la eficiencia operativa en la unidad minera Shougang Hierro Perú. Se

establecen los objetivos, tanto generales como específicos, que buscan determinar los beneficios de la implementación de estos detonadores frente a los convencionales. También se justifica la relevancia del estudio, indicando la importancia de mejorar las prácticas en las actividades de perforación y voladura, seguido de las hipótesis y la identificación de las variables dependientes e independientes clave para el análisis.

El Capítulo II desarrolla el Marco Teórico, donde se presentan los antecedentes y bases teóricas que sustentan la investigación, incluyendo estudios previos y definiciones relacionadas con el uso de detonadores electrónicos y su impacto en la industria minera. El Capítulo III detalla la Metodología, especificando el tipo de investigación cuantitativa y aplicada, el diseño experimental, el ámbito espacial y temporal, así como la población y muestra a estudiar, compuesta por voladuras en el tercer trimestre del 2024. Se describen los instrumentos y procedimientos utilizados para recolectar y analizar los datos. En el Capítulo IV se presentan los Resultados y la discusión, seguidos por las Conclusiones en el Capítulo V, que sintetizan los hallazgos más importantes, y finalmente, en el Capítulo VI se ofrecen Recomendaciones para mejorar la eficiencia operativa en futuras operaciones mineras.

I. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Descripción y formulación del problema

La minería superficial, uno de los principales sectores industriales a nivel mundial, ha adoptado la voladura como método predominante para la fragmentación de roca debido a sus ventajas reconocidas en términos de economía, eficiencia y capacidad para fragmentar incluso las rocas más resistentes. La voladura no solo optimiza la operación minera, sino que también representa una alternativa conveniente frente a otros métodos de excavación. No obstante, se enfrenta a un desafío significativo: un alto porcentaje de la energía total de los explosivos se disipa ineficazmente, siendo solo una fracción utilizada efectivamente en la fractura de la roca (Singh *et al.*, 2019).

Esta ineficiencia energética lleva consigo no solo una pérdida económica, sino también impactos en la eficiencia operativa y ambientales considerables. Con el crecimiento de las actividades mineras en áreas próximas a asentamientos humanos, las vibraciones del suelo generadas por las explosiones se han convertido en una fuente de preocupación. Estas pueden provocar molestias a las personas y daños estructurales y en respuesta a estos desafíos, en tanto la industria minera y de explosivos como Enaex está incorporando activamente nuevas tecnologías como los detonadores electrónicos para mejorar no solo el rendimiento y la eficiencia de costos de las operaciones de voladura, sino también para mitigar sus efectos adversos.

En este sentido, el detonador electrónico ha alcanzado un desarrollo y uso generalizado en las últimas décadas sin precedentes

debido a sus numerosas ventajas, tales como una configuración de retraso preciso, un diseño de red sencillo, una iniciación segura mediante contraseña y buenos resultados obtenidos en voladura. El sistema de detonadores electrónicos permite un control preciso y exacto de los tiempos de retardo, lo cual influye en la eficiencia de la energía del explosivo y minimiza las vibraciones indeseadas. No obstante, en el proceso de popularización a gran escala, han comenzado a aparecer problemas evidentes, entre estos problemas, la tasa de fallos en la voladura se mantiene en un nivel elevado (Ren *et al*., 2019).

Los proyectos de innovación tecnológica como el uso de los detonadores electrónicos son una necesidad apremiante en el contexto nacional actual. En el Perú, la minería representa alrededor del 8.33% del PBI nacional y solo en el año 2022 se realizaron inversiones en minería por 5,372 millones USD y se cuenta con 74 proyectos de exploración por 596 millones USD (Ministerio de Energía y Minas, 2023). No obstante, la demanda mundial aumenta y la producción neta de muchas empresas mineras se ha estancado o disminuido, situación que pone mayor presión sobre la industria e impulsa la búsqueda de soluciones tecnológicas para la mejora de la eficiencia de sus operaciones y el aseguramiento del retorno de la inversión. Shougang tiene planificado la exploración en el distrito de Marcona con 662 plataformas y una inversión de US$ 10.6 millones (Energiminas, 2024) para satisfacer la creciente demanda. En este contexto, los detonadores electrónicos emergen como una solución tecnológica prometedora ya que esta reciente innovación busca optimizar los resultados tecnológicos y económicos de las voladuras, además de

reducir los efectos negativos asociados al uso de explosivos convencionales.

En la Unidad Minera Shougang Hierro Perú, la eficiencia operativa y la calidad de la granulometría en la zona de desmonte son aspectos críticos para el éxito y la rentabilidad de las operaciones mineras. Sin embargo, la práctica actual de voladura con detonadores convencionales plantea una serie de desafíos. Uno de ellos es que la falta de precisión y control en las voladuras con detonadores convencionales conlleva a una fragmentación inconsistente del material en la zona de desmonte, lo que afecta negativamente tanto la eficiencia operativa como la calidad de la granulometría. Esta inconsistencia se traduce en una mayor variabilidad en el tamaño del material extraído, lo que dificulta los procesos de carga, transporte y procesamiento del mineral.

Además, la práctica de voladura con detonadores convencionales puede resultar en una mayor generación de tiros cortados, desperdiciando recursos valiosos y aumentando los costos operativos. Es más, la inexactitud en voladuras produce una fragmentación pobre de la roca resulta en un incremento de bolones y de la dilución del mineral afectando negativamente la eficiencia de los procesos de carguío, acarreo y chancado. Además, niveles elevados de vibración pueden causar daños estructurales en los taludes circundantes, aumentando el riesgo de proyección de rocas y, por ende, los costos asociados tanto a la operación como a la mitigación de estos efectos negativos. Esta situación no solo afecta la rentabilidad de la mina, sino que también tiene implicaciones en

términos de seguridad laboral y sostenibilidad ambiental, al aumentar el riesgo de accidentes y la generación de residuos no deseados.

Por tanto, el primer problema específico trata del efecto de la sustitución de detonadores convencionales por detonadores electrónicos en la granulometría del material resultante tras las voladuras. La hipótesis específica establece que los detonadores electrónicos permiten un mayor control y precisión en la secuencia de explosión, lo que se traduce en una fragmentación más uniforme de la roca. Este control sobre los tiempos de retardo minimiza la presencia de fragmentos de gran tamaño o también llamados bolones como los de la Figura 1, favoreciendo una granulometría más eficiente para los procesos posteriores, como el transporte y el chancado. Por su parte, los detonadores convencionales tienden a generar una mayor variabilidad en el tamaño de los fragmentos, lo que dificulta los procesos de manejo del material y puede llevar a una sobrecarga en los equipos de procesamiento, afectando negativamente la eficiencia general de la operación.

Figura 1

Generación de bolones y material grueso producto de la ineficiencia en el proceso de voladura.



Nota. Adaptado de Mamani (2018, p. 5)

El segundo problema específico trata sobre la implementación de detonadores electrónicos y su influencia en la eficiencia operativa en términos de costos por tonelada y control de vibraciones en la zona de desmonte. Se hipotetiza que, al optimizar la secuencia de explosiones, se reduce la cantidad de tiros cortados y se mejora la fragmentación, lo que disminuye el costo por tonelada procesada al hacer más eficiente el proceso de carga y transporte del mineral. Además, los detonadores electrónicos permiten un mejor control de las vibraciones generadas durante la voladura, lo que contribuye a la estabilidad de los taludes circundantes y reduce el riesgo de proyecciones de rocas. Esto no solo disminuye los costos asociados a la mitigación de estos efectos, sino que también mejora la seguridad en el entorno laboral y reduce el impacto ambiental, haciéndolo un método más sostenible en comparación con los detonadores convencionales.

La implementación de detonadores electrónicos emerge como una solución potencial para abordar el problema de estudio. Es así que la presente investigación busca comprender cómo la adopción de detonadores electrónicos puede optimizar los procesos de voladura, la granulometría del material y la rentabilidad de la operación minera en la zona de desmonte de la unidad minera Shougang Hierro Perú.

1.2. Justificación e importancia

La presente investigación se justifica de acuerdo a los siguientes aspectos:

Mejora de la Eficiencia Operativa

La eficiencia en las operaciones mineras conlleva garantizar la rentabilidad, el retorno de las inversiones y la competitividad en el mercado

(Ministerio de Energía y Minas, 2023). La transición de detonadores convencionales a electrónicos podría ofrecer mejoras significativas en la eficiencia de las voladuras, lo que se traduciría en una mejor fragmentación de la roca y la mejora de los procesos de chancado y molienda.

Optimización de la Granulometría

La calidad de la granulometría del material extraído es un factor crítico en la eficiencia de los procesos de carguío, acarreo y procesamiento en la industria minera. La implementación de detonadores electrónicos tiene el potencial de mejorar la uniformidad y consistencia en la fragmentación del material, lo que facilitaría estos procesos y aumentaría la eficiencia del ciclo de minado en general.

Reducción de Costos y Desperdicios

Los tiros cortados representan un problema común en las operaciones de desmonte, lo que resulta en costos adicionales y desperdicio de recursos. La investigación de los beneficios de los detonadores electrónicos permitirá identificar estrategias para minimizar estos eventos, lo que a su vez reducirá los costos operativos y mejorará la gestión de los recursos naturales.

Mejora de la Seguridad Laboral

La seguridad de los trabajadores mineros es una prioridad indiscutible. La implementación de tecnologías avanzadas, como los detonadores electrónicos, podría contribuir a reducir los riesgos asociados con vibraciones y proyección de rocas, mejorando así las condiciones de seguridad en el lugar de trabajo y protegiendo la salud y el bienestar de los empleados.

Contribución a la Sostenibilidad Ambiental

La industria minera enfrenta cada vez más presiones para adoptar prácticas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. La investigación de los beneficios de los detonadores electrónicos no solo se centra en la eficiencia operativa, sino también en el impacto ambiental de las operaciones mineras, buscando reducir la generación de desperdicios y minimizar la huella ecológica de la actividad minera.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Identificar los efectos de la implementación de detonadores electrónicos en reemplazo de detonadores convencionales a fin de mejorar la eficiencia operativa y optimizar la granulometría resultante de las actividades de perforación y voladura en la zona de desmonte de la unidad minera Shougang Hierro Perú.

1.3.2. Objetivos específicos

Analizar la granulometría de las actividades de perforación y voladura con detonadores electrónicos y comparar con el uso de detonadores convencionales, en la zona de desmonte de la unidad minera Shougang Hierro Perú.

Determinar el costo por taladro y vibración por carga operante del uso de los detonadores electrónicos en el diseño de carga explosiva frente al uso de detonadores convencionales en la zona de desmonte de la unidad minera Shougang Hierro Perú.

1.4. Hipótesis

Las hipótesis de investigación son las siguientes:

1.4.1. Hipótesis general

La implementación de detonadores electrónicos, en reemplazo de los detonadores convencionales, generará menores costos operativos por taladro, menor vibración por carga operante y mejorará significativamente la granulometría en la zona de desmonte de la unidad minera Shougang Hierro Perú.

1.4.2. Hipótesis específicas

La implementación de un diseño de carga explosiva con detonadores electrónicos mejorará significativamente la fragmentación del material resultante en la zona de desmonte en la unidad minera Shougang Hierro Perú en el año 2024, optimizando la fragmentación y la granulométrica.

La voladura con detonadores electrónicos presentará un menor costo por taladro y menores valores de vibración por carga operante debido a que estos ofrecen mayor eficiencia que los detonadores convencionales al ser más precisos y permitir un mayor control y exactitud en el diseño de voladura en la zona de desmonte en la unidad minera Shougang Hierro Perú.

1.5. Variables

1.5.1. Variable dependiente

Eficiencia operativa y granulometría de las actividades de perforación y voladura.

Dimensiones

Granulometría

Indicadores

- P80
- Promedio
- Rango
- Mínimos y máximos

Eficiencia Operativa

Indicadores

- Costo de taladro
- Vibración por carga operante

1.5.2. Variable independiente

Diseño de carga explosiva.

Dimensiones

Parámetros de diseño de voladura.

Indicadores

- Diseño de carga
- Espaciamiento
- *Burden*
- Diseño de taco
- Diámetro de broca
- Tiempo entre taladros y filas

La Tabla 1 presenta la estructura de las variables de acuerdo al diseño de investigación establecido, estableciendo sus definiciones conceptuales, dimensiones e indicadores. En el Anexo 1 se adjunta la Matriz de Consistencia.

Tabla 1

Operacionalización de variables

Variables	Definición Conceptual	Dimensiones	Indicador	Unidad de Medida
Variable Independiente				
Diseño de carga explosiva con detonadores electrónicos.	Proceso de planificar, calcular y configurar la disposición de explosivos en un área específica, utilizando detonadores electrónicos para asegurar una detonación precisa y controlada a fin de fragmentar el material de desmonte o mineral eficientemente.	Parámetros de diseño	-Diseño de carga -Espaciamiento -*Burden* -Diseño de taco -Diámetro de broca -Tiempo entre taladros y filas	kg m pulg ms
Variable Dependiente				
Eficiencia operativa y granulometría de las actividades de perforación y voladura.	Capacidad de optimizar el uso de recursos para maximizar la productividad, mientras se controla y se ajusta la distribución del tamaño de los fragmentos de roca resultantes, el impacto ambiental y de seguridad para mejorar los siguientes pasos del ciclo de minado.	Granulometría	1) P80	pulg
			2) Promedio, rango, mínimos y máximos	pulg
		Eficiencia Operativa	1) Costo de taladro	$/tal
			2) Vibración por carga operante	Mm/s

Nota. Elaboración propia.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes internacionales

El artículo internacional de Singh *et al*. (2019) analiza los principales impactos derivados de las voladuras con detonadores electrónicos en la fragmentación, la vibración del terreno, la sobrepresión de aire y el *flyrock*. Se estudiaron 22 detonaciones distintas que empleaban detonadores electrónicos y 9 que utilizaban mechas detonantes y relés de cordón, registrando y analizando los resultados obtenidos. Los resultados demostraron que la fragmentación media conseguida durante las detonaciones con detonadores electrónicos fue menor en comparación con aquellas realizadas usando sistemas de iniciación con mechas detonantes y relés de cordón. Además, el análisis de fragmentación reveló una reducción aproximada del 44% en el tamaño medio de los fragmentos. También hallaron una reducción del 36% en la vibración del terreno inducida por las explosiones a una distancia escalada de 10 $m/kg^{0.5}$ utilizando detonadores electrónicos en comparación con los sistemas de iniciación convencionales.

Mishra *et al*. (2017) llevaron a cabo un estudio de caso en la mina de piedra caliza Sonadih, ubicada en India, enfocándose en la realización de voladuras controladas cerca de una estructura verde de un volcador de vagones a tan solo 2 metros de distancia como parte de los trabajos fundacionales de un transportador de cinta. Para el estudio, se emplearon sismógrafos de Instantel Inc y el programa Shotplus-I de Orica. La metodología incluyó la realización inicial de una voladura de prueba para

comprender el comportamiento de los estratos y las primeras dos voladuras y las subsiguientes cerca de la estructura verde se diseñaron utilizando el Shotplus-I. Además, se registraron las vibraciones del suelo inducidas por las voladuras de y se realizaron atenuando los orificios de perforación con el transportador de cinta y sacos de arena para prevenir la proyección de rocas. Tras la primera explosión, las siguientes cuatro se realizaron en un frente obstruido para limitar el alcance y la vibración del suelo hacia la estructura verde.

De acuerdo con este estudio, el uso inteligente de detonadores electrónicos, junto con un diseño adecuado e implementación cuidadosa, provee soluciones técnicas óptimas para realizar voladuras altamente controladas cerca de estructuras en construcción. El diseño de las voladuras permitió generar vibraciones del suelo inducidas por las explosiones inferiores a 3.1 mm/s y 2.3 mm/s a 50 m y 100 m del sitio de la explosión, respectivamente. Los niveles de vibración proyectados y observados fueron coherentes y dentro de los límites de umbral, mostrando que los detonadores electrónicos y el diseño inteligente son herramientas efectivas para realizar voladuras controladas cerca de estructuras en construcción sin impactos adversos.

En el estudio realizado por Ren *et al.* (2022) en China, se analizó el método Split Hopkins para evaluar el rendimiento de detonadores electrónicos bajo condiciones de alta sobrecarga e identificar el estado de fallo de cada componente del detonador electrónico. El análisis se llevó a cabo utilizando un módulo de control electrónico, que fue integrado con un

alambre de puente de níquel-cromo de 0.04 mm de diámetro. La metodología empleada incluyó la conexión de todos los detonadores electrónicos a una red para su posterior evaluación. Tras verificar la calidad de los detonadores, se programaron los tiempos de retardo a través de un controlador de iniciación y se verificó la contraseña de cada detonador. Cada detonador, una vez programado, iniciaba una cuenta regresiva hasta la detonación, gestionada completamente por el módulo de control electrónico, que también manejaba las funciones de detección, retraso y control de iniciación durante todo el proceso. Las conclusiones indicaron que el componente que más fácilmente falla es el alambre de puente en estado de retardo, con un fallo inicial en el suministro de energía del módulo de control electrónico, mientras que la función de comunicación del módulo de control electrónico es el segundo componente con más fallos. El punto menos vulnerable es el sitio de soldadura del alambre de conexión, que permanece firme incluso a sobrecargas de 46.62 decenas de miles de g. Aunque las limitaciones experimentales impiden simular con precisión el tiempo y la frecuencia de los pulsos de carga que el detonador electrónico experimenta en situaciones reales, los resultados proporcionan un enfoque útil para el análisis de fallas y la protección de detonadores electrónicos, ofreciendo también una base para soluciones de fiabilidad.

En el estudio realizado por Iwano *et al.* (2020), se llevaron a cabo pruebas de detonación en el sitio de construcción del túnel Aneigawa en Toyota, Japón, con el objetivo de evaluar los efectos de la vibración y tiempos de retardo óptimos con iniciación electrónica. Para esto, se utilizaron detonadores electrónicos como el modelo eDevII fabricado por

Orica Limited, los cuales permiten configurar tiempos de ignición a elección a fin de evaluar la vibración. Este avance tecnológico posibilita la ejecución de voladuras basadas en diseño y la medición de las formas de onda de vibración, tanto en voladuras de disparo único como en voladuras con retardo. La metodología implementada involucró el análisis detallado de las características de las formas de onda de vibración inducidas por los detonadores. Además, se compararon las formas de onda grabadas en las voladuras con retardo con aquellas calculadas mediante la superposición de una forma de onda base obtenida en la voladura de disparo único.

Los resultados del estudio revelaron que las formas de onda de vibración vertical en las voladuras con retardo y múltiples taladros pueden reproducirse superponiendo las formas de onda base registradas en las voladuras de disparo único. Se observó que la amplitud máxima de las formas de onda de vibración de cada uno de los taladros de carga sigue una distribución de Weibull y que el tiempo de propagación de la onda depende de la ubicación del taladro de voladura en la cara del túnel. Las conclusiones de la investigación indicaron que el intervalo de retardo óptimo determinado por el método de superposición es casi igual al obtenido mediante un método simple que utiliza el coeficiente de autocorrelación o un análisis de frecuencia de una forma de onda de vibración en una voladura de disparo único. Estos métodos simples fueron validados mediante su aplicación en otro sitio de construcción de un túnel, confirmando que la superposición es necesaria para obtener con precisión el intervalo de retardo óptimo; sin embargo, tanto el coeficiente de autocorrelación como el análisis de frecuencia pueden utilizarse como

métodos de estimación útiles para determinar el intervalo de retardo óptimo en la voladura práctica de disparo único en cada frente de túnel diariamente.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Peña (2019) llevó a cabo un estudio en la Fase 5 del Tajo Isabelita, situado en la mina El Toro, en La Libertad. El principal objetivo fue reducir el porcentaje de dilución del mineral al reemplazar los detonadores pirotécnicos por detonadores electrónicos con la hipótesis de optimizar de manera significativa la recuperación de mineral en el área de estudio. La metodología consistió en la recopilación y clasificación cuidadosa de los reportes de voladura correspondientes a los últimos seis meses en los que se usaron detonadores pirotécnicos y se analizaron comparativamente con las pruebas llevadas a cabo con detonadores electrónicos, a fin de evaluar el impacto de este cambio en la operación minera. Los resultados fueron altamente positivos puesto que el porcentaje de dilución de mineral con el uso de detonadores electrónicos mostró una reducción significativa comparado con los métodos anteriores. Esto resultó en un aumento en la recuperación de mineral de un 75% a un 93%. Estas cifras no solo demostraron una mejora en la eficiencia de la extracción, sino que también contribuyeron a un ahorro económico considerable. Los hallazgos indicaron que el uso de detonadores electrónicos en la Fase 5 del Tajo Isabelita resultó en una disminución del 17% en la dilución de mineral lo que permitió optimizar hasta en un 93% la recuperación del mineral. Adicionalmente, el uso de estos detonadores electrónicos generó un ahorro en los costos de perforación y voladura, alcanzando ahorros de 0.011 $/Ton y 0.013 $/Ton

respectivamente, lo que representa un 11% y 12% de reducción en costos comparado con el método de detonadores pirotécnicos. Se encontró que la viabilidad técnica y económica del uso de detonadores electrónicos en operaciones mineras establece un precedente importante para futuras investigaciones y aplicaciones en el sector minero.

En el estudio de Cueva y Herrera (2018), se estudió detalladamente la eficiencia de diferentes sistemas de iniciación en la fragmentación con el fin de determinar cuál resulta más efectivo en términos de productividad, fragmentación de la roca y optimización de costos en la unidad minera Yanacocha, ubicada en Cajamarca. La metodología empleada fue de carácter experimental y preexperimental, aplicativo y transversal. Se analizó la población de todas las voladuras llevadas a cabo en los tajos Tapado Oeste y Yanacocha durante los meses de febrero a abril del 2017. Los instrumentos utilizados para llevar a cabo las voladuras incluyeron diseños de carguío de taladros, detonadores no eléctricos EXSANEL y detonadores electrónicos DIGISHOT. Los resultados indicaron una mejora significativa utilizando el sistema de iniciación electrónica, destacando un P80 de 3.34” comparado con 3.9” usando detonadores pirotécnicos, lo que representa una optimización del 14.6% en la fragmentación. Aunque los costos iniciales de los detonadores electrónicos son superiores, estos se justifican ampliamente debido a las mejoras en los procesos subsecuentes de chancado y molienda. Las conclusiones del estudio revelaron que el sistema de iniciación electrónica no solo proporciona una mejor fragmentación, sino que también incrementa la productividad general en un 11.4% en comparación con el sistema pirotécnico. Además, se observó

que, a pesar del mayor costo unitario por taladro con detonadores electrónicos, este es recuperado en las etapas siguientes de la cadena de producción, mostrando mejoras significativas en la productividad de las palas, así como en los procesos de chancado y molienda. Los resultados, validados por monitoreo en tres puntos distintos, cumplen con los estándares de la normativa peruana, consolidando al sistema de iniciación electrónica como una opción más rentable y eficiente para la minería en Yanacocha.

En la investigación realizada por Mamani (2018) en la unidad minera Toquepala, ubicada en Tacna, se propuso evaluar la optimización de la fragmentación mediante el uso de detonadores electrónicos. El estudio se centró en dos niveles específicos, el 2800 y el 2785, en el primero se emplearon exclusivamente detonadores pirotécnicos, mientras que en el 2785 se utilizaron detonadores electrónicos, manteniendo en ambos la misma geometría en los diseños de perforación. La metodología empleada abarcó la observación y el método explicativo analítico y experimental, comparando ambos tipos de detonadores bajo idénticas condiciones de perforación. Los resultados indicaron que el uso de detonadores electrónicos redujo el porcentaje de material grueso de 7,10 % a 3,41 % y el tiempo de carguío de 1,91 minutos a 1,68 minutos. Además, se observó una disminución en el consumo de explosivos por tonelada y una reducción en las vibraciones de 129,7 mm/s a 111 mm/s, implicando menos daño al entorno del macizo rocoso. Los hallazgos destacan la eficiencia de los detonadores electrónicos en la optimización de la fragmentación, con una reducción significativa del tamaño de

fragmentación gruesa y una disminución de costos en el proceso de minado. Además, la implementación del sistema de voladura ajustado en términos de tiempo entre filas y la reducción del factor de carga resultaron en ahorros considerables y mejoras en la seguridad y eficacia de las operaciones mineras.

Vargas (2021) llevó a cabo un estudio comparativo y descriptivo correlacional en la Unidad minera Quellaveco, ubicada en Moquegua, con el objetivo de evaluar los métodos de iniciación pirotécnica y electrónica en voladuras, así como la aplicación de fragmentación con plasma para la reducción de vibraciones. El estudio fue realizado a fin de determinar cuál de los métodos de iniciación, ya sea electrónica o pirotécnica, ofrece mejores resultados en términos de fragmentación y reducción de vibraciones en puntos críticos, asimismo el estudio incluyó la exploración del uso de plasma en la fragmentación para comparar sus efectos con los de los métodos tradicionales. La metodología implementada involucró la recolección y comparación de información sobre los resultados de las voladuras con iniciación electrónica en el área 3000 (plantas) y las voladuras con iniciación pirotécnica en el área 4000. Este enfoque permitió una evaluación directa de la eficacia de cada técnica en el contexto de su aplicación real en la minería y los resultados indicaron que la iniciación electrónica es superior al método pirotécnico, destacando por su flexibilidad en la programación de tiempos y por generar menos vibraciones, lo que facilitó un mejor manejo de la energía liberada y reducción de los acoplamientos de tiempo entre taladros.

Este método también mostró un menor impacto en estructuras cercanas y geológicas, así como en centros poblados debido a la menor generación de vibraciones. Las conclusiones del estudio enfatizaron la recomendación de usar iniciación electrónica cuando el objetivo principal es minimizar los impactos por vibraciones, además se demostró que la fragmentación con plasma es una técnica segura y menos invasiva comparada con los explosivos tradicionales, destacando su capacidad de generar bajas vibraciones, la ausencia de emisión de gases nocivos y su menor impacto ambiental en términos de residuos peligrosos. El estudio halla evidencia significativa sobre la efectividad y beneficios de la iniciación electrónica y el uso de plasma en la fragmentación en minería superficial.

Flores (2022) realizó un estudio con el objetivo de determinar el efecto de la exactitud y precisión del iniciador electrónico sobre las propiedades geomecánicas en la optimización de la fragmentación del mineral en la Mina Cuajone, ubicada en la región de Moquegua. Para llevar a cabo esta investigación, se emplearon instrumentos como los iniciadores electrónicos I-KON III Extreme de Orica, con un margen de dispersión de 0.005%, y sistemas de iniciación “Blaster” y “Logger” IKON III. Además, se utilizó el programa Split-Online para el análisis de fragmentación en línea y cámaras de alta velocidad para capturar el tiempo de retardo en comparación con iniciadores no electrónicos. La metodología de la investigación fue de tipo aplicativa tecnológica, utilizando un diseño no experimental y relacional transversal. Los resultados destacaron diferencias significativas en el retardo por tipo de iniciador medido en

milisegundos, evidenciando un coeficiente de variación de 9.28% para los iniciadores no electrónicos frente a 1.17% para los electrónicos.

Las conclusiones del estudio indicaron que la precisión y exactitud del iniciador electrónico influyen positivamente en la optimización de la fragmentación del mineral. Se encontró que una mayor exactitud y precisión en la iniciación resultaron en una reducción de la fragmentación promedio de la roca, pasando de 7.24 a 6.4 pulgadas, lo que representa una mejora del 11.6%. Además, se observó una optimización de la fragmentación comparando las voladuras con retardos de 10 ms y 17 ms, siendo más efectivo el menor tiempo de retardo. Se concluyó que los iniciadores electrónicos, al tener menor dispersión, generan una mejor fragmentación confirmado por pruebas estadísticas.

2.1.3. Antecedentes regionales

Huincho (2022) estudió la optimización del proceso de perforación y voladura en la unidad minera Cerro Lindo, ubicada en Ica y operada por Nexa Resources S.A.A. El objetivo fue mejorar la eficiencia de avance y controlar la sobrerotura en los frentes de avance, así como evaluar las características geomecánicas que influyen en estos procesos, diseñar una malla de perforación y voladura adecuada, y mejorar la calidad del trabajo de los operarios. La metodología del estudio fue de tipo aplicada con un diseño experimental y la población abarcó todos los frentes de avance de la mina, mientras que la muestra específica incluyó el frente de avance del BP 700 en etapa de desarrollo.

La eficiencia de avance mejoró del 88.20% al 93.60%, alcanzando un avance promedio de 4.85 metros por disparo. Asimismo, el porcentaje de sobrerotura se redujo del 14.90% al 8.70%, con un ancho promedio de 5.29 metros y una altura de 4.62 metros. Además, se logró una reducción en la cantidad de *shotcrete* empleado de 1.7 m^3 a 1.6 m^3 por metro de avance, y la cantidad de carga por disparo disminuyó de 222 kg a 197.7 kg, correspondiente a un factor de carga de 1.88 kg/m^3 a 1.67 kg/m^3. Las prácticas implementadas, como el uso de plantillas para el arranque, guiadores, puntos de contra, líneas de dirección y cañas, mejoraron la calidad del trabajo de los operarios. Esto se reflejó en los resultados obtenidos, mostrando una mejora en la eficiencia de avance y un control efectivo de la sobrerotura.

Valdivia (2023) realizó un estudio con el objetivo de identificar las ventajas del empleo de detonadores electrónicos en comparación con los sistemas de iniciación no eléctricos (convencionales) y determinar en qué medida estos evitan los tiros quedados (TQ) en la operación minera. Se llevó a cabo en la mina a cielo abierto de Shougang Hierro Perú S.A.A. Zona Nueva, ubicada en Ica y se implementaron los detonadores electrónicos DaveyTronic, comercializados por Enaex. La investigación contempló una población de 20 voladuras, dividiéndose en una muestra de 10 voladuras realizadas con detonadores no eléctricos y 10 voladuras utilizando los detonadores electrónicos DaveyTronic. La metodología empleada fue tanto general (análisis y comparación) como científica. La recolección de datos se basó en información técnica, propiedades, ventajas y experiencia profesional con el uso de detonadores electrónicos en

voladuras de rocas dentro de operaciones mineras, contrastando estos datos con el sistema convencional de iniciación.

Los resultados mostraron que la implementación de detonadores electrónicos tuvo beneficios significativos en términos de seguridad, eficiencia, productividad y sostenibilidad ambiental. No se registraron tiros quedados (TQs), se logró una eficiencia en el proceso de liberación de mina a través de la voladura que generó 31 horas adicionales de producción al año solo en Mina 14. Además, se observó una mejora en la fragmentación con una reducción del P80 en un 21.2 % y una disminución en el registro de velocidad pico de partícula (VPP) debido a las vibraciones generadas por las voladuras. La utilización de detonadores electrónicos DaveyTronic en la Mina Shougang Zona Nueva demostró ser una estrategia superior frente a los métodos convencionales, mejorando significativamente diversos aspectos operacionales y reduciendo riesgos asociados a la minería a cielo abierto.

Molina (2023) realizó una investigación con el fin de establecer los resultados de la aplicación de voladura controlada en la corona con Famecorte E-20 en la Mina Cachicachi – Yauricocha, ubicada en la Unidad minera Cerro Lindo en Ica, proponiendo oportunidades de mejora en los indicadores clave de desempeño en las actividades de perforación y voladura. La investigación fue aplicada, correlacional y cuasiexperimental, utilizando una muestra censal que incluyó el Nivel 970, Piso 12, Rampa 1215 NE, Zona III, y el Cuerpo Karlita en la Mina Cachicachi - Yauricocha.

Los resultados demostraron que la aplicación del Famecorte E-20 reduce la existencia de pechos en hastiales y corona, y disminuye la sobre rotura en la corona en un promedio de 20 cm. Las pruebas mostraron ser favorables, destacando una propuesta de mejora continua que recomienda cambiar de 5 taladros cargados con Emulnor de 1000 de 1 1/8” x 12” y 4 taladros de alivio, a la realización de 6 taladros cargados con Famecorte E-20. Este cambio permitiría reducir el costo de perforación y voladura de 27.58 $/m a 23.13 $/m. Se identificó que la existencia de pechos en hastiales, corona y piso es causada por un exceso de *burden*, sugiriendo un correcto marcado de la cuadrícula en la malla de perforación. Además, el entubado de los taladros perforados en labores de calidad de roca IVA proporciona beneficios al evitar el taponamiento y facilitar el carguío, permitiendo también una reducción en el consumo de explosivos al sustituir cartuchos de 1 ½” x 12” 3000 por 1 ¼” x 12” 3000.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Detonadores electrónicos en minería superficial

Los detonadores electrónicos (DE) son una tecnología innovadora en sistemas de iniciación para voladuras, caracterizados por sustituir la tradicional pasta pirotécnica con un circuito electrónico controlado por microchip, en tanto cada detonador electrónico cuenta con un código único para su programación y activación posterior. Garai *et al.* (2018) caracterizan a los detonadores electrónicos como una evolución técnica diseñada para mejorar la precisión de los tiempos de detonación y con una capacidad de ofrecer un control exacto, necesario para lograr resultados de voladura

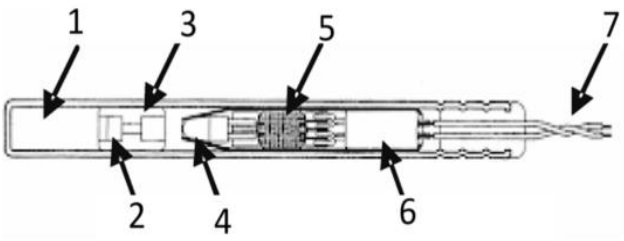
precisos y consistentes, aplicables en diversas áreas como la minería, la cantería y la construcción. Estos dispositivos pueden satisfacer la demanda de mayor precisión, pero su tecnología costosa ha limitado su crecimiento esperado.

En un detonador electrónico, el retardo se controla electrónicamente mediante un chip que regula los tiempos de detonación. Un circuito integrado y un condensador dentro de cada detonador controlan el momento de la iniciación. Gracias a esto, los detonadores electrónicos pueden ser programados en incrementos de 1 milisegundo, en un rango que va desde 1 hasta 10,000 milisegundos, utilizando un dispositivo de programación específico conocido como *logger* o unidad de programación. Esta alta precisión en los tiempos de retardo asegura que la dispersión de las detonaciones sea mínima, lo que contribuye a una mayor eficacia y seguridad en las operaciones de voladura (Iwano *et al.,* 2020).

A diferencia del detonador de retardo químico convencional, el detonador electrónico es controlado por un módulo de control electrónico para ejecutar diversas órdenes. No obstante, este puede ser vulnerable a sobrecargas por impacto e interferencias electrónicas durante el proceso de explosión lo que podría impedir lograr el efecto de voladura esperado, aunque el número de eventos de tiros cortados suelen ser menores que los detonadores convencionales (Ren *et al.,* 2019). El esquema de la estructura interna de un detonador eléctrico se muestra en la Figura 2.

Figura 2

Esquema de la estructura interna de un detonador electrónico



1. Carga primaria.
2. Carga iniciadora.
3. Tubo con elemento iniciador.
4. Pastilla de ignición.
5. Microchip.
6. Condensador.
7. Cables.

Nota. Adaptado de Cardu *et al*. (2013, p.376)

La temporización electrónica incluye detonadores eléctricos con un dispositivo de almacenamiento de energía para ignición y un temporizador programable, todo integrado con el sistema de programación, alimentación y activación. Esto permite al diseñador de voladuras decidir con precisión y flexibilidad la distribución de los tiempos de detonación. Sin embargo, dado que tanto los detonadores electrónicos como otros componentes del sistema (incluyendo al operador capacitado) son más caros que los sistemas convencionales, es necesario sopesar las ventajas de la detonación electrónica respecto a su mayor costo.

Los sistemas de iniciación electrónica están diseñados con altos estándares de seguridad para asegurar operaciones seguras y eficientes. Esto debido a dos componentes principales: la seguridad física inherente del sistema y la proporcionada por el programa y el detonador electrónico mismo. Estos sistemas también incorporan medidas de seguridad sofisticadas, como protección contra descargas eléctricas, sobrevoltaje, e inmunidad electromagnética, lo cual los hace más seguros y confiables.

Adicionalmente, cuentan con plataformas digitales que ayudan a controlar el acceso no autorizado y a asegurar que la integridad del sistema se mantenga durante su operación (Exsa S.A., 2019).

2.2.1.1. Explosivos en minería a tajo abierto

La minería a tajo abierto es una de las principales técnicas de extracción de materiales económicamente rentables, llevada a cabo directamente sobre la superficie del terreno. La Figura 3 muestra las operaciones de minería superficial de SHP en el distrito de Marcona, región de Ica.

Figura 3

Vista de las operaciones a tajo abierto de SHP en Marcona



Nota. Tomado de Proactivo (2024).

Tras evaluar la presencia de recursos en el yacimiento, se procede a preparar el área mediante maquinaria pesada, y en muchas ocasiones, el uso de explosivos se convierte en una herramienta fundamental para

desintegrar las formaciones geológicas que protegen el material valioso. Este tipo de minería implica la remoción diaria de grandes volúmenes de material a través del proceso de voladura, lo que exige una constante revisión de los costos operativos para asegurar la rentabilidad y sostenibilidad a lo largo de su ciclo de vida (Cueva y Huaynate, 2020, p.43).

La voladura en minería es un proceso importante que utiliza explosivos para fragmentar y remover masas rocosas, facilitando la extracción de minerales. Un explosivo es cualquier sustancia sólida o líquida, o una mezcla de ambas, que puede transformarse rápidamente en gases bajo la influencia de un estímulo. Este estímulo puede ser fricción, impacto, calor, o la introducción de un detonador, que inicia una onda de choque. Esta onda se propaga a través de la carga explosiva, generando una detonación que libera altas presiones y calor, desencadenando la fragmentación y desplazamiento de la roca.

El principio fundamental de este proceso radica en la energía explosiva, que es la característica más importante de cualquier mezcla explosiva utilizada. La energía explosiva es la energía química almacenada en el explosivo y que, durante la detonación, se libera en forma de calor, gases y ondas de choque. Esta energía se utiliza para realizar varios efectos sobre la roca, incluyendo (Vidal, 2020, p. 25):

- **Desmenuzamiento de la pared del taladro:** La energía genera una presión intensa que pulveriza el material rocoso adyacente al barreno o taladro donde se ubica el explosivo.

- **Formación de fracturas:** La detonación induce fracturas radiales y tensionales en la roca, facilitando su fragmentación.

- **Corte**: La acción de la energía explosiva genera líneas de corte en la roca, creando bloques más manejables para su extracción.

- **Generación de calor y luz**: Como resultado de la reacción explosiva, se libera una cantidad significativa de calor y luz.

- **Movimiento de la masa rocosa:** El volumen de gases generado empuja y desplaza la roca fragmentada.

- **Vibración del terreno**: La liberación de energía provoca vibraciones en el suelo, que pueden propagarse a áreas circundantes.

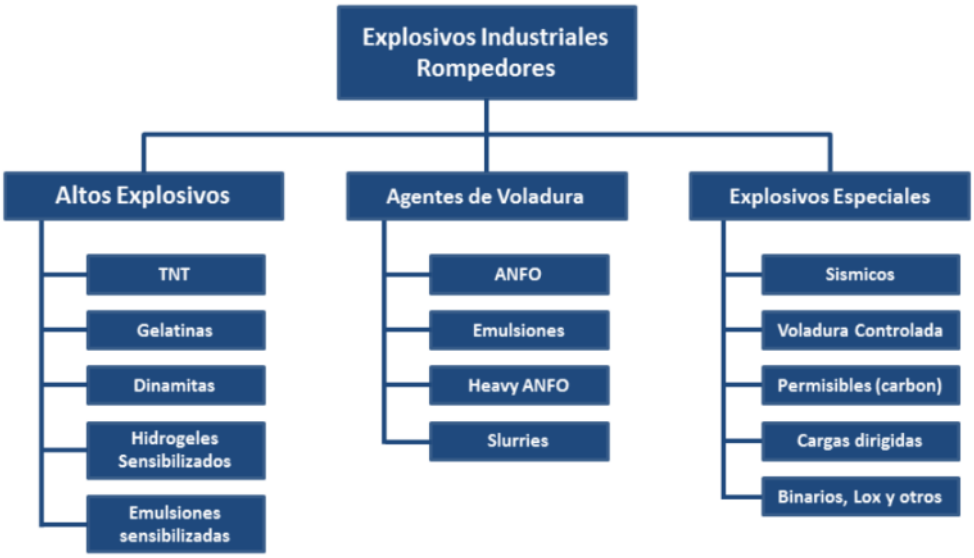
- **Golpe de aire:** La detonación genera una onda expansiva que se manifiesta como un golpe de aire en la superficie.

La energía explosiva se libera de dos principales formas. La primera es la presión de detonación o la fuerza que se genera en el momento de la explosión, ejerciendo una presión intensa que fragmenta la roca en partículas más pequeñas. Esta presión genera para el desmenuzamiento del material circundante al taladro. La segunda es presión de taladro, la cual es el resultado de la expansión de los gases generados por la detonación. Estos gases son responsables del desplazamiento de la roca, ya que su expansión genera el movimiento de grandes volúmenes de material rocoso.

La selección adecuada de explosivos y la planificación precisa de la voladura influyen en la optimización del proceso de fragmentación, controlar los efectos colaterales (como vibraciones y golpes de aire, o *airblasts* en inglés), y asegurar la seguridad en la operación minera. Para esto se utilizan diversos explosivos industriales, clasificados en la Figura 4.

Figura 4

Clasificación de explosivos industriales



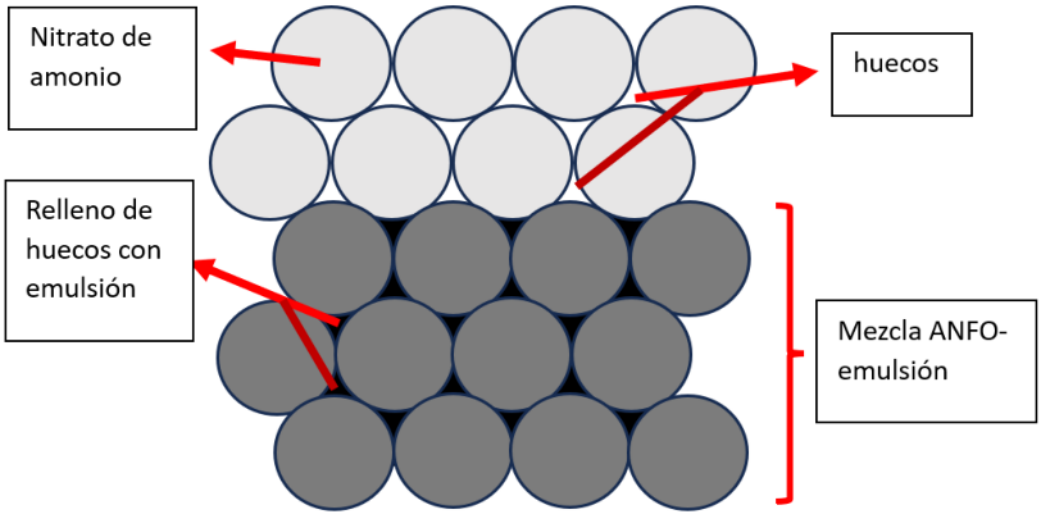
Nota. Tomado de Alcalde (2019, p.22).

En la zona de desmonte, el área de estudio, se utiliza ANFO pesado, también conocido como *Heavy ANFO*, en inglés. El ANFO pesado es un tipo de explosivo ampliamente utilizado en la minería a tajo abierto en Perú, debido a su versatilidad y capacidad de ajuste según las condiciones del terreno y las necesidades de la voladura. Este explosivo es una mezcla de ANFO (nitrato de amonio y *fuel oil*) con emulsión base, en la cual los espacios intersticiales entre los *prills* de ANFO, que son pequeños gránulos de nitrato de amonio, se rellenan con la emulsión

líquida. Este proceso convierte al ANFO pesado en una matriz energética más potente, ya que la emulsión contribuye a mejorar las propiedades detonantes de la mezcla (Alcalde, 2019, p.25). La Figura 5 representa la estructura general del ANFO pesado

Figura 5

Estructura general del ANFO pesado de Bampfield y Morrey



Nota. Elaboración propia en base a Bampfield y Morrey (1984).

La cantidad de emulsión en la mezcla de ANFO pesado es un factor crítico, ya que permite ajustar tanto la energía de la explosión como la sensibilidad del explosivo. A mayor cantidad de emulsión, el ANFO pesado se vuelve más sensible a los estímulos detonantes, lo que mejora su rendimiento. Además, la emulsión incrementa la resistencia al agua, un atributo fundamental cuando se trabaja en zonas donde el terreno presenta niveles freáticos elevados o condiciones de humedad. La emulsión impide que el ANFO absorba agua, lo que podría deteriorar su capacidad explosiva.

El ANFO pesado también ofrece la ventaja de permitir la variación de energía a lo largo del taladro de voladura, lo que optimiza el uso del explosivo en función de la naturaleza de la roca y la ubicación de los puntos de fractura deseados. De esta forma, es posible cargar los taladros con diferentes concentraciones de emulsión y ANFO, ajustando la energía liberada durante la detonación en zonas específicas de la roca. Esta flexibilidad no solo maximiza la eficiencia de la voladura, sino que también contribuye a un control más preciso de las vibraciones y del desplazamiento de material.

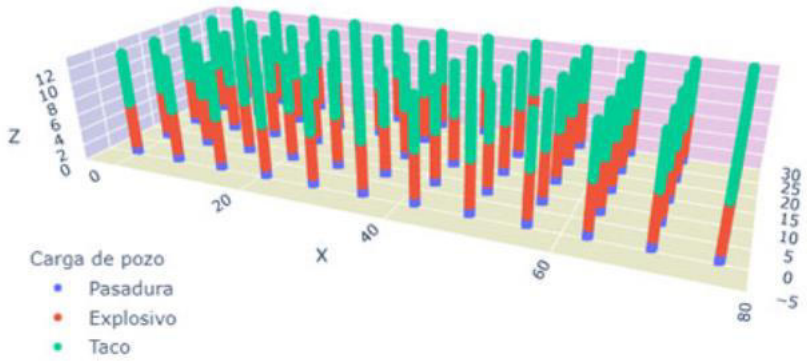
En comparación con el ANFO convencional, el ANFO pesado genera una mayor cantidad de energía, lo que se traduce en una voladura más eficiente y fragmentada. Esto resulta especialmente útil en condiciones geológicas difíciles, donde se requiere mayor potencia para fracturar la roca de manera adecuada.

Malla de Perforación

La malla de perforación se refiere a la distribución estratégica de taladros en un área específica como se muestra en la Figura 6, cuyo objetivo es permitir la fragmentación eficiente del macizo rocoso mediante el uso de agentes de fragmentación, como explosivos. Estos taladros son diseñados tomando en cuenta una serie de parámetros que varían según las características del terreno y los equipos disponibles. Entre los aspectos clave a considerar en su diseño están el *burden* o distancia entre el taladro y la cara libre de la roca, el espaciamiento entre taladros, la longitud del taladro, el ángulo de inclinación, el diámetro de la perforación y el tipo de roca a tratar (Cueva y Huaynate, 2020).

Figura 6

Esquema de una malla de perforación para producción en minería a cielo abierto



Nota. Tomado de NubeMinera (2024).

Cada uno de estos factores debe ser cuidadosamente ajustado para asegurar que la fragmentación sea efectiva y controlada. El objetivo principal de una malla de perforación bien diseñada es garantizar que la roca se fragmente de manera adecuada, optimizando tanto la perforación como el uso del material explosivo. Una correcta distribución de los taladros evita problemas posteriores a la voladura, como la formación de bancos residuales o inestables, y ayuda a reducir los efectos secundarios no deseados, como vibraciones excesivas, golpes de aire o la proyección de fragmentos de roca.

El procedimiento para implementar una malla de perforación comienza con el marcado del terreno de acuerdo con el diseño previamente elaborado. Luego, se traslada el equipo necesario al frente de trabajo, donde se posiciona adecuadamente para iniciar las perforaciones. A continuación, se suministran los materiales necesarios a las máquinas, como agua y aceite, que se inyectan durante la perforación para reducir la

fricción entre la broca y la roca. Este proceso debe ser preciso para garantizar que la perforación sea eficaz y segura.

2.2.1.2. Ventajas de los detonadores electrónicos frente a los convencionales

Los detonadores electrónicos ofrecen ventajas significativas para la voladura en operaciones de minado frente a los detonadores convencionales, enfocándose principalmente en la precisión y control del proceso. Al incorporar tecnología electrónica digital, estos detonadores transforman un proceso estocástico como la voladura en una operación altamente controlable. Su capacidad de programación permite ajustar la secuencia de detonación con exactitud, lo que es esencial para optimizar la fragmentación del material y minimizar efectos indeseados como las vibraciones (Agrawal y Mishra, 2020).

Los detonadores electrónicos ofrecen varias ventajas, como mayor precisión, mejor resultado de voladuras gracias a un amplio rango de retardos, reducción de vibraciones y ondas aéreas, uso seguro en entornos difíciles y la posibilidad de limitar la cantidad de detonadores por disparo. Otros beneficios del uso de detonadores electrónicos incluyen la sincronización precisa, que permite una mejora en la fragmentación y control de la sobrepresión. No obstante, también presentan desventajas, como su mayor costo por detonador y la necesidad de una formación intensiva para los usuarios.

Además, la capacidad de ajustar los niveles de ruido y de vibración, junto con una mayor flexibilidad en el uso de tiempos de retardo, contribuye a una gestión más eficiente y adaptativa de los almacenes, optimizando así

los recursos y mejorando la seguridad global (Exsa S.A., 2019). Aunque su costo inicial es superior al de los detonadores pirotécnicos convencionales, el uso de detonadores electrónicos y programas de diseño especializado proporciona una mayor flexibilidad y eficacia. Esto se traduce en una reducción de los costos globales de la operación minera, haciendo de la inversión inicial en tecnología una decisión rentable a largo plazo.

Otra gran ventaja de los detonadores electrónicos es su seguridad frente a radiación de radar u otras interferencias electromagnéticas, así como su resistencia a disparos accidentales causados por baterías u otras fuentes eléctricas. Además, la organización precisa y variable de los retardos mejora la estabilidad de los taludes y la preservación de los bordes, lo que resulta en operaciones mineras más seguras y en una menor vibración inducida por las explosiones. Estas mejoras permiten una colocación más precisa de los barrenos en voladuras secuenciadas.

2.2.1.3. Diferencias entre detonadores electrónicos y convencionales

La principal diferencia entre un detonador electrónico y uno no electrónico radica en el mecanismo de temporización utilizado para iniciar la voladura que incide en la exactitud de la secuencia de detonación. Incluso una inexactitud de unos pocos milisegundos en la secuencia de temporización puede generar errores significativos en la predicción de la propagación de la onda de choque en la roca o en el avance de una fractura.

Mientras que en los detonadores no electrónicos el retardo se determina por la velocidad de consumo de una sustancia pirotécnica en un casquillo metálico, en los electrónicos este retardo es controlado por un

circuito electrónico que descarga un condensador de manera precisa mediante un microchip. Cada detonador electrónico es identificado con un código único para su programación y disparo posterior. Y aunque la carga explosiva es comparable entre ambos tipos de detonadores, la precisión en los tiempos de retardo alcanza un 0,02 % en los electrónicos, considerablemente superior a la de los no electrónicos, que sufren de dispersión en sus tiempos de disparo debido a variaciones en la velocidad de consumo de la sustancia pirotécnica (Peña, 2019). La Tabla 2 muestra las principales características y diferentes funcionamientos de los sistemas de detonación.

Tabla 2

Comparación de distintos sistemas de detonación

Sistemas de detonación	Componentes
Eléctrico con elementos de retardo pirotécnico	Máquina de voladura, cables, pastilla de ignición, elemento de retardo, carga NP (No Primaria) primaria o especial.
Eléctrico con circuitos separados alimentados en secuencia	Máquina de voladura (incluyendo un temporizador), cables, pastilla de ignición, carga NP primaria o especial.
No eléctrico con tubo de choque y elementos de retardo pirotécnico	Cualquier fuente de choque de cebado, tubos de choque, elementos de retardo pirotécnico, carga detonante primaria o NP especial (para ramificación y detonación de la carga principal).
No eléctrico con cordón detonante y elementos de retardo pirotécnico	Cualquier tipo de detonador, cordón detonante, elementos de retardo pirotécnico (relés).
Mecha de seguridad	Dispositivos de ignición de mecha, mecha, cápsulas detonantes.
Sistemas mixtos	Comprendidos por una combinación de los anteriores sistemas.

Nota. Adaptado de Cardu *et al.* (2013, p.375)

2.2.1.4. Principales factores para la eficiencia de la voladura

Los principales factores que influyen en la eficiencia de las voladuras en minería relacionan con el control de calidad, la distribución de energía de los explosivos, el confinamiento de dicha energía y el nivel de energía explosiva aplicada. A continuación, se describen los aspectos más importantes que deben considerarse para optimizar el rendimiento de las voladuras, basados en los principios técnicos de diseño y ejecución (Vidal, 2020, p. 27).

Control de calidad en voladuras.

El control de calidad en cada fase del proceso influencia significativamente la efectividad de las voladuras. La eficiencia de una voladura depende de un trabajo coordinado con supervisores, técnicos y operadores, donde una comunicación clara y fluida entre los diferentes grupos involucrados es necesario para asegurar un resultado óptimo y seguro. Esto implica que cada paso del proceso debe ser completado de manera consistente, ya que cada operación impacta el resultado de la siguiente. Para asegurar un alto control de calidad, los procedimientos de diseño e implementación de las voladuras deben estar claramente definidos, documentados, seguidos y auditados regularmente. Además, es necesario un enfoque de mejora continua en el proceso de ejecución de voladuras.

Distribución de la energía de los explosivos

Una distribución uniforme de la energía de los explosivos en la masa rocosa influye en una fragmentación homogénea. Algunos factores

críticos que afectan esta distribución incluyen la relación adecuada entre el diámetro del barreno y la altura del banco, así como los bordos y espaciamientos. Además, es importante implementar cuidadosamente el diseño de la voladura, ajustando la dirección de perforación si es necesario para mejorar la distribución de la energía.

Confinamiento de la energía del explosivo

El confinamiento adecuado de la energía explosiva después de la detonación se relaciona con la óptima generación fracturas y el desplazamiento del material de manera efectiva. El paso de menor resistencia del explosivo debe estar bien controlado, y los barrenos deben ser cargados según las condiciones geológicas del lugar. Para optimizar el confinamiento, es importante elegir el material y la longitud de taco adecuados y configurar los tiempos de retardo con precisión, ajustándolos a las condiciones específicas del terreno.

Nivel de energía explosiva

El nivel de energía explosiva debe ser suficiente para superar la resistencia de la estructura rocosa y asegurar el desplazamiento controlado del material. Este nivel de energía se determina en función del grado de fragmentación y el desplazamiento deseado. Factores como la sensibilidad del sitio y las condiciones geológicas, las propiedades mecánicas de la roca, incluyendo bordos excesivos, pisos irregulares, también deben tenerse en cuenta al seleccionar el tipo de explosivo. Fisuras, fracturas y planos de debilidad pueden influir en la propagación de la onda explosiva, afectando la distribución de energía.

2.2.1.5. Efecto de la precisión de los detonadores en la eficiencia de las voladuras

El control preciso de las voladuras incide en la seguridad y la productividad de las operaciones mineras debido a que su capacidad de programación y precisión de los detonadores, combinada con el programa de diseño, ofrece flexibilidad durante la fase de planificación de secuencias de detonación (Mishra *et al.*, 2017). La precisión de los tiempos de detonación elimina muchos efectos aleatorios, siempre que se cuide también la secuenciación correcta de la voladura, la perforación, la carga y el tapado. En general, una secuenciación precisa y flexible permite a los técnicos ajustar pequeños cambios de taladro a taladro o de fila a fila para corregir inexactitudes en la perforación. Ajustar el diseño de la voladura a las condiciones reales mejora la seguridad y la fragmentación, lo que puede reducir costos al optimizar el ciclo de carga y transporte, aumentar el rendimiento del proceso de chancado y reducir la manipulación de material sobredimensionado y la necesidad de rechancado.

La optimización del diseño de voladuras para aprovechar la precisión de los detonadores electrónicos permite ampliar el patrón de voladura y reducir el consumo de explosivos sin afectar negativamente la producción. Los detonadores electrónicos permiten un control más fino sobre la secuencia de detonación, minimizando la variabilidad en la liberación de energía y mejorando la capacidad para adaptarse a las características específicas del terreno y del mineral. El control preciso del retardo en el encendido de las cargas durante las voladuras es un factor importante para optimizar los resultados en operaciones mineras y de

construcción. Esta técnica permite no solo ajustar los tiempos entre las detonaciones de los barrenos, sino también dirigir de manera específica la salida de la voladura y el movimiento del material. Al secuenciar la detonación de los barrenos en bancos, se puede modificar de manera controlada los patrones de perforación, mejorando la fragmentación y reduciendo proyecciones no deseadas y vibraciones. La utilización de detonadores electrónicos con retardos precisos y altamente flexibles facilita crear esquemas de voladura más eficientes, minimizando impactos ambientales y optimizando la manipulación del material volado (Ren *et al.*, 2022).

Un mal ajuste de los tiempos de detonación (ya sea un intervalo demasiado largo o demasiado corto) puede afectar el resultado de la voladura de varias maneras. El efecto sísmico puede incrementarse debido a interacciones de ondas de choque no deseadas o porque la carga real supera la carga planeada (es decir, la roca que debería haberse roto con la explosión previa sigue en su lugar), o por efectos de interferencia positiva. Asimismo, el *flyrock* puede aumentar, ya sea porque la remoción de roca por la explosión anterior esté demasiado avanzada o porque sea insuficiente. En el primer caso, la carga es demasiado pequeña; en el segundo, demasiado grande, lo que puede provocar la expulsión del tapado. Por último, un desequilibrio entre las cargas en la voladura puede causar efectos de retroceso localizados e irregularidades en el frente residual, así como fragmentación irregular, incluso cuando las cargas se midieron correctamente.

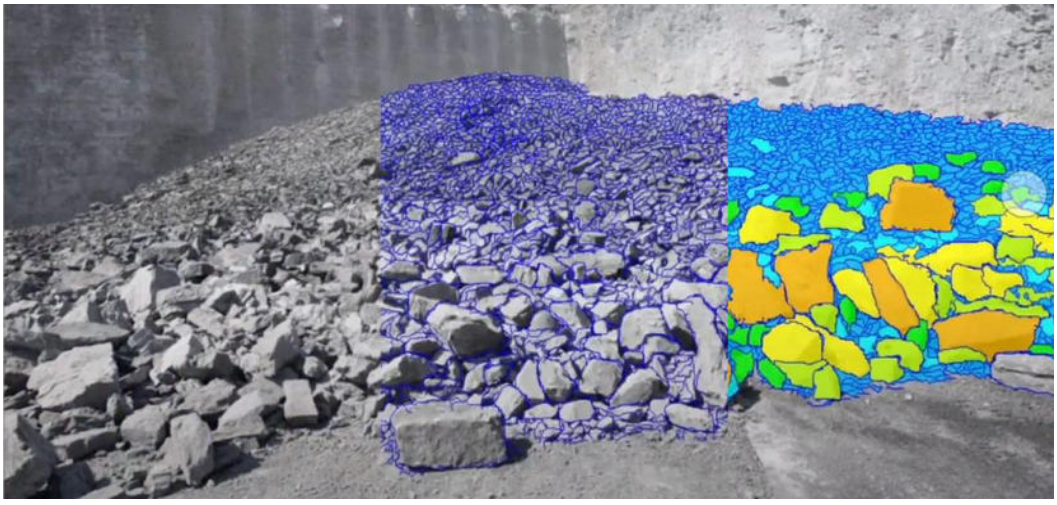
2.2.2. Eficiencia operativa de las actividades de perforación y voladura en minería a cielo abierto

2.2.2.1. Granulometría

La granulometría en minería se refiere a la distribución de tamaños de los fragmentos de roca resultantes de una voladura y está definida por la distribución de tamaños de la pila de material fragmentado (Roy *et al.*, 2020). Su importancia radica en que incide directamente en el proceso de tratamiento posterior en las plantas de chancado y molienda. En este sentido es importante contar con herramientas que puedan proporcionar una evaluación aproximada pero efectiva de la granulometría mediante técnicas digitales, como la adquisición y procesamiento de imágenes con WipFrag™ mostrado en la Figura 7. Estas técnicas permiten obtener curvas granulométricas precisas mediante el análisis de fracciones representativas de la voladura, facilitando así decisiones informadas en el manejo y procesamiento del material.

Figura 7

Análisis de la granulometría a través de WipFrag™



Nota. Adaptado de WipWare (2016, 1m13s).

2.2.2.2. Fragmentación

En la minería a cielo abierto, el término fragmentación se refiere a la medida promedio del tamaño de las rocas después de una voladura. Este tamaño puede variar, y se utiliza a menudo de manera comparativa, hablando de fragmentación "buena" o "mala". Una buena fragmentación se define como aquella en la que el tamaño de los fragmentos producidos es el adecuado para ser manejado por el equipo disponible, como el tamaño de la cuchara de la máquina de carguío, la capacidad de los camiones y las maquinarias de chancado y molienda.

La fragmentación resultante no solo depende de la cantidad de explosivo usado, sino también de factores geológicos y técnicos. Esto incluye las discontinuidades geológicas naturales, como la composición y disposición de las rocas, la frecuencia y el espaciado de las discontinuidades, la carga de los explosivos y la precisión de los detonadores. Otros factores relevantes incluyen el espaciado entre los taladros, la línea de fractura, la disponibilidad de caras libres de roca y en general del diseño de carga explosiva (Singh *et al.*, 2019).

2.2.2.3. Costo de voladura

Es una estimación de todos los gastos asociados con la ejecución de actividades de perforación y voladura. Este costo incluye la adquisición de los explosivos, los accesorios de iniciación, y el personal técnico especializado necesario para planificar y ejecutar las detonaciones de manera segura y efectiva. También se consideran los costos indirectos, como el impacto de la voladura en la productividad general de la mina, el

grado de fragmentación de la roca y cualquier daño colateral a la infraestructura cercana o al medio ambiente. Optimizar estos costos significa mejorar la eficiencia de la voladura para maximizar la fragmentación mientras se minimizan los efectos no deseados y los costos de producción (Huamani, 2021).

Método de costos por proyecto similar

El método de costeo por proyecto similar es una técnica de estimación de costos utilizada cuando se enfrenta un nuevo proyecto que tiene características comparables a otro existente cuyos costos ya son conocidos. Este método aprovecha la información disponible de un proyecto previo y realiza ajustes para acomodar las diferencias específicas del nuevo proyecto. Los principales criterios son adaptación y extrapolación de los datos y se parte de costos base conocidos y se realizan estimaciones para los costos generales, adaptándolos a través de correlaciones entre los diferentes componentes del proyecto (Alegre, 2023).

2.2.2.4. Impacto en la seguridad y el ambiente

A pesar de los beneficios de la voladura como una técnica eficiente de excavación, el principal inconveniente de este método radica en la vibración del terreno inducida, que ocasionalmente podría afectar la seguridad estructural durante las actividades de excavación, o podría causar daños considerables en la roca y el ambiente cercano. Estos efectos secundarios adversos de la voladura pueden resultar en un aumento de los costos de explotación y en una disminución de la estabilidad estructural (Garai *et al.* 2018).

Vibración y Velocidad Pico Partícula (PPV)

Las vibraciones del suelo son causadas por explosiones, y en particular la velocidad pico partícula (PPV) y son monitoreadas con indicadores de seguridad en las actividades de voladura. El control de este valor busca minimizar el daño en estructuras residenciales y sensibles cercanas y no solo sirve para evaluar el daño potencial, sino que también se utiliza para investigar el rendimiento de los explosivos en las voladuras. Los factores como la cantidad de explosivos detonados en un momento dado, la distancia desde el punto de interés, los intervalos de retardo y la geología local desempeñan un papel fundamental en la generación de estas vibraciones (Agrawal y Mishra, 2020).

La caracterización de las vibraciones del suelo inducidas por explosiones depende de la implementación de tiempos de retardo óptimos entre los agujeros de voladura adyacentes y las filas de estos agujeros. Se cree que un ajuste adecuado en la sincronización de estos tiempos permite una mejor utilización de la energía explosiva, lo que resulta en una fragmentación efectiva de la roca con niveles más bajos de vibración. Además, una combinación adecuada de carga de explosivo y tiempo de retardo es importante, ya que proporciona el espacio necesario para la expansión de la masa de roca, especialmente en explosiones de múltiples filas. Sin embargo, errores en la sincronización causadas por la dispersión e inexactitud de los detonadores puede aumentar la velocidad de partícula y disminuir la eficiencia de la voladura.

El desafío de predecir con precisión la magnitud de la vibración, es decir, la PPV, es considerable y sigue siendo objeto de extensas

investigaciones que buscan resolver problemáticas sobre la predicción precisa de vibraciones, incluyendo diferencias entre registros en campo cercano y campo lejano, la distinción entre tipos de cargas explosivas largas y cortas, y la determinación de límites de vibración para evitar daños por voladuras. Además, se estudia el impacto del tiempo de retardo y su variabilidad en la magnitud y comportamiento de la vibración del suelo inducida por explosiones (Garai *et al.*, 2018).

2.2.2.5. Detonadores y vibraciones

Las diferencias en el nivel de vibración al usar diferentes sistemas de iniciación se deben principalmente a la dispersión en el tiempo de retardo causada por el uso de diferentes cápsulas en los sistemas de iniciación. Este efecto de dispersión del tiempo de retardo conduce a la superposición de los agujeros de detonación, lo que resulta en un aumento de la carga por retardo real respecto a lo diseñado. El sistema de iniciación electrónica se destaca por su precisión en los tiempos de retardo, con una dispersión muy limitada de las cápsulas. Lo que permite a los ingenieros de voladuras diseñar explosiones con la carga por retardo requerida sin superposición de agujeros, mientras que otros sistemas de iniciación, como el cordón detonante con relevo de cordón y el tubo de choque, muestran una dispersión significativa en sus tiempos de retardo (Garai *et al.*, 2018).

2.2.2.6. Proyección de rocas

Este fenómeno, también conocido como *flyrock,* es la proyección inesperada de piedras que ocurre durante la voladura en la cual algunos pedazos de piedra se desprenden y pueden viajar grandes distancias.

Estas son expulsadas a grandes velocidades y pueden alcanzar distancias de hasta 400 metros o más, causando daños a edificios, equipos y, en situaciones desafortunadas, incluso la muerte de personas y animales. La aparición de *flyrock* se debe principalmente a la liberación de la energía de la explosión a través de un camino estrecho de menor resistencia en la masa rocosa. Varios factores influyen en su ocurrencia, incluyendo la carga inadecuada y la separación entre taladros, barrenos sobrecargados, características geológicas del sitio, perforaciones inexactas y taponamientos, tiempos de retardo defectuosos y superposición de los mismos, secuencias de iniciación inapropiadas, y a veces, montones de rocas sueltas que se encuentran en la parte superior del banco o a lo largo de la pendiente, que también se convierten en un peligro potencial (Silva *et al.*, 2018).

2.2.2.7. Influencia de la geología

La geología del terreno influye significativamente en la eficiencia y resultados de la operación, muchas veces incluso más que las propiedades de los explosivos utilizados. La estructura y las propiedades de las rocas determinan cómo se comportan durante una voladura, afectando directamente la fragmentación obtenida.

En primer lugar, la resistencia compresiva, que mide la capacidad de la roca para soportar cargas de compresión, es uno de los factores más importantes. Por otro lado, la resistencia a la tensión, que mide la capacidad de la roca para resistir fuerzas que intentan separarla, suele ser mucho menor, generalmente una décima parte de la resistencia compresiva. Esto

significa que una roca puede ser más susceptible a fracturarse cuando se somete a fuerzas de tensión (Vidal, 2020, p. 28).

La resistencia al corte es otra propiedad importante, ya que determina la capacidad de la roca para resistir fuerzas aplicadas de manera lateral. Esta resistencia se utiliza para evaluar la estabilidad del macizo rocoso durante la voladura. De igual manera, el coeficiente de Poisson, que describe cómo se deforma lateralmente la roca cuando se somete a una carga longitudinal, determina la idoneidad de aplicar técnicas como el precorte. Cuanto menor sea este coeficiente, más favorable será la roca para estas técnicas.

El módulo de Young, o la medida de elasticidad de la roca, refleja su capacidad para resistir deformaciones. Un valor elevado de este parámetro indica que la roca será más difícil de fracturar, ya que presenta una mayor rigidez. Otra propiedad importante de la roca es la densidad, ya que una mayor densidad puede influir en la propagación de las ondas de detonación. Otro factor es la velocidad longitudinal de las ondas sísmicas a través de la roca. En formaciones masivas, la velocidad de detonación del explosivo debe superar esta velocidad de onda para asegurar una buena fragmentación de la roca. Si esto no se logra, el resultado de la voladura puede ser subóptimo, con fragmentos más grandes y menos uniformes.

A pesar de que todas estas propiedades de la roca pueden ser medidas en laboratorio, la correlación directa entre estos valores y la fragmentación observada no es exacta ni precisa. Los intentos de predecir con precisión la fragmentación basándose únicamente en los parámetros geológicos han sido limitados, debido a la compleja interacción entre la

geología y las condiciones dinámicas de la voladura. Es necesario realizar ajustes continuos en el diseño de voladuras en campo, tomando en cuenta no solo las características del explosivo, sino también las condiciones geológicas específicas del sitio.

2.3. Definición de términos

Burden

Término en inglés que se refiere a la distancia desde un taladro cargado con explosivos hasta la superficie libre más próxima de la roca, perpendicularmente. Esta distancia influye en la resistencia que el material opone a la fuerza de la explosión y, por ende, en la fragmentación de la roca, el control de la proyección de los fragmentos y las vibraciones generadas por la explosión. Su valor se elige basándose en el diámetro del taladro y las características del material a fragmentar (Al-Bakri y Hefni, 2021).

Barreno

Perforación con taladros en la roca, donde se colocan los explosivos para la ejecución de la voladura (Exsa S.A., 2019).

Carga operante

Es la cantidad de explosivo máxima utilizada en un intervalo de tiempo generalmente de 8 ms, tiene influencia directa en la fragmentación y vibraciones (Silva *et al.*, 2018).

Costo de voladura

Se refiere al gasto total asociado con el proceso de voladura en una operación minera. Esto incluye los costos de los explosivos, la perforación, la mano de obra y otros costos indirectos relacionados (Huamani, 2021).

Detonador electrónico

Sistema de iniciación de voladuras avanzado caracterizado por su exactitud, precisión y flexibilidad en el manejo de tiempos. Esta tecnología permite programar y almacenar con antelación los tiempos de detonación específicos sobre dispositivos de memoria electrónicos. Estos detonadores ofrecen beneficios significativos sobre los métodos convencionales al proporcionar retrasos ajustables con exactitudes de milisegundos, permitiendo un control más afinado y seguro de las operaciones de voladura (Garai *et al.*, 2018).

Diámetro de broca

Es el diámetro de la herramienta de corte utilizada para realizar los barrenos en la roca y su diámetro seleccionado puede influir en la carga de explosivo necesaria y en la fragmentación de la roca (Exsa S.A., 2019).

Diseño de carga

Es la planificación y distribución de los explosivos dentro de los barrenos. El diseño incluye la selección del tipo de explosivo, la cantidad, la ubicación de la carga dentro del barreno (como la profundidad de la carga y la cantidad de taco), y la secuencia de detonación. Este diseño busca maximizar la eficiencia de la voladura reduciendo los costos y mejorando la fragmentación de la roca (Roy *et al.*, 2020).

Diseño de taco

Relleno de la parte superior del taladro con material inerte para optimizar la utilización de la energía generada por los explosivos y controlar

la dispersión de los gases durante la detonación. Este material, que puede consistir en detritos de la perforación, arcillas o piedra triturada, actúa como un sello temporal que retiene los gases solo por un breve período, esencial para asegurar que la energía se concentre en romper y desplazar la roca de manera efectiva, en lugar de escapar al ambiente. La longitud del taco es el parámetro más importante y varía dependiendo de la resistencia y el tipo de roca (Huincho, 2022).

Dispersión

Se refiere a la variación en los tiempos de retardo entre detonadores que deberían actuar de manera secuencial pero que presentan diferencias mínimas debido a variaciones en la fabricación o en su configuración. Esto puede llevar a que algunos detonadores se activen antes o después de lo esperado por un margen que puede ser mayor al tiempo nominal establecido. La dispersión influye en la superposición de ondas explosivas que podrían causar una detonación no deseada o un uso ineficiente de la energía explosiva. Se acepta internacionalmente una variación de ±5%, aunque puede llegar hasta el 10% y para prevenir problemas asociados a la dispersión, como la superposición o la vibración excesiva del terreno, se recomienda mantener una diferencia mínima de 8 ms entre detonaciones sucesivas (Silva *et al.*, 2018).

Espaciamiento

Distancia entre los taladros adyacentes en un patrón de perforación. Este influye en la fragmentación y transferencia de energía entre los taladros durante la detonación. Un espaciamiento incorrecto

puede llevar a una fragmentación ineficiente y aumento del costo de producción (Roy *et al.*, 2020).

Fragmentación

Es el resultado de la voladura, donde la roca es dividida en piezas más pequeñas. La calidad de la fragmentación es determinante para la eficiencia de las operaciones subsiguientes como el carguío, acarreo y chancado. Una buena fragmentación reduce la necesidad de procesamiento adicional y mejora la eficiencia general del ciclo de minado (Flores, 2022).

Granulometría

Se refiere a la distribución de tamaños de los fragmentos de roca resultantes de la voladura. La granulometría es evaluada para determinar si cumple con los requisitos específicos para el proceso siguiente, ya sea para tratamiento o venta. Una granulometría adecuada ayuda a optimizar los procesos de chancado y molienda, reduciendo los costos operativos (Mamani, 2018).

P80

Es una medida granulométrica que indica que el 80% de los fragmentos de roca resultantes de la voladura tienen un tamaño igual o menor a este valor. Es un indicador importante de la efectividad de la voladura en cuanto a la fragmentación deseada y se utiliza para ajustar parámetros de la voladura y asegurar que la fragmentación sea adecuada (Tafur y Mautino, 2022).

Precisión de detonadores

Se refiere a la capacidad de los detonadores para explotar con exactitud en el tiempo predeterminado e influye en el control de la secuencia de las explosiones, la optimización de la fragmentación y las vibraciones (Agrawal y Mishra, 2020).

Proyección de rocas

También llamado *flyrock* en inglés, se refiere al desplazamiento no deseado de fragmentos de roca más allá del área controlada de la voladura. Aunque un diseño de voladura adecuado puede reducir la incidencia de proyecciones, es casi imposible eliminarlas por completo. En voladuras de banco bien controladas, se estima que la proyección típica puede alcanzar distancias de hasta cinco veces la altura del banco (Alcalde, 2019).

Tiempo de retardo

Es el intervalo de tiempo establecido entre la detonación de cargas explosivas en diferentes barrenos o en diferentes filas de barrenos. Los tiempos de retardo permiten controlar la propagación de la energía de la voladura, optimizar la fragmentación y reducir impactos como las vibraciones (Valdivia, 2023).

Vibraciones

Son movimientos oscilatorios generados por la energía de la voladura que se transmite a través del suelo y las estructuras cercanas. Estas se suelen monitorear y controlar para cumplir con normativas

ambientales y de seguridad, y para evitar daños en estructuras cercanas y en la mina misma (Al-Bakri y Hefni, 2021)

Voladura

En minería superficial, es el proceso de fragmentación de rocas utilizando explosivos, especialmente en la explotación minera, el cual facilita la extracción de minerales y otros materiales, realizándose en bancos de roca predefinidos (Exsa S.A., 2019).

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y nivel de investigación

La presente investigación es del tipo experimental. Para cumplir con los objetivos de investigación se realizó la observación de distintas zonas de voladuras (minas) y se compararon los resultados en similares condiciones, pero con diferentes sistemas de iniciación: Electrónica y convencional.

La investigación es aplicada ya que busca aplicar y evaluar la implementación de detonadores electrónicos en un entorno específico, la unidad minera Shougang Hierro Perú, con el objetivo de generar conocimientos prácticos y soluciones para mejorar las operaciones mineras (Walliman, 2022).

El nivel de la investigación es explicativo puesto que se busca evaluar cómo los detonadores electrónicos afectan la granulometría del material y la eficiencia de la operación.

El diseño de la investigación es un estudio de caso porque se está investigando los efectos y beneficios de la implementación de detonadores electrónicos en una mina específica, lo que hace que este sea apropiado para examinar detalladamente este contexto particular y porque ello permitirá explorar en profundidad los diferentes aspectos de la implementación de detonadores electrónicos en la mina, incluyendo la eficiencia operativa, la calidad de la granulometría, los costos asociados, la seguridad laboral y las percepciones de los trabajadores.

El enfoque de la investigación es cuantitativo en tanto que todas las

variables a estudiar y sus dimensiones son cuantificables.

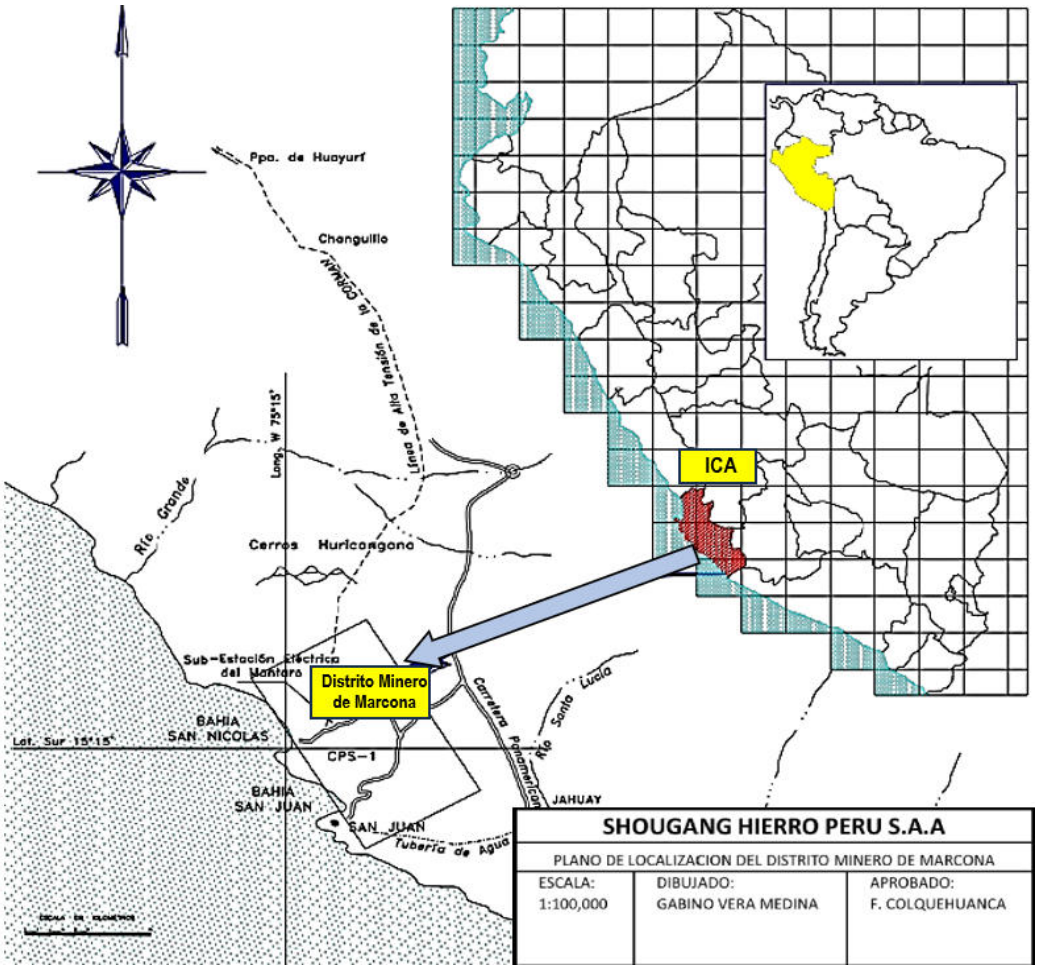
3.2. Ámbito temporal y espacial

3.2.1. Ubicación del complejo minero metalúrgico de Shougang Hierro Perú S.A.A

El lugar de ejecución de la investigación se encuentra en la Unidad Minera Shougang Hierro Perú de acuerdo a la Figura 8.

Figura 8

Mapa de ubicación de la unidad minera Shougang Hierro Perú



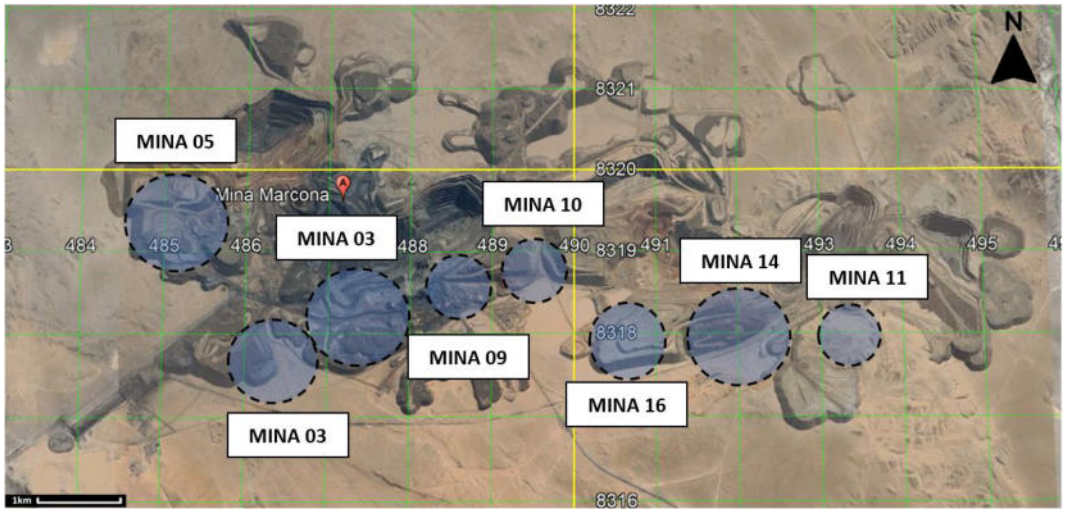
Nota. Adaptado de Leiva (2019).

Para evaluar el uso de detonadores electrónicos se analizaron varias minas de acuerdo a la Figura 9. En las minas 03 y 04, actualmente se realizan voladuras en zonas de mineral utilizando detonadores

electrónicos DaveyTronic. Por otro lado, en la mina 05 se llevan a cabo voladuras tanto en zonas de mineral como en zonas de desarrollo (desmonte). En estas últimas, se utilizan tanto detonadores convencionales como electrónicos DaveyTronic. En las minas 09 y 10, inicialmente se realizaron voladuras solo en desarrollo con detonadores convencionales como Exel, Fanel y Brinel, pero recientemente se ha comenzado la implementación de detonadores electrónicos DaveyTronic. Finalmente, la mina 14 se seleccionó por haber completado la transición a detonadores electrónicos DaveyTronic en todas sus operaciones de voladura, tanto en zonas de mineral como de desarrollo.

Figura 9

Zona de estudio de la unidad minera Shougang Hierro Perú



Nota. Vista general de la unidad minera, operaciones principales. Se han señalado en círculo azul las ocho principales minas de. Elaboración propia con Google Maps en coordenadas UTM.

3.2.2. Shougang Hierro Perú S.A.A.

Shougang Hierro Perú S.A.A. es una filial de la corporación china Shougang Group, empresa dedicada a la producción y explotación de hierro en el Perú. El grupo tiene sede en Beijing y opera en diversas

industrias, incluyendo la producción de acero, fabricación de equipos y transporte marítimo. La actividad principal de Shougang Hierro Perú es la extracción, procesamiento y comercialización de hierro y otros minerales. Desde su adquisición de la Empresa Minera del Hierro del Perú en 1992, la compañía ha optimizado su estructura organizacional y aumentado significativamente su capacidad productiva y de ventas.

El complejo minero de Shougang Hierro Perú se ubica en Marcona y está compuesto por tres áreas principales: Mina, San Nicolás y San Juan. Adicionalmente, cuenta con instalaciones en Jahuay y un edificio administrativo en Lima. La mina en Marcona opera bajo el sistema de tajo abierto, dividiéndose en la Zona Antigua y la Zona Nueva, donde se llevan a cabo trabajos de exploración y explotación con una serie de equipos especializados. La infraestructura de Shougang Hierro Perú garantiza un manejo eficiente de sus recursos, consolidando su posición como uno de los principales productores de hierro en la región. En la Zona Antigua se emplean perforadoras, palas, camiones de acarreo y plantas de chancado, mientras que la Zona Nueva cuenta con un sistema automatizado de chancado y transporte de mineral (Shougang Hierro Perú S.A.A, 2023).

El área de San Nicolás es el núcleo de las plantas de beneficio, donde los minerales son procesados hasta obtener productos comercializables. Las zonas antigua y nueva de esta área operan de manera independiente, utilizando tecnología avanzada como molinos, separadores magnéticos, sistemas de mitigación de polvo y plantas de filtración. Asimismo, se cuenta con infraestructura para el manejo de relaves y desalación de agua, importantes procesos para el procesamiento.

En San Juan se encuentra el campamento minero, que proporciona servicios residenciales para los trabajadores, así como oficinas administrativas. Además, esta zona dispone de una planta de tratamiento de aguas residuales y un sistema de almacenamiento de agua dulce y salada. Finalmente, en la zona de Jahuay, se localizan pozos de agua dulce que abastecen a las operaciones mineras a través de un sistema de transporte de agua hacia San Juan.

3.3. Población y Muestra

3.3.1. Población

La población está conformada por actividades de perforación y voladura en la zona de desmonte de la unidad minera Shougang Hierro Perú.

3.3.2. Muestra

La muestra es no probabilística y está conformada por los proyectos de Voladura “M14 Nv 650 Py 115” y “M14 Nv 650 Py117” con detonadores electrónicos y no electrónicos en la zona de desmonte de la unidad minera Shougang Hierro.

3.4. Instrumentos

Los principales instrumentos para la recolección de datos se detallan a continuación:

3.4.1. WipFrag™ 4

Es un programa especializado para el análisis granulométrico de voladuras mediante fotografías basada en una tecnología patentada de análisis de fragmentación de rocas desarrollada por WipWare Inc. Se utiliza en la industria minera y de agregados para analizar rápidamente la

distribución de tamaños del material fragmentado después de una detonación. Mediante el uso de programas de análisis de imágenes, este programa procesa fotos o videos del material postvoladura para determinar la distribución de tamaños de los fragmentos (WipWare, 2021). Esta información es útil para optimizar el diseño de las detonaciones y mejorar la capacidad de procesamiento de chancado. Se utilizó para realizar análisis de la calidad de fragmentación en la zona de desmonte usando detonadores electrónicos y convencionales.

3.4.2. O-Pitblast

O-Pitblast es un programa especializado en diseño y ejecución de voladuras para el sector minero. Diseñado para operar en Microsoft Windows, permite a los ingenieros importar datos topográficos de sus operaciones para planificar todas las fases de las operaciones de voladura y optimiza la recolección y procesamiento de datos en campo, facilitando la gestión y coordinación de los barrenos. Con capacidades analíticas avanzadas, ofrece visualizaciones de datos de voladuras, incluyendo costos por disparo y características de los parámetros de voladura, asimismo supervisa procesos clave como topografía, perforación, carga y sincronización, controlando los resultados de las explosiones configuradas y prediciendo y controlando vibraciones (O-pitblast, 2018, p. 13). En Shougang Hierro se utiliza para el diseño de secuencias con detonadores electrónicos en la zona de estudio.

La presente investigación utilizó la observación directa con el registro de fotografías y el análisis documental como principales técnicas

de recolección de datos, mientras que los principales instrumentos son WipFrag para la medición de la granulometría y O-pitblast para el diseño de carga y secuencia de salida de la voladura.

3.4.3. Sistema de iniciación electrónica DaveyTronic OP

El sistema de iniciación Daveytronic® OP es un sistema de detonación digital de alta precisión y confiabilidad, diseñado para mejorar el rendimiento de la voladura en canteras, construcción y pequeñas minas a cielo abierto. Como se muestra en la Figura 10 este sistema incluye un detonador DaveyTronic® OP de uso fácil, permitiendo una programación rápida y la capacidad de realizar disparos de forma remota.

Figura 10

Sistema de iniciación electrónica DaveyTronic OP



Nota. Tomado de Davey Bickford Enaex (2018).

Ofrece beneficios como paredes más limpias y estables, un mayor tamaño de patrón de voladura, y una mejora en la fragmentación y uniformidad del material, lo que resulta en una disminución de las vibraciones. En la Tabla 3 se muestra las características del detonador Daveytronic, el cual está diseñado con un alto nivel de seguridad, que incluye doble condensador para comunicación bidireccional y disparo y protección contra descargas electrostáticas y campos electromagnéticos

(Davey Bickford Enaex, 2018). En el Anexo 2, se presenta la ficha técnica del sistema de iniciación DaveyTronic OP.

Tabla 3

Características del sistema de iniciación electrónica DaveyTronic OP

Características	Descripción
Detonadores	Solo puede ser utilizado con detonadores DaveyTronic® OP
Modo Monoblast	Hasta 1500 detonadores
Modo de Conexión	3 modos: Uno a Uno - Fácil Uno a Uno – En Línea
Modo de Programación	3 modos: Manual - Incremental - Automático (diseño en computador)
Conexión a la DRB2	Cable o Radio Frecuencia*
Accesorios / Cables	El sistema de voladura DaveyTronic® OP solo podrá ser usado con el cable de superficie autorizado

Nota. Adaptado de Davey Bickford Enaex (2018)

El sistema consta de tres unidades principales: un Blaster Remoto (DRB) que maneja las pruebas y el disparo, una Unidad de Programación (PU) que identifica y diagnostica cada detonador, y un Blast Driver (DBD) que comunica y suministra energía para detonar hasta 1500 detonadores. Este sistema opera exclusivamente con detonadores DaveyTronic® OP y utiliza un protocolo de comunicación codificado, seguro y patentado.

3.4.4. Sistema de iniciación no electrónica Brinel

El sistema de iniciación no eléctrica Brinel mostrado en la Figura 11 consta de detonadores con retardo diseñados para la iniciación precisa de cargas explosivas. Estos detonadores se caracterizan por su fiabilidad en

diferentes aplicaciones, como minería a cielo abierto y subterránea, canteras y construcción civil, incluyendo opciones para voladuras subacuáticas. Una de las principales innovaciones de Brinel es el uso del tubo Thermotube, que emite una chispa de alta temperatura en lugar de la onda de choque tradicional, y no requiere de explosivos. Esta característica asegura una mayor seguridad y precisión en la activación.

Figura 11

Sistema de iniciación no eléctrica Brinel



Nota. Tomado de Enaex (2021).

Los tiempos de retardo de los detonadores Brinel varían, ofreciendo múltiples opciones desde 0 hasta 8.300 milisegundos, adaptándose así a las necesidades específicas de cada operación. Estos tiempos están claramente marcados en cada unidad para evitar errores y optimizar los resultados de las voladuras. Tiene diversas longitudes de detonadores, que van desde 4.8 hasta 30 metros (Enaex, 2021). Las principales

características de este sistema se muestran en la Tabla 4, mientras que las especificaciones técnicas detalladas se adjuntan en el Anexo 3.

Tabla 4

Características del sistema de iniciación no eléctrica Brinel

Característica	Descripción
Diámetro interno	1,25 – 1,50 mm
Diámetro externo	2,96 – 3,24 mm
Resistencia a la tracción	40 kgF
Alargamiento	128%
Velocidad de propagación	1.140 – 1.275 m/s
Resistencia al agua	Resistente
Tipo de conector	J
Longitud	4,8 - 6 - 12 - 15 - 18 - 21 - 25 - 30 m
Temperatura de operación	**-40 a +45°C**

Nota. Adaptado de la ficha técnica de Brinel de Enaex (2021).

3.4.5. ANFO Pesado

El ANFO Pesado 55 se utiliza para el mineral y es un tipo de explosivo especialmente diseñado para ofrecer una mayor flexibilidad en su aplicación en condiciones donde la presencia de agua es una preocupación, aunque con resistencia al agua limitada. Esta mezcla consta de un 50% de emulsión y un 50% de ANFO, combinando las propiedades de ambos componentes. La adición de emulsión ayuda a mejorar la resistencia al agua del ANFO convencional y permite un margen de error más amplio en la mezcla, manteniendo un balance de oxígeno positivo. Sin embargo, el uso de emulsión en esta proporción también resulta en una reducción de la velocidad de detonación en comparación con fórmulas de ANFO más convencionales. Este aspecto puede afectar la eficacia de la fragmentación en ciertas aplicaciones de minería y construcción. Además,

el incremento en el contenido de emulsión conlleva un aumento en el costo del producto.

Asimismo, se utilizó ANFO HA 28 para zona de desmonte en tanto que las características de las dos mezclas a utilizar en este estudio se detallan en la Tabla 5.

Tabla 5

Comparación de mezclas de ANFO utilizadas

Producto	Densidad (g/cm3)	Energía total (Kj/kg)
HA-28	0.9	3570
HA-45/55	1.27	3250

Nota. Adaptado de Tafur y Mautino (2022, p. 25).

3.5. Procedimientos

3.5.1. Técnica de recolección de datos

3.5.1.1. Observación directa.

Involucra la recopilación sistemática de información mediante la observación visual o auditiva de comportamientos, eventos, o situaciones tal como ocurren naturalmente, sin manipular o controlar la situación de estudio. Este método permite al investigador obtener datos de primera mano sobre cómo los individuos se comportan e interactúan en su entorno natural. La observación puede ser estructurada, con criterios y categorías predefinidas para registrar las observaciones, o no estructurada, donde el observador tiene la libertad de anotar lo que considera relevante. Para el caso de la presente investigación se recolectarán diferentes datos de WipFrag, O-pitblast y registros de campo para obtener información sobre la granulometría y parámetros de voladura tanto para proyectos con

detonadores electrónicos y no electrónicos. Se realizaron simulaciones con programas WipFrag y O-pitblast para la granulometría y diseño de voladuras lo que permitirá demostrar los beneficios de la fragmentación y control de voladuras.

3.5.1.2. Análisis documental.

Se examinaron documentos relevantes, como informes de operaciones mineras, registros de producción, informes de seguridad, registros de costos y cualquier otro documento relacionado con la implementación de detonadores electrónicos. Esto te proporcionó datos históricos y contextuales sobre la situación antes y después de la implementación de la nueva tecnología. Se utilizaron datos secundarios disponibles, como informes técnicos de fabricantes de detonadores electrónicos, estudios de casos anteriores sobre implementaciones similares, y cualquier otra información relevante obtenida de fuentes externas.

3.5.1.3. Equipos para seguridad

Durante las actividades realizadas en la mina, se implementó un riguroso protocolo de seguridad para garantizar la protección del equipo de investigación y el cumplimiento de las normas de seguridad y prevención de riesgos laborales como:

- Cascos de seguridad certificados para proteger la cabeza del personal de posibles golpes y caídas de objetos.

- Calzado de seguridad resistente y con punta de acero para proteger los pies del equipo de investigación en caso de caídas de objetos pesados o terreno irregular.
- Chalecos reflectantes para aumentar la visibilidad del personal durante las actividades en áreas de tráfico vehicular o movimiento de maquinaria pesada.
- Gafas de protección para proteger los ojos del equipo de investigación contra partículas voladoras, polvo y productos químicos peligrosos.
- Guantes de seguridad resistentes para proteger las manos del personal de posibles lesiones durante la manipulación de equipos y materiales.
- Presencia de polvo o gases tóxicos, se utilizaron equipos de respiración adecuados para garantizar la seguridad del personal.

3.6. Análisis de Datos

Para el análisis de los datos se realizó la comparación de resultados de voladuras de diseños con detonadores convencionales o pirotécnicos y con diseños con detonadores electrónicos. Se comparó la fragmentación la vibración y el costo por taladro.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

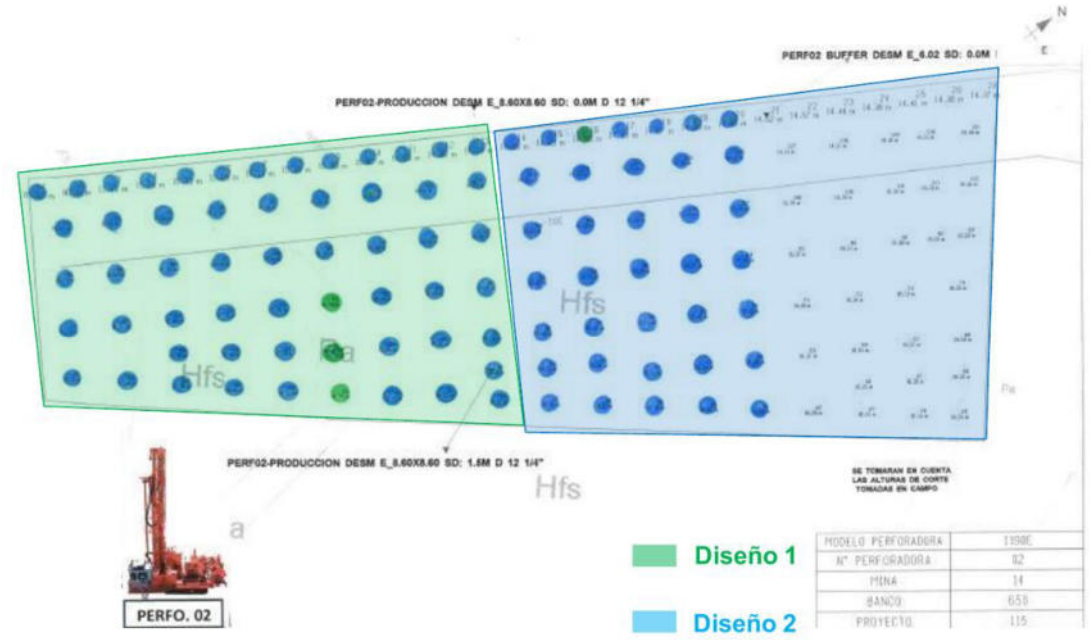
4.1. Resultados

4.1.1. Objetivo Específico 1 - Uso de detonadores electrónicos y convencionales en la optimización de la granulometría

Para cumplir con el objetivo de evaluar la influencia del uso de detonadores electrónicos frente a detonadores convencionales en la granulometría del material fragmentado en la zona de desmonte de la unidad minera Shougang Hierro Perú, se desarrolló un proyecto de voladura identificado como M14 Nv 650 Py 115. Este proyecto contempló dos diseños distintos de voladura, cada uno empleando diferentes tipos de detonadores y configuraciones de carga explosiva (Figura 12), y fue trabajado con las Palas 02 y 04, las cuales realizaron las labores de minado. Para las actividades del proyecto se emplearon los Estándares y PETS del Anexo 4.

Figura 12

Diseño de voladura con y sin detonadores electrónicos



Nota. Elaboración propia con información de operaciones mina.

4.1.1.1. Descripción del Proyecto de Voladura M14 Nv 650 Py 115

La primera configuración utilizó detonadores convencionales y un diseño de carga corrida con un taco de 7 metros. La segunda configuración empleó detonadores electrónicos, y el diseño de carga corrida incluyó una cámara de aire con un taco de 5 metros. Estas diferencias en los parámetros de voladura influenciaron en las variaciones en la fragmentación de la roca resultante y permitieron determinar el impacto del uso de detonadores electrónicos en comparación con los convencionales.

4.1.1.2. Diseño y Parámetros del Proyecto de Voladura M14 Nv 650 Py 115

Este proyecto de voladura se basa en dos diseños, por su parte el diseño 1 (Ver Tabla 6) de perforación de producción con taladros de 12 1/4 pulgadas de diámetro y utiliza una mezcla explosiva HA37. Se han calcularon parámetros de perforación con un espaciamiento y *burden* de 8.6 metros, una profundidad total de taladro de 16 metros, y un *subdrilling* de 1 metro. La carga explosiva principal consiste en 651.26 kg de HA37 aplicada en la parte inferior de cada taladro, alcanzando una densidad de carga de 7 kg por metro lineal. Este esquema de voladura está diseñado para cubrir un volumen de 1,109.40 m^3 de roca, con una densidad de 2.74 toneladas por metro cúbico, lo que equivale a un total de 3,039.76 toneladas de material. El factor de carga para este diseño es de 0.59 kg/m^3, con un factor de potencia de 0.21 kg por tonelada, lo que optimiza el uso del explosivo para alcanzar la fragmentación deseada en la producción.

Tabla 6

Parámetros de perforación y voladura del Diseño 1 sin detonadores electrónicos.

PROYECTO	
NV	650
PY	115
CALCULO PARA TALADROS DE PRODUCCION	
Diseño en	Producción
Diametro del taladro	12 1/4"
Mezcla explosiva	HA37
PARÁMETROS DE PERFORACION	
Diámetro taladro (pulg)	12.25
Espaciamiento (m)	8.6
Burden (m)	8.6
Sub drilling (m)	1
Altura de taladro (m)	16
Inclinación de perforación	0
PARÁMETROS DE VOLADURA	
Aire inicial (m)	1
Piston de taco fondo (m)	-
Carga de fondo HA37 (m)	8
Material taco (m)	-
Carga intermedia HA37 (m)	-
Material taco (m)	-
Carga superior HA37 (m)	-
Material taco (m)	-
Aire final (m)	-
Taco final (m)	-
Mezcla explosiva-HA37 (kg/m)	7
Densidad de explosivo	1.07
Densidad de roca (tm/m3)	2.74
1ra Carga HA37 (kg):	651.26
2da Carga HA37 (kg):	-
3ra Carga HA37 (kg):	-
CANTIDAD TOTAL DE EXPLOSIVO (kg/tal)	**651.26**
Volumen (m^3)	1,109.40
Toneladas de diseño (TM)	3,039.76
FACTOR DE CARGA (Kg/m^3)	0.59
FACTOR DE POTENCIA (Kg/Tn)	0.21

Nota. Elaboración propia con información de operaciones mina.

El diseño 2 con detonadores electrónicos del proyecto de voladura NV 650 PY 115, se ha diseñado para producción, con cálculos destinados a optimizar la perforación de taladros. De acuerdo a la Tabla 7, el diseño

de taladro seleccionado tiene un diámetro de 12 1/4 pulgadas, con un espaciamiento y *burden* de 8.6 metros cada uno al igual que el Diseño 1.

Tabla 7

Parámetros de perforación y voladura del Diseño 2 con detonadores electrónicos.

PROYECTO	
NV	650
PY	115
CÁLCULO PARA TALADROS DE PRODUCCION	
Diseño en	PRODUCCION
Diámetro del taladro	12 1/4"
Mezcla explosiva	HA37
PARÁMETROS DE PERFORACION	
Diámetro taladro (pulg)	12.25
Espaciamiento (m)	8.6
Burden (m)	8.6
Sub drilling (m)	1
Altura de taladro (m)	16
Inclinación de perforación	0
PARÁMETROS DE VOLADURA	
Aire inicial (m)	1
Pistón de taco fondo (m)	-
Carga de fondo HA37 (m)	7.7
Material taco (m)	-
Carga intermedia HA37 (m)	-
Material taco (m)	-
Carga superior HA37 (m)	-
Material taco (m)	-
Aire final (m)	2.3
Taco final (m)	5
Mezcla explosiva-HA37 (kg/m)	81.41
Densidad de explosivo	1.07
Densidad de roca (tm/m^3)	2.74
1ra Carga HA37 (kg):	626.84
2da Carga HA37 (kg):	-
3ra Carga HA37 (kg):	-
CANTIDAD TOTAL DE EXPLOSIVO (kg/tal)	**651.26**
Volumen (m^3)	1,109.40
Toneladas de diseño (TM)	3,039.76
Factor de carga (Kg/m3)	0.57
Factor de potencia (Kg/Tn)	0.21

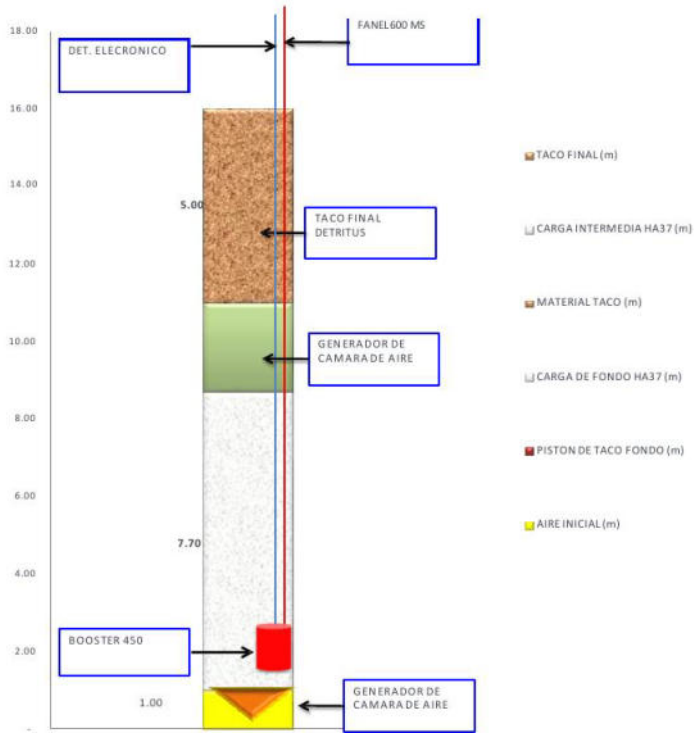
Nota. Elaboración propia con información de operaciones mina.

Se utilizó una densidad de explosivo de 1.07 kg/m³, compatible con la densidad de roca de 2.74 tm/m³, permitiendo un manejo efectivo de la carga explosiva en cada fase del proceso. La altura total de los taladros es de 16 metros, con un *subdrilling* de 1 metro para garantizar una fractura adecuada en la base de los taladros.

El esquema de voladura incluye una secuencia de carga con una carga de fondo de 7.7 metros, seguida de un taco final de 5 metros, y un aire final de 2.3 metros (Figura 13). En total, cada taladro contiene 651.26 kg de explosivo distribuido en tres cargas (626.84 kg, 1109.4 kg y 3039.76 kg respectivamente), lo cual contribuye a un factor de carga de 0.57 kg/m³ y un factor de potencia de 0.21 kg/tonelada.

Figura 13

Diseño de carga de taladros de producción ER 12 ¼" para diseño 2 de voladura con detonadores electrónicos



Nota. Elaboración propia con información de operaciones mina.

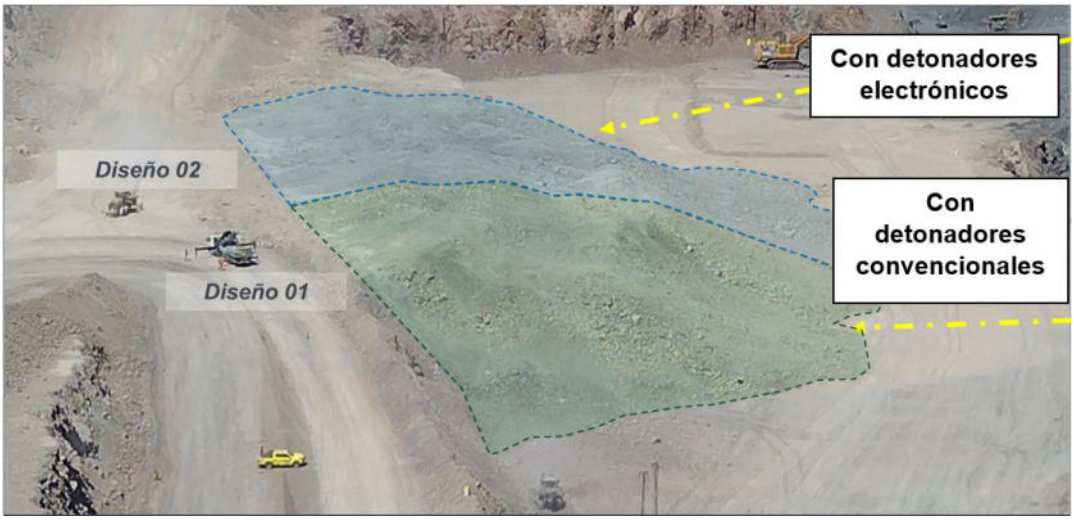
Este diseño está concebido para generar un volumen de 1109.4 m³, con una proyección de producción de 3039.76 toneladas de material, asegurando una operación de voladura eficiente y controlada que optimiza tanto el rendimiento de la producción como la fragmentación del material.

4.1.1.3. Resultados del Uso de Detonadores Electrónicos en la Granulometría del Material

El análisis de granulometría se realizó sobre el frente de la voladura mediante la toma de fotografías y análisis granulométrico. La evaluación se enfocó en comparar la distribución y el tamaño de las partículas de roca obtenidas con cada diseño, documentando la fragmentación lograda en cada caso. Como parte del análisis, se revisaron todas las imágenes obtenidas (Figura 14), para cuantificar la variabilidad en la fragmentación de la roca.

Figura 14

Vista fotográfica de la zona de voladura con y sin detonadores electrónicos



Nota. Elaboración propia con información de operaciones mina.

Se realizó comparación detallada entre ambas configuraciones de detonadores, permitiendo así probar la hipótesis de que el uso de detonadores electrónicos optimiza significativamente la fragmentación del material en el área de desmonte de la mina. Como resultado del análisis granulométrico de la voladura del Diseño 1 con detonadores convencionales se obtuvo una granulometría de acuerdo a la Tabla 8.

Tabla 8

Granulometría de voladura con detonadores convencionales.

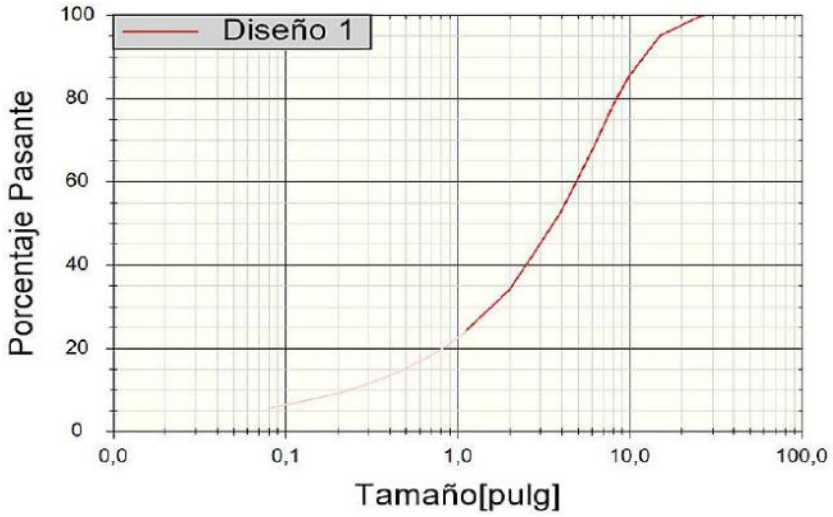
% Pasante	**Diseño 1 con detonadores convencionales**	
	Tamaño [pulg]	
F10	0.14	0.72
F20	0.54	1.68
F30	1.18	2.73
F40	2.02	3.81
F50	3.02	4.93
F60	4.2	6.08
F70	5.7	7.39
F80	**7.89**	**8.98**
F90	12.23	11.35
Topsize (99,95%)	27.24	19.29

Nota. Elaboración propia con información de operaciones mina.

Así también se halló la distribución granulométrica de la fragmentación resultante de la voladura con detonadores convencionales como se muestra en la Figura 15.

Figura 15

Distribución granulométrica del Diseño 1 con detonadores convencionales



Nota. Elaboración propia con información de operaciones mina.

La Figura 16 incluye algunas vistas fotográficas de la fragmentación en campo del Diseño 1 de voladura con detonadores convencionales.

Figura 16

Resultado de la granulometría del Diseño 1 con detonador convencional



Nota. Elaboración propia con información de operaciones mina.

La Tabla 9 muestra el análisis granulométrico del Diseño 2 de voladura con detonadores electrónicos. Como se puede observar, el pasante 80% es

significativamente menor (5.84 pulg.) que el Diseño 1 (7.89 pulg.) con detonadores convencionales.

Tabla 9

Granulometría de voladura con detonadores electrónicos.

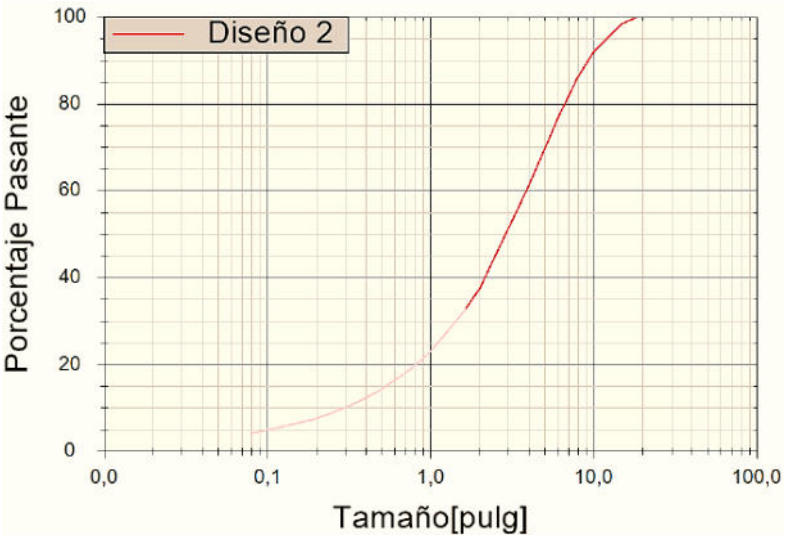
% Pasante	Diseño 2 con detonadores electrónicos	
	Tamaño [pulg]	
F10	0.23	0.41
F20	0.67	1.04
F30	1.23	1.78
F40	1.91	2.6
F50	2.65	3.5
F60	3.48	4.52
F70	4.49	5.85
F80	**5.84**	**7.92**
F90	7.86	11.61
Topsize (99,95%)	14.08	18.59

Nota. Elaboración propia con información de operaciones mina.

A su vez, se halló la distribución granulométrica de la fragmentación resultante de la voladura con detonadores electrónicos de acuerdo al porcentaje de pasantes y tamaño de acuerdo a la Figura 17.

Figura 17

Distribución granulométrica del Diseño 2 con detonadores electrónicos



Nota. Elaboración propia con información de operaciones mina.

En la Figura 18 se muestran algunas vistas fotográficas de la fragmentación en campo del Diseño 2 de voladura con detonadores electrónicos.

Figura 18

Resultado en campo de la granulometría del Diseño 2 con detonador electrónico



Nota. Elaboración propia con información de operaciones mina.

En el proyecto de voladura Nv650 Py115 en la zona de desmonte, se realizaron dos diseños de carga para evaluar el rendimiento en la fragmentación del material. Se calculó un Factor de Potencia teórico de 0,21 kg/tn, utilizando los parámetros específicos de *burden* y espaciamiento. El análisis granulométrico muestra que en el área donde se aplicó el Diseño 2, que incluye detonadores electrónicos y una carga corrida complementada con una cámara de aire (taco de 5 metros), se obtuvieron resultados superiores, especialmente en la fracción más gruesa de la curva de distribución granulométrica, mejorando significativamente la fragmentación de acuerdo a la Tabla 10.

Tabla 10

Comparación de resultados de granulometría de voladura con detonadores electrónicos y con detonadores convencionales.

% Pasante	Diseño 1	Diseño 2	Promedio del proyecto
F10	0.23	0.29	0.25
F20	0.81	0.81	0.81
F30	1.63	1.45	1.57
F40	2.6	2.19	2.46
F50	3.68	2.99	3.44
F60	4.93	3.91	4.59
F70	6.42	5.04	5.99
F80	**8.42**	**6.63**	**7.89**
F90	11.79	9.21	11.07
Topsize (99.95%)	27.07	18.43	26.88

Nota. Elaboración propia con información de operaciones mina.

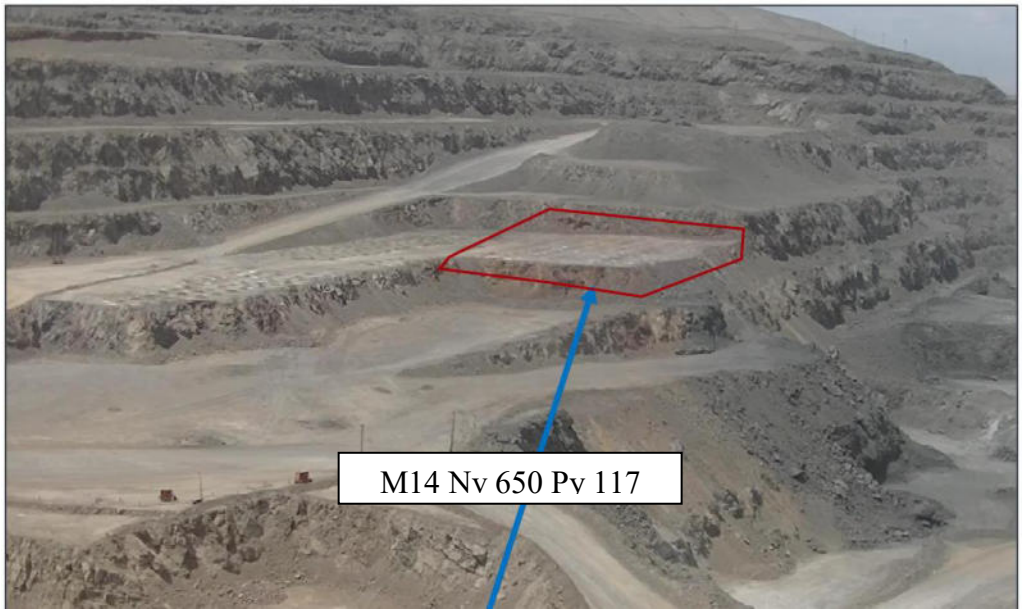
En el frente de minado de la Pala 02, donde se empleó el Diseño 1 con detonadores convencionales, se observó un P80 de 8,42 pulgadas en la fragmentación del material. Por otro lado, en el frente de minado de la Pala 04, donde se utilizó el Diseño 2 con detonadores electrónicos y una cámara de aire, se logró un P80 de 6,63 pulgadas, lo que representa una mejora en la fragmentación de un 21,2 % en comparación con el Diseño 1. Finalmente, el análisis promedio de la fragmentación en el proyecto 115, correspondiente a la mina 14, arrojó una granulometría global de 7,89 pulgadas. Estos resultados indican una mayor eficiencia del Diseño 2 con detonadores electrónicos en términos de reducción de tamaño de partículas y optimización del proceso de voladura.

4.1.2. Objetivo Específico 2 - Detonadores Electrónicos y Vibración por Carga Operante

Para hallar el efecto de los detonadores electrónicos en la vibración por carga operante se compararon los resultados de voladura con detonadores electrónicos y voladura pirotécnica con detonadores convencionales. Para esto se seleccionó el proyecto de voladura M14 Nv650 Py117 de la Figura 19, en el cual se evaluó y analizó el diseño de voladura empleado y posteriormente se realizó la medición de la vibración VPP. Se compararon los registros de monitoreo de vibraciones con sismógrafo para la voladura pirotécnica y para la voladura electrónica.

Figura 19

Vista fotográfica del proyecto de voladura M14 Nv 650 Py 117



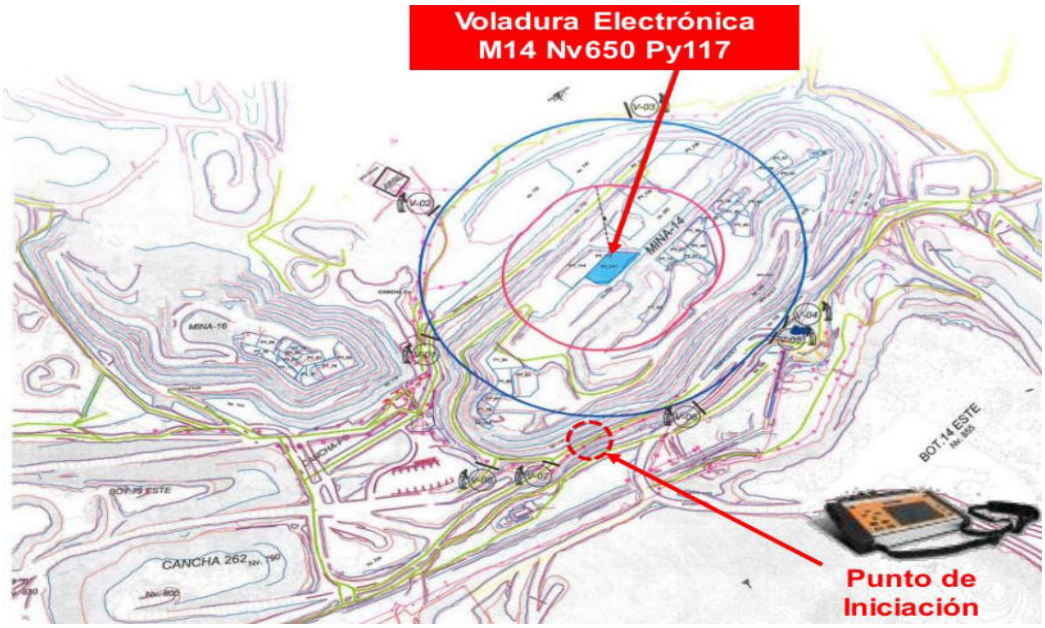
Nota. Elaboración propia con información de operaciones mina.

4.1.2.1. Descripción del Proyecto de Voladura M14 Nv 650 Py 117

El proyecto de voladura M14 Nv 650 Py 117 fue un trabajo de voladura primaria que se llevó a cabo en la mina 14 de acuerdo a la Figura 20.

Figura 20

Plano de ubicación de la voladura M14 Nv 650 Py 117

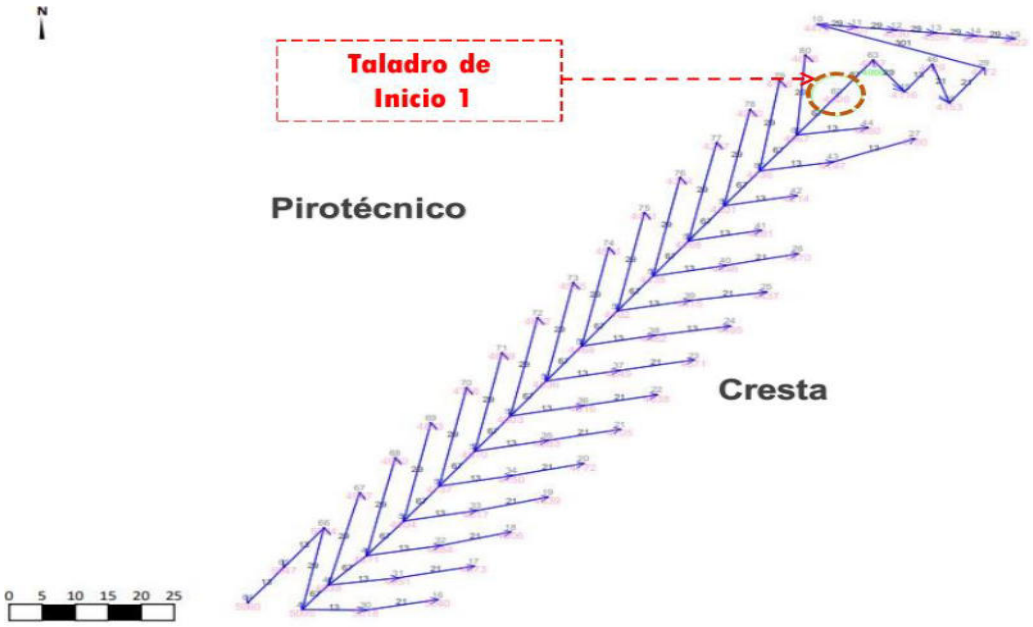


Nota. Elaboración propia con información de operaciones mina.

La secuencia de salida de la voladura se estructuró en una disposición tipo “V”, lo que ayudó a dirigir y controlar la propagación de la onda de choque (Figura 21).

Figura 21

Secuencia de Iniciación de la voladura M14 Nv 650 Py 117



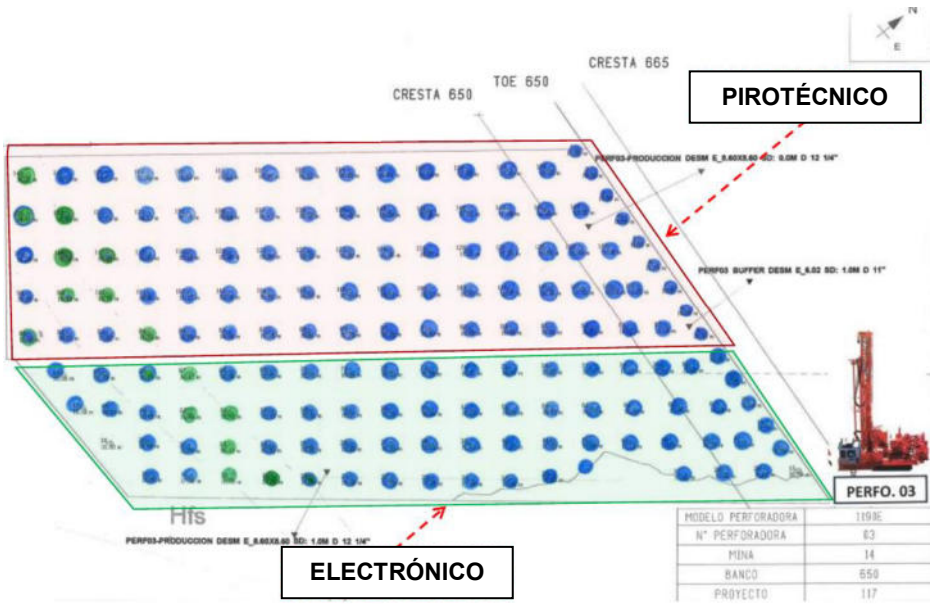
Nota. Elaboración propia con información de operaciones mina.

El tiempo entre los taladros se organizó en intervalos de 13, 21 y 29 milisegundos, mientras que el tiempo entre filas fue programado en intervalos de 62, 67 y 301 milisegundos. Esta programación permite un control detallado de la liberación de energía, lo que optimiza el proceso de fracturación de la roca y minimiza las vibraciones hacia las áreas cercanas.

Se utilizaron un total de 69 taladros (Ver Figura 22), cuidadosamente perforados para garantizar una distribución uniforme de la energía de explosión. El sistema de iniciación utilizado fue inalámbrico, específicamente con el sistema OneTOUCH, el cual permite un control preciso. La voladura se realizó con éxito a las 13:38 horas, dentro de la ventana de tiempo programada entre las 13:30 y 14:00 horas, maximizando la seguridad y eficiencia de la operación.

Figura 22

Distribución de taladros para la voladura pirotécnica y electrónica.



Nota. Elaboración propia con información de operaciones mina.

Se usaron 139 detonadores electrónicos para la ejecución de esta voladura, siendo 138 de ellos detonadores DaveyTronic® y 1 detonador adicional para el disparo pirotécnico. La totalidad de detonadores fue activada exitosamente sin la necesidad de un detonador electrónico de respaldo (back up), con una tasa acumulada de back ups de apenas un 0.06%, lo que indica un bajo requerimiento de redundancia debido a la fiabilidad de los equipos empleados.

Para el amarre de los detonadores se utilizó un total de 1000 metros de cable, y se emplearon detonadores electrónicos de 14 segundos con tecnología DT SP de 20 metros - HD (Pack 54), específicos para asegurar una alta precisión en tiempos de retardo y en la iniciación secuencial. Además, la fuga de corriente en el circuito fue controlada y se registró en apenas 0.7 mA, un indicador positivo de la seguridad en la instalación del sistema de voladura.

4.1.2.2. Diseño y Parámetros del Proyecto de Voladura M14 Nv 650 Py 117

El proyecto de voladura primaria M14 Nv 650 Py 117 tuvo como objetivo la fragmentación eficiente de roca en el nivel 650, proyecto N° 117, utilizando parámetros de perforación y voladura diseñados específicamente para optimizar el rendimiento del explosivo y maximizar la eficiencia del proceso. En la Tabla 11, se presenta el diseño y los parámetros de la voladura de producción.

Tabla 11

Parámetros de perforación y voladura del proyecto M14 Nv 650 Py 117

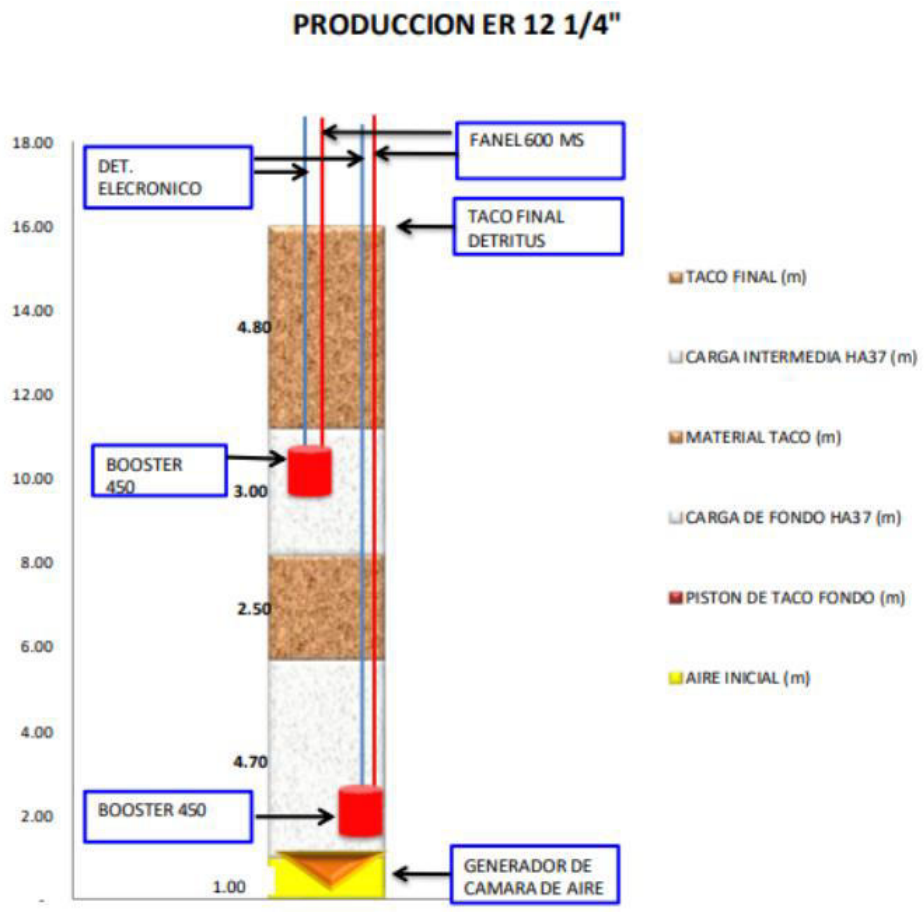
PROYECTO	
NV	650
PY	117
CÁLCULO PARA TALADROS DE PRODUCCIÓN	
Diseño en	PRODUCCIÓN
Diámetro del taladro	12 1/4"
Mezcla explosive	HA37
PARÁMETROS DE PERFORACIÓN	
DIÁMETRO TALADRO (pulg)	12.25
Espaciamiento (m)	8.6
Burden (m)	8.6
Sub drilling (m)	1
Altura de taladro (m)	16
Inclinación de perforación	0
PARÁMETROS DE VOLADURA	
Aire inicial (m)	1
Pistón de taco fondo (m)	-
Carga de fondo HA37 (m)	4.7
Material taco (m)	2.5
Carga intermedia HA37 (m)	3
Material taco (m)	-
Carga superior HA37 (m)	-
Material taco (m)	-
Aire final (m)	-
Taco final (m)	4.8
Mezcla explosiva-HA37 (kg/m)	81.41
Densidad de explosive	HA37 1.070
Densidad de roca (t/m³)	2.74
1ra Carga HA4S/55 (kg)	382.61
2da Carga HA4S/55 (kg)	244.22
3ra Carga HA4S/55 (kg)	-
Cantidad total de explosivo (kg/tal)	**626.84**
Volumen (m³)	1,109.40
Toneladas de diseño (TM)	3,039.76
Factor de carga (Kg/m³)	0.57
Factor de potencia	0.21

Nota. Elaboración propia con información de operaciones mina.

El diseño de voladura primaria para el M14 Nv 650 Py 117 se ha configurado para maximizar la eficiencia del explosivo HA37, logrando una fragmentación adecuada con un volumen objetivo de 1,109.4 m³ por taladro y un tonelaje total de 3,039.76 toneladas. La Figura 23 describe el diseño del taladro de producción ER 12 ¼" en el cual se muestra la distribución de cámara de aire, booster, taco, entre otros.

Figura 23

Diseño de carga de taladros de producción ER 12 ¼"



Nota. Elaboración propia con información de operaciones mina.

Los parámetros de espaciamiento y *burden* fueron de 8.6 m para asegurar una fractura uniforme de la roca, mientras que la configuración de

cargas de fondo e intermedias busca garantizar un control preciso del desplazamiento de material. Los factores de carga y potencia se adecuaron para la densidad de roca con el fin de optimizar los recursos y reducir la bolonería.

Por su parte la Tabla 12 muestra el diseño del taco de producción considerándose un SD (*Significance of Scaled Depth of Burial*) de 1. Esto debido a que la profundidad de enterramiento influye en la transmisión de las ondas de choque y las vibraciones generadas por la voladura, lo que puede ayudar a minimizar los impactos en el entorno.

Tabla 12

Parámetros de control del taco de producción

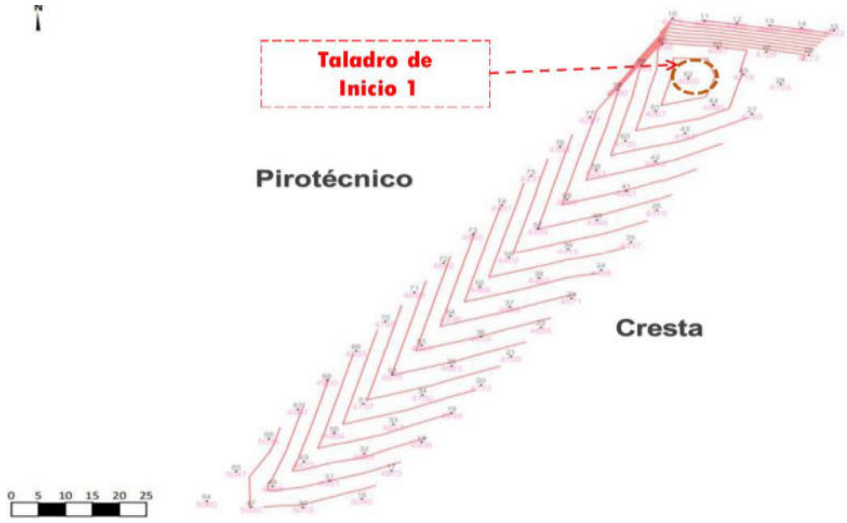
Taco de Producción	
H (m)	16
J (m)	1
Taco (m)	4.8
Deck	2.5
Lc (m)	7.7
Diam (pulg)	12 1/4
HA 37 δexpl (g/cc)	1.07
SD	**1**
B (m)	8.6
S (m)	8.6
δroca (g/cc)	2.74
FP (kg/ton)	0.21
FC (Kg/m3)	0.57
Kilos por Taladro	**626.84**

Nota. Elaboración propia con información de operaciones mina.

Por su parte la Figura 24 muestra las líneas de isotiempos del diseño de malla de voladura M14 Nv 650 Py 117 que representan gráficamente la progresión del tiempo en que las diferentes áreas o zonas se ven afectadas por la detonación.

Figura 24

Isotiempos de la voladura M14 Nv 650 Py 117.

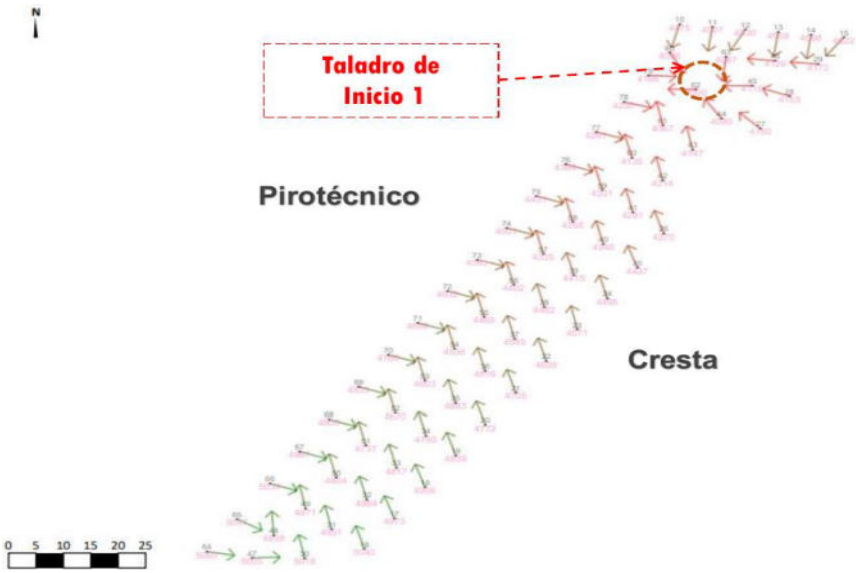


Nota. Elaboración propia con información de operaciones mina.

La Figura 25 muestra la proyección del desplazamiento del material producto de la voladura electrónica indicando el taladro de inicio. La proyección del desplazamiento del material se refiere a la representación gráfica o modelada de cómo se moverá el material como consecuencia de del diseño de la voladura.

Figura 25

Desplazamiento del material de la voladura M14 Nv 650 Py 117.

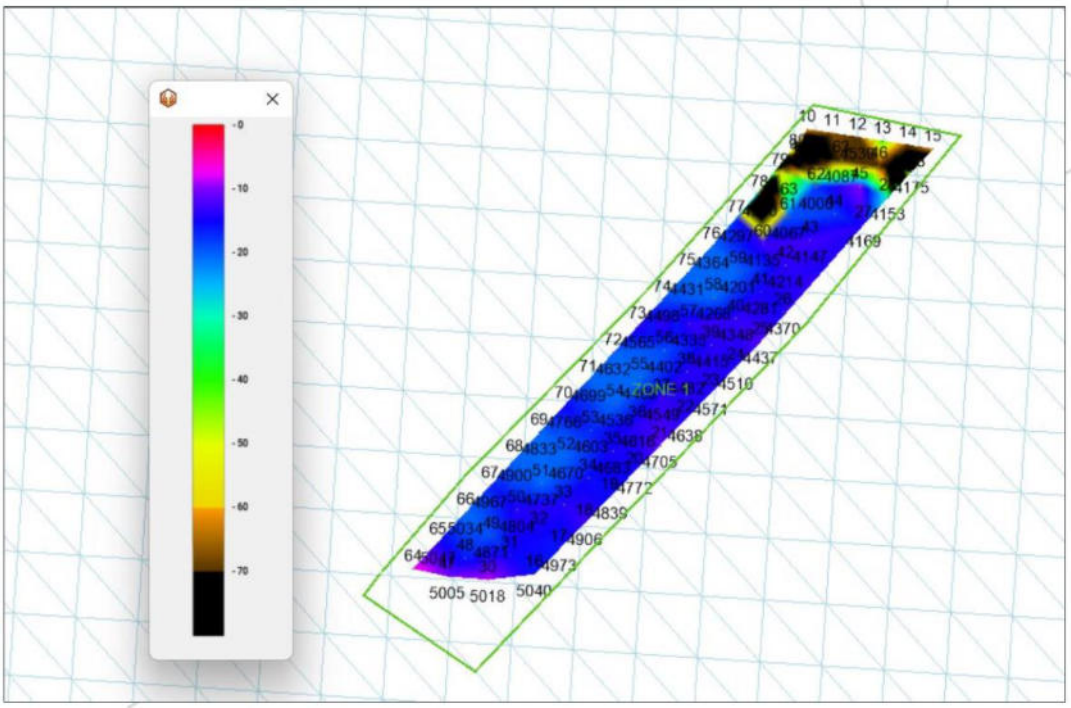


Nota. Elaboración propia con información de operaciones mina.

La Figura 26, por su parte muestra el *burden* de alivio de la voladura con un código a de colores que indica el nivel de desplazamiento o alivio del *burden* en la voladura con el fin de visualizar la distancia entre el explosivo y la cara libre del material que se quiere fragmentar. Este gráfico ayuda a detectar potenciales problemas de sobreconfinamiento, fragmentación deficiente o riesgos de vibraciones excesivas.

Figura 26

Burden de alivio de la voladura electrónica del M14 Nv 650 Py 117.



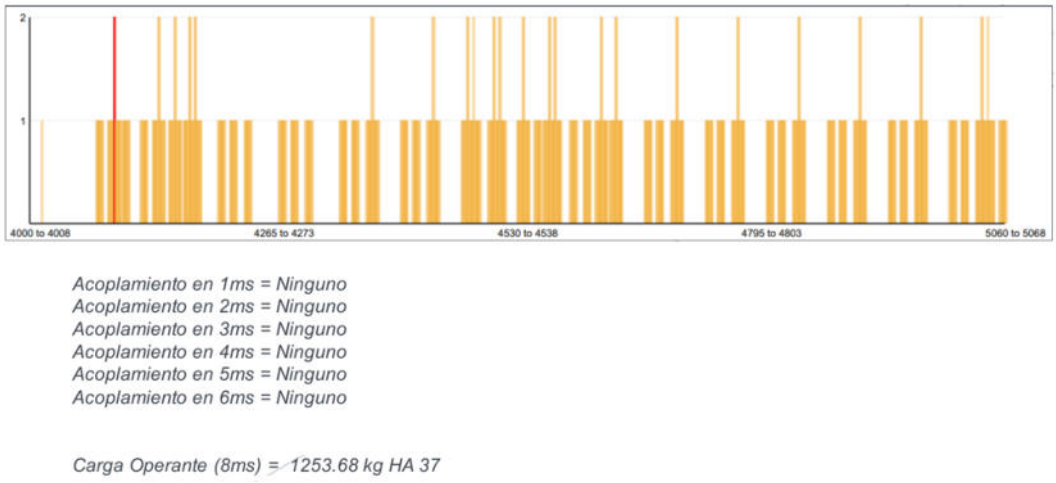
Nota. Elaboración propia con información de operaciones mina.

4.1.2.3. Resultados del Uso de Detonadores Electrónicos en la Vibración por Carga Operante

Una vez definidos los parámetros de diseño de perforación y voladura se ejecutó el proyecto y como resultado se obtuvo la carga operante y tiempos de acoplamiento de la Figura 27 para la voladura M14 Nv 650 Py 117 con una carga operante (8 ms) de 1253.68 kg de explosivo HA 37.

Figura 27

Carga operante de la voladura M14 Nv 650 Py 117.

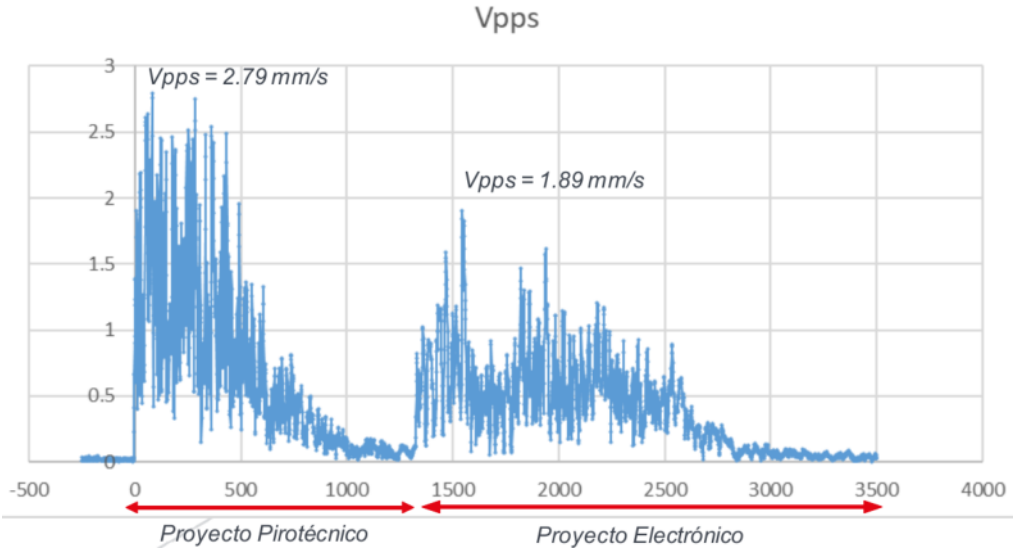


Nota. Elaboración propia con información de operaciones mina.

Asimismo, como resultado del monitoreo de vibraciones con sismógrafo durante el proceso de voladura se obtuvieron los registros de la Figura 28. El registro de monitoreo de vibraciones en el Proyecto electrónico Nv650 Py 117 fue de 1.89 mm/s y en el Nv650 Py117 Pirotécnico fue de 2.79 mm/s.

Figura 28

Registros de vibraciones de la voladura pirotécnica y voladura electrónica.



Nota. Elaboración propia con información de operaciones mina.

Como se puede observar la voladura pirotécnica tuvo mayores valores de vibraciones que la voladura electrónica. Comparando los valores picos de vpp se puede afirmar que la voladura pirotécnica produjo 47.6% más vibración por carga operante que la voladura electrónica, en otras palabras, la voladura electrónica produjo 32.3% menos vibración pico por carga operante que la voladura pirotécnica. Por su parte la Figura 29 muestra los resultados en campo de la voladura, antes y después del disparo.

Figura 29

Vista fotográfica del resultado del disparo de la voladura pirotécnica y electrónica

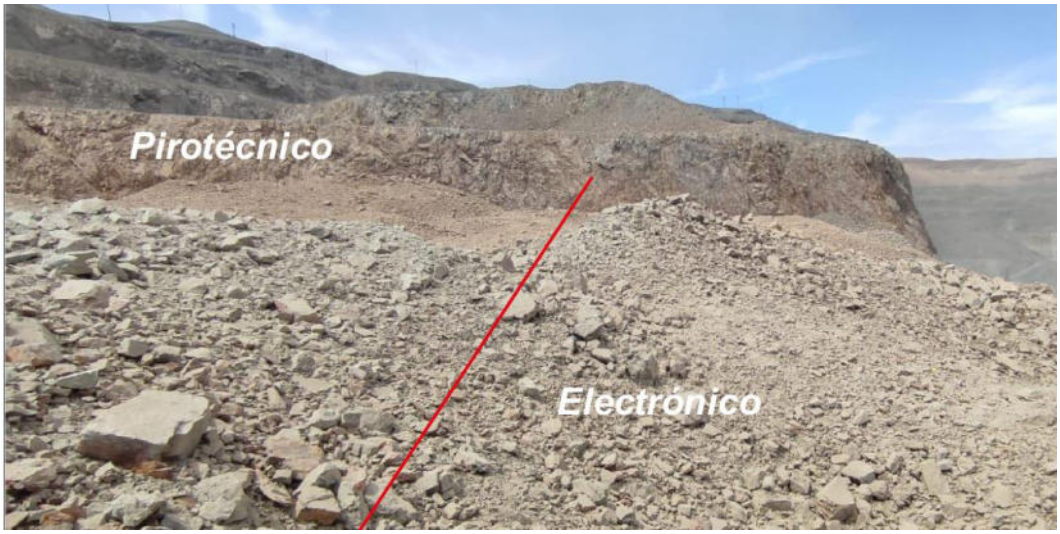


Nota. Elaboración propia con información de operaciones mina.

La Figura 30 presenta una vista fotográfica del resultado de la fragmentación comparando la voladura pirotécnica con la voladura electrónica con los detonadores DaveyTronic. La comparación de la fragmentación resultante de la voladura convencional visualmente muestra fragmentos de mayor tamaño con una diferencia notable que concuerda con el análisis granulométrico anteriormente encontrado.

Figura 30

Vista fotográfica de la comparación de la fragmentación resultante de voladura con detonadores pirotécnicos y con detonadores electrónicos.



Nota. Elaboración propia con información de operaciones mina.

4.1.3. Objetivo Específico 2 - Detonadores Electrónicos y Costo por Taladro

Para evaluar la influencia de los detonadores electrónicos en el costo frente a la alternativa de detonadores convencionales se realizó una comparación del costo por taladro de distintos diseños con y sin detonadores electrónicos.

4.1.3.1. Costos Unitarios para Taladros de Voladura con y sin Detonadores Electrónicos

En el análisis de los costos unitarios que intervienen en un taladro de voladura, se deben considerar diversos elementos que constituyen el proceso y los insumos necesarios para llevarlo a cabo. Cada componente tiene un costo asociado que impacta directamente en el costo total por taladro.

La Tabla 13 muestra todos los costos unitarios que intervienen en un taladro de voladura y realiza una comparación de diferentes configuraciones con y sin detonadores electrónicos. En primer lugar, se tiene el Generador de Cámara de Aire, cuyo costo unitario es de $6.00 por unidad el cual sirve para generar la presión adecuada en el sistema de voladura. A este se suma el Booster APD, también requerido en cada taladro, con un costo de $5.00 por unidad, que actúa como un multiplicador de energía para asegurar una detonación efectiva.

Tabla 13

Costos unitarios para el cálculo del costo por taladro de voladura

Concepto	Unidad	Costo (USD)
Generador de Camará de Aire	Unidad	$6.00
Booster APD	Unidad	$5.00
Mezcla Explosiva	HA 37	-
EMULSIÓN	Kilogramo	$1.12
Nitrato de Amonio	Kilogramo	$1.29
Petroleo	Kilogramo	$1.45
Detonador Electronico	Unidad	$17.50
Detonador Convencional	Unidad	$2.50
Costo Total	**USD/Tal**	

Nota. Elaboración propia con información de operaciones mina.

En términos de material explosivo, se ha considerado ANFO Pesado 37 (30% de emulsión y 70% de ANFO), este es un buen explosivo adecuado para utilizarlo en roca de dureza media a dura y conforma la mayor parte del costo de cada taladro. La Emulsión tiene un costo unitario de $1.12 por kilogramo, mientras que el Nitrato de Amonio asciende a $1.29 por kilogramo. Para complementar la mezcla, se incluye Petróleo, que tiene un costo de $1.45 por kilogramo.

Además de los insumos explosivos, se requieren detonadores para iniciar la reacción. El Detonador Electrónico, con un costo unitario elevado de $17.50 por unidad, se caracteriza por su alta precisión y confiabilidad. Alternativamente, se tiene el detonador no electrónico (también llamado pirotécnico o convencional), que presenta un costo significativamente menor de $2.50 por unidad, aunque su precisión es inferior en comparación con el detonador electrónico.

4.1.3.2. Comparación de Costos por Taladro con y sin Detonadores Electrónicos.

Para evaluar los costos por taladro con detonadores pirotécnicos o convencionales frente a los costos por taladro de voladura con detonadores electrónicos se tomaron los costos unitarios de la sección anterior y se contabilizaron de acuerdo a la cantidad de unidades o kilogramos usado por cada diseño, y como resultado se obtuvo la Tabla 14.

Tabla 14

Costo comparativo por taladro según diseños con y sin detonadores electrónicos

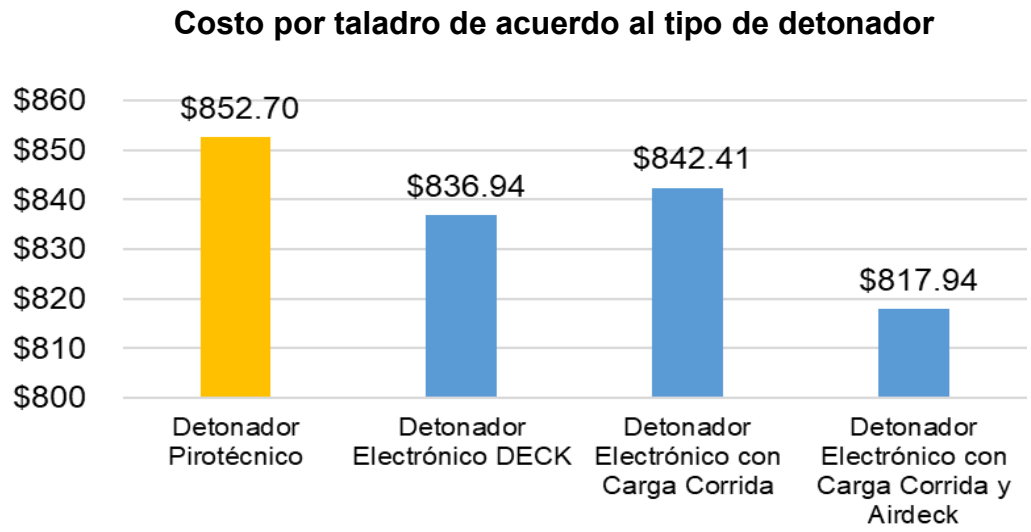
Concepto	Detonador Pirotécnico	Detonador Electrónico Deck	Detonador Electrónico con Carga Corrida	Detonador Electrónico con Carga Corrida y Airdeck
Generador de Camará de Aire	$6.00	$6.00	$6.00	$12.00
Booster APD	$10.00	$10.00	$5.00	$5.00
Mezcla Explosiva	HA 37	HA 37	HA 37	HA 37
EMULSIÓN	$224.29	$210.60	$218.82	$210.62
Nitrato de Amonio	$566.62	$532.04	$552.80	$532.02
Petroleo	$40.79	$38.30	$39.79	$38.30
Detonador Electronico	-	$35.00	$17.50	$17.50
Detonador Convencional	$5.00	$5.00	$2.50	$2.50
Costo Total	**$852.70**	**$836.94**	**$842.41**	**$ 817.94**

Nota. Elaboración propia con información de operaciones mina.

Los diseños de taladros considerados en esta comparación fueron taladros con detonador pirotécnico, Electrónido con *Deck*, Electrónico con Carga Corrida y Electrónico con Carga Corrida y *Airdeck*. Como resultado se puede observar en la Figura 31que el costo por taladro con detonadores convencionales o pirotécnicos es mayor que los 3 diseños considerados con detonadores electrónicos. El diseño con detonador electrónico con carga corrida y *Airdeck* tuvo el menor costo por taladro con 817.94$ por taladro. Mientras que el diseño con detonador pirotécnico fue de $852.7.

Figura 31

Comparación de costo por taladro de diseños con y sin detonadores electrónicos



Nota. Elaboración propia con información de operaciones mina.

En términos relativos el diseño con detonadores electrónicos puede ser hasta 4.1% menos costoso que el diseño con detonadores convencionales (Tabla 15).

Tabla 15

Porcentaje de ahorro de diseños con detonadores electrónicos frente a diseños con detonador pirotécnicos

Diseño	% de ahorro por diseño
Detonador Pirotécnico	Línea base
Detonador Electrónico Deck	-1.8%
Detonador Electrónico con Carga Corrida	-1.2%
Detonador Electrónico con Carga Corrida y Airdeck	-4.1%

Nota. Elaboración propia con información de operaciones mina.

Por tanto, se demuestra que el uso de detonadores electrónicos no solo ofrece una mejora de la fragmentación del material y menor vibración por carga operante, sino que también reduce los costos por taladro.

4.2. Discusión

La implementación de detonadores electrónicos en las operaciones de perforación y voladura ha sido ampliamente estudiada en diversos escenarios mineros, mostrando resultados consistentes con los obtenidos en la presente investigación en Shougang Hierro Perú. En términos de fragmentación del material, nuestros resultados revelaron una mejora del 21.2 % en comparación con los detonadores convencionales, con un P80 de 6.63 pulgadas frente a las 8.42 pulgadas de los convencionales. Este hallazgo coincide con los resultados reportados por Valdivia (2023), quien encontró una mejora del 21.2 % en la fragmentación utilizando sistemas electrónicos. Asimismo, Flores (2022) y Cueva y Herrera (2018) también observaron reducciones significativas en el tamaño medio de los fragmentos, atribuyendo esta mejora a la precisión en los tiempos de iniciación que ofrecen estos dispositivos. A su vez esto también fue corroborado por Singh *et al.* (2019), quienes reportaron una disminución del 44 % en el tamaño medio de los fragmentos.

Respecto a las vibraciones inducidas por las voladuras, los resultados obtenidos en Shougang Hierro Perú muestran una reducción del 32.3 % al emplear detonadores electrónicos, con un valor máximo de 1.89 mm/s frente a los 2.79 mm/s registrados con detonadores convencionales. Estos valores están dentro de los límites recomendados y coinciden con los hallazgos de Mishra *et al.* (2017), quienes también reportaron vibraciones inferiores a 3.1 mm/s a distancias de 50 m. Además, Vargas (2021) y Mamani (2018) resaltaron la capacidad de los sistemas electrónicos para reducir las vibraciones y mejorar la eficiencia en la liberación de energía.

En términos de costos operativos, la presente investigación evidenció una optimización del 4.1 % en los costos totales por taladro utilizando detonadores electrónicos, alcanzando un costo de $817.94 por taladro frente a $852.70 de los convencionales. Estos resultados se alinean con los resultados de Peña (2019), quien identificó ahorros significativos en los costos de perforación y voladura, y Molina (2023), quien observó una reducción en los costos por metro perforado al emplear sistemas más eficientes.

Por último, los resultados de Shougang Hierro Perú refuerzan la evidencia sobre las ventajas operativas y ambientales de los detonadores electrónicos. Como lo destacaron Ren *et al.* (2022) y Huincho (2022), la precisión de estos sistemas no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también reduce riesgos asociados a fallas mecánicas y vibraciones. Esta tecnología representa un avance importante en el diseño de voladuras más controladas y seguras.

V. CONCLUSIONES

La implementación de detonadores electrónicos en la unidad minera Shougang Hierro Perú mejoró significativamente la eficiencia operativa en las actividades de perforación y voladura. Esta tecnología optimizó la granulometría del material fragmentado, redujo la vibración por carga operante, y tuvo menores costos operativos por taladro. Por tanto, los detonadores electrónicos son una alternativa más precisa y controlada frente a los detonadores convencionales.

El uso de detonadores electrónicos en las actividades de voladura mejoró la fragmentación del material en un 21.2 % en comparación con los detonadores convencionales. En el diseño de carga con detonadores electrónicos, el P80 obtenido fue de 6.63 pulgadas frente a las 8.42 pulgadas alcanzadas con los convencionales. Esta mejora en la granulometría demostró un procesamiento más eficiente y una mejor disposición del material en las operaciones posteriores del ciclo de minado.

La implementación de detonadores electrónicos redujo significativamente la vibración por carga operante en un 32.3 %, en comparación con los detonadores pirotécnicos convencionales. Los valores máximos registrados en voladuras electrónicas fueron de 1.89 mm/s, mientras que las pirotécnicas alcanzaron 2.79 mm/s. Esta reducción minimizó los riesgos asociados a la vibración, mejorando las condiciones de seguridad y reduciendo el impacto ambiental.

El uso de detonadores electrónicos también optimizó los costos operativos, siendo hasta un 4.1 % más económico que los diseños con detonadores

convencionales. El diseño más eficiente, que emplea detonadores electrónicos con carga corrida y Airdeck, presentó un costo de $817.94 por taladro, frente a los $852.7 asociados a los diseños convencionales. Es así que la inversión en detonadores electrónicos ofrece beneficios económicos directos en las operaciones de perforación y voladura.

VI. RECOMENDACIONES

En base a los resultados obtenidos en el presente estudio, se plantean las siguientes recomendaciones dirigidas a optimizar las operaciones de perforación y voladura en la zona de desmonte de la unidad minera Shougang Hierro Perú:

Se recomienda adoptar el uso de detonadores electrónicos de manera general en las operaciones de perforación y voladura. Los resultados muestran que su uso permite una mejora significativa en la granulometría, lo cual contribuirá directamente a una mayor eficiencia en el manejo del material fragmentado y a la reducción de costos asociados al procesamiento.

Dado que las voladuras con detonadores electrónicos generan un 32.3% menos vibración pico por carga operante en comparación con las voladuras pirotécnicas, se recomienda estandarizar su uso para minimizar el impacto en la estabilidad geotécnica y reducir los riesgos asociados a las vibraciones excesivas en áreas sensibles, con riesgo de desprendimiento de rocas o cercanas a instalaciones importantes. Asimismo, esta mejora en el control de vibraciones puede facilitar la aprobación de voladuras en zonas cercanas a estructuras críticas o centros poblados.

Se debe integrar configuraciones avanzadas como el uso de cámaras de aire (Airdeck) con carga corrida en los diseños de carga explosiva junto con los detonadores electrónicos. Este enfoque ha demostrado ser el más eficiente en términos de costos, con un costo por taladro de $817.94, representando una reducción del 4.1% frente al diseño de taladro con

detonador pirotécnico. Esto podría traducirse en un ahorro económico significativo a largo plazo, especialmente en operaciones de gran escala como las de Shougang Hierro Perú.

Se recomienda implementar programas de capacitación para el personal técnico y operativo en el uso, configuración y mantenimiento de sistemas de detonadores electrónicos. Esto garantizará una correcta implementación y maximización de los beneficios técnicos y económicos asociados. Actualmente las operaciones de perforación y voladura en muchos casos se encuentran tercerizadas. Asimismo, herramientas como el programa O-pitblast y WipFragTM 4 deben ser utilizadas para generar datos consistentes que faciliten la toma de decisiones basada en evidencia.

Se recomienda realizar un análisis costo-beneficio más detallado en proyectos similares dentro de la unidad minera para determinar la viabilidad económica de escalar la implementación de detonadores electrónicos a otras zonas de operación. Considerando los ahorros en costos por taladro y las mejoras operativas, esta inversión puede ser altamente rentable, no obstante existen otros factores a considerar como las condiciones del terreno, la disponibilidad de explosivos y la capacidad técnica del personal.

VII. REFERENCIAS

Agrawal, H., y Mishra, A. (2020). *An Analytical Approach to Measure the Probable Overlapping of Holes Due to Scattering in Initiation System and Its Effect on Blast-Induced Ground Vibration in Surface Mines*. Mining, Metallurgy & Exploration. doi:10.1007/s42461-020-00350-2

Al-Bakri, A., y Hefni, M. (2021). *A review of some nonexplosive alternative methods to conventional rock blasting*. Open Geosciences, 13(1), 431–442. doi:10.1515/geo-2020-0245

Alcalde, J. (2019). *Emulsión gasificada en reemplazo de heavy ANFO para reducir el P80 en la fragmentación e incrementar la productividad en carguío, acarreo y chancado en mina Shougang Hierro Perú*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Trujillo]. Repositorio de la Universidad Nacional de Trujillo. https://hdl.handle.net/20.500.14414/15735

Alegre, E. (2023). *La voladura controlada y su influencia en los costos de operación de la compañía minera San Ignacio de Morococha S.A.A*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional del Centro del Perú. Disponible en http://hdl.handle.net/20.500.12894/9241

Bampfield, H., y Morrey, W. (1984). *Emulsion explosives*. En CIM Third Coal Operators' Conference, Fernie, British Columbia, Canadá.

Cardu M., Giraudi A. y Oreste, P. (2013). *A review of the benefits of electronic detonators.* Esc. Minas, Ouro Preto, 66(3), 375-382. Doi: https://doi.org/10.1590/S0370-44672013000300016

Cueva, B. y Herrera, I. (2018). *Comparación de la Productividad, Fragmentación y Costos del Sistema de Iniciación Electrónica Versus Pirotécnica en Voladura Minera Yanacocha S.R.L*. [Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte]. Repositorio institucional

de la Universidad Privada del Norte. Disponible en https://hdl.handle.net/11537/14653.

Cueva, A. y Huaynate, A. (2020). *Aplicación de fragmentador de roca, Plasma FRAG BE, en sectores productivos de la Compañía Minera Cerro de Pasco cercanas a zonas urbanas para reducir impactos generados durante la fragmentación del macizo rocoso*. [Tesis de pregrado, UPC]. Repositorio de la Universidad Peruana de Ciencias. http://hdl.handle.net/10757/654904

Davey Bickford Enaex (2018). *Davey Tronic OP/OPW Sistema Digital de Voladura/Detonadores Electrónicos*. Davey Bickford-Enaex. [Archivo pdf]. Disponible en http://www.daveybickfordenaex.com/media/129573/davey tronic-opopw-esp-4-pages-2018-bat2.pdf

Exsa S.A. (2019). *Manual práctico de voladura*. Exsa. 5ta Edición.

Enaex (2021). *Brinel Sistema de Iniciación No Eléctrico*. Davey Bickford. [Archivo pdf]. Disponible en https://www.enaex.com/cl/content/uploads/sites/2/2022/02/Brinel-1.pdf

Energiminas (08 de febrero de 2024). *Shougang Hierro: en busca de más mineral de hierro en Marcona*. Consultado el 09 de septiembre de 2024 en https://energiminas.com/2024/02/08/shougang-hierro-en-busca-de-mas-mineral-de-hierro-en-marcona/

Flores, D. (2022). *Optimización de la fragmentación resultante para el mineral relacionado a la exactitud y precisión del iniciador electrónico con las propiedades geomecánicas en mina Cuajone*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Moquegua]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional de Moquegua. Disponible en https://repositorio.unam.edu.pe/handle/UNAM/461

Garai, D., Agrawal, H., Mishra, A. y Kumar,S. (2018). *Influence of initiation system on blast-induced ground vibration using random forest algorithm, artificial neural network, and scaled distance analysis.*

International Information and Engineering Technology Association. 5(4), 418-426. doi: 10.18280/mmep.050419

Huamani (2021). *Análisis técnico y económico de perforación y voladura para el control del grado de fragmentación postvoladura en una mina a tajo abierto – 2021*. [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. Repositorio institucional de la Universidad Continental. Disponible en https://hdl.handle.net/20.500.12394/12027

Huincho, J. (2022). *Optimización del proceso de perforación y voladura para mejorar la eficiencia de avance y controlar la sobrerotura en los frentes de avance de la unidad minera Cerro Lindo, Nexa Resources S. A. A.* [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. Repositorio de la Universidad Continental. https://hdl.handle.net/20.500.12394/12258

Iwano, K., Hashiba, K., Nagae, J., y Fukui, K. (2020). *Reduction of tunnel blasting induced ground vibrations using advanced electronic detonators*. Tunnelling and Underground Space Technology, 105, 103556. doi:10.1016/j.tust.2020.103556

Leiva, D. (2019). *Implementación del sistema Dispatch: Control de equipos de carguío y acarreo en minería a cielo abierto para optimizar los costos operativos en la compañía minera Shougang Hierro Perú S.A.A. – Mina 5- Marcona – Perú.* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional “Santiago Antúnez de Mayolo]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional “Santiago Antúnez de Mayolo. Disponible en http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/4316

Mamani, Y. (2018). *Optimización de la Fragmentación con el Uso de Detonadores Electrónicos en la Mina Toquepala*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohman]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohman. Disponible en https://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/20.500.12510/1772

Molina, M. (2023). *Voladura controlada en corona con Famecorte E-20 para plantear oportunidades de mejora de indicadores claves de desempeño en perforación voladura*. [Tesis de pregrado – Universidad Continental]. Repositorio de la Universidad Continental. https://hdl.handle.net/20.500.12394/12989

Ministerio de Energía y Minas (2023). *Anuario Minero 2022*. Vera, O., Riva, J. y Sánchez, W. (Eds.). [Archivo PDF]. Disponible en https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4700376/ 2022.pdf?v=1689975935

Mishra, A., Nigam, Y., y Singh, D. (2017). *Controlled blasting in a limestone mine using electronic detonators: A case study.* Journal of the Geological Society of India, 89(1), 87–90. doi:10.1007/s12594-017-0563-5

NubeMinera (2024). *Diseño malla de producción para cielo abierto con implementación en Python (DMP*). Nube Minera Mining Research Collective. Consultado el 7 de septiembre de 2024 en https://nubeminera.cl/course/dmp/

O-pitblast (2018). *O-pitblast User Manual V.2.0*. O-pitblast. Portugal. Disponible en https://downloads.o-pitblast.com/files/manual/O-Pitblast%20Manual% 20 v.3.0.pdf

Peña, J. (2019). *Reducir el Porcentaje de Dilución mediante el Reemplazo de Detonadores Pirotécnicos por Detonadores Electrónicos, en la Fase 5 del Tajo Isabelita - El Toro*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Trujillo]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Trujillo. Disponible en https://hdl.handle.net/20.500.14414/14743

ProActivo (2024). *Shougang Hierro Perú normaliza sus operaciones en Marcona*. Consultado del 7 de septiembre de 2024 en https://proactivo.com.pe/shougang-hierro-peru-normaliza-sus-operaciones-en-marcona/

Ren, D., Hou, J., Duan, J., Ye, Y., Liu, X., y Liu, D. (2022). *Failure mode analysis of electronic detonator under high overload condition*. FirePhysChem, 2(2), 199–205. doi:10.1016/j.fpc.2022.02.001

Roy, M., Mishra, A., Agrawal, H., y Singh, P. (2020). *Blast vibration dependence on total explosives weight in open-pit blasting*. Arabian Journal of Geosciences, 13(13). doi:10.1007/s12517-020-05560-y

Shougang Hierro Perú S.A.A (2023). *Memoria Anual Año 2023*. [Archivo PDF]. Disponible en https://www.smv.gob.pe/ConsultasP8/temp/Memoria%20Anual%202023%20-%20SHP.pdf

Singh, C., Agrawal, H., Mishra, A., y Singh, P. (2019). *Reducing environmental hazards of blasting using electronic detonators in a large opencast coal project-a case study*. Journal of Mines, Metals & Fuels, 67(7), 345-350. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/262743895_A_review_of_the_benefits_of_electronic_detonators

Silva, J., Worsey, T., y Lusk, B. (2018). *Practical assessment of rock damage due to blasting*. International Journal of Mining Science and Technology, 29, 379-385. doi: 10.1016/j.ijmst.2018.11.003

Tafur, F. y Mautino F. (2022). *Modelo Predictivo de Fragmentación en Voladura en Función del Macizo Rocoso y el Explosivo Utilizado en una Mina Open Pit en Ayacucho*. [Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte]. Repositorio institucional de la Universidad Privada del Norte. Disponible en https://hdl.handle.net/11537/34563

Valdivia (2023). *Implementación de detonadores electrónicos en Mina Shougang Zona Nueva para incrementar la seguridad y eficiencia en el proceso de voladura.* [Tesis de maestría - Escuela de posgrado Newman]. Repositorio de la Escuela de Posgrado Newman. https://hdl.handle.net/20.500.12892/1073

Vargas, J. (2021). *Voladura con Iniciación Pirotécnica, Electrónica y Aplicación de Fracturamiento con Plasma ejecutado por la Empresa Enaex S.A. en Áreas 3000 y 4000 del Proyecto Quellaveco*. [Informe final de trabajo de suficiencia profesional, Universidad Nacional de Moquegua]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional de Moquegua. Disponible en https://repositorio.unam.edu.pe/handle/UNAM/253

Vidal, M. (2020). *Voladura controlada aplicando el modelo matemático de Holmberg y la ingeniería de explosivos para mejorar la eficiencia de avance en la CIA Minera Poderosa S.A*. [Tesis de pregrado – Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio de la Universidad Nacional del Centro del Perú. http://hdl.handle.net/20.500.12894/5923

Walliman, N. (2022). *Research Methods The Basics*. (3era Ed.). Routledge. DOI: 10.4324/9781003141693

WipWare (2021). *Sampling and Analysis Guide*. WipWare. Ontario, Canadá. Disponible en https://wipware.com/wp-content/uploads/2021/06/Sampling-and-Analysis-Guide-2021.pdf

WipWare (22 de Junio de 2020). *WipFrag Image Analysis Software*. [Archivo de Vídeo]. https://www.youtube.com/watch?v=k2uYcwF7--g

VIII. ANEXOS

Anexo 1. Matriz de Consistencia

Título: Determinación de la eficiencia de los detonadores electrónicos frente a los convencionales en la zona de desmonte de la unidad minera Shougang Hierro Perú

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Método
General ¿Cómo influye la implementación de detonadores electrónicos en la optimización de la granulometría y la eficiencia operativa en las actividades de perforación y voladura en la zona de desmonte de la unidad minera Shougang Hierro Perú?	**General** Identificar los efectos de la implementación de detonadores electrónicos en reemplazo de detonadores convencionales a fin de mejorar la eficiencia operativa y optimizar la granulometría resultante de las actividades de perforación y voladura en la zona de desmonte de la unidad minera Shougang Hierro Perú.	**Principal** La implementación de detonadores electrónicos, en reemplazo de los detonadores convencionales, generará menores costos por taladro, menores vibraciones por carga operante y también mejorará significativamente la granulometría en la zona de desmonte de la unidad minera Shougang Hierro Perú.	**Variable Dependiente:** Eficiencia operativa y granulometría. **Indicadores de Variable Dependiente** (1) Granulometría o P80 (pulg.). o Promedio, rango, mín., max. (pulg.). (2) Eficiencia Operativa - Costo por taladro ($/tal). - Vibraciones (mm/s)	**a) Tipo de investigación** Cuantitativa y aplicada **b) Diseño de la investigación** Experimental **c) Ámbito de estudio** Unidad Minera Shougang Hierro Perú. **d) Población** Todas las actividades de perforación y voladura en la zona de desmonte de la unidad minera Shougang Hierro Perú. **e) Muestra** Proyectos de Voladura “M14 Nv 650 Py 115” y “M14 Nv 650 Py117” con detonadores electrónicos y no electrónicos en la zona de desmonte de la unidad minera Shougang Hierro. **f) Técnicas de recolección de datos** ➢ Observación directa. ➢ Análisis documental de los registros de perforación y voladura. ➢ Análisis de granulometría. **g) Instrumentos** ➢ Registros de perforación y voladura. ➢ Estándares de perforación y voladura de Shougang Hierro Perú. ➢ Programa O-pitblast. ➢ Programa WipFrag™ 4.
Específicos (1) ¿Cuál es la influencia del uso de detonadores electrónicos en reemplazo de detonadores convencionales en la granulometría de la roca resultante en la zona de desmonte de la unidad minera Shougang Hierro Perú?	**Específicos** (1) Analizar la granulometría de las actividades de perforación y voladura con detonadores electrónicos y comparar con el uso de detonadores convencionales, en la zona de desmonte de la unidad minera Shougang Hierro Perú.	**Específicas** (1) La implementación de un diseño de carga explosiva con detonadores electrónicos mejorará significativamente la fragmentación del material resultante en la zona de desmonte en la unidad minera Shougang Hierro Perú en el año 2024, optimizando la fragmentación y la granulométrica.	**Variables independientes:** Diseño de carga explosiva. **Indicadores de Variable Independiente** - Diseño de carga (kg.). - Espaciamiento (m.). - *Burden* (m.). - Diseño de taco (m.). - Diámetro de broca (pulg.). - Tiempo entre taladros y filas(ms.)	
(2) ¿Cómo afecta la implementación de los detonadores electrónicos en la eficiencia operativa en términos de costo por taladro y vibración por carga operante en la zona de desmonte de la unidad minera Shougang Hierro?	(2) Determinar el costo por taladro y vibración por carga operan del uso de los detonadores electrónicos en el diseño de carga explosiva frente al uso de detonadores convencionales en la zona de desmonte de la unidad minera Shougang Hierro Perú.	(2) La voladura con detonadores electrónicos presentará un menor costo por taladro y menores valores de vibración por carga operante debido a que estos ofrecen mayor eficiencia que los detonadores convencionales al ser más precisos y permitir un mayor control y exactitud en el diseño de voladura en la zona de desmonte en la unidad minera Shougang Hierro Perú.		

Anexo 2. Ficha técnica del sistema de iniciación electrónica DaveyTronic OP

DaveyTronic® OP/OPW

Davey Bickford Enaex

Sistema Digital de Voladura / Detonadores Electrónicos



APLICACIÓN

Canteras, construcción y pequeñas minas tajo abierto.

PRODUCTIVIDAD

- La alta precisión y confiabilidad del detonador **DaveyTronic® OP** mejora significativamente el rendimiento de la voladura:
  - Paredes más limpias y estables
  - Mayor tamaño del patrón de voladura
  - Mejoramiento en la fragmentación y uniformidad del material
  - Disminución de vibracioness
- La facilidad de uso de **DaveyTronic® OP** permite una programación rápida con capacidades de disparo remoto

SEGURIDAD

DaveyTronic® está diseñado para una seguridad completa durante todo el procedimiento de voladura.

- **Mayor seguridad a nivel de detonador**
  - Un doble condensador exclusivo: uno para comunicación bidireccional con los equipos de voladura y otro para el disparo
  - Exclusiva tecnología Smartshunt, para aislar el fusehead hasta que el comando de fuego es recibido
  - Excelente protección contra descargas electrostáticas (ESD) y campos electromagnéticos (EMP)
- **Mayor seguridad a nivel de sistema**
  - Procedimiento continúo de testeo hasta que el comando fuego es ejecutado
  - Bloqueo electrónico de seguridad para autorizar el procedimiento de disparo
  - El acoplamiento del equipo pre-voladura garantiza la inmunidad a otras interferencias de RF

PROTECCIÓN

DaveyTronic® OP tiene un protocolo de comunicación codificado, seguro y patentado para el control de línea de disparo y la transmisión inalámbrica de datos.
La tecnología RFID integrada y único ID de trazabilidad de cada detonador completan las características de seguridad.

DESCRIPCIÓN

El sistema digital de voladura **DaveyTronic® OP/OPW** incluye un set de tres tipos de unidades robustas:

- 1 blaster remoto (DRB) que gestiona el procedimiento de pruebas y disparo, se comunica de forma remota con cada detonador
- 1 unidad de programación (PU), identifica y diagnostica probando separadamente cada detonador en el banco, y asigna el tiempo de retardo
- 1 compacto Blast Driver (DBD)*, se comunica de forma inalámbrica desde el DRB2 y proporciona energía para disparar hasta 500 detonadores (también disponible para voladuras con cable)

*únicamente con **DaveyTronic® OPW**





CARACTERISTICAS OPERACIONALES	
Detonadores	Solo puede ser utilizado con detonadores DaveyTronic® OP
Modo Monoblast	Hasta 500 detonadores
Modo de Conexión	3 modos: Uno a Uno - Fácil Uno a Uno – En Línea
Modo de Programación	3 modos: Manual - Incremental - Automático (diseño en computador)
Conexión a la DRB2	Cable o Radio Frecuencia*
Accesorios / Cables	El sistema de voladura DaveyTronic® OP solo podrá ser usado con el cable de superficie autorizado

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS			
	Blaster Remoto - DRB2	Blast Driver - DBD*	Unidad de Programación - PU
Peso (kg/lbs)	1,8 / 4,0	1,9 / 4,2	1,2 / 2,7
Tamaño (mm) (pulgadas)	240 x 190 x 32 9,4" x 7,5" x 1,3"	185 x 185 x 55 7,3" x 7,3" x 2,2"	220 x 140 x 32 8,7" x 5,5" x 1,3"
Lenguajes Disponibles	Inglés / Francés / Español / Portugués **		
Registro de Eventos	Archivo historial, archivo datalogger		/
Llave de Seguridad	Tarjeta de seguridad RFID	/	/
Actualización del Firmware	A través del puerto USB		
Tipo de Batería	Technologie Li-Ion		
Autonomía	4 h - Nivel de indicador	4h de stand-by + 1h en COM	8 h - Nivel de indicador
Cargador	Entrada: 100 – 240 V AC - 50-60 Hz, 2,0 A - Salida: 10-12V CC - Corriente nominal: 4A máx. Tiempo de carga: 4 horas hasta 4 equipos		
Clasificación de Protección de Ingreso	IP 65	IP 67	IP 65
Pantalla	5.7" TFT Color QVGA con retroiluminación	Indicador LED de 4 estados	3.5" FSTN N&B con retroiluminación
Teclado	14 teclas iluminadas	/	18 teclas iluminadas
Altavoz Integrado	Instrucciones vocal / beeps	/	Beeps
Puertos de Comunicación	RS232 - USB - RFID - ETHERNET		USB - RFID - ETHERNET
Capacidad	Hasta 500 detonadores por voladura		Programación y Pruebas: 500 detonadores
Rango Inalámbrico	Hasta 1500 metros, sujeto a condiciones ambientales		/
Rango de Frecuencia	868 MHz o 923 MHz o 2,4 GHz		/
Temperatura de Operación	Operación: -20°C a +50°C / -4°F a +122°F / Cargando batería: 0°C a +40°C / +32°F a +104°F		
Temperatura de Almacenamiento	-40°C a +70°C / -40°F a +158°F		
Caja (todo en uno)	DaveyTronic® OP: Pelican 1430 negra resistente al agua DaveyTronic® OPW: Pelican 1520 negra resistente al agua		
Caja de cartón - Peso	DaveyTronic® OP: 40 x 30 x 35 cm / 15,7" x 11,8" x 13,8" - 7,5 kg / 16,5 lbs DaveyTronic® OPW: 50 x 40 x 25 cm / 19,7" x 15,7" x 9,8" - 11,5 kg / 25 lbs		
Certificados	Cumple con los estándares Europeos CEN TS/ 13763-26 & 27 Cumple con los estándares Sudafricanos SANS 1717-1 y ARP 1717-1 Marca CE Clasificación de Transporte UN 3481, Cl9, Gr2		

Anexo 3. Ficha técnica del sistema de iniciación no electrónica Brinel

Brinel®

Davey Bickford

FT 051/01/01 R1
Mar. 2021



SISTEMA DE INICIACIÓN
NO ELÉCTRICO

DESCRIPCIÓN

Brinel es una familia de detonadores con retardo, de iniciación no eléctrica, utilizados para la iniciación de cargas explosivas. Propician excelentes resultados gracias a la precisión de sus tiempos de retardo y su iniciación puntual, sea en minería a cielo abierto o subterránea, canteras o construcción civil.
Fabricado con el tubo Thermotube, que tiene tecnología diferenciada que no utiliza explosivo. Diferente de los tubos convencionales, que emiten una onda de choque, con el Thermotube, se emite una chispa fundida de alta temperatura.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Diámetro interno (mm)	1,25 – 1,50
Diámetro externo (mm)	2,96 – 3,24
Resistencia a la tracción (kgF)	40
Alargamiento (%)	128
Velocidad de propagación (m/s)	1.140 – 1.275
Resistencia al agua*	Resistente
Tipo de conector	J
Longitud** (m)	4,8 - 6 – 12 - 15 - 18 – 21 - 25 - 30
Temperatura de operación (°C)	-40 a +45

*Para aplicaciones en voladuras subacuáticas, consulte el área de Servicio al Cliente.
**Para otras longitudes, consulte el área de Servicio al Cliente.

TIEMPOS DE RETARDO

Tiempo (ms)	0	25	50	75	100	125	150
Número	0	1	2	3	4	5	6
Tiempo (ms)	175	200	225	250	275	300	350
Número	7	8	9	10	11	12	14
Tiempo (ms)	400	450	500	600	700	850	1.000
Número	16	18	20	24	28	34	40
Tiempo (ms)	1.250	1.500	1.750	2.000	2.500	3.000	3.500
Número	50	60	70	80	100	120	140
Tiempo (ms)	4.000	4.500	5.000	6.000	6.800	7.500	8.300
Número	160	180	200	240	272	300	332

INFORMACIÓN DE TRANSPORTE



UN 0360
CONJUNTOS DE DETONADORES
NO ELÉCTRICOS
Clase de riesgo: 1.1B



UN 0361
CONJUNTOS DE DETONADORES
NO ELÉCTRICOS
Clase de riesgo: 1.4B***

***Bajo consulta.

APLICACIÓN Y RECOMENDACIÓN DE USO

- Minería a cielo abierto y subterránea, canteras, construcción civil y voladuras subacuáticas;
- Iniciación recomendada: Brinel Conexión / Britacord NP05 / Detonador nº8 / Brinel Iniciador.

EMBALAJE

Longitud (m)	4,8	6	12	15	18	21	25	30
Unidades por caja (piezas)	100	100	100	100	100	100	80	60
Dimensiones LxAxA (cm)	62 x 31 x 25	62 x 31 x 45						
Tipo	Caja de cartón							

ALMACENAMIENTO Y GARANTÍA

Conservado en su embalaje original y almacenado bajo las condiciones adecuadas el producto goza de una garantía de 36 meses a partir de la fecha de fabricación. Se debe cumplir con los requisitos legales vigentes.

FABRICACIÓN

- Quatro Barras - PR, Brasil, Enaex Brasil.

¿Le gustaría contactar a nuestros expertos?

Dirección: Rod. Régis Bitencourt, km 1
Quatro Barras/PR
Teléfono: 0800 701 0141
E-mail: contato.brasil@enaex.com
www.enaex.com

ADVERTENCIA

Enaex S.A. solo se hace responsable de la información que está expresamente indicada en este catálogo y no se responsabiliza por daños, pérdidas o cualquier contingencia derivada del uso de los productos, salvo las que fueren expresamente indicadas en la legislación local vigente. El uso de explosivos está regulado en cada país por leyes propias. Enaex S.A. se reserva el derecho de modificar sus productos, sin aviso previo.

Enaex

Anexo 4. PETS y Estandares

	ESTANDAR DE OPERACIONES MINA		
	PRIMADO DE TALADROS		
	Código:	Revisión:	
	Fecha de elaboración: 28-12-24	Página	

1. OBJETIVO

- Establecer los lineamientos para identificar los peligros, evaluar y controlar los riesgos relacionados a la Seguridad asociados a la actividad de primado de taladros.

2. ALCANCE

Este estándar se aplica a todas las áreas de operaciones mina en Shougang Hierro Peru.

3. REFERENCIAS LEGALES Y OTRAS NORMAS

- Ley 29783 Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo.
- DS N° 024-2016-EM y su Modificatoria D.S 023 -2017-EM

4. ESPECIFICACIONES DEL ESTANDAR

4.1. Definiciones

- **Operario de piso:** Persona natural con autorización para manipular accesorios de voladura y explosivos.
- **Accesorios de voladura:** Son los dispositivos o productos utilizados para suministrar o transmitir energía para que se inicie la detonación del explosivo.
- **Taladro:** Agujero en el macizo rocoso o suelo efectuado por un equipo de perforación, donde se introduce el explosivo a fin de efectuar la voladura.
- **Supervisor de Voladura:** Es la persona, designada por la planificación de tareas asi como el responsable de la operación minera.

4.2. Especificaciones:

- La realización del IPERC por parte del Operario de piso, es obligatoria, la misma que debe ser verificada por el Supervisor.
- Durante el traslado de accesorios de voladura deberá hacerse con previa evaluación del terreno.
- Hacer uso del celular solo cuando sea necesario o casos de emergencia.
- Durante el primado de taladros asegurar que la prima llegue al fondo del taladro y que este en optimas condiciones para su posterior carguío.
- Colocar una estaca o roca lo suficientemente resistente para el soporte en la parte de la prima en la parte superior del taladro.

- Estar atento en todo momento a la radio para las coordinaciones dentro del proyecto de voladura.

5. RESPONSABLES

5.1. Supervisor de voladura.

- Asegurar que las condiciones de trabajo en campo sean óptimas y seguras.
- Cuando cerca al talud, asegurar que no haya desprendimiento de rocas.
- Reportar al área de Geotecnia cualquier deslizamiento y/o anomalías que se presente en el nivel del banco o talud.
- Reportar al área de Seguridad todo accidente o incidente.
- Asegurar que los trabajadores cuenten con autorización para el manipuleo de explosivos.

5.2. Operario de piso

- Solo personal capacitado con licencia de SUCAMEC.
- Realizar la inspección del área de trabajo antes de repartir accesorios de voladura.
- Reportar a su Supervisor todo accidente o incidente que se presente.
- Someterse al dosaje etílico ante la Policía Nacional en caso de accidente de trabajo dentro del plazo establecido por ley.

5.3. Ingeniero de Seguridad

- Verificar el cumplimiento del presente estándar.
- Dar las recomendaciones del caso al infractor y a su supervisor.

6. REGISTROS, CONTROLES Y DOCUMENTACIÓN

- Formato de IPERC continuo.
- Reportes de condiciones y actos Subestándares.

7. REVISIÓN

- Este estándar será revisado como mínimo anualmente y cada vez que la normatividad legal vigente sufra un cambio y/o modificaciones.

	ESTANDAR DE OPERACIONES MINA		
	PROGRAMACION DE DETONADORES ELECTRONICOS		
	Código:	Revisión:	
	Fecha de elaboración: 28-12-24	Página	

1. OBJETIVO

- Establecer los lineamientos para identificar los peligros, evaluar y controlar los riesgos relacionados a la Seguridad asociados a la actividad de programación de detonadores electrónicos.

2. ALCANCE

Este estándar se aplica a todas las áreas de operaciones mina en Shougang Hierro Perú.

3. REFERENCIAS LEGALES Y OTRAS NORMAS

- Ley 29783 Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo.
- DS N° 024-2016-EM y su Modificatoria D.S 023 -2017-EM

4. ESPECIFICACIONES DEL ESTANDAR

4.1. Definiciones

- **Operario de piso:** Persona natural con autorización para manipular accesorios de voladura y explosivos.
- **Programador de disparos electrónicos:** Persona natural, con certificación en sistemas de iniciación electrónica, encargado de la detonación de voladuras electrónicas.
- **Accesorios de voladura:** Son los dispositivos o productos utilizados para suministrar o transmitir energía para que se inicie la detonación del explosivo.
- **Taladro:** Agujero en el macizo rocoso o suelo efectuado por un equipo de perforación, donde se introduce el explosivo a fin de efectuar la voladura.
- **Supervisor de Voladura:** Es la persona, designada por la planificación de tareas asi como el responsable de la operación minera.

4.2. Especificaciones:

- La realización del IPERC por parte del Operario de piso y programador de disparos electrónicos, es obligatoria, la misma que debe ser verificada por el Supervisor.
- Antes de realizar las tareas de testeo o programación de detonadores electrónicos, hacer la verificación de equipos mediante el Chek List.
- Durante la programación de los detonadores electrónicos, deberá hacerse con previa evaluación del terreno.

- Hacer uso del celular solo cuando sea necesario o casos de emergencia.
- Durante el primado de taladros asegurar que la prima llegue al fondo del taladro y que este en optimas condiciones para su posterior carguío.
- Colocar una estaca o roca lo suficientemente resistente para el soporte en la parte de la prima en la parte superior del taladro.
- Luego del carguío de taladros, asegurar la operatividad de los detonadores electrónicos mediante el testeo o logueo.
- Estar atento en todo momento a la radio para las coordinaciones dentro del proyecto de voladura.

5. RESPONSABLES

5.1. Supervisor de voladura.

- Asegurar que las condiciones de trabajo en campo sean optimas y seguras..
- Cuando cerca al talud, asegurar que no haya desprendimiento de rocas.
- Reportar al área de Geotecnia cualquier deslizamiento y/o anomalías que se presente en el nivel del banco o talud.
- Reportar al área de Seguridad todo accidente o incidente.
- Asegurar que los trabajadores cuenten con autorización para el manipuleo de explosivos.

5.2. Operario de piso

- Solo personal capacitado con licencia de SUCAMEC.
- Realizar la inspección del área de trabajo antes de repartir accesorios de voladura.
- Reportar a su Supervisor todo accidente o incidente que se presente.

5.3. Programador de Disparos electrónicos

- Personal capacitado y certificado en iniciación electrónica.
- Realizar inspección de proyecto de voladura y equipos de iniciación electrónica.
- Reportar al Supervisor actos y condiciones subestándar.

5.4. Ingeniero de Seguridad

- Verificar el cumplimiento del presente estándar.
- Dar las recomendaciones del caso al infractor y a su supervisor.

6. REGISTROS, CONTROLES Y DOCUMENTACIÓN

- Formato de IPERC continuo.

- Reportes de condiciones y actos Subestándares.
- Check List de equipos

7. REVISIÓN

- Este estándar será revisado como mínimo anualmente y cada vez que la normatividad legal vigente sufra un cambio y/o modificaciones.

8. ANEXOS

	ENAEX	GG
Código de documento: PE-ENX-OA-HSE-00-F-024	CHECK LIST DIARIO EQUIPOS DAVEYTRONIC SP	

Cliente: _____ **Fecha:** _____ **Hora:** _____

PATRONES DE REVISIÓN (NA: No aplica para el equipo)	DRB Nº:		DRB Nº:		DBD Nº:		DBD Nº:		PU Nº:		PU Nº:		PU Nº:		PU Nº:	
	☑	☒	☑	☒	☑	☒	☑	☒	☑	☒	☑	☒	☑	☒	☑	☒
N° 1: ESTADO DE CUMPLIMIENTO SEGÚN REGLAS DE ORO																
Pantalla sin daño					NA		NA									
Pantalla con placa de acrílico y adhesivo de protección					NA		NA									
Tapa protectora y pines para Ethernet, USB, Power sin daños					NA		NA									
Placa de acrílico de protección para RFID en buen estado	NA		NA		NA		NA									
Conectores Ethernet, USD, Power sin daños	NA		NA						NA		NA		NA		NA	
Tapa protectora para proteger del conector de antena									NA		NA		NA		NA	
Conector de antena sin daños									NA		NA		NA		NA	
Conectores militares para cable M35 de la voladura sin daños									NA		NA		NA		NA	
Conectores militares para cable M35 de synohroblast sin daños	NA		NA						NA		NA		NA		NA	
Conector amarillo de estaca a tierra sin daño									NA		NA		NA		NA	
Conectores de presión de conexión M35 sin daños	NA		NA		NA		NA									
Pines de programación en buen estado	NA		NA		NA		NA									
Arnés y correas de sujeción sin daños	NA		NA		NA		NA									
Fecha de mantención legible y vigente																
Fecha de cambio de batería legible y vigente																
¿Confirma usted que el equipo visualmente esta limpio y sin daños?																
N° 2: FUNCIONALIDAD																
¿El equipo completa su Autotest de manera satisfactoria? (DRB mensaje OK); (DBD 1er LED verde parpadeando); (PU mensaje OK)																
¿El nivel de la batería es mayor a 75%?																
¿La tarjeta RFID está en buenas condiciones?					NA		NA		NA		NA		NA		NA	
DRB 01 y 02, tiene MODEM INTERNO ACTIVADO					-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
¿El equipo puede ser tageado a través de RFID?	NA		NA													
¿El teclado funciona de forma correcta? ***(Esto se debe realizar simulando un disparo con dummies para verificar que TODOS los botones del teclado estén operativas)***																

PROCEDIMIENTO ESCRITO DE TRABAJO - PET

TÍTULO: PRIMADO DE TALADROS

Código:	**Versión:**	**AREA: Perforación y Voladura**	**PMC:**
Fecha de Elaboración: 28/12/2024	**Fecha de Revisión:**		
PROTOCOLOS DE FATALIDAD/ACTIVIDAD DE ALTO RIESGO ASOCIADA (FHP): Equipos móviles, Explosivos y voladura, Trabajo en zonas con riesgo de Falla de Terreno y Estratos, Manipulación de sustancias químicas peligrosas.	**PERSONAL RESPONSABLE:** Operario de piso Supervisor de voladura. Supervisor SSOMA	**EQUIPOS DE PROTECCIÓN PERSONAL (ESPECÍFICO):** Casco de seguridad, zapatos de seguridad, lentes de seguridad, guantes, respirador, tapón de oídos, chaleco reflectivo, barbiquejo, bloqueador solar, respirador de media cara.	

CONSIDERACIONES GENERALES/RESTRICCIONES:

Esta Prohibido:

- Si esta fatigado, auto medicado, o con síntomas de salud anormal, no paralizar la actividad.
- Hacer uso del celular en la malla de carguio.

Es Obligatorio: Contar con el carné de manipulador de explosivos y materiales relacionados emitido por la SUCAMEC .

- Contar con radio de comunicación.

Referencia Legal/otros:

- DS N° 024-2016-EM y su Modificatoria D.S 023 -2017-EM
- D.S. 040-2014 MINEM
- TAN-NOP-MAM-019 Atención y manejo de derrames menores.
- Ley 28256. Ley para la Regulación de Transporte de Residuos Peligrosos.
- TAN-NGE-SGI-010 Gestión de emergencias.
- TAN-NGE-SGI-011 Gestión de incidentes HSEC.

EQUIPOS	MATERIALES	HERRAMIENTAS
	Booster	Conos
Radio de comunicación	Detonador electrónico y pirotécnico	Tacos de seguridad.
	Kit para atención a derrames	Primador
	Bandeja de contención	
	Hojas MSDS	
	Plano de diseño y carguío de taladros	

ETAPAS DE LA TAREA	RIESGO/ASPECTO	PROCEDIMIENTO SEGURO
1. Distribución de accesorios de voladura en malla de carguío.	• Caída al mismo nivel • Tropiezos • Explosión • Incendio • Caída de accesorios a fondo del taladro.	1.1. La ubicación del booster y los detonadores en el taladro debe ser a más de medio metro de la boca del taladro, en línea recta, teniendo al taladro como punto centro y paralelo al ingreso del camión fábrica. 1.2. La ubicación del booster es en posición vertical "parado" para identificarlo fácilmente. 1.3. Todo taladro debe ser primado con: UN iniciador o booster y UN detonador (pirotécnico o electrónico), si fuese necesario se colocará DOS detonadores (01 electrónico y 01 pirotécnico), (02 pirotécnicos), (02 electrónicos), asimismo se puede usar cordón detonante en zonas determinadas. 1.4. Despejar cualquier material (piedras u otros) que se encuentre obstaculizando la "boca del taladro", son peligro a la línea cable de los detonadores. 1.5. Verificar si se han sido muestreado los taladros por geología de no ser así reportar. Los primados de los taladros serán solo a taladros seguros a cargar.

		1.6. No primar taladros que no han sido muestreados, cerca de perforadoras u otros equipos. 1.7. Antes de primar los taladros deben estar previamente medidos e identificados (taladros secos y taladros con agua). Asimismo, nivelados según el caso. 1.8. Si por diseño se requiere en el fondo del taladro un accesorio que forme cámara de aire (taponex, bolsa de aire) debe estar instalado antes del primado. 1.9. Sera responsabilidad del supervisor de voldura asignar al personal para que reparta los taponex, de acuerdo al diámetro de los taladros. Se colocará invertido el taponex a fin de no dañar la línea. 1.10. Toda "prima" debe estar bien sostenida en una roca que no presente ángulos que puedan dañar las líneas descendentes, debe estar colocada en forma paralela.
2. Primado de Taladros.	• Caída al mismo nivel • Tropiezos • Explosión • Incendio • Caída de accesorios a fondo del taladro.	2.1. Trabaje con los accesorios distribuidos en el taladro, o accesorios posicionados en el campo, NUNCA retire accesorios del furgón, y si requiere más accesorios, solicite al encargado del furgón. 2.2. Coja el booster o iniciador, inserte un detonador a la vez (pirotécnico o electrónico). 2.3. Se usará backup en taladros críticos (agrietados, cresta, fangosos, material volado) previa coordinación del supervisor de voladura ENAEX. 2.4. Al insertar nunca presione el detonador; si por algún motivo no es posible insertar al detonador, comunique supervisor y/o devuelva el accesorio al operador de furgoneta para la devolución a polvorines. 2.5. En caso de caída y pérdida de accesorios al interior del taladro u otro motivo comunique al operador del camión y al supervisor de Voladura ENAEX para los controles y comunicaciones necesarias. 2.6. En taladros fangosos debe primarse y cargarse de modo similar a los taladros con agua (bombeable). 2.7. En taladros con agua se colocará como elemento adicional un "ancla" (roca) con una malla para evitar que flote la prima sobre el agua o la carga explosiva. 2.8. Cuando use más accesorios a lo normal en el taladro, comunique al operador de camión fabrica la cantidad usada para su registro. 2.9. Al instante de bajar la prima, efectué la labor con cuidado y siempre bajar por el centro del taladro, evitar golpear con la pared por que puede romperse la línea descendente o dañarse el booster. 2.10. Llegada la prima al fondo de los taladros de producción y buffer, jale 0.50 metros aproximadamente de modo que el booster este a esa altura, "ate" o envuelva el sobrante de la línea a la estaca o roca de manera segura para evitar caer al primar al interior por la carga explosiva. 2.11. El sobrante de la línea descendente debe ubicarse en forma paralela al tránsito del camión fábrica. 2.12. NUNCA prime taladros sin seguir la secuencia de carguío del camión, puede confundir al personal que tapa. 2.13. Culminada la labor, verifique y "cuadre" la cantidad de accesorios usados, cruce información con los datos de los operadores, entregue los accesorios sobrantes contados al encargado del furgón.

PROCEDIMIENTO ESCRITO DE TRABAJO - PET				
TÍTULO: PROGRAMACION DE DETONADORES ELECTRONICOS				
Código:	**Versión:**	**AREA: Perforación y Voladura**	**PMC:**	
Fecha de Elaboración: 28/12/2024	**Fecha de Revisión:**			
PROTOCOLOS DE FATALIDAD/ACTIVIDAD DE ALTO RIESGO ASOCIADA (FHP): Equipos móviles, Explosivos y voladura, Manipulación de sustancias químicas, Falla del terreno / estratos, trabajo cerca de taludes. .	**PERSONAL RESPONSABLE:** Operario de piso Especialista de Disparos Electrónicos. Programador de Disparos Electrónico. Asistente Técnico. Supervisor de voladura ENAEX. Supervisor SSOMA ENAEX	**EQUIPOS DE PROTECCIÓN PERSONAL (ESPECÍFICO):** Casco de seguridad, zapatos de seguridad, lentes de seguridad, guantes, respirador, tapón de oídos y/o orejeras, chaleco reflectivo, barbiquejo, bloqueador solar, respirador de media cara. .		
CONSIDERACIONES GENERALES/RESTRICCIONES: **Está prohibido:** • Fumar y hacer fuego en malla de voladura Mantenerse a la imtemperie durante la alerta roja. **Es obligatorio:** • Contar con el carné de manipulador de explosivos y materiales relacionados emitido por la SUCAMEC Contar con radio de comunicación. • El personal encargado deberá asegurar la operatividad de los equipos mediante un check list y contar con herramientas en buen estado. • Si esta fatigado, auto medicado o con síntomas de salud anormal, paralize la labor y comunique al supervisor	**Referencia Legal/otros:** • DS N° 024-2016-EM y su Modificatoria D.S 023 -2017-EM • TAN-NGE-SGI-010 Gestión de emergencias. • TAN-NGE-SGI-011 Gestión de incidentes HSEC.			

EQUIPOS	MATERIALES	HERRAMIENTAS
Radio de comunicación	Conos de seguridad color amarillo	Alicate pelacable
Camioneta	Plano de radio de influencia de voladura.	Trípode
Set de equipos DaveyTronic® SP EVOLUTION	Plano de vías	Cable de conexión M35
Laptop con software O-pitblast.	Útiles de escritorio	Cinta aislante
DaveyTronic® Unidades de Programación (PU)		Caja protectora metálica
DaveyTronic® Blast Driver (DBD)		
DaveyTronic® Remote Blaster (DRB)		

ETAPAS DE LA TAREA	RIESGO/ASPECTO	PROCEDIMIENTO SEGURO
1. Inspección de equipos.	• Corte. • Golpe. Movimientos repetitivos.	1.1. Utilizar guantes de seguridad. 1.2. Realice la inspección de equipos sobre una superficie plana (mesa, escritorio). 1.3. Contar con tomacorrientes operativos y señalizadas 1.4. Programador de disparos electrónicos realizará el check-list de equipos empleando detonadores inertes (dummy 20 seg) para asegurar la operatividad. 1.5. Realización de simulación de disparo con detonadores inertes (dummy 20 seg) antes de realizar la tarea (en oficinas y/o en campo) en modo alámbricos e inalámbrico.
2. Traslado de personal al proyecto de voladura	• Colisión frontal. • Volcadura o despiste de lado o a desnivel.	2.1. Se informará a B3 y B1/B2 para el traslado al proyecto de voladura. 2.2. Realización de check-list de camioneta para asegurar su operatividad. 2.3. Todos los ocupantes deben llevar abrochado el cinturón de seguridad, tanto en asientos delanteros como traseros. 2.4. Respetar los límites de velocidad y señales de tránsito. 2.5. Aplicar manejo defensivo. 2.6. Solicitar autorización de ingreso a O1 y Geotecnia a operaciones mina.
3. Inspección del área de voladura	• Caída a mismo nivel. • golpe. • Exposición a rayos solares • Exposición a polvo.	3.1. Realice inspección previa a todos los equipos y herramientas utilizados para esta labor. 3.2. En la evaluación del área de trabajo: Se deben verificar los niveles de iluminación (presencia de luminarias) en malla de voladura para trabajos a realizarse sin iluminación solar. 3.3. El programador de disparos electrónicos, inspecciona la zona de ubicación de taladros para el proceso de programación y conexión de la malla; revise si el área tiene pendiente o desniveles que representen algún riesgo para la labor, si los taladros están cerca a talud, si están muy cerca a la cresta o cara libre, verifica el "cuerpo" entre los taladros de primer fila o colindantes a la cara libre, zonas fangosas, ubicación de los equipos de acarreo, presencia de la pala cerca de la zona de los taladros cargados con explosivos, ubicación de equipos cerca al área de labor (bombas, tuberías, cables eléctricos, etc.). De acuerdo a las condiciones iniciara la labor programada con previa coordinación con el B3. 3.4. Solicitar a B3 que los taladros cuenten con las estacas de identificación y cantidad de primas empleadas por taladro. 3.5. Realizar el IPERC continuo (identificación de peligros, evaluación de riesgos y controles) 3.6.
4. Programación de Detonadores Electrónicos	• Polvo. • Ruido. • Explosión. • Caída a distinto nivel. • Caídas a mismo nivel. • Posturas inadecuadas. • Esfuerzo de manos y muñecas. • Movimientos repetitivos prolongados.	4.1. Carnet de manipulador de explosivos (SUCAMEC). 4.2. Evitar la sobrecarga postural estática prolongada. 4.3. Uso de Tapones y/o orejeras auditivas. 4.4. Llevar planos impresos de los taladros y camino de programación. 4.5. La programación de los detonadores electrónicos se realizará después del tapado de los taladros. 4.6. Se asignará el tiempo de retardo de cada detonador según indica el diseño aprobado por SHP. 4.7. Realizar la programación de los detonadores electrónicos, con la finalidad de verificar la operatividad e integridad durante el proceso de carguío y tapado. 4.8. En el caso de ocurrir una anomalía con los detonadores (Fuga, corte de línea, corto circuito, etc.), el programador informará el evento al Supervisor de Voladura ENAEX. 4.9. Si durante la programación, el personal de Enaex detecta problemas para tener comunicación con el detonador, se hará una evaluación más exhaustiva del detonador y su cable correspondiente.

		4.10. La evaluación del detonador debe hacerse usando el equipo de programación (PU) utilizando la función LEER y/o TEST DE LÍNEA. Así mismo; en caso de no responder el detonador a los comandos de PU y no contar con fuga deberá emplearse el medidor de corte KLEIN para identificar la profundidad del corte. 4.11. Al determinar que no hay comunicación con el detonador, se ubicara claramente en el plano especificando el taladro con problema, luego el B3 comunicara a B1/B2 4.12. El B1/B2 evaluará las condiciones del proyecto y de las zonas adyacentes (si existe equipos, infraestructura) para asignar el tiempo de retardo al back-up 4.13. El B1/B2 dará las instrucciones para el disparo. El detonador con problemas podrá dispararse primero o manteniendo la secuencia definida en el diseño, este criterio está definido por el B1/B2 por ello se debe mantener comunicación directa sobre estos casos. 4.14. Se colocará un detonador electrónico adicional en el tubo de choque del detonador no-eléctrico. 4.15. El tiempo de inicio estándar para todos los proyectos de voladura es de 5000 ms. El tiempo asignado al detonador back up debe guardar una separación con respecto al tiempo de inicio del proyecto de voladura en 2000 ms a 3000 ms antes del inicio, para poder observar una detonación diferenciada del resto de taladros y lograr evidenciar con filmaciones y registros de sismógrafo. Después del disparo, se debe chequear en el material disparado el esponjamiento de la superficie vinculada al taladro a fin de confirmar físicamente su detonación, además de revisar la filmación y la onda generada por el taladro detonado con back up en el registro del sismógrafo. En el caso de sospecha de que un taladro con back up no se haya activado deberá ser considerado como un tiro quedado y deberá tomarse por parte de mina las medidas que corresponden a estos casos. El B1/ B2 instruirá a las áreas que correspondan para delimitarla zona colocando cintas rojas, quedando totalmente prohibido el acceso a la zona.

"UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA"

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

FORMATO DE AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL UNAM

Formulario de autorización para la publicación electrónica en la página web del Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Moquegua, de conformidad con la Ley N° 30035 Ley que regula el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto y Resolución de Comisión Organizadora N° 041-2022-UNAM que aprueba el Reglamento que regula el Repositorio Institucional Digital de la UNAM.

1. DATOS DEL AUTOR

Nombres y Apellidos	: Jose Miguel Fernandez Mamani
DNI/Carnet de Extranjería/Pasaporte N°	: 72641761
Correo electrónico	: josefernandeslv1920@gmail.com
Teléfono/Celular	: 953949516

2. GRADO, TITULO O ESPECIALIZACIÓN (Marque con una X)

Bachiller	Título Profesional	Magister	Doctor	Segunda Especialidad
	x			

3. TIPO DE PUBLICACIÓN (Marque con una X)

a) Articulo ( )
b) Tesis de pregrado (x)
c) Tesis de Maestría ( )
d) Tesis de Doctorado ( )
e) Monografía ( )
f) Reporte de caso científico o hallazgos ( )
g) Libro ( )
h) Parte de un libro ( )
i) Revisión ( )
j) Conferencia ( )
k) Presentación ( )
l) Artículo preliminar ( )
m) Articulo antes de ser publicado ( )
n) Artículo de prensa ( )
o) Documentos internos ( )
p) Imagen ( )
q) Documentos técnicos ( )
r) Ponencias presentadas en eventos científicos (Jornada, Congreso, Simposio Conferencias, etc.) ( )
s) Informes de suficiencia profesional ( )
t) Patentes producidas por académicos/as ( )

4. TIPO DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN (Marque con una X)

a) Tesis **(x)**
b) Trabajo de Investigación **( )**
c) Trabajo de suficiencia profesional **( )**
d) Trabajo académico **( )**

5. DATOS DE LA PUBLICACION

a) Título: DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LOS DETONADORES ELECTRONICOS FRENTE A LOS CONVENCIONALES EN LA ZONA DE DESMONTE DE LA UNIDAD MINERA SHOUGANG HIERRO PERU
b) Campo del conocimiento OCDE (Indicar el código de clasificación OCDE de la obra : https://catalogos.concytec.gob.pe/vocabulario/ocde_ford.html) : 2.07.05
c) Fecha de publicación: .....

6. DATOS DEL ASESOR:

a) Nombres y Apellidos : Arquimedes Leon Vargas Luque
b) DNI/Pasaporte/Cédula : 01309736
c) ORCID : 0000-0001-7619-2844

FIRMA : .....

DOCUMENTO DE IDENTIDAD : 72641761
NOMBRES Y APELLIDOS : Jose Miguel Fernandez Mamani

"UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA"

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

LICENCIAS

Licencia Estándar

Bajo los siguientes términos, autorizo el depósito de mi trabajo de investigación en el Repositorio Institucional Digital de la UNAM.

Con la autorización de depósito da mi trabajo de investigación, otorgo a la Universidad Nacional de Moquegua, una Licencia No Exclusiva para reproducir. distribuir, comunicar al público, transformar (únicamente mediante su traducción a otros idiomas) y poner a disposición del público mi trabajo de investigación (incluido el resumen), en formato físico o digital, en cualquier medio, conocido o por conocerse, a través de los diversos servicios provistos por la Universidad, creados o por crearse, tales como el Repositorio Institucional Digital de la UNAM, Colección de Tesis, entre otros, en el Perú y en el extranjero, por el tiempo y veces que considere necesarias, y libre de remuneraciones.

En virtud de dicha Licencia, la UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA, podrá reproducir mi trabajo de investigación en cualquier tipo de soporte y en más de un ejemplar, sin modificar su contenido, solo con los propósitos de seguridad, respaldo y preservación.

Declaro que el trabajo de investigación es una creación de mi autoría y exclusiva titularidad, o coautoría con titularidad compartida, y me encuentro facultado a conceder la presente licencia y, asimismo, garantizo que dicho trabajo de investigación no infringe derechos de autor de terceras personas.

La UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA consignara el nombre del/los autor/es del trabajo de investigación, y no le hará ninguna modificación más de la permitida en la presente licencia.

Autorizo el depósito (marque con una X).

(_x_) **SI autorizo que se deposite inmediatamente.**

FIRMA : .....

DOCUMENTO DE IDENTIDAD : ...72641761.....

NOMBRES Y APELLIDOS : ..Jose Miguel Fernandez Mamani .....

FECHA : ...14/01/2025.....



UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN / TESIS / TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Yo, Jose Miguel Fernandez Mamani, bachiller de la Escuela Profesional de Ingenieria de Minas, de la Universidad Nacional de Moquegua, identificado (a) con DNI: Nº 72641761, autor(a) de la Tesis / Trabajo de suficiencia profesional "titulado DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LOS DETONADORES ELECTRONICOS FRENTE A LOS CONVENCIONALES EN LA ZONA DE DESMONTE DE LA UNIDAD MINERA SHOUGANG HIERRO PERU".

Declaro bajo juramento que:

1. El trabajo de investigación es auténtico, siendo resultado de mi trabajo personal, que no se ha copiado, que no se ha utilizado ideas, formulaciones, citas integrales e ilustraciones diversas, sacadas de cualquier tesis, obra, artículo, memoria, etc., (en versión digital o impresa), sin mencionar de forma clara y exacta su origen o autor, tanto en el cuerpo del texto, figuras, cuadros, tablas u otros que tengan derechos de autor. Por tanto, el trabajo de investigación no ha sido plagiado total ni parcialmente.
2. El trabajo de investigación no ha sido autoplagiada, es decir, no ha sido publicada ni presentada anteriormente para obtener algún grado académico previo o título profesional.
3. Los datos presentados en los resultados son reales, no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados y por tanto los resultados que se presentan en el trabajo de investigación constituirán aporte a la realidad investigada.

Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones universitarias y/o legales, por lo que asumo cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de irregularidades en el trabajo de investigación, así como de los derechos sobre la obra presentada.

Moquegua, 14/01/2025



Huella digital

Jose Miguel Fernandez Mamani
72641761

Base legal: RESOLUCIÓN DIRECTORAL N° 194-2020-SUNEDU-02-15

Arquimedes Vargas

JOSE MIGUEL FERNANDEZ MAMANI _TESIS ACTUALIZADA.pdf

Prueba turnitin

PRUEBA

Universidad Nacional de Moquegua

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::1:3151707313

Fecha de entrega
10 feb 2025, 5:17 p.m. GMT-5

Fecha de descarga
10 feb 2025, 5:21 p.m. GMT-5

Nombre de archivo
JOSE_MIGUEL_FERNANDEZ_MAMANI__TESIS_ACTUALIZADA.pdf

Tamaño de archivo
3.4 MB

125 Páginas

25,269 Palabras

143,572 Caracteres

17% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto mencionado

Fuentes principales

16% Fuentes de Internet
3% Publicaciones
5% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Fuentes principales

16% Fuentes de Internet
3% Publicaciones
5% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1 Internet
hdl.handle.net 3%

2 Internet
unam.edu.pe 1%

3 Internet
www.repositorio.unam.edu.pe <1%

4 Internet
repositorio.upn.edu.pe <1%

5 Internet
repositorio.epnewman.edu.pe <1%

6 Internet
repositorio.unam.edu.pe <1%

7 Internet
dspace.unitru.edu.pe <1%

8 Internet
repositorio.unasam.edu.pe <1%

9 Internet
repositorio.uncp.edu.pe <1%

10 Trabajos del estudiante
Universidad Continental <1%

11 Internet
repositorio.continental.edu.pe <1%

12	Internet	
renati.sunedu.gob.pe		<1%
13	Internet	
epc-espana.com		<1%
14	Internet	
www.coursehero.com		<1%
15	Internet	
repositorio.ucv.edu.pe		<1%
16	Internet	
repositorio.uladech.edu.pe		<1%
17	Internet	
cybertesis.uni.edu.pe		<1%
18	Internet	
repositorio.untels.edu.pe		<1%
19	Internet	
repositorio.unac.edu.pe		<1%
20	Internet	
repositorio.undac.edu.pe		<1%
21	Internet	
repositorio.unheval.edu.pe		<1%
22	Trabajos del estudiante	
Universidad Nacional del Centro del Peru		<1%
23	Internet	
repositorio.unjbg.edu.pe		<1%
24	Internet	
repositorio.unap.edu.pe		<1%
25	Internet	
repositorio.unp.edu.pe		<1%

26	Internet	
www.researchgate.net		<1%
27	Internet	
fliphtml5.com		<1%
28	Trabajos del estudiante	
Instituto Superior de Artes, Ciencias y Comunicación IACC		<1%
29	Trabajos del estudiante	
uni		<1%
30	Publicación	
Autar K. Raina, Rishikesh Vajre, Anand Sangode, K. Ram Chandar. "Application of ...		<1%
31	Trabajos del estudiante	
Universidad Tecnologica del Peru		<1%
32	Internet	
repositorio.unsaac.edu.pe		<1%
33	Internet	
www.fitchca.com		<1%
34	Internet	
www11.urbe.edu		<1%
35	Trabajos del estudiante	
Universidad Nacional de Educacion Enrique Guzman y Valle		<1%
36	Trabajos del estudiante	
Universidad Nacional de Moquegua		<1%
37	Internet	
upc.aws.openrepository.com		<1%
38	Internet	
apirepositorio.unh.edu.pe		<1%
39	Publicación	
Blanca Berral-Ortiz, Francisco Javier Hinojo Lucena, Pilar Cáceres Reche, José Ant...		<1%

40	Internet	
repositorio.autonoma.edu.pe		<1%
41	Internet	
repositorio.tls.edu.pe		<1%
42	Internet	
repositorio.unfv.edu.pe:8080		<1%
43	Internet	
www.slideshare.net		<1%
44	Publicación	
JCI INGENIERIA & SERVICIOS AMBIENTALES S.A.C.. "Tercer ITS de la Unidad Miner...		<1%
45	Internet	
fdocuments.ec		<1%
46	Internet	
ri2.bib.udo.edu.ve		<1%
47	Internet	
theibfr.com		<1%
48	Internet	
vdocuments.es		<1%
49	Internet	
idoc.pub		<1%
50	Internet	
www.iksadamerica.org		<1%
51	Internet	
repositorio.adp.edu.pe		<1%
52	Internet	
vsip.info		<1%
53	Internet	
www.scribd.com		<1%

DECENIO DE LA IGUALDAD DE OPORTUNIDADES PARA MUJERES Y HOMBRES
"AÑO DE LA RECUPERACIÓN Y CONSOLIDACIÓN DE LA ECONOMÍA PERUANA"

RESOLUCIÓN DE CONSEJO UNIVERSITARIO N° 049-2025-CU-UNAM

Moquegua, 25 de febrero de 2025

VISTOS:

El Acuerdo de Sesión Extraordinaria de Consejo Universitario de fecha 25 de febrero de 2025; Proveído N° 570-2025 de fecha 19 de febrero de 2025 emitido por el Rectorado; Informe N° 057-2025-UNAM-R/SG de fecha 19 febrero de 2025 emitido por la Secretaria General; Carta N° 21-2025-UNAM/SEGE/GYT/SVR de fecha 17 de febrero de 2025 emitido por el Área de Grados y Títulos; Sobre el otorgamiento del Título Profesional de Ingeniero de Minas, y;

CONSIDERANDO:

Que, la Constitución Política del Perú en su artículo 18° prevé que cada Universidad es autónoma en su régimen normativo, de gobierno, académico, administrativo y económico, y el artículo 8° de la Ley N° 30220, Ley Universitaria, establece que la referida autonomía inherente a las Universidades, se ejerce de conformidad con la Constitución y las Leyes de la República e implica las organizaciones de su sistema académico, económico y administrativo, así como la administración de sus bienes y rentas, elaborar su presupuesto y aplicar sus fondos con la responsabilidad que impone la Ley;

Que, el artículo 58° de la Ley Universitaria, Ley N° 30220, concordado con el artículo 14° del Estatuto de la Universidad Nacional de Moquegua, aprobado con Resolución de Comisión Organizadora N° 578-2021-UNAM, establecen que el **Consejo Universitario es el máximo órgano de gestión, dirección y ejecución académica y administrativa de la universidad;**

Que, el artículo 44° de la Ley N° 30220, Ley Universitaria, señala que las universidades otorgan los grados académicos de Bachiller, Maestro, Doctor y los Títulos Profesionales que correspondan, a nombre de la Nación (...);

Que, el numeral 45.2 del artículo 45° de la Ley N° 30220, Ley Universitaria, precisa **los requisitos mínimos para la obtención del título profesional, como son: el grado de Bachiller y la aprobación de una tesis o trabajo de suficiencia profesional**. Asimismo, establece que el título profesional solo se puede obtener en la universidad en la cual se haya obtenido el grado de bachiller;

Que, con Resolución de Comisión Organizadora N° 1153-2021-UNAM, se aprobó el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional de Moquegua, el mismo que fue modificado a través de las Resoluciones de Comisión Organizadora N° 410, 453 y 890-2022; N° 880-2023 y N° 081, 484-2024-UNAM/CO, el cual establece los requisitos y norma los procedimientos para la obtención de los grados académicos y títulos profesionales conferidos por esta Casa Superior de Estudios;

Que, mediante Carta N°21-2025-UNAM/SEGE/GYT/SVR, la Especialista del Área de Grados y Títulos, remite a Secretaria General, el expediente de un (1) bachiller de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas quien se encuentra apto para la expedición del Título Profesional de Ingeniero de Minas por la modalidad de sustentación de Tesis, al haber cumplido satisfactoriamente con los requisitos legales y reglamentarios[1], exigidos en el Reglamento de Grados

[1] Artículo 122°. - Requisitos para la obtención del Título Profesional
Para obtener el Título Profesional el interesado deberá presentar ante su Escuela Profesional un expediente con la siguiente documentación:
a. Solicitud dirigida al Director de la Escuela Profesional o quien haga sus veces, indicando la fecha y numero de comprobante de pago.
b. Dos (2) fotografías de frente, tamaño pasaporte a color con fondo blanco (con traje formal); para garantizar la seguridad ciudadana.
c. Dos ejemplares de la Tesis, del Trabajo de Suficiencia Profesional o Informe del Examen Profesional en físico, uno para la Biblioteca y otro para la Escuela Profesional, y un CD con la versión digital.
d. Formulario de autorización del graduado para la publicación de la Tesis, Trabajo de Suficiencia Profesional o Informe de Examen Profesional en el repositorio.
e. Declaración Jurada de originalidad de la Tesis, Trabajo de Suficiencia Profesional o Informe de Examen Profesional.

Domicilio Fiscal: Prolongación Av., Ancash S/N - Moquegua
RUC: 20449347448 - Teléfono: (053) 670168
Página Web: www.unam.edu.pe

y Títulos de la Universidad Nacional de Moquegua, conforme lo señala la Dirección de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, razón por la cual la Secretaría General incluye el expediente como punto de agenda para ser tratado en Sesión de Consejo Universitario de fecha 25 de febrero de 2025;

Que, se ha establecido como atribución del Consejo Universitario de la UNAM, la facultad de conferir los grados académicos y los títulos profesionales (...), por lo que en mérito al pedido del Secretario General y debatido el caso en Sesión Extraordinaria de fecha 25 de febrero de 2025, se acordó por unanimidad **conferir a nombre de la Nación el Título Profesional de Ingeniero de Minas a un (1) bachiller de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Nacional de Moquegua**;

De conformidad con el artículo 59° de la Ley Universitaria, Ley N° 30220, concordado con el artículo 16° del Estatuto de la Universidad Nacional de Moquegua, y estando a lo acordado en la V Sesión Extraordinaria de fecha 25 de febrero de 2025 de Consejo Universitario;

SE RESUELVE:

ARTÍCULO PRIMERO: CONFERIR, a nombre de la Nación el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE MINAS** por la modalidad de Sustentación de Tesis, al Bachiller de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Nacional de Moquegua, de acuerdo al siguiente detalle:

1. **JOSE MIGUEL FERNANDEZ MAMANI**
   TESIS : "DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LOS DETONADORES ELECTRÓNICOS FRENTE A LOS CONVENCIONALES EN LA ZONA DE DESMONTE DE LA UNIDAD MINERA SHOUGANG HIERRO PERÚ", cuyo Asesor fue el Dr. Arquimedes Leon Vargas Luque.

ARTÍCULO SEGUNDO: AUTORIZAR, a la Secretaría General de la Universidad Nacional de Moquegua, expedir y registrar el Diploma correspondiente para su otorgamiento.

ARTÍCULO TERCERO: ENCARGAR al Área de Grados y Títulos de la Universidad Nacional de Moquegua, para que realice las acciones pertinentes conducentes, relacionadas con la inscripción de los grados y títulos en el Registro de Grados y Títulos de la Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria - SUNEDU.

ARTÍCULO CUARTO: NOTIFICAR, la presente Resolución a las instancias y dependencias administrativas y académicas de la Universidad Nacional de Moquegua, para su conocimiento, cumplimiento y demás fines pertinentes.

ARTÍCULO QUINTO: ENCARGAR, a la Oficina de Tecnología de la Información, la publicación de la presente Resolución en el portal de transparencia de la Universidad Nacional de Moquegua.

REGÍSTRESE, COMUNÍQUESE, CÚMPLASE Y ARCHÍVESE

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA – UNAM – RECTORADO

DR. HUGO RUBEN MARCA MAQUERA
Rector
Universidad Nacional de Moquegua

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA – UNAM – SECRETARÍA GENERAL

ABG. GUILLERMO S. KUONG CORNEJO
Secretario General
Universidad Nacional de Moquegua

La Escuela Profesional es responsable de completar el expediente del bachiller en un plazo máximo de 3 días hábiles y derivar a la Oficina de Secretaría General, adjuntando los siguientes documentos:

a. Copia del acta de sustentación indicando la modalidad de obtención del título profesional.
b. Constancia de "no adeudo" de Bienes a la Universidad, bienes a los Laboratorios Básicos y de Especialidad, material bibliográfico; dichos documentos deberán ser refrendados por los responsables a cargo.

Domicilio Fiscal: Prolongación Av., Ancash S/N - Moquegua
RUC: 20449347448 - Teléfono: (053) 670168
Página Web: www.unam.edu.pe