UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

TESIS

APLICACIÓN DE DETONADORES ELECTRÓNICOS DAVEYTRONIC PARA OPTIMIZAR EL COSTO UNITARIO DE VOLADURA PARA ROCA HORNFELS EN LOS TAJOS 09-10 DE LA UNIDAD MINERA SHOUGANG HIERRO PERÚ

PRESENTADO POR:

Bach. Claudia Elizabeth Ramírez Chipana

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

MOQUEGUA – PERÚ

2025

UNAM
UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

Folio N° 070

ACTA DE SUSTENTACIÓN

I. Modalidad:

Tesis : [X]

Trabajo de Suficiencia Profesional : [ ]

Otro: ..... : [ ]

II. Documento de aprobación para la sustentación:
Resolución de Consejo de Facultad N° 266-2025-CF-FAIN-UNAM
Fecha: 19.11.2025

III. El Jurado ha dictaminado la (el) Tesis, TITULADO:
"APLICACIÓN DE DETONADORES ELECTRÓNICOS DAVEYTRONIK PARA OPTIMIZAR EL COSTO UNITARIO DE VOLADURA PARA ROCA HORNFELS EN LOS TAJOS 09-10 DE LA UNIDAD MINERA SHOUGANG HIERRO PERÚ"
Bachiller: Claudia Elizabeth Ramírez Chipana
Asesor Principal: Christ Jesus Barriga Paria
Co-Asesor : .....

IV. Se dictamina:
Como: Aprobada por Unanimidad la sustentación de manera:
Presencial [X] Virtual [ ]
Con nota: Dieciseis (16) por lo que; Sí [X] No [ ]
Opta el Título Profesional de INGENIERO DE MINAS.

Siendo las 12:20 horas, del 03 de diciembre del año 2025 se procede con la firma en conformidad de lo dictaminado por el Jurado.

Presidente
Dr. Arquímedes Leon VARGAS LUQUE
(Nombres y Apellidos)

Primer Miembro
MSc. Agapito FLORES JUSTO
(Nombres y Apellidos)

Segundo Miembro
Mgr. Juan Elias ROJAS CONDORI
(Nombres y Apellidos)

Bachiller
Claudia Elizabeth RAMÍREZ CHIPANA
(Nombres y Apellidos)

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA DE MINAS

TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE MINAS

“APLICACIÓN DE DETONADORES ELECTRÓNICOS DAVEYTRONIC PARA OPTIMIZAR EL COSTO UNITARIO DE VOLADURA PARA ROCA HORNFELS EN LOS TAJOS 09-10 DE LA UNIDAD MINERA SHOUGANG HIERRO PERÚ”

Tesis sustentada y aprobada el ___ de _____del 2025, estando integrado el jurado dictaminador y el asesor por:

PRESIDENTE : ……

Dr. Arquímedes León VARGAS LUQUE

1ER MIEMBRO : ….……

Dr. Agapito FLORES JUSTO

2DO MIEMBRO : ….……

Mgr. Juan Elías ROJAS CONDORI

ASESOR : ..……

Dr. Christ Jesus BARRIGA PARIA

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a la memoria de mi querido abuelito Juan, quien me brindó su amor incondicional y me enseñó con su ejemplo el valor del esfuerzo, la humildad y la perseverancia. Aunque hoy no esté físicamente conmigo, sé que desde el cielo acompaña cada uno de mis logros.

Este logro es también suyo; todo lo que soy se lo debo, en gran parte, a él, quien me acompañó desde mis primeros pasos.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por guiar mi camino y brindarme salud y sabiduría para alcanzar este objetivo académico.

A mi alma mater, la Universidad Nacional de Moquegua y a la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, por la formación académica y profesional brindada a lo largo de mi carrera universitaria.

A mi asesor, Dr. Christ Jesus Barriga Paria, le agradezco profundamente por su guía, paciencia y valioso apoyo durante el desarrollo de la presente tesis. Su gran calidad como profesional y docente, fueron fuente de motivación e inspiración como profesional.

A mis compañeros de trabajo del área de Perforación y Voladura, por su colaboración, disposición y recomendaciones brindadas en cada etapa del presente trabajo.

A mis padres, José Luis y Graciela, por su amor incondicional, comprensión y apoyo permanente. Su ejemplo de vida es mi fuente de fortaleza y perseverancia.

Finalmente, al Ing. Cesar Diego Yucra Torres, por su invaluable apoyo, comprensión y aliento. Su presencia incondicional durante este proceso fueron un impulso importante para el logro de este objetivo profesional.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación, titulado “Aplicación de detonadores electrónicos Daveytronic para optimizar el costo unitario de voladura para roca Hornfels en los tajos 09-10 de la unidad minera Shougang Hierro Perú” tiene como objetivo principal optimizar el costo unitario de voladura en roca tipo Hornfels, mediante la aplicación de detonadores electrónicos Daveytronic. Esta investigación surge de la necesidad constante de minimizar el costo en voladura y maximizar la rentabilidad de las operaciones mineras, considerando que la roca Hornfels es una roca metamórfica dura, resistente y con alta resistencia a la compresión. Para el desarrollo de este estudio se analizaron 10 proyectos de voladura pirotécnica y 10 proyectos de voladura con la aplicación de detonadores Daveytronic; todos los proyectos, en la formación Hornfels. Los resultados obtenidos demuestran una reducción de costo de 8% pasando de un costo promedio de 0.260 US$/TM a 0.239 US$/TM, esto se debe a que con la aplicación de detonadores Daveytronic y su característica de alta precisión y su versatilidad en su programación de secuencia de salida, permitió reducir el factor de potencia en un 15%, pasando de un 0.234 Kg/TM en voladura pirotécnica a 0.198 Kg/TM en voladura electrónica, con ello no se vio afectado la fragmentación, debido a que se optimizo la fragmentación de un P80 de 10.55 pulgadas a 7.16 pulgadas. Como recomendaciones, se sugiere realizar una evaluación integral del impacto de los detonadores electrónicos en las etapas posteriores del ciclo de minado, así como extender su aplicación a todas las operaciones de voladura en Mina Shougang Hierro Perú. Esto permitiría aprovechar plenamente los beneficios adicionales en materia de seguridad y control operacional, tales como la reducción del daño no deseado a las paredes de la mina y una mayor estabilidad geotécnica.

Palabras clave: Detonadores electrónicos, optimización de costos, fragmentación de roca.

ABSTRACT

The present research work, titled “Application of Daveytronic Electronic Detonators to Optimize the Unit Blasting Cost for Hornfels Rock in Pits 09-10 of the Shougang Hierro Perú Mine”, aims to optimize the unit blasting cost in Hornfels-type rock through the implementation of Daveytronic electronic detonators. This study arises from the ongoing need to reduce blasting costs and maximize the profitability of mining operations, considering that Hornfels is a hard, highly competent metamorphic rock with high compressive strength. For the development of this research, ten conventional (pyrotechnic) blasting projects and ten blasting projects using Daveytronic electronic detonators were analyzed, all conducted within the Hornfels formation. The results obtained demonstrate a cost reduction of 8%, decreasing from an average unit cost of 0.260 USD/t to 0.239 USD/t. This improvement is attributed to the use of Daveytronic electronic detonators, whose high timing accuracy and flexibility in programming firing sequences allowed for a 15% reduction in the powder factor, decreasing from 0.234 kg/t in pyrotechnic blasting to 0.198 kg/t in electronic blasting. Despite the reduction in the powder factor, fragmentation was not negatively affected; in fact, it was optimized, improving from a P80 of 10.55 inches to 7.16 inches. As recommendations, it is suggested to carry out a comprehensive assessment of the impact of electronic detonators on subsequent stages of the mining cycle, as well as to extend their implementation across all blasting operations at the Shougang Hierro Perú Mine. This would enable the operation to fully leverage the additional benefits of electronic blasting technology, particularly in terms of safety and operational control, such as minimizing undesired wall damage and improving geotechnical stability

Keywords: Electronic detonators, cost optimization, rock fragmentation.

ÍNDICE

CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 1

1.1. Descripción y formulación del problema 1

1.1.1. Interrogante general 1

1.1.2. Interrogantes especificas 2

1.2. Objetivos 2

1.2.1. Objetivo general 2

1.2.2. Objetivos específicos 2

1.3. Justificación e importancia 3

1.3.1. Justificación práctica 3

1.3.2. Justificación teórica 3

1.3.3. Justificación metodológica 3

1.4. Hipótesis 4

1.4.1. Hipótesis general 4

1.4.2. Hipótesis especificas 4

1.5. Variables 5

1.5.1. Variables independientes 5

1.5.2. Variable dependiente 5

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO 6

2.1. Antecedentes del problema 6

2.1.1. Antecedentes internacionales 6

2.1.2. Antecedentes nacionales 8

2.1.3. Antecedentes locales 13

2.2. Bases teóricas 17

2.2.1. Mina Shougang 17

2.2.2. Roca Hornfels 25

2.2.3. Voladura de Rocas 30

2.2.4. Sistema de voladura Digital Enaex 43

2.3. Definición de términos..... 45

2.3.1. Explosivo……..... 45

2.3.2. Altos explosivos……...45

2.3.3. Agentes de voladura 45

2.3.4. Carga operante……..45

2.3.5. Factor de potencia..... 45

2.3.6. Factor de carga……...46

2.3.7. Scaled Depth of Burial (SD)..... 46

2.3.8. Flyrocks……..... 46

2.3.9. Taco superior……..... 47

2.3.10. Taco intermedio……...47

2.3.11. Detonadores no eléctricos..... 47

2.3.12. Detonadores electrónicos..... 48

2.3.13. Cordón detonante..... 49

2.3.14. Costo variable…….. 49

2.3.15. Costo fijo……..... 49

2.3.16. Costo total……..…..... 49

2.3.17. Costos operativos..... 49

2.3.18. Costos directos……....50

2.3.19. Costos indirectos……50

2.3.20. Costos unitarios de mina (US$/TM)..... 50

2.3.21. Costos de voladura 50

2.3.22. Optimización de costos 51

2.3.23. Costo de producción 51

2.3.24. Costo administrativo..... 51

2.3.25. Fragmentación de rocas..... 52

2.3.26. Sistemas de iniciación..... 55

2.3.27. Sistema de iniciación pirotécnicos 55

2.3.28. Sistema de Iniciación electrónicos 57

2.3.29. Burden relief 60

2.3.30. Nitrato de amonio 61

2.3.31. ANFO 61

2.3.32. Emulsión 62

2.3.33. Heavy ANFO 62

2.3.34. Tasa de excavación (DIG RATE) 63

2.3.35. RMR 64

2.3.36. RQD 64

2.3.37. Resistencia dinámica a la compresión y tracción 64

CAPÍTULO III METODOLOGÍA 65

3.1. Tipo y nivel de investigación 65

3.1.1. Tipo de investigación 65

3.1.2. Nivel de investigación 65

3.2. Diseño de investigación 65

3.3. Población y muestra 66

3.3.1 Población 66

3.3.2. Muestra 66

3.4. Técnicas e instrumentación para la recolección de datos 66

3.4.1. Técnicas para la recolección de datos 66

3.4.2. Instrumentación para la recolección de datos 67

3.5. Validación y confiablidad de los instrumentos 67

3.6. Métodos y técnicas para la presentación y análisis de datos 68

CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN 69

4.1. Evaluación de factor de potencia ejecutado 71

4.1.1. Factor de potencia detonadores pirotécnicos 71

4.1.2. Factor de potencia detonadores Daveytronic. 72

4.2. Evaluación de la fragmentación 74

4.2.1. Resultados de fragmentación detonadores pirotécnicos 75

4.2.2. Fragmentación resultante detonadores Daveytronic 76

4.3. Evaluación de costo unitario de voladuras 77

4.4. Comprobación hipótesis e interpretación 82

4.4.1. Comprobación de hipótesis e interpretación factor de potencia 82

4.4.2. Comprobación de hipótesis e interpretación fragmentación 87

4.4.3. Comprobación de hipótesis e interpretación costos de voladura 92

CAPÍTULO V CONCLUSIONES 97

CAPÍTULO VI RECOMENDACIONES 99

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 101

ANEXOS 108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 *Accesibilidad U.M. Shougang* **19**

Tabla 2 *Flota de equipos de perforación* **22**

Tabla 3 *Flota de equipos de voladura* **23**

Tabla 4 *Flota de equipos de carguío* **24**

Tabla 5 *Parámetros de Hornfels por Secciones* **29**

Tabla 6 *Tiempos entre filas en función al burden efectivo* **61**

Tabla 7 *Listado de proyectos evaluados* **70**

Tabla 8 *Fragmentación resultante voladura pirotécnico* **76**

Tabla 9 *Fragmentación resultante voladura electrónico* **77**

Tabla 10 *Costos unitarios de agentes de voladura* **78**

Tabla 11 *Costos unitarios de accesorios de voladura* **78**

Tabla 12 *Costos total de accesorios de voladura por proyecto* **79**

Tabla 13 *Costos unitarios de accesorios de voladura* **80**

Tabla 14 *Costos unitarios de voladura* **81**

Tabla 15 *Resumen factor de potencia (Kg/TM)* **83**

Tabla 16 *Resumen estadístico para las dos muestras de datos* **84**

Tabla 17 *Resumen de datos P80* **88**

Tabla 18 *Resumen estadístico para las dos muestras fragmentación* **89**

Tabla 19 *Resumen de costos unitario de voladura (US$/TM)* **92**

Tabla 20 *Resumen estadístico para las dos muestras costos* **94**

Tabla 18 *Matriz de consistencia* **108**

Tabla 19 *Operacionalización de variables* **109**

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 *Localización de U.M. Shougang* **18**

Figura 2 *Perforadora Sandvik DR412i* **21**

Figura 3 *Camión Fabrica Kenworth T800* **23**

Figura 4 *Afloramiento de Hornfels* **25**

Figura 5 *Afloramiento de Hornfels fracturado en Mina 10, cara Norte, Nv. 569* .. **26**

Figura 6 *Sección de Análisis de Estabilidad A-A* **27**

Figura 7 *Sección de Análisis de Estabilidad B-B* **27**

Figura 8 *Sección de Análisis de Estabilidad C-C* **28**

Figura 9 *Sección de Análisis de Estabilidad D-D* **28**

Figura 10 *Desarrollo de una detonación* **31**

Figura 11 *Sistema digital Daveytronic* **44**

Figura 12 *Significance of Scaled Depth of Burial* **46**

Figura 13 *Partes del detonador no eléctrico* **48**

Figura 14 *Características técnicas del detonador electrónico* **48**

Figura 15 *Proceso de detonación de taladro* **52**

Figura 16 ***Propagación de las ondas de choque*** **53**

Figura 17 *Expansión de los gases* **54**

Figura 18 *Desplazamiento del material* **54**

Figura 19 *Partes de detonadores usados en iniciación pirotécnica* **56**

Figura 20 *Detonador electrónico utilizado en iniciación electrónica* **57**

Figura 21 *Número de serie del detonador electrónico* **58**

Figura 22 *Conexión de detonador electrónico* **58**

Figura 23 *Aseguramiento de cables de detonador electrónico* **59**

Figura 24 *Estructura Heavy ANFO* **62**

Figura 25 *Aplicación del Heavy ANFO en el carguío de taladros* **63**

Figura 26 *Diseño de carga de columna explosiva con detonadores pirotécnicos* **71**

Figura 27 *Grafica de factor de potencia de proyectos con uso de detonadores pirotécnicos* **72**

Figura 28 *Diseño de columna explosiva con detonadores electrónicos Daveytronic* **73**

Figura 29 *Grafica de factor de potencia de proyectos con uso de detonadores electrónicos* **73**

Figura 30 *Análisis granulométrico del material volado* **75**

Figura 31 *Comparación de factor de potencia electrónico Daveytronic y pirotécnico.* **84**

Figura 32 *Caja y bigotes para factor de potencia* **85**

Figura 32 *Gráfico de aceptación o rechazo de la hipótesis (FP)* **86**

Figura 34 *Comparación resultado fragmentación (In)* **89**

Figura 35 *Caja y bigotes para fragmentación* **90**

Figura 36 *Grafico de aceptación o rechazo hipótesis* **91**

Figura 37 *Comparación resultados costos voladura (US$/TM)* **93**

Figura 38 *Caja y bigotes para costos voladura* **94**

Figura 39 *Gráfico de aceptación o rechazo hipótesis.* **95**

LISTA DE ABREVIATURAS Y NOMENCLATURAS

USD/TM	: Dólares por tonelada
US$	: Dólares americanos.
Kg	: Kilogramos
TM	: Toneladas métricas
g/t	: Factor de carga
P&T	: Perforación y tronadura
US$/año	: Dólares por año
Mm/s	: Milímetros por segundo
P80	: Pasante 80%
Kg/TM	: Factor de potencia
TM/H	: Tonelada métrica hora
Hrs	: Horas
km	: Kilómetros
kN/m3	: Kilonewton por metro cúbico
MPa	: Megapascal
GSI	: Índice de resistencia geológica
VOD	: Velocidad de detonación
DRB	: Blaster remoto
DBD	: Compacto Blast driver
PU	: Unidades de programación
mg	: Miligramos
SD	: Scaled Depth of Burial
V	: Voltios
Ms/m	: megasíemens por metro

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción y formulación del problema

En las operaciones mineras a tajo abierto se requiere constantemente minimizar los costos de operación y maximizar las ganancias, en asociación de la productividad, seguridad y cuidado del medio ambiente. Por ello, la optimización de costos en voladura resulta fundamental, debido a que esta operación primaria con un correcto aprovechamiento óptimo de la energía del explosivo y obtención de una fragmentación ideal; no solo se logra reducir el costo unitario de voladura, sino también impacta en las operaciones unitarias de carguío, chancado y molienda.

Se tuvo como desafío implementar de forma eficaz los detonadores electrónicos Daveytronic en Mina 09-10 en zonas con litología tipo Hornfels, con una optimización de costos de voladura y correcta fragmentación. Debido a que las técnicas de iniciación convencionales presentan sobrecostos en consumo de explosivos, además de obtener una fragmentación aceptable pero no optimizada; esto debido a la poca versatilidad para establecer tiempos de detonación en función de las propiedades geotécnicas y geomecánicas de la litología tipo Hornfels, lo cual impacta en el diseño de secuencias de iniciación para la voladura del proyecto en función de tiempos de nominales. Asimismo, se tiene zonas de cuidado de taludes, en los cuales se requiere generar los cuidados respectivos.

1.1.1. Interrogante general

¿Cómo puede la aplicación de detonadores electrónicos tipo Daveytronic optimizar el costo unitario de voladura para roca tipo Hornfels en los tajos 09-10 de la Unidad Minera Shougang Hierro Perú?

1.1.2. Interrogantes especificas

¿Qué impacto tiene el uso de detonadores electrónicos Daveytronic en la fragmentación del material volado para roca tipo Hornfels en los tajos 09-10 de la Unidad Minera Shougang Hierro Perú?

¿De qué manera contribuyen los detonadores electrónicos a la reducción del consumo de explosivo por tonelada de material roto para roca tipo Hornfels en los tajos 09-10 de la Unidad Minera Shougang Hierro Perú?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Optimizar el costo unitario de voladura para roca tipo Hornfels en los tajos 09-10 de la Unidad Minera Shougang Hierro Perú, mediante la aplicación de detonadores electrónicos Daveytronic.

1.2.2. Objetivos específicos

Identificar cómo los detonadores electrónicos Daveytronic afectan la fragmentación del material volado para roca tipo Hornfels en los tajos 09-10 de la Unidad Minera Shougang Hierro Perú.

Determinar el impacto económico de la aplicación de detonadores electrónicos Daveytronic en la reducción del consumo de explosivo por tonelada de material roto, para roca tipo Hornfels en los tajos 09-10 de la Unidad Minera Shougang Hierro Perú.

1.3. Justificación e importancia

1.3.1. Justificación práctica

La justificación práctica de este estudio se centra en la aplicación directa de los detonadores electrónicos Daveytronic para mejorar el proceso de voladura en rocas tipo Hornfels. Su aplicación permitió una mayor precisión en el proceso de iniciación, lo que mejoró la fragmentación y por ende se optimizó los costos de material volado. Estos resultados fueron evidenciados en beneficios económicos y operativos inmediatos.

1.3.2. Justificación teórica

La justificación teórica de esta investigación radica en la necesidad de optimizar el proceso de voladura en rocas tipo Hornfels, considerando que esta roca es medianamente dura y macizo rocoso fracturado, por lo que requiere una mayor precisión en la iniciación de taladros, para obtener una reducción de costos junto a una fragmentación adecuada.

Además, se basa en teorías de optimización de procesos mineros que demuestran que un control más exacto en las voladuras puede aumentar la eficiencia y mejorar los procesos operativos.

1.3.3. Justificación metodológica

La justificación metodológica del presente trabajo de investigación radica en la creación de un enfoque estructurado para la implementación de detonadores electrónicos Daveytronic en el proceso de voladura en rocas tipo Hornfels. Al ofrecer un análisis exhaustivo de las ventajas y limitaciones de estos dispositivos. Además, ofrece un marco metodológico solido que permite medir de manera precisa el impacto de estas tecnologías.

Estos datos no solo proporcionarán una compresión sobre la eficacia de los detonadores electrónicos, sino también servirá para futuras investigaciones y las mejoras en las técnicas de voladura.

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

La aplicación de detonadores electrónicos Daveytronic en los tajos 09-10 de la Unidad Minera Shougang Hierro Perú para roca tipo Hornfels, optimiza el costo unitario de voladura.

1.4.2. Hipótesis especificas

La integración de detonadores electrónicos en el proceso de voladura contribuye a una mejor fragmentación del material volado para roca tipo Hornfels en los tajos 09-10 de la Unidad Minera Shougang Hierro Perú.

La integración de detonadores electrónicos en el proceso de voladura contribuye a una reducción del consumo de explosivo por tonelada de material roto para roca tipo Hornfels en los tajos 09-10 de la Unidad Minera Shougang Hierro Perú.

1.5. Variables

1.5.1. Variables independientes

Aplicación de detonadores electrónicos Daveytronic.

1.5.2. Variable dependiente

Costo unitario de voladura en roca tipo Hornfels; correspondiente al costo total de voladura por tonelada de material roto, considerando todos los costos asociados al consumo de agentes y accesorios utilizados para llevar a cabo el proceso de voladura, cuya unidad de medida es USD/TM.

Fragmentación en roca tipo Hornfels; referido a la calidad de la fragmentación resultante del proceso de voladura, expresada en la medición de P80 resultante del análisis fotográfico de la granulometría.

Consumo de explosivos; relacionado a la cantidad de explosivo empleados para obtener la fragmentación deseada de la roca Hornfels, la cual es medida a través del Factor de Potencia, cuya unidad de medida es Kg de explosivo utilizado por TM.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del problema

2.1.1. Antecedentes internacionales

Bravo (2018) en su memoria de título “Estudio de vibraciones inducidas por tronadura en minera Spence” de la Universidad de Chile, realiza un estudio de control de daño por vibraciones, en zonas de roca dura y medianamente fracturadas. En función a ello se diseña la malla de perforación. Como resultado obtiene un beneficio anual de 1.21 M USD, reduciendo un 35% de deslizamiento a escalas de banco, optimizando el proceso en términos de generación de daño y fragmentación esperada.

En este estudio podemos notar que un correcto diseño de malla de perforación de acuerdo con las características del macizo rocoso, se logra la optimización de costo, daños colaterales y mejora de fragmentación; al igual que el presente trabajo de investigación estas variables fueron optimizadas con la implementación de los detonadores electrónicos Daveytronic, debido a la precisión de iniciación programada en el diseño de malla de perforación.

Según Báez (2021) en su tesis “Modelamiento de la granulometría obtenida de operaciones de tronadura frente a cambios en el burden, el espaciamiento y tipo de explosivos: Aplicación a fases 7 y 10 en minera Los Pelambres”, de la Universidad de Chile, realiza un estudio de la variación de burden y espaciamiento y su impacto en la granulometría, donde realiza la recopilación de datos de granulometría y posteriormente realiza un ajuste en la malla de perforación.

El estudio concluye que existe una menor variación en el P80, sin embargo, se tiene menor pozos perforados y cargados, lo que se traduce en menor costo unitario de voladura. Con el uso de detonadores electrónicos y su menor tiempo de dispersión en la exactitud de iniciación, nos permitirá aumentar el burden y espaciamiento, además de nos brinda una mayor flexibilidad y precisión en el diseño del secuenciamiento de voladura, lo que nos brinda una mejor fragmentación y reducción de factor de carga.

La tesis de Dimas (2015) titulada "Diseño de Tronaduras y su Impacto en el Costo Mina de Compañía Minera Cerro Negro" en la Universidad de Chile, ubicada en Santiago. El objetivo del estudio fue implementar nuevas tecnologías, para obtener material mejor fragmentado, adecuados a los requerimientos de los procesos aguas abajo. La muestra abarcó varias voladuras realizadas en un período determinado.

Los resultados indicaron una reducción de factor de carga de más de 300 (g/t) a valores entre 220 (g/t) y 290 (g/t), lo que conllevo a una reducción de metros perforados y consumo de explosivos. Por lo que se logra una reducción de costo de 2 (USD/TM) en el costo global de P&T. En esta tesis podemos apreciar que la aplicación de nuevas tecnologías y las ventajas ofrecidas, reducen el costo unitario de voladura y se obtiene una mejor fragmentación.

Espeche (2022) en su trabajo de investigación titulado “Reducción de costos operativos en mina Farallón Negro – optimizando estándares de perforación & voladura en desarrollo - preparación” analiza los estándares de perforación, carga y voladura existente y compararlos con el planteado por el autor. Plantea realizar la medición mediante los indicadores de eficiencia de avance, condición de labor, sobre excavación y fragmentación.

Como resultado obtiene una reducción de 13% de metros perforados, debido a la reducción de cantidad de taladros, traduciéndose esto en un ahorro anual de 403,230.37 US$/año en el costo de perforación y voladura. Espeche solo realiza el cambio de estándares de perforación y voladura, no usando nuevas tecnologías, en el presente trabajo de investigación se implemente una tecnología en la iniciación de taladros, lo que conllevó también al cambio de estándares de perforación y voladura.

2.1.2. Antecedentes nacionales

De acuerdo con Quispe (2023), en su trabajo “Influencia de la implementación de detonadores electrónicos en el proceso de voladura en la unidad minera Cerro Corona-Cajamarca, 2019” tiene como objetivo determinar la influencia de los detonadores electrónicos DigiShot Plus en la mejora del proceso de voladura, siendo una investigación aplicada, de nivel descriptivo y diseño no experimental.

Obteniendo resultados favorables en cuanto a la disminución de tiros cortados, fragmentación y nivel de vibraciones. Teniendo una disminución de P80 de 8.74’’ a 2.96’’, además de reducir las vibraciones de 20.15 mm/s a 9.64 mm/s. De esta forma los detonadores electrónicos reducen de manera significativa la fragmentación, sin embargo, no hace un análisis de costos, debido a que el costo unitario de detonadores electrónicos es también mucho mayor a los pirotécnicos.

Alvis (2024) en la tesis titulada “Optimización de la fragmentación de rocas empleando el sistema de voladura electrónica Fametronic en la unidad minera Tacaza-Lampa-Puno” tiene como objetivo determinar la influencia de la implementación del sistema Fametronic en la optimización de voladuras en la unidad minera Tacaza. En la muestra tomada, determino que, con el sistema de

iniciación no electrónico, se tiene una deficiente fragmentación y elevado costo de voladura.

Posterior a la evaluación e implementación de los detonadores electrónicos Fametronic, se obtiene como resultado la reducción de un P80=32.51 cm a P80=13.94 cm, que representa una optimización de un 57.12%, además de reducir un factor de potencia de 0.53 Kg/TM a 0.31 Kg/TM. Podemos notar que la implementación de detonadores electrónicos reducen significativamente el factor de potencia lo que conlleva a una reducción de costos de voladuras, debido a la reducción de cantidad de agente de voladura a utilizar, sin afectar la fragmentación requerida.

De acuerdo con Mendoza (2024) en su trabajo de investigación titulado “Análisis de fragmentación y vibración en la voladura del tajo San Gerardo de la minera Atacocha” determina como los parámetros de voladura, tienen influencia en la fragmentación y vibraciones. Analizando 300 reportes de 30 proyectos en 3 niveles del tajo San Gerardo.

Como resultado obtiene que, con el ajuste de parámetros de voladura, se mejora de manera positiva la fragmentación, además de reducir las vibraciones. Disminuyendo el P80 de 5.2359 pulgadas a 5.0867 pulgadas, esto debido a la cantidad y distribución eficaz del explosivo y la técnica de perforación. Estos parámetros se ajustaron, tomando en consideración la calidad de macizo rocoso, lo que es de importancia en el presente trabajo de investigación, analizar las características de la roca Hornfels, en el proceso de voladura con detonadores electrónicos.

Segura (2024) realiza la reducción de costos de voladura en la fase 008 en la compañía minera Summa Gold Corporation aplicando el HA55G, presentando una estrategia efectiva para reducir costos y mejorar la eficiencia

operativa. En dicho estudio realiza la comparación entre la mezcla explosiva HA-73G y HA-55G, con factores de potencia de 0.23 y 0.24 promedio respectivamente.

Como resultado se obtiene una reducción de costo de voladura con un ahorro de 3.9 US$/tal y una fragmentación de P80 de 2.53 pulgadas para la mezcla HA-73G y una fragmentación de P80 de 3.28 pulgadas para la mezcla HA-55G. Se evidencia que un cambio de agente de voladura se obtiene una reducción de costos de voladura, sin embargo, no realiza la evaluación con diferentes tipos de iniciación lo que podría significar una reducción mayor del costo de voladura.

Según Lozano (2021) en su trabajo de investigación, evalúa los sistemas de iniciación pirotécnica y electrónica para determinar cuál ofrece mejores resultados en la optimización de costos por voladura en el banco 3240 de una mina a cielo abierto en la región. La metodología consistió en un análisis comparativo mediante la evaluación de voladuras en campo utilizando ambos tipos de iniciación, implementando un diseño cuasi-experimental que permitió medir los costos y la eficiencia de la fragmentación obtenida en cada caso.

Lozano concluye que el costo del sistema de iniciación pirotécnico es de US$ 19,072.72 y el costo del sistema de iniciación electrónica es de US$ 19,624.24. Sin embargo, en los indicadores de producción el sistema pirotécnico presenta un valor de 4,540.55 TM/H y el sistema de iniciación electrónico se tiene un valor de 8,922.38 TM/H, traduciéndose en una reducción de costo global operativo de 17%. De acuerdo con los resultados se tiene una reducción en el costo global, no obstante, no se evaluó rediseñar la malla de perforación considerando la exactitud de los detonadores electrónicos.

De acuerdo con Huerta (2020), en su trabajo de investigación, tiene como objetivo evaluar y comparar la eficiencia de la triple iniciación electrónica en voladuras frente a los sistemas de iniciación simple y doble, en términos de fragmentación, vibraciones y eficiencia operativa en un yacimiento cuprífero a cielo abierto. La metodología incluyó un estudio experimental con voladuras realizadas bajo los tres sistemas, analizando parámetros como la granulometría del material, desplazamiento y vibraciones generadas.

El diseño consistió en pruebas controladas en diversas áreas del yacimiento, con una muestra representativa de voladuras. Huerta concluye que existe una eficiencia en la voladura empleando la iniciación electrónica triple, debido a que obtiene una diferencia sustancial entre el nivel base de 40%, obteniendo un porcentaje de finos esperado de menores a 1". Demostrando que la eficiencia de voladura del sistema triple iniciación electrónica es superior a la iniciación doble y simple.

Jesús (2022), en su tesis titulada "Detonadores electrónicos para mejorar la fragmentación de la roca en minería a cielo abierto" tiene como objetivo identificar las bondades del detonador electrónico y la influencia en la fragmentación, siendo una investigación aplicativa. Concluyendo que la fragmentación mejoro un 27.68% y la bolonería disminuyo en un 50.63%, lo que se tradujo en el rendimiento del ciclo de minado de la pala P&H4100AC de 6.59%, por lo que la minera obtuvo un ahorro de 156,096.44 USD.

Además, concluye con los detonadores electrónicos los tiempos entre taladro, fila y factor de potencia se reduce en un 7.62%, teniendo así un factor de potencia para el sistema de iniciación electrónica de 0.493 kg/TM, mientras que el factor de potencia para el sistema de iniciación pirotécnica es de 0.534 kg/TM, traduciéndose esto en la reducción de costo por tonelada métrica volada.

Rafaelo (2024), en su trabajo de investigación tiene como objetivo de determinar la relación respecto de la fragmentación y los otros procesos unitarios de explotación en la compañía minera aurífera Santa Rosa-Comarsa, tales como carguío y acarreo; haciendo uso de la metodología aplicada, con el uso de conocimientos en el análisis de fragmentación.

Como conclusión indica que con un 93% de passing de fragmentación, los procesos unitarios de carguío y acarreo son más eficientes y que estos irán mejorando de acuerdo con la disminución de la fragmentación. Por lo que la fragmentación es de vital importancia en los otros procesos de explotación. La implementación de detonadores electrónicos no solo mejora en la reducción directa del costo de voladura, sino también en todo el proceso de explotación.

De acuerdo con Cabada (2022), en la tesis titulada “Aplicación del sistema de iniciación electrónico DigiShot Plus para optimizar la fragmentación de rocas en el proceso de voladura en una empresa minera de Cajamarca - 2022”, tiene como objetivo principal optimizar la fragmentación con el uso de detonadores electrónicos DigiShot Plus, dicho estudio se realizó en el nivel 3336, investigación tipo aplicativo.

Como resultado, Cabada consiguió mejores resultados en la fragmentación, a la vez de tener estabilidad de taludes y vibraciones. Debo comentar que la mejora en la fragmentación es un beneficio de los detonadores electrónicos, este también nos permite rediseñar nuestra malla de perforación, debido a que tenemos una menor dispersión de tiempos y permitirnos establecer un secuenciamiento.

Huamán (2021) en su trabajo de investigación titulado “Optimización de los procesos Downstream mediante la modificación de la malla, el incremento del factor de potencia y el uso de detonadores electrónicos en la empresa minera

Golden SAC", donde el trabajo consistió en la reducción de malla de perforación, incremento de factor de potencia y el uso de detonadores electrónicos.

Huamán concluye con una disminución del 42% de P80 y un aumento de la productividad en 21%, y un incremento de productividad de la molienda de 12%, ello conlleva a una utilidad de 7.5 MM US$/mes. Podemos notar el proceso unitario de voladura, tiene gran influencia en los demás procesos, donde los detonadores electrónicos, no solo influyen en el costo unitario, sino también el costo global de explotación,

2.1.3. Antecedentes locales

Márquez (2024) en su tesis titulada "Reducción de fragmentación (P80) en la zona fase 4 con la aplicación de gravilla de 2 pulgadas en la unidad minera Toquepala" tiene como objetivo reducir el P80 mediante la aplicación de gravilla de 2 pulgadas, y analizando el P80 de material pasante, teniendo como variables la altura de taco y siendo una investigación aplicada.

Como resultado obtuvo una reducción de la fragmentación (P80) de 28.02 centímetros a 16.72 centímetros y este también mejora los procesos de carguío y acarreo. El uso de un adecuado taco hace que la malla de perforación tenga una maximización en el confinamiento y tener mejor eficiencia en el uso de la energía del explosivo; con el uso de detonadores electrónicos, debido a su precisión mejoraremos y optimizaremos la energía del explosivo, reduciendo el factor de carga y mejorando la fragmentación.

Cárdenas (2022) en su trabajo de investigación tiene como objetivo principal, analizar la aplicación del sistema Taponex en la sobre perforación, investigación tipo aplicativo, de diseño cuasiexperimental. Concluye que con la aplicación de Taponex obtiene una mejor fragmentación, reduce en un 12% el

consumo de explosivo y reduce la sobre perforación de 1.5 m a 0.5 m. La aplicación de estos elementos hace que aprovechemos de manera efectiva la energía del explosivo, buscando lograr de igual forma con el uso de detonadores electrónicos, aprovechando su precisión en la iniciación.

El trabajo de Córdova (2021), titulado "Efectividad de la iniciación electrónica en zona de interacción con equipos autónomos empleando el sistema Daveytronic Evolution Pack 48, mina Quellaveco - Moquegua". El objetivo de la investigación fue evaluar la correcta operatividad de los equipos de iniciación electrónica Daveytronic Evolution Pack 48 en áreas donde operan equipos autónomos en mina Quellaveco, con la finalidad de mejorar la seguridad y optimizar los procesos de voladura.

La muestra incluyó varias zonas de trabajo dentro de la mina, analizando variables como la precisión en la sincronización de los tiempos de detonación y su impacto en la seguridad y eficiencia de los equipos autónomos. Córdova concluye que los equipos empleados en el sistema de iniciación Daveytronic Evolution Pack 48, ya sea disparado de manera alámbrico e inalámbrico, se tiene una correcta operatividad con los equipos autónomos, teniendo una correcta calidad e intensidad de señal entre los equipos.

El trabajo de investigación de Flores (2022), titulado "Optimización de la fragmentación resultante para el mineral relacionado a la exactitud y precisión del iniciador electrónico con las propiedades geomecánicas en mina Cuajone". El estudio tuvo como objetivo principal determinar el efecto de la exactitud y precisión del sistema de iniciación electrónico, para obtener una mejor fragmentación. La metodología siguió un enfoque cuantitativo, aplicando un diseño experimental en el que se utilizaron diferentes configuraciones de iniciadores electrónicos para evaluar su efecto en la fragmentación.

Concluye que la exactitud y precisión del iniciador electrónico con respecto las propiedades geomecánicas inciden en la optimización de la fragmentación de manera positiva, optimizando en un 11.6%. En este trabajo de investigación podemos notar que se analiza el impacto económico con el uso de detonadores electrónicos, ya que, al tener una mejor exactitud y precisión, nos permitirá tener una mayor flexibilidad en el diseño de la secuencia de voladura, por lo que se debería evaluar el burden y espaciamiento de la malla de perforación, esto para optimizar el factor de carga.

Según Ninaja (2022) en su trabajo de investigación tiene como objetivo determinar la influencia de los detonadores electrónicos en los costos unitarios de operaciones en mina Toquepala, donde indica que el costo del sistema electrónico es más elevado, respecto a los sistemas tradicionales, sin embargo, sustenta el uso de detonadores electrónicos al mejorar las variables de fragmentación, vibración, velocidad de minado y costos unitarios de voladura, reflejándose en una reducción del 5.59% en el costo total de minado, logrando una utilidad de 3.5 M USD en el año 2017.

De acuerdo con Paredes (2014), en su tesis titulada “Empleo de detonadores electrónicos para optimizar la fragmentación en sector yeso anhidrita en mina modelo a tajo abierto - Toquepala” tiene como objetivo analizar y ofrecer oportunidades de mejora en la fragmentación de macizo rocoso para la reducción del costo unitario de perforación y voladura. Para ello toma como muestra el nivel de minado 2800 y 2875, realizando una comparación con sistema de iniciación electrónica y pirotécnica, en aspectos de diseño de columna explosiva, fragmentación de roca, velocidad de minado, factor de carga y niveles de vibraciones.

Concluyendo que el sistema de iniciación electrónico ofrece una mejor precisión en los tiempos de detonación, lo que permite periodos cortos en la colisión de ondas, obteniendo de esta forma una mejor fragmentación. Además, el factor de potencia con el sistema de iniciación electrónica se redujo en un 9.0% lo que permite una reducción en el costo por tonelada métrica volada.

Flores (2022) en su trabajo de investigación, tiene como objetivo demostrar la mejora de la fragmentación con el uso de emulsión gasificada, en la unidad minera Shougang, haciendo uso de la metodología aplicada. Como resultado demostró la mejora la fragmentación debido a que se tiene más elevado el factor de potencia. Con la aplicación de nuevas tecnologías se mejora los procesos unitarios de voladura, influenciando este en la fragmentación y por ende en los procesos de carguío y acarreo.

Polo (2020), en su trabajo de investigación, tiene como objetivo principal reducir costos mediante la implementación de un nuevo diseño de voladura, en la unidad minera Cerro Lindo. Realizando dicho diseño de acuerdo con los parámetros del macizo rocoso, factores de seguridad y la parte geomecánica. Concluye que logra reducir en explosivos y accesorios en un valor de 0.87 US$/ml. Con el uso de detonadores electrónicos, debido a su precisión en el secuenciamiento de salida, nos permite rediseñar las mallas de perforación, logrando reducir el factor de carga y por ende el costo de explosivos y accesorios.

Cuchula & Huari (2021), en su tesis titulado “Análisis del uso de cámaras de aire para la reducción de costos en voladura en una mina a tajo abierto - Nazca 2021” tiene como objetivo analizar el impacto del uso de cámaras de aire en la optimización de costos de voladura, siendo una investigación aplicada de diseño experimental, y tomando 8 voladuras, concluyo que con las cámaras de aire logra obtener un ahorro mayor a US$ 1,400,000 anuales. Cuchula & Huari, logran

mejorar el factor de potencia con la implementación de cámaras de aire, en el presente trabajo evaluaremos mejorar el factor de potencia con la exactitud en la iniciación de los detonadores electrónicos.

Melendres (2024), en su trabajo de investigación tiene como objetivo implementar una voladura controlada en las labores de Cerro Lindo-Ica, para controlar la sobrerotura, siendo una investigación aplicada y de diseño cuasi-experimental. Para ello realiza un control de la carga, las perforaciones de acuerdo con diseño y el secuenciamiento de las mismas; como muestra toma los proyectos de los niveles 1680, 1640, 1770 y 1650.

Como resultado redujo la sobre rotura de un 14.5% a 4%, disminuyendo un 262%. Melendres hace uso de retardo y realiza el diseño de su malla de acuerdo con los tiempos ya programados en los retardos, sin embargo, considero que, con la aplicación de detonadores electrónicos, en control de la sobre rotura, sería mayor, debido a que la dispersión de tiempo es mucho menor que los retardos, además de disminuir el acoplamiento de taladros.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Mina Shougang

a. Ubicación

La unidad minera Shougang Hierro Perú, se encuentra ubicada en el distrito de Marcona, perteneciente a la provincia de Nazca, dentro del departamento de Ica, en la costa sur del Perú, como se aprecia en la Figura 1. La unidad minera Shougang se encuentra a una altura del 798 m.s.n.m. Se ubica en costa del Perú lo que le otorga características geográficas particulares, como la facilidad de accesos y a puertos.

Figura 1

Localización de U.M. Shougang



Nota. Elaboración propia

- **Accesibilidad**

Para acceder a la unidad minera Shougang, desde la ciudad de Lima, se realiza principalmente por vía terrestre, mediante la carretera Panamericana Sur, vía que se encuentra asfaltada, teniendo un total de distancia aproximada de 554.5 kilómetros y en un tiempo de 8.15 horas. Para acceder a la unidad minera Shougang, desde la ciudad de Moquegua, también se realizar por la vía terrestre, en una distancia aproximada de 761.7 kilómetros y un tiempo de 12.15 horas, como se detalla de forma resumida en la Tabla 1.

Tabla 1

Accesibilidad U.M. Shougang

Tramo	Distancia (km)	Tiempo (Hrs)	Tipo de vía
Lima - Ica	304.5	4.5	C. Asfaltada
Ica - Nazca	143.0	2.0	C. Asfaltada
Nazca - Marcona	80.7	1.15	C. Asfaltada
Marcona - Mina Shougang	26.3	0.5	C. Asfaltada
Moquegua - Nazca	654.7	10.5	C. Asfaltada
Nazca-Marcona	80.7	1.15	C. Asfaltada
Marcona – Mina Shougang	26.3	0.5	C. Asfaltada

Nota. Elaboración propia

b. Geología

- **Geología regional**

Caldas (1978), Las unidades geológicas presentes abarcan desde el Precámbrico hasta el reciente. La más antigua es el Complejo Basal de la Costa, compuesto por rocas metamórficas, que están cubiertas de manera discordante por tilloides (formación Chiquerío), seguida por la formación San Juan. A inicios del Paleozoico inferior se acumuló la Formación Marcona, y durante el Ordovícico se emplazó el Batolito de San Nicolás.

La sedimentación mesozoica comenzó con una transgresión en el Jurásico superior, que cubrió la región y dio lugar a dos facies de acumulación: una occidental en el margen de la cuenca, conformada por las Formaciones Rio Grande (Caloviano-Oxfordiano), Jahuay (Titoniano) y Yauca (Neocomiano). En el

Aptiano-Albiano inferior se formaron los depósitos volcánicos y grauvacas de la formación Copara.

Posteriormente, la transgresión del Terciario cubrió la región durante el Mioceno, acompañada de movimientos tafrogénicos, que depositaron la formación Pisco, en el Plioceno, la invasión marina alcanzó el flanco occidental de los Andes, formando la Peneplanicie Pliocénica, seguida por una rápida regresión, que acumuló los depósitos volcánicos de Sencca. Esta regresión continuó durante el Pleistoceno y hasta tiempos recientes, dando lugar al desarrollo de terrazas marinas, dunas de arena y abanicos aluviales.

- **Geología local**

De acuerdo con Mamani (2023), en el área de mina 09-10, presentan unidades aflorantes tales como roca Hornfels (meta-sedimentarias), que vienen a ser la roca encajonante. Además de presentar múltiples diques andesíticos y dacíticos, que forman una estructura tipo sills. Esta roca encajonante está fuertemente dominada por fallas que corta de forma trasversal.

- **Geología estructural**

Según Mamani (2023), los afloramientos de rocas encontradas en Mina 9-10 pertenecen a formaciones de origen volcánico-sedimentario y meta volcánico, que muestran un nivel de fracturamiento de moderado a intenso, con presencia de fallas debido a la distribución de esfuerzos dentro del macizo rocoso. Dentro de Mina 9-10, se presentan fallas de desplazamiento dextral y paralelas de rumbo N60O, presentando un fuerte fracturamiento, además de presentar diaclasamiento con orientaciones longitudinales al eje del talud.

c. Ciclo de explotación en Mina 09-10

- Perforación

En los tajos 09-10 las perforaciones se realizan, con equipos de perforación rotativos a diésel, los cuales son de la marca Sandvik y Epiroc. Con dichos equipos se realiza la perforación con diámetros de 5” para los taladros de precorte, 7 7/8” de diámetro para taladros de buffer y para producción se utilizan diámetros de 7 7/8”, 9”, 11” y 12 1/4”, según las necesidades y condiciones geológicas. En la Figura 2 se observa una perforadora de la marca Sandvik operada en Mina 09-10.

Figura 2

Perforadora Sandvik DR412i



Nota. Elaboración propia

A continuación, en la Tabla 2 se da detalle de la flota de equipos de perforación para los tajos 09-10 Desarrollo. Los equipos Sandvik DR412i, DR460 y D75KS son equipos alquilados de propiedad de Sandvik, mientras que los equipos Epiroc son de propiedad de San Martín.

Tabla 2

Flota de equipos de perforación

Marca	Modelo	Cantidad
Sandvik	DR412i	3
Sandvik	DR460	1
Sandvik	D75KS	1
Epiroc	DML HP	1
Epiroc	DML LP	2
Epiroc	DM 45 LP	1

Nota. Elaboración propia

- **Voladura**

Para la actividad de voladura se cuenta con 4 camiones fabrica, con los cuales se realiza el carguío de taladros. Se tiene 2 camiones fábrica de propiedad de San Martín y 2 camiones fábrica de propiedad de la empresa Hidroex. Asimismo, para el proceso de tapado de taladros se utiliza 2 minicargadores. En la Figura 3 podemos observar el camión fábrica de código TV-35 propiedad de San Martín.

Figura 3

Camión Fabrica Kenworth T800



Nota. Elaboración propia

En la Tabla 3, se presenta de manera detallada la composición completa de la flota de equipos especializados que han sido asignados para los procesos de voladura en las operaciones mineras correspondientes a los tajos 09-10. En dicha tabla se presenta información respecto a las características técnicas, capacidades operativas y especificaciones de cada uno de los equipos que conforman dicha flota.

Tabla 3

Flota de equipos de voladura

Equipo	Descripción	Marca	Modelo	Color
TV-34	Camión para ANFO	Kenworth	T800	Blanco
TV-35	Camión para ANFO	Kenworth	T800	Blanco
TV-327-AL	Camión para ANFO	International	5600I-6x4	Blanco
TV-330-AL	Camión para ANFO	Mack	GU813E	Blanco
MC-17-AL	Minicargador	John Deere	324G	Amarillo y Negro
MC-18-AL	Minicargador	John Deere	324G	Amarillo y Negro

Nota. Elaboración propia

- **Carguío**

El proceso de carguío del material volado se realiza con las palas mecánicas de modelos CAT 6040 con capacidad de 40 toneladas y CAT 6050 con capacidad de 50 toneladas. Así como excavadoras de Marca Hitachi y Caterpillar, las cuales han sido seleccionadas considerando criterios de eficiencia operativa, rendimiento productivo. Se presenta en la Tabla 4 la flota de equipos de carguío.

Tabla 4

Flota de equipos de carguío

Modelo	Marca	Descripción del equipo
365 CL	Caterpillar	Excavadora
374F	Caterpillar	Excavadora
374FL	Caterpillar	Excavadora
390DL-STD	Caterpillar	Excavadora
390FL	Caterpillar	Excavadora
6040FS	Caterpillar	Pala Mecánica
6050FS	Caterpillar	Pala Mecánica
870G LC	John Deere	Excavadora
EC950	Volvo	Excavadora
EX1200-7 BH	Hitachi	Excavadora
HX850SL	Hyundai	Excavadora
RH120E FS	O&K	Pala Mecánica
SY750H	Sany	Excavadora
ZX870LC-5	Hitachi	Excavadora

Nota. Elaboración propia

- **Acarreo**

El proceso de acarreo se realiza con los camiones mineros modelos; CAT 785C, 785D, 783D. Estos equipos garantizan el flujo continuo y eficiente del material desde los frentes de carguío hasta sus destinos finales. El mineral es destinado a la planta de procesamiento donde se llevan a cabo las etapas de concentración, mientras que el desmonte es enviado al botadero previamente designado para su disposición final.

2.2.2. Roca Hornfels

Mamani (2023), la roca Hornfels es la encajonante y predominante en la mina 9-10, como se muestra en la Figura 4, donde presenta con una coloración de color gris claro a gris verdoso, alta resistencia, con un fracturamiento moderado a muy fracturado, en algunos casos presenta nódulos de chert. La roca Hornfels en la mina 9-10, presenta un fuerte fracturamiento, por la presencia sistemática de fallas locales, con planos de fallas tipo ondulantes y escalonados.

Figura 4

Afloramiento de Hornfels



Nota. Mamani (2023)

En el estudio de Mamani (2023), se pudo identificar esta unidad litológica principalmente en la zona Norte del Tajo, de acuerdo con la Figura 5. Este macizo rocoso se caracterizó por ser moderadamente resistente a resistente, encontrándose fracturado a muy fracturado. Asimismo, se tuvo presencia de fracturas planas ligeramente rugosas, con presencia de relleno de pátinas de óxido.

Figura 5

Afloramiento de Hornfels fracturado en Mina 10, cara Norte, Nv. 569



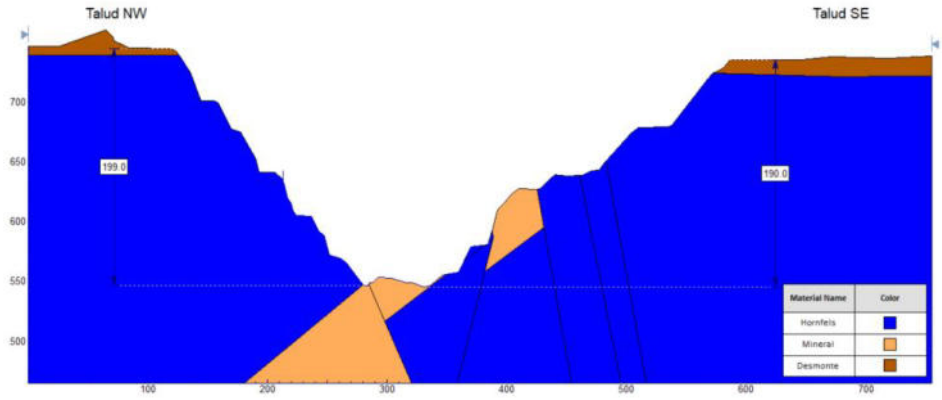
Nota. Mamani (2023)

a. Consideraciones geotécnicas

Mamani (2023) considero 4 secciones geológicas en base a las zonas más críticas y representativas de los taludes de Mina 09-10. En las siguiente Figura 6 se muestran dichas secciones analizadas según la geometría de los taludes del tajo.

Figura 6

Sección de Análisis de Estabilidad A-A

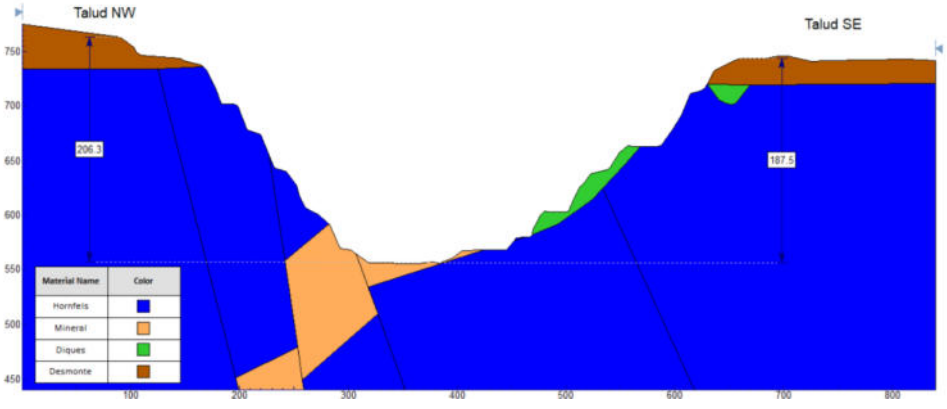


Nota. Mamani (2023)

En la Figura 7 se puede observar la predominancia de la roca Hornfels, así como la presencia de desmonte en la parte superior de la sección. A diferencia de la Figura 6, se puede observar también la presencia de diques representados en color verde y presencia de mineral en la zona inferior del tajo.

Figura 7

Sección de Análisis de Estabilidad B-B

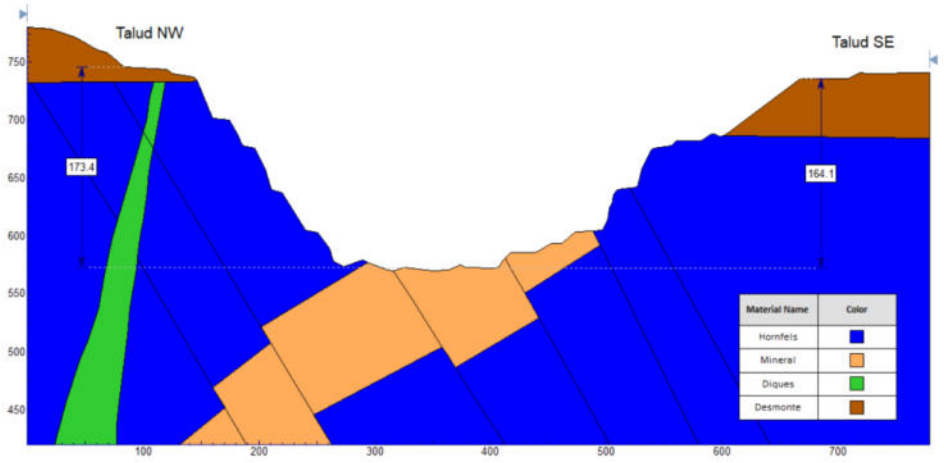


Nota. Mamani (2023)

La sección C-C que se muestra en la Figura 8 se aprecia la presencia de dique a lo largo del talud NW. Asimismo, se visualiza la presencia de Hornfels en ambos taludes y se incrementada la presencia de mineral en los niveles inferiores del tajo.

Figura 8

Sección de Análisis de Estabilidad C-C

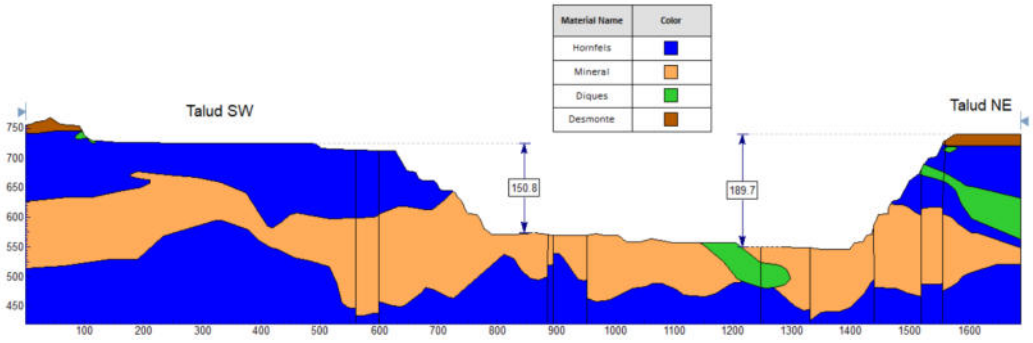


Nota. Mamani (2023)

En la Figura 9 se puede observar la presencia de mineral a lo largo del talud SW y NE, así como la presencia de Hornfels y Diques que intersecan tanto el mineral como al Hornfels.

Figura 9

Sección de Análisis de Estabilidad D-D



Nota. Mamani (2023)

b. Parámetros de resistencia del macizo rocoso

Mamani (2023) estimó las propiedades de los macizos rocosos en cada una de las secciones analizadas. A continuación, se presenta en la Tabla 5 resumen de dichos parámetros de resistencia para la roca Hornfels.

Tabla 5

Parámetros de Hornfels por Secciones

Sección	Litología	Densidad (kN/m3)	Resistencia a la compresión (MPa)	GSI
A-A	Hornfels (Talud - NW)	26.4	125.0	55
	Hornfels (Talud - SE)	26.4	100.0	54
B-B	Hornfels (Talud - NW)	26.4	127.0	57
	Hornfels (Talud - SE)	26.1	100.0	55
C-C	Hornfels (Talud - NW)	26.5	121.0	58
	Hornfels (Talud - SE)	26.5	180.0	55
D-D	Hornfels (Talud - SW)	26.5	135.0	52
	Hornfels (Talud - NE)	27.9	79.0	48

Nota. Mamani (2023)

2.2.3. Voladura de Rocas

a. Propiedades de explosivos

- **Densidad**

La densidad del explosivo depende de los materiales utilizados en su fabricación y se expresa en términos de gravedad específica, que es la relación entre la densidad del explosivo y la densidad del agua en condiciones estándares.

- **Onda de choque**

Es un movimiento ondulatorio repetitivo que afecta toda la masa explosiva, estos movimientos de desplazan entre las velocidades de 1,500 y 7,000 m/s, esto estará determinado de acuerdo con la composición del agente explosivo, así como a las condiciones de iniciación.

EXSA (2009), indica que un carácter determinante de la onda de choque en la detonación es que una vez que alcanza su nivel de equilibrio (temperatura, velocidad y presión) este se mantiene durante todo el proceso, por lo que se dice que es auto sostenida, mientras que la onda deflagrante tiende a amortiguarse hasta prácticamente extinguirse, de acuerdo con el factor, tiempo / distancia a recorrer, se forma una zona de reacción, que en su último tramo queda limitada por un plano ideal, que se denominado Plano de Chapman-Jouguet, lo que se conoce también como condiciones del estado de detonación

- **Velocidad de detonación (VOD)**

ENAEX (2010), define el VOD como la velocidad en que la onda de detonación o la onda de choque se desplaza a través del explosivo, como se muestra en la Figura 10, el desarrollo de una detonación. Este valor es un

indicador del performance del explosivo. Entre los factores más relevantes que afectan la velocidad de detonación, se destacan los siguientes:

El diámetro del explosivo.

El grado de confinamiento y el tamaño de las partículas del explosivo.

La densidad del explosivo.

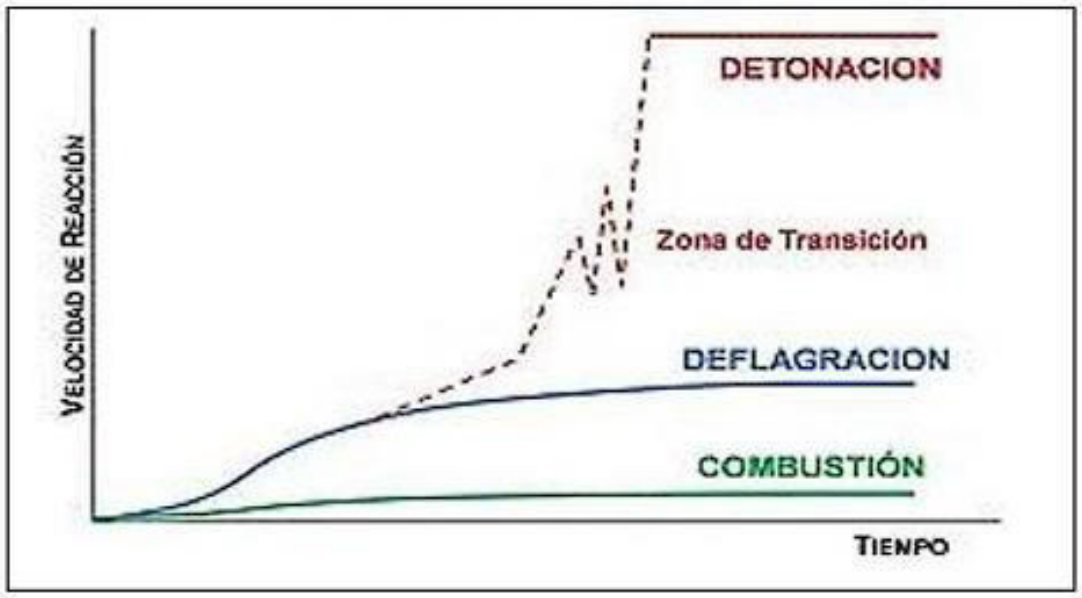
La energía de iniciación (cebo).

El efecto del agua en el rendimiento de los explosivos comerciales.

La temperatura del explosivo.

Figura 10

Desarrollo de una detonación



Nota. Bernaola (2013)

- **Presión de detonación**

Se denomina presión de detonación a la onda de choque generada durante el proceso de detonación del explosivo; este es un indicador del performance del explosivo para fragmentar del macizo rocoso.

Según Konya (1998), la presión de choque es una presión transitoria que se desplaza a la velocidad de detonación del explosivo. Se calcula que esta presión representa solo entre el 10% y el 15% de toda la energía de trabajo disponible en un explosivo, mientras que la presión de gas constituye entre el 85% y el 90% de la energía útil del explosivo.

Para determinar la presión de detonación se aplica la siguiente ecuación, que está relacionada con la velocidad de detonación y con la densidad del explosivo.

$$Pd = \frac{K\ x\ p\ x\ VOD^2}{1 + 0.8\ x\ p} \quad (1)$$

Donde:

Pd = Presión de detonación (Kg/cm3)

K = Constante del explosivo

p = Densidad inicial del explosivo (g/cm3)

VOD = Velocidad de detonación (m/s)

b. Parámetros de diseño de voladura

- **Burden**

Jesús (2022), el burden se define como la distancia entre el eje del taladro y la cara libre más cercana, medida de manera perpendicular a las líneas de los taladros perforados. Esta variable, es una de las más críticas de determinar en el proceso de voladura. Si consideramos un burden muy pequeño, este traerá como consecuencia desplazamiento de material volado o una fragmentación muy fina.

Por el contrario, se diseñamos un burden muy grande, este puede producir una sobre rotura en la cara final, producirse fly rocks, posibilidad de formarse cráteres y fragmentación muy gruesa.

Para el cálculo del burden se tomará la ecuación propuesta por Calvin J. Konya, esta ecuación se expresa de la siguiente forma:

$$B = 0.012 \left(\frac{2SGe}{SGr} + 1.5\right)(de)x\ Kr\ x\ Kd\ x\ Ks \quad (2)$$

Donde:

B = Burden (m)

S = Espaciamiento (m)

SGe = Densidad del explosivo (g/cc)

SGr = Densidad de la roca (g/cc)

De = Diámetro de explosivo (mm)

El burden también se puede diseñar a partir del explosivo, siendo expresada la ecuación de la siguiente forma:

$$B = 8\ x\ 10^{-3}\ x\ (De)\ x\ \sqrt[3]{\frac{PRvol}{SGr}}\ \ x\ Kr\ x\ Kd\ x\ Ks \qquad (3)$$

Donde:

B = Burden (m)

SGr = Densidad de la roca (g/cc)

S = Espaciamiento (m)

De = Diámetro de explosivo (mm)

PRvol = Potencia relativa por volumen

- **Espaciamiento**

Jesús (2022), define como la distancia entre los taladros de una misma fila que son perpendiculares al burden. Este se calcula en función de la longitud de la carga. La distribución de la energía explosiva se considera óptima cuando el espaciamiento es 1.15 veces la carga y el patrón es triangular. Se sugiere utilizar una malla triangular equilátera en lugar de una cuadrada, ya que resulta más efectivo para la fragmentación de la roca. Por lo tanto, el espaciamiento suele estar relacionado con la carga.

- **Diámetro del taladro**

Paredes (2014), el diámetro de perforación está ligada a varios factores, como las especificaciones del equipo de perforación, la carga, el espaciamiento, la distribución del explosivo en el taladro y, en general, la eficiencia y la economía

del proceso de extracción. Las consideraciones más relevantes para determinar el diámetro óptimo de perforación incluyen los parámetros de la roca y del explosivo, así como las restricciones debidas a la proximidad de instalaciones (nivel de vibraciones) y factores de producción relacionados con los equipos de carguío, transporte, chancado, entre otros.

De acuerdo con McKenzie (1994), los principales factores a considerar para seleccionar el diámetro del taladro son:

- El costo específico de la voladura ($/m³ de roca volada).
- La fragmentación y la relación entre el espaciado de los taladros y las fracturas.
- El control de la precisión de la perforación y su impacto en la fragmentación, la seguridad y el medio ambiente.
- El tamaño de la perforadora y la accesibilidad al sitio.
- La altura del banco y la proporción del taladro necesaria para el taco.

Según McKenzie (1994), el diámetro del taladro debe estar entre el 0.5% y el 1% de la longitud necesaria del taladro (por ejemplo, una longitud máxima de taladro de 100 a 200 veces el diámetro). Taladros con un diámetro más pequeño (así como su correspondiente burden y espaciamiento reducido) proporcionarán una mejor fragmentación, menos vibraciones y permitirán el uso de perforadoras más ligeras y móviles, aunque es probable que aumenten el costo de perforación, definiéndolo de la siguiente forma:

(4)

$$d = \frac{Hb}{150}$$

Donde:

Hb = altura de banco (m)

d = diámetro del taladro (m)

Sobre perforación

La sobre perforación se considera la perforación realizada por debajo del nivel de piso, esta sobre perforación asegura la rotura del piso diseñado. Es importante saber las características del macizo rocoso, así como las propiedades del explosivo, tales como el grado de potencia.

Para determinar la longitud de la sobre perforación Calvin J. Konya, lo formula de la siguiente forma:

$$L = 0.3\ B \tag{5}$$

Donde:

L = Largo de la sobre perforación (m)

B = Burden (m)

Es importante mencionar que un exceso de sobre perforación, implicará un aumento en el costo unitario de perforación, mayor consumo de explosivos, mayor fragmentación en el piso y mayores niveles de vibración.

- **Longitud de taco**

El taco es el material inerte que se coloca sobre la carga explosiva con el objetivo de confinar y retener la energía generada por la explosión. Si el taco es

menor al rango de confinamiento, se producirá roca proyectada y tendrá un escape prematuro de gases, lo que representa una pérdida de energía costosa y no aprovechada. Su función es retener los gases generados por la detonación del explosivo durante unos pocos segundos, lo suficientemente largos como para evitar que los gases se escapen del taladro.

Para el cálculo de la longitud de taco, se tienen diversos modelos, entre las que mencionamos las siguientes:

Según Richard L. Ash:

$$T = (0.5\ a\ 1.0)B \tag{6}$$

Donde:

B = Burden (m)

Según Calvin J. Konya, para roca estratificada (7) y para roca masiva (8):

$$T = B \tag{7}$$

$$T = 0.72\ B \tag{8}$$

Donde:

B = Burden (m)

c. Análisis de granulometría

- Modelo KUZ-RAM

ENAEX (2010), es una ecuación para determinar la distribución granulométrica de una voladura, que relaciona los parámetros de voladura y el tamaño medio de fragmentación.

Este método proporciona una estimación del tamiz por el cual pasa el 50% de la roca, expresándose la fórmula de la siguiente manera:

$$X_{50} = A\left(\frac{Va}{Q}\right)^{0.8} Q^{\frac{1}{6}}\left(\frac{115}{E}\right)^{-\frac{19}{30}} \quad (9)$$

Donde:

X 50 = Tamaño medio del fragmento

A = Factor de la roca

Va = Volumen de la roca quebrado por pozo

Q = Kilogramo de explosivo por pozo

E = Potencia en peso del explosivo en %

El factor de roca de acuerdo con el modelo de Kuz-Ram, se deduce de los datos geológicos de la masa rocosa usando la ecuación, siguiente:

$$A = 0.06 * (RMD + JPS + JPA + RDI + HF) \quad (10)$$

Donde:

RMD = Descriptor de la masa rocosa

JPS = Espaciamiento de las diaclasas verticales

JPA = Ángulo del plano de diaclasa

RDI = Influencia de la densidad

HF = Factor de dureza

- Modelo desarrollado por JKMRC: TCM y CZM

Kanchibotla y Grundstrom, demostraron que el modelo de Kuz-Ram no toma en cuenta la proporción de finos en la distribución del tamaño de la fragmentación. Dado que la fragmentación de la roca volada se produce a través de varios mecanismos, no es posible modelar la distribución de tamaños de los fragmentos utilizando una única distribución. JKMRC desarrollo dos modelos de fragmentación, el modelo en el área de chancado (CZM) y el modelo de dos componentes (TCM).

El modelo de dos componentes TCM; comprendida de dos conjuntos de fragmento de roca, primera zona, corresponde a la parte final, y la segunda zona, correspondiente a la parte gruesa. Este modelo es construido por dos funciones Rosin-Rammler, de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$P(x) = 100\left(1 - (1 - fc) * e^{\left(-1n2*\left(\frac{X}{a}\right)^{b}\right)} - Fc * e^{\left(-1n2*\left(\frac{X}{c}\right)^{d}\right)}\right) \quad (11)$$

Donde:

P(x) = Porcentaje de material de tamaño menor de X (%).

X = Tamaño de material (m).

Fc = Fracción de roca que falla por compresión.

a = Tamaño de fragmento medio en la región de falla por tensión (m).

b = Coeficiente de uniformidad en la región de falla por tensión.

c = Tamaño de fragmento medio en la región de falla por compresión (m).

d = Coeficiente de uniformidad en la región de falla por compresión.

El Modelo CZM; también usa componentes de la función Rosin-Rammler, donde la ecuación es similar al modelo Kuz-Ram, pero teniendo cambios en el factor de roca y el índice de uniformidad, quedado expresada la fórmula de la siguiente manera:

$$P(x) = 100\left(1 - e^{\left(\ln\left(1-P(xc)*\left(\frac{X}{Xc}\right)^{n\ gruesos}\right)\right)}\right) \quad (12)$$

Donde:

P(x) = Porcentaje pasante cribado de tamaño.

P(xc) = Porcentaje pasante de tamaño característico, Xc, (%).

X = Tamaño cribado (m).

Xc =Tamaño característico (m).

N gruesos = Índice de uniformidad usado para la zona de gruesos.

La parte de material finos de distribución de tamaños dado por:

$$P(x) = 100\left(1 - e^{\left(\ln\left(1-P(xc)*\left(\frac{X}{Xc}\right)^{n\ finos}\right)\right)}\right) \quad (13)$$

Donde:

N finos = Índice de uniformidad usado para la zona de finos.

El índice de uniformidad del material fino es reestructurado y expresado de la siguiente forma.

$$n\,fino = \frac{\ln\left(\frac{\ln(1-Fc)}{\ln(1-P(Xc))}\right)}{\ln\left[\left(\frac{1}{Xc}\right]\right)} \quad (14)$$

Donde:

P(xc) = Porcentaje pasante de tamaño característico, Xc, (%).

Xc =Tamaño característico (m).

d. Vibraciones

Según ENAEX (2010), las vibraciones son uno de los obstáculos más importantes que enfrentan dentro de las operaciones de voladura. En ciertas circunstancias, podrían generar grandes daños estructurales a las unidades mineras o poblaciones cercanas.

Bernaola (2013) menciona algunos factores que podrían influir en la generación de vibraciones por voladura:

- Cantidad de explosivo detonado simultáneamente, este valor no corresponde a la cantidad de explosivo total de la voladura, ya que, según la secuencia de detonación diseñada, los taladros no detonan todos a la vez. Esta evidenciado que la vibración generada por 2 taladros detonados con un retardo menor a 8 ms entre sí, no generan una vibración adicional significante y se podrían considerar disparos separados.
- Grado de confinamiento, ya que, un grado de confinamiento más alto supone una mayor dificultad para la fragmentación y desplazamiento de la roca, debido a ello, la energía generada por la detonación se transformará en energía sísmica que se trasferirá al terreno.

- Características de la roca, este factor es de gran influencia, puesto que cada ejemplar de roca transfiere de manera diferente las vibraciones, esto debido a su composición y densidad individual.
- Distancia al lugar de detonación, esto debido a que según el punto de la voladura se encuentre cercano a alguna estructura particularmente susceptible o un lugar aislado, la generación de vibraciones podría influir o no de manera notable en el entorno.
- Geología del terreno, este factor hace referencia a que cada ejemplar de roca presenta un comportamiento particular en función de las características tensionales del medio. Ciertas rocas son más plásticas, mientras que otras son más elásticas, lo que influye en su capacidad para absorber y transmitir las ondas vibratorias de modo diferente.

Asimismo, ante este obstáculo, Bernaola (2013) propone las siguientes acciones para reducir las vibraciones que se puedan generar producto de las voladuras.

- Disminuir la carga operante:
    - Incremento del número de detonadores, así como el de micro retardos.
    - Uso de explosores secuenciales.
    - Utilización de detonadores electrónicos, en casos especiales.

- Disminuir la carga del taladro:
    - Disminuir el diámetro y número de taladros por proyecto.
    - Usar diseños con carga espaciada en los taladros.
    - Uso de cargas de diámetro menor al del taladro.

- Disminución de la altura de banco.

- Disminuir el grado de confinamiento de cargas:
  - Uso de taladros inclinados.
  - Cerrando la malla.
  - Adecuación de la secuencia de iniciación.
- Crear un corte entre la estructura a cuidar y la voladura.

2.2.4. Sistema de voladura Digital Enaex

a. Descripción del sistema

Este sistema digital está conformado por un conjunto de 03 tipos de unidades resistentes, los mismo que se presentan en la Figura 11:

- **01 blaster remoto (DRB),** con el que se efectúan los procedimientos de pruebas, así como los de disparo. Este dispositivo es capaz de comunicarse de manera remota con cada detonador.
- **02 unidades de programación (PU),** con el que se identifican y prueban de manera individual cada detonador en el banco, permitiendo también asignar el tiempo de retardo.
- **01 compacto Blast driver (DBD),** el cual puede comunicarse de manera inalámbrica desde el DRB2 y recibir las instrucciones, así como, brindar energía para disparar hasta 1,500 detonadores por cada DBD.

Figura 11

Sistema digital Daveytronic



Nota. Elaboración propia

b. Características Técnicas

Dicho detonador electrónico posee una carga base compuesta por PETN de 800mg (Su fuerza es de #8) y una carga de iniciación compuesta por explosivos primario de 200mg. Asimismo para ofrecer mayor seguridad en entornos de trabajo pesado, las cápsulas de los detonadores podrían utilizar una aleación de cobre

c. Características de funcionamiento

El sistema de detonación digital Daveytronic posee un rango de retardo desde 0 hasta 14 000 ms con intervalos de incremento de hasta 1 ms.

2.3. Definición de términos

2.3.1. Explosivo

Se definen como sustancias o compuestos químicos que pueden estar en estado sólido, gaseoso o líquido, los cuales mediante reacciones químicas de óxido reducción, son capaces de transformarse en un tiempo breve (milisegundos) en grandes volúmenes de productos gaseosos con alta liberación de energía. (EXSA, 2009).

2.3.2. Altos explosivos

Son aquellos explosivos sensibles al fulminante N°8. Comprendido por dinamitas, explosivos de seguridad, hidrogeles, emulsiones sensibilizadas y explosivos especiales. (EXSA, 2009)

2.3.3. Agentes de voladura

Son aquellos explosivos no sensibles al fulminante N°8. Conformado por hidrogeles, emulsiones, agentes mixtos (Emulsión / ANFO o Heavy ANFO, entre otros), agentes de voladura NCN granulares. (EXSA, 2009)

2.3.4. Carga operante

Según Herrera (2021) es definida como la cantidad de carga explosiva total de un taladro o varios taladros a ser detonados al mismo tiempo.

2.3.5. Factor de potencia

Se refiere a la cantidad de explosivo necesario para romper determinada unidad de peso de roca. Su unidad de medida es expresada en kg/TM. (FAMESA, 2019)

2.3.6. Factor de carga

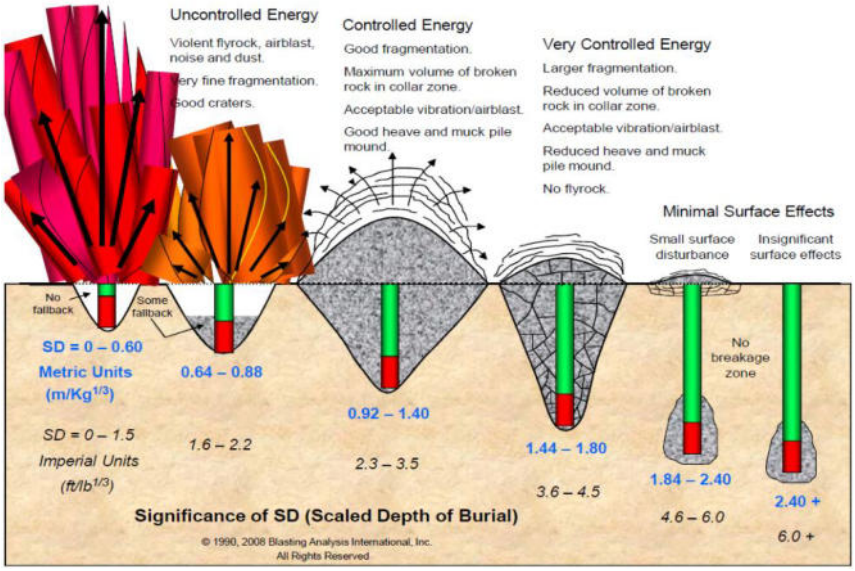
Se refiere a la cantidad de explosivo necesario para romper un volumen de roca. Su unidad de medida es expresada en kg/m3. (FAMESA, 2019)

2.3.7. Scaled Depth of Burial (SD)

Es la relación del material de taco y la cantidad de explosivo, dentro de un espacio equivalente a diez veces el diámetro, como se presenta de manera grafica en la Figura 12. (BAI, 2008).

Figura 12

Significance of Scaled Depth of Burial



Nota. BAI (2008)

2.3.8. Flyrocks

Son los fragmentos de roca que son proyectados de manera violenta debido a la acción de los gases generados después de detonar un explosivo confinado en un determinado volumen de roca. Los flyrocks son un riesgo inherente a la praxis de voladuras y constituyen un peligro de alta significancia

para la seguridad de personas, vehículos, equipos e infraestructuras en general. (ENAEX, 2010)

2.3.9. Taco superior

Se define como el material inerte adicionado en la parte superior del hoyo de voladura el cual sirve para el confinamiento de los gases generados de la explosión y evitando también la proyección de rocas (fly rocks) y la sobrepresión excesiva. (ENAEX, 2010)

2.3.10. Taco intermedio

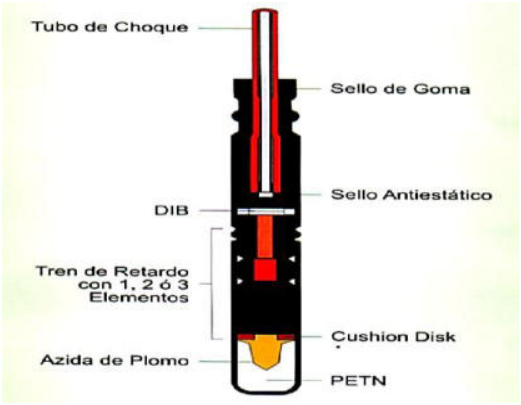
Es el material inerte adicionado a la columna del explosivo utilizado para minimizar la cantidad de explosivo contenido en el hoyo de voladura. Esta práctica es utilizada en aquellas zonas del hoyo de voladura donde la roca situada alrededor es lo suficientemente débil como para evitar generar un quebrantamiento adicional. (ENAEX, 2010)

2.3.11. Detonadores no eléctricos

Este dispositivo contiene un “retardo de plomo” el cual establece el tiempo preciso de retardo, cuyo núcleo se encuentra relleno con una especie de mixto pirotécnico. (ENAEX, 2010). Se detalla sus partes o componentes en la Figura 13

Figura 13

Partes del detonador no eléctrico



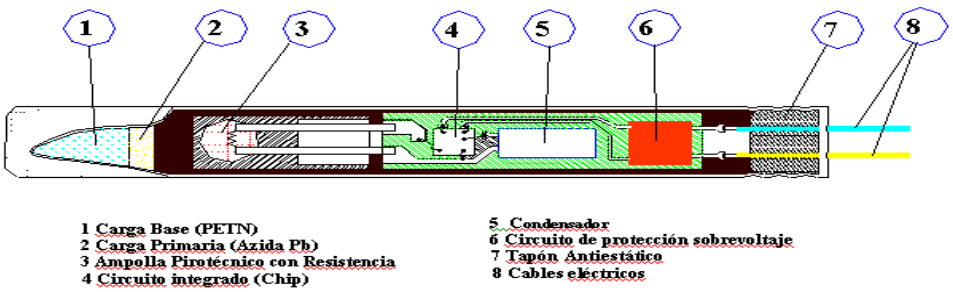
Nota. ENAEX (2010)

2.3.12. Detonadores electrónicos

Compuesto por una unidad y un detonador electrónicos instantáneo, como se muestra en la Figura 14. Donde se identifica un circuito integrado o microchip, el cual conforma el corazón del detonador, un condensador empleado para almacenamiento de energías y un circuito de seguridad conectados a hilos destinados a la protección de distintas formas de sobrecargas eléctricas. (ENAEX, 2010).

Figura 14

Características técnicas del detonador electrónico



Nota. ENAEX (2010)

2.3.13. Cordón detonante

Orica (2018), es un dispositivo de voladura flexible y resistente que contiene un núcleo compacto de pentrita, envuelto en una malla de fibra, la cual a su vez está protegida por un recubrimiento de plástico o PVC. Su principal función es actuar como línea maestra para conectar los detonadores y facilitar su activación.

2.3.14. Costo variable

Son aquellos costos que cambian en proporción directa con el nivel de producción de la actividad minera. Mientras la producción se incremente, los costos variables también incrementarán.

2.3.15. Costo fijo

Son aquellos costos que cambian de acuerdo con el nivel de producción, estos costos se mantienen constantes independientemente si aumenta la producción o disminuye.

2.3.16. Costo total

Se considera el costo total, al total de gastos que se incurren para la producción; constituida por los costos fijos y los costos variables. Podemos definir también como el total de gastos que se realiza para obtención de un producto.

2.3.17. Costos operativos

Se definen como aquellos que son generados de manera continua durante todo el ciclo de explotación minera, ligados siempre a la producción minera.

2.3.18. Costos directos

Pacahuala (2015), son costos variables, ligados a las actividades primaria del ciclo de explotación, siendo estos los procesos de perforación, voladura, carguío, acarreo y servicios auxiliares; considerándose costos de personal, materiales, insumos, equipos, entre otros.

2.3.19. Costos indirectos

Pacahuala (2015), son costos que son independientes a la producción, tales como gastos generales, administración, logística, capacitaciones, depreciación, entre otros. Son considerados como costos fijos que pueden variar en función del nivel de producción proyectado, pero no está ligados directamente con la producción obtenida.

2.3.20. Costos unitarios de mina (US$/TM)

Se define como los costos para extraer y transportar una tonelada de mineral desde la mina hasta el punto de procesamiento o disposición. Este indicador económico permite evaluar la eficiencia operativa y económica de una operación minera y se calcula considerando todos los costos asociados, tales como: Costos de perforación y voladura, costos de carguío y acarreo, costos de mantenimiento, mano de obra directa: Sueldos y beneficios del personal, y gastos generales.

2.3.21. Costos de voladura

El proceso de voladura es clave en la minería, ya que permite reducir el tamaño de la roca para tener un eficiente proceso de carguío, transporte y chancado. En la minería a cielo abierto, los costos asociados a la voladura constituyen un porcentaje importante en los costos totales, debido a la inversión

en mano de obra calificada, agentes explosivos y equipos. El costo de la voladura se refleja en el valor monetario necesario para producir el bien deseado, el cual se calcula sumando todos los costos involucrados en la producción total.

2.3.22. Optimización de costos

Consiste en llevar a cabo un proceso destinado a optimizar los costos de un proceso para aprovechar al máximo el presupuesto asignado. Esto incluye asegurar las mejores tarifas y condiciones en todas las adquisiciones comerciales, así como promover la estandarización, simplificación y racionalización de plataformas, aplicaciones, uso de tecnologías, y mejoras en los servicios.

2.3.23. Costo de producción

Incluye todos los costos necesarios para ejecutar las operaciones directamente relacionadas con la extracción del mineral, como la perforación y voladura. En el caso de la voladura, este costo abarca, explosivos, detonadores, equipos utilizados para perforar y cargar explosivos, mano de obra directa en las operaciones de perforación y voladura, insumos asociados (por ejemplo, combustibles, accesorios para perforadoras, entre otros).

2.3.24. Costo administrativo

Constituye los costos generales y de gestión que respaldan las operaciones mineras, incluidos los procesos de voladura. Considerando la planificación de las voladuras, supervisión y control de calidad de los procedimientos de voladura, salarios del personal administrativo, ingenieros de mina y encargados de seguridad, licencias, permisos y otros gastos legales relacionados con la operación de voladuras.

2.3.25. Fragmentación de rocas

Según Bernaola (2013), se tiene 4 fases durante el proceso de fragmentación y desplazamiento del material volado que acontecen durante la detonación de la carga explosiva y posterior. Siendo las siguientes 4 fases:

FASE I: Proceso de detonación

La detonación es la fase inicial de la fragmentación y el posterior desplazamiento, en la que los principales componentes del explosivo se transforman en gases. Al estar confinados, estos gases generan alta presión y temperatura. Esto se puede apreciar en la Figura 15.

Figura 15

Proceso de detonación de taladro



Nota. Bernaola (2013)

FASE II: Propagación de ondas de choque

La etapa siguiente de la detonación es la propagación de ondas de choque y esfuerzos a través de la roca. Esta onda de presión, que se transmite por el macizo rocoso, se genera debido a las altas presiones y a la rápida expansión del gas, lo que produce un impacto en las paredes de los taladros. A medida que la

onda se desplaza hacia el exterior, tiende a comprimir el material rocoso que ha sido desplazado, como se aprecia en la Figura 16.

Figura 16

Propagación de las ondas de choque



Nota. Bernaola (2013)

FASE III: Expansión de los gases

Durante la propagación de la onda de choque, los gases generados a alta presión y temperatura crean un campo de esfuerzo alrededor del taladro, lo que provoca la expansión del taladro original. Esto da lugar a la formación de grietas radiales que pueden penetrar en cualquier discontinuidad del macizo rocoso, como se puede representar en la Figura 17.

Figura 17

Expansión de los gases



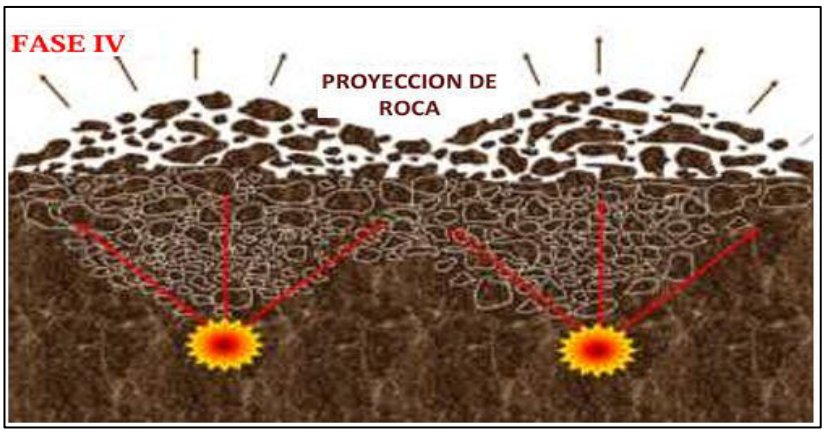
Nota. Bernaola (2013)

FASE IV: Desplazamiento de material

En esta fase, el proceso está casi finalizado debido a las ondas de compresión y tensión, así como la presurización del gas, de acuerdo a la gráfica representativa en la Figura18. En la gran mayoría de procesos de voladura, entre más alto es la altura de banco, aumenta la posibilidad de obtener una mejor fragmentación, debido al aumento de la velocidad en la que los fragmentos de manera individual caen e impactan con el piso del banco.

Figura 18

Desplazamiento del material



Nota. Bernaola (2013)

2.3.26. Sistemas de iniciación

Están constituido por el método utilizado para la iniciación energética de los explosivos. Según FAMESA (2019) la correcta selección del tipo de sistema de iniciación está determinado por las necesidades de secuenciamiento, las características del entorno, la simplicidad en la realización de la conexión y la seguridad involucrada en uno u otro sistema. Los distintos tipos de sistemas de iniciación se clasifican en cuatro grupos:

- Sistemas convencionales.
- Sistemas eléctricos.
- Sistemas no eléctricos.
- Sistemas electrónicos.

2.3.27. Sistema de iniciación pirotécnicos

Ninaja (2022), los sistemas de iniciación pirotécnicos presentan dispersiones absolutas en los tiempos de iniciación, logrando ser esta dispersión mucho mayor y significativa a los detonadores electrónicos, esto se debe la dependencia del periodo de retardo y la combinación de los retardos que se emplean entre taladros y filas.

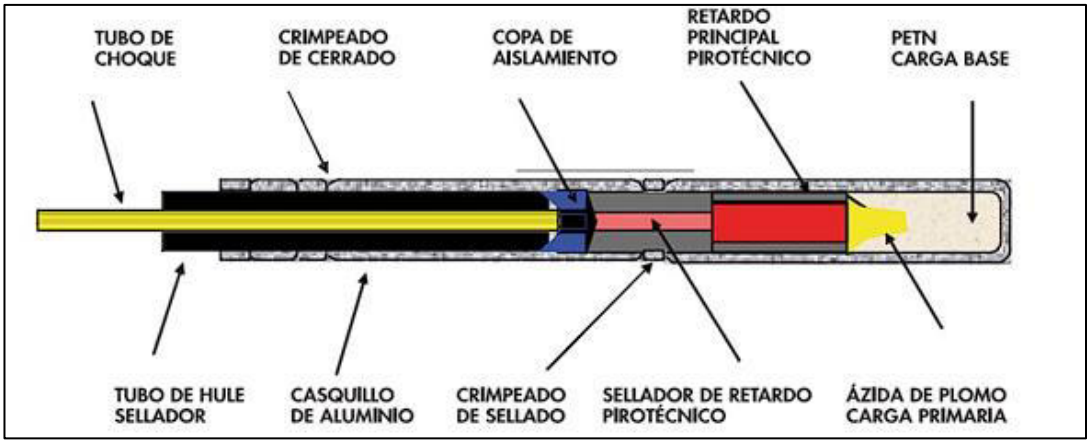
La voladura de rocas involucra diversas variables, como la precisión en el diseño de los tiempos, los cuales se determinan mediante la interacción entre las velocidades de onda del macizo rocoso y la velocidad de fracturación. Esta interacción de tiempos se sitúa entre los 2 y 6 milisegundos, un intervalo que no es alcanzable con detonadores pirotécnicos debido a su alta dispersión, que supera los 20 milisegundos por retardo. Esto impide establecer una secuencia precisa de detonación.

Este sistema comprende de los siguientes elementos, los mismo que se encuentran representados en la Figura 19:

- Detonador; contiene en su interior una carga explosiva primaria, además de una secundaria de una potencia número 12, un retardo con intervalos de tiempo de, 25, 50, 100, 200, 400, 600, 800, 900, 1000, 1100 milisegundos.
- Tubo de choque; compuesto por material termoplástico de considerable resistencia mecánica, en su interior está cubierta por una sustancia reactiva, que siendo esta activada, conducen una onda de choque que, con la presión y temperatura, se logra iniciar el detonador.
- Conector; elemento para facilitar una conexión segura entre el tubo de choque y el cordón detonante; compuesto de un block de plástico.

Figura 19

Partes de detonadores usados en iniciación pirotécnica



Nota. EXSA (2009)

2.3.28. Sistema de Iniciación electrónicos

En la Figura 20, se presenta el detonador electrónico el cual es programable en un rango de 0 a 15,000 milisegundos, con incrementos de 1 milisegundo, lo que permite un control extenso sobre los tiempos de amarre. Además, ofrece una precisión de retardo de 0,1 % de milisegundos. Esta exactitud asegura la ausencia de traslapes, lo cual está directamente relacionado con la probabilidad de acoplamiento de las ondas de choque generadas por las cargas que detonan al mismo tiempo. Ninaja (2022).

Figura 20

Detonador electrónico utilizado en iniciación electrónica



Nota. Ninaja (2022)

De acuerdo con Ninaja (2022), El detonador electrónico posee un número de identificación único de fábrica, como se muestra en la Figura 21, lo que permite llevar un registro individual de cada uno. Con el sistema de iniciación electrónico se establece una comunicación bidireccional entre el equipo de control y el detonador.

Figura 21

Número de serie del detonador electrónico

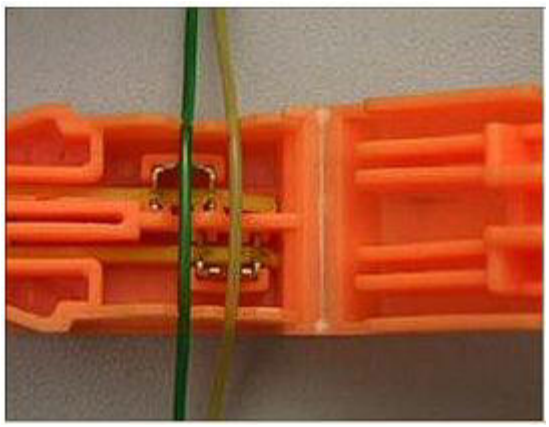


Nota. Ninaja (2022)

Para registrar o conectar un detonador, es necesario insertar los cables en las ranuras terminales del conector; cualquier cable puede colocarse en cualquier ranura, pero solo debe colocarse un cable por ranura. En la siguiente Figura 22, se muestra cómo se realiza dicha conexión.

Figura 22

Conexión de detonador electrónico

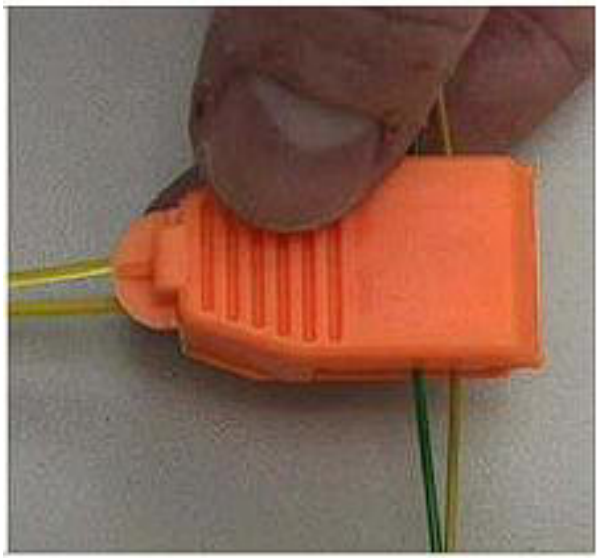


Nota. Ninaja (2022)

Una vez insertado los cables en las ranuras del conector, se procede a cerrar el conector haciendo presión. La siguiente Figura 23 muestra el correcto aseguramiento de los cables del detonador.

Figura 23

Aseguramiento de cables de detonador electrónico



Nota. Ninaja (2022)

El sistema de iniciación electrónico está compuesto por 3 elementos, equipos de uso de malla, equipo de iniciación y accesorios; se describen de la siguiente forma:

Equipos de uso de malla; se consideran aquí los equipos que tienen una interacción directa con los detonadores en la malla de manera individual o grupal. Estos equipos permiten asignar al detonador, un código o retardo, y además de verificar su estado. Los equipos usados son el, programador, máquina de disparo y llave de disparo. El programador es una unidad de etiquetado y verificación de detonadores.

Este equipo asigna al detonador una posición definida, además de su estado. La máquina de disparo es la unidad de energía que permite energizar los detonadores, además tiene la opción de interrumpir el disparo, en caso sea necesario. La llave de disparo es componente da acceso al sistema de activación del disparo, previa ingreso de usuario y clave.

Equipos de iniciación, estos equipos programan los detonadores la cual carga con un voltaje de 24V, además los condensadores, proporcionan los retardos a cada detonador, además de realizar una verificación constante de los detonadores. Los diseños de secuencia de salida son descargados en este equipo.

Accesorios, comprendidos de llaves de disparo, cable de amarre y antenas Omnidireccionales. Las llaves de disparo son dispositivo de seguridad que, a través de la lectura del circuito electrónico y una contraseña única, da inicio al proceso de disparo. El cabe de amarre, comprendida de dos vías que se usa para conectar los detonadores electrónicos entre sí, y con el equipo de iniciación. La antena Omnidireccional es un componente que se vincula con el equipo de iniciación, para potenciar la señal de comunicación entre ellos; con estos equipos nos permiten estar alejados hasta 3 kilómetros en contacto visual.

2.3.29. Burden relief

Está definido como la relación entre el tiempo entre filas de taladros y el burden efectivo. Es expresado en ms/m. En la Tabla 6, se presentan los tiempos entre fila en función al burden efectivo.

Tabla 6

Tiempos entre filas en función al burden efectivo

Burden Relief (ms/m)	Resultados
6.5	Confinamiento y alta vibración, eyecciones y rotura trasera excesiva.
8.0	Altura de pila alta cerca a la cara, eyecciones de rotura moderada.
11.5	Pila de material promedio, sobrepresión y rotura promedio.
16.5	Pila dispersa con rotura trasera mínima.

Nota. Lupérdiga, R. (s.f.)

2.3.30. Nitrato de amonio

Es una sal inorgánica cuya forma suele presentarse en cristales de color blanco y soluble en agua. Por sí sola, no es un agente explosivo, pero al tener una capacidad de descomposición rápida en ciertas condiciones, adquiere esa propiedad cuando se mezcla con una cantidad mínima de combustible, reaccionando violentamente con el nitrato de amonio (NA). El nitrato de amonio se presenta en diversas formas, pero en la fabricación de explosivos se utiliza en forma de partículas esféricas o prills porosos, ya que tienen mejores propiedades para absorber y retener combustibles líquidos. Además, son fáciles de manipular sin causar apelmazamientos o adherencias. La densidad del nitrato es de aproximadamente 1,72 g/ml. (Material Properties, s.f.)

2.3.31. ANFO

De acuerdo con López (1994), el ANFO es un agente de voladura seco, que está constituido por los componentes de nitrato de amonio poroso y diésel. Generalmente es empleado en taladros sin presencia de agua, resultando ser eficiente y un costo bajo. Un ANFO ideal, está compuesto por 94.3% de nitrato de

amonio (oxidante) y 5.7 % de diésel (combustible), obteniendo de esta forma un correcto balance de oxígeno en la detonación.

2.3.32. Emulsión

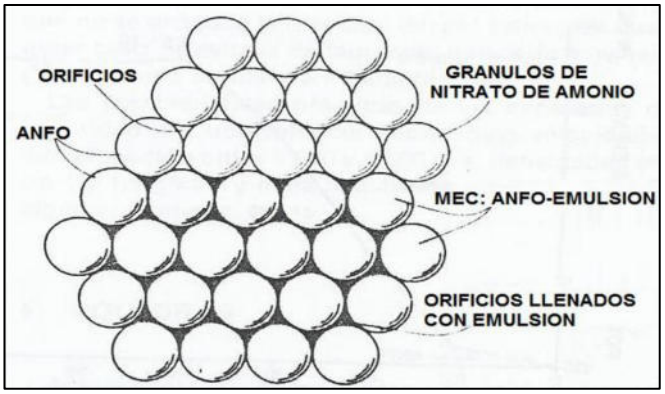
Según López (1994), indica que la emulsión es una combinación de dos líquidos que no se mezclan entre sí, conocidos como fases. Siendo la primera fase el comburente que es la solución de nitrato de amonio, quien está conformado por gotitas. Mientras que la segunda fase está constituida por diésel o agente emulsificante. Las emulsiones no son inherentemente explosivas; necesitan ser sensibilizadas para funcionar como explosivos. La emulsión base se combina con ANFO para crear el Heavy ANFO o ANFO pesado, que se utiliza en la carga de taladros como columna explosiva.

2.3.33. Heavy ANFO

Challa (2014) el Heavy ANFO, es una mezcla entre dos agentes, emulsión base con ANFO, presentando unos orificios intersticiales, que son ocupados por explosivo líquido, pudiendo ser la emulsión quien actúa como una matriz energética de acuerdo con la Figura 24.

Figura 24

Estructura Heavy ANFO



Nota. Challa (2014)

Las presentaciones de Heavy ANFO, se encuentran con relación a las necesidades de voladura y la presencia de agua, obteniendo una mejora respecto a las propiedades, tales como resistencia al agua, aumento en la sensibilidad del explosivo, además de mejorar su poder rompedor. Entre las combinaciones más frecuentes se encuentran, los siguientes: 20-80, 30-70, 40-60, 50-50, 60-40 y 65-35, los mismos que se presentan en la Figura 25.

Figura 25

Aplicación del Heavy ANFO en el carguío de taladros



Nota. Quezada (2022)

2.3.34. Tasa de excavación (DIG RATE)

Cueva (2022), El DIG RATE es comprendida entre la relación de toneladas nominales cargadas y el tiempo de carguío.

$$Tasa\ de\ excavación\ \left(\frac{t}{h}\right) = \frac{tonelajes\ nominal}{tiempo\ de\ carguio} \qquad (15)$$

Donde:

Tonelaje nominal; valor resultante de la relación de la capacidad de carga útil, respecto al factor de ajuste.

Tiempo de carguío; es el período que transcurre desde el comienzo del carguío de un camión hasta su salida o despacho.

2.3.35. RMR

Bieniawski (1972) desarrollo de formar sencilla, estimar la calidad del macizo rocoso, mediante la medición de parámetros, establecidos en el campo. Este método consta de parámetros de UCS, RQD, medición de estacionamiento y condición de discontinuidades.

2.3.36. RQD

El RQD es un índice utilizado para evaluar la calidad de la roca y es uno de los métodos más comunes para caracterizar un macizo rocoso. Este índice asigna un porcentaje que refleja la competencia de la roca, con un 100 % para rocas competentes y un 0 % para aquellas menos competentes.

2.3.37. Resistencia dinámica a la compresión y tracción

OSINERGMIN (2017), la resistencia a la compresión se refiere a la fuerza que una roca puede soportar antes de fallar por corte o cizalla. En otras palabras, es la capacidad de la roca para resistir la ruptura bajo presión. Esta resistencia está influenciada por varios factores, como la textura, el tamaño y la forma de los granos, así como la presencia de agua en el macizo rocoso. Por otro lado, cuando la velocidad de los esfuerzos es muy alta, la resistencia a la tracción provoca la ruptura. Tanto la resistencia a la tracción como la resistencia a la compresión pueden aumentar entre 5 y 13 veces las resistencias estáticas, lo que se conoce como resistencias dinámicas a la compresión y a la tracción.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Tipo y nivel de investigación

3.1.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación del presente trabajo es aplicada, debido a que se enfoca a la optimización de costo de voladura en un entorno específico y problema real, aplicando tecnología especifica. Además, esta investigación es del tipo cuantitativo, debido a que pretende medir de forma objetiva la implementación de detonadores electrónicos Daveytronic, en términos de costos, eficiencia y calidad de la voladura, mediante datos medibles y comparables.

3.1.2. Nivel de investigación

El nivel de investigación usado es de causal, ya que se busca analizar los efectos específicos que tiene la implementación de detonadores electrónicos Daveytronic, sobre el proceso de voladura en roca tipo Hornfels, en términos de costos, eficiencia y fragmentación; durante el periodo del último trimestre del 2023 y primer trimestre del 2024.

3.2. Diseño de investigación

El diseño de investigación del presente trabajo es experimental, ya que se establece una relación causal entre la implementación de los detonadores electrónicos Daveytronic y las mejoras obtenidas en el proceso de voladura en roca Hornfels. Para ello, se compararán los datos obtenidos en el último trimestre del 2023, en el que se emplearon métodos tradicionales, con los datos del primer trimestre del 2024, período en el que se aplicaron los detonadores electrónicos Daveytronic.

Este trabajo se centra en medir los efectos del uso de detonadores electrónicos Daveytronic en términos de costos unitarios, consumo de explosivo y la fragmentación de la roca Hornfels bajo condiciones controladas. De esta forma, se pretende validar la hipótesis de que su implementación optimiza significativamente el costo de proceso de voladura, contribuyendo a la eficiencia operativa y reducción de costos en la Unidad Minera Shougang Hierro Perú.

3.3. Población y muestra

3.3.1 Población

La población estudiada corresponde a los proyectos de voladura realizados en los tajos 09 y10 de la Unidad Minera Shougang.

3.3.2. Muestra

El presente trabajo de investigación se enfoca en las voladuras realizadas en la formación Hornfels en los tajos 09-10 ubicados en la Unidad minera Shougang, durante el último trimestre del 2023 y primer trimestre del 2024.

3.4. Técnicas e instrumentación para la recolección de datos

3.4.1. Técnicas para la recolección de datos

Para la variable independiente

Observación directa: Llevándose a cabo una observación directa durante las voladuras donde se apliquen los detonadores electrónicos Daveytronic; se permitió registrar el procedimiento de uso, programación de tiempos y secuenciamiento.

Revisión documentaria técnica: Se realizo un análisis de la documentación presentada por el fabricante, comprendida por manuales de operación y especificaciones técnicas.

Para la variable dependiente

Registro de datos: Se registro los datos relacionados a consumo y costos de accesorios y agentes de voladura, entre otros. También se realizó la medición del tamaño y distribución de la fragmentación, mediante tomas fotográficas y procesamiento mediante software Rocky AI.

Análisis comparativo: Se llevo un análisis comparativo de los costos directos de voladura, antes y posterior a la implementación de los detonadores electrónicos Daveytronic para la roca Hornfels, donde se realizaron análisis estadísticos con el uso de software SPSS.

3.4.2. Instrumentación para la recolección de datos

- Software de control de detonadores electrónicos (O-Pitblast).
- Rocky AI.
- SPSS 26.
- Cámara fotográfica.
- Laptop.

3.5. Validación y confiablidad de los instrumentos

Para poder analizar las muestras de los datos del costo unitario de voladura antes y posterior de implementar los detonadores electrónicos Daveytronic, se utilizó el software SPSS. Como prueba estadística se usará la prueba T-student

3.6. Métodos y técnicas para la presentación y análisis de datos

Para la presentación y análisis de datos en el presente trabajo de investigación, se utilizaron métodos cuantitativos como gráficos y tablas estadísticas para visualizar los resultados de las mediciones, tiempos de detonación, fragmentación de las rocas y consumo de explosivos y accesorios de voladuras.

Además, se aplicaron técnicas de análisis comparativo para evaluar los resultados obtenidos antes y después de implementar los detonadores electrónicos, lo que permitió verificar si se ha optimizado el costo unitario de voladura.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la presente tesis de investigación, se analizaron los resultados obtenidos en la ejecución de voladuras de proyectos con aplicación de detonadores pirotécnicos y detonadores electrónicos Daveytronic, ello en la roca Hornfels en los tajos 09 y 10 de la Unidad Minera Shougang. El estudio comprende un total de 20 proyectos de voladura ejecutados durante el período de setiembre 2023 a abril 2024, distribuidos en 10 proyectos con detonadores electrónicos Daveytronic y 10 proyectos con detonadores pirotécnicos, los mismos que se presentan de manera detallada en la Tabla 7.

La selección de estos tajos se basó en la homogeneidad de las condiciones geológicas y la presencia predominante de formaciones rocosas tipo Hornfels, lo que permitió mantener controladas las variables litológicas para el análisis comparativo. Los proyectos seleccionados cuentan con registros técnicos completos de parámetros de voladura, fragmentación resultante y factor de potencia, proporcionando una base sólida para la evaluación de la efectividad de ambos sistemas de iniciación en condiciones operativas similares. Se presenta cuadro resumen de los proyectos con el uso de detonadores pirotécnicos y detonadores electrónicos Daveytronic.

Tabla 7

Listado de proyectos evaluados

N°	TIPO	Proyecto	Mina	Fecha	Banco	Material	Diámetro de Perforación (pulg)
1	Electrónico	725-74	09D	16/03/2024	725	Hornfels	11"
2		725-73	09D	09/03/2024	725	Hornfels	11"
3		701-54	09D	27/03/2024	701	Hornfels	11"
4		701-03	09D	30/11/2023	701	Hornfels	9"
5		701-08	09D	01/12/2023	701	Hornfels	11"
6		701-02	09D	25/11/2023	701	Hornfels	12 1/4"
7		701-04	09D	05/12/2023	701	Hornfels	12 1/4"
8		677-05	09D	31/03/2024	677	Hornfels	7 7/8", 9" y 11"
9		677-11	09D	29/04/2024	677	Hornfels	7 7/8" , 9"
10		713-44	09D	21/11/2023	713	Hornfels	7 7/8", 9" y 12 1/4"
1	Pirotécnico	713-21	09D	09/10/2023	713	Hornfels	12 1/4"
2		713-07	09D	27/09/2023	713	Hornfels	12 1/4"
3		701-25	09D	09/01/2024	701	Hornfels	11"
4		713-45	09D	08/11/2023	713	Hornfels	11"
5		689-26	09D	07/03/2024	689	Hornfels	11"
6		701-38	09D	23/01/2024	701	Hornfels	11"
7		713-10	09D	26/09/2023	713	Hornfels	11"
8		701-11	09D	26/12/2023	701	Hornfels	12 1/4"
9		701-35	09D	19/01/2024	701	Hornfels	12 1/4"
10		713-39	10D	30/10/2023	713	Hornfels	11" y 12 1/4"

Nota. Elaboración propia

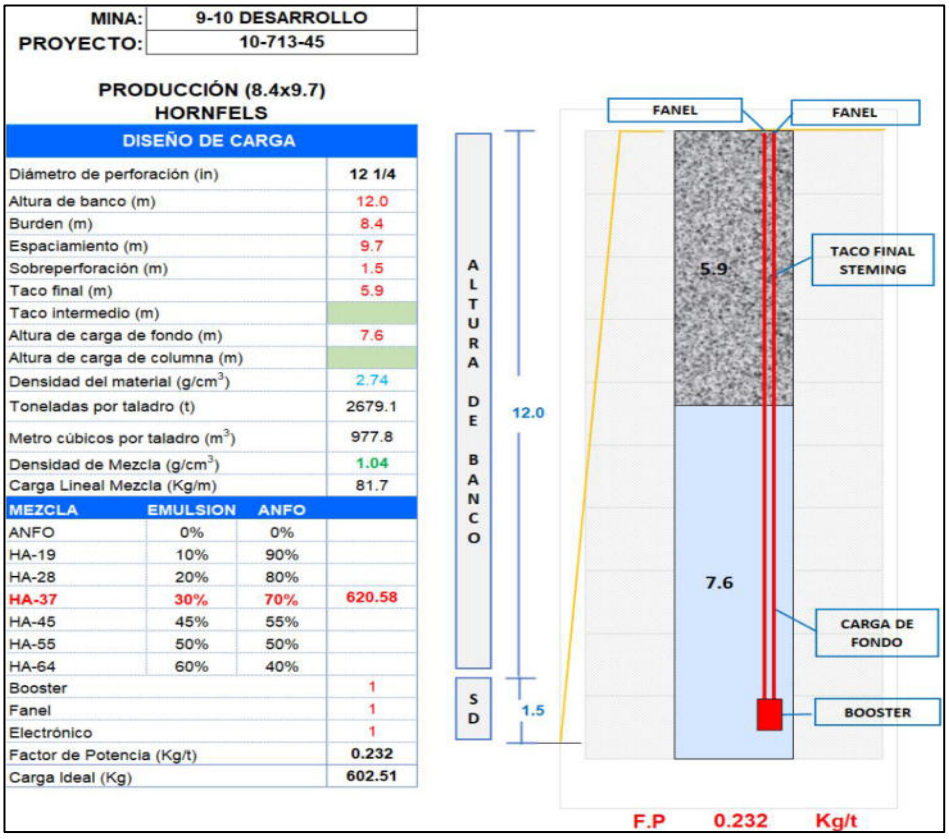
4.1. Evaluación de factor de potencia ejecutado

4.1.1. Factor de potencia de voladuras con detonadores pirotécnicos

Para el cálculo del factor de potencia, se presenta el diseño de carga estándar utilizado en las columnas de perforación para mallas con detonadores pirotécnicos. La configuración de carga para taladros de producción de diámetro de 12 ¼ in comprende: un booster ubicado en el fondo del taladro, iniciado con 2 fanel, asimismo se tiene 7.6 metros de carga lineal, utilizando la mezcla explosiva HA-37 y finalmente 5.9 metros de taco en la parte superior del taladro para confinamiento de la carga explosiva. En este diseño de carga se obtiene un factor de potencia de 0.232. En la Figura 26, podemos observar el detalle de la configuración de carga descrita.

Figura 26

Diseño de carga de columna explosiva con detonadores pirotécnicos

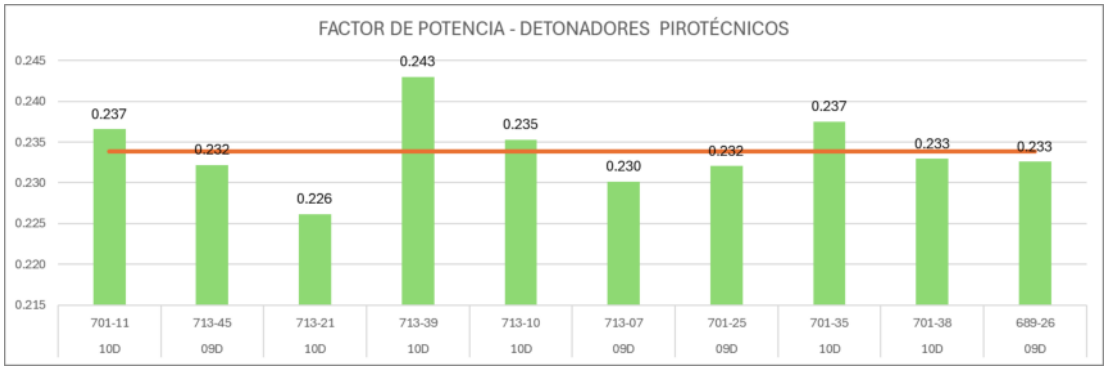


Nota. Elaboración propia

En la Figura 27, se presenta los resultados del Factor de potencia real conforme al consumo real de agentes de voladura con el uso de detonadores pirotécnicos, donde se tiene un valor mínimo 0.226 Kg/TM; un valor máximo de 0.243 Kg/TM, obteniendo así un valor promedio de los 10 proyectos de voladura pirotécnicos de 0.234 Kg/TM.

Figura 27

Grafica de factor de potencia de proyectos con uso de detonadores pirotécnicos



Nota. Elaboración -propia

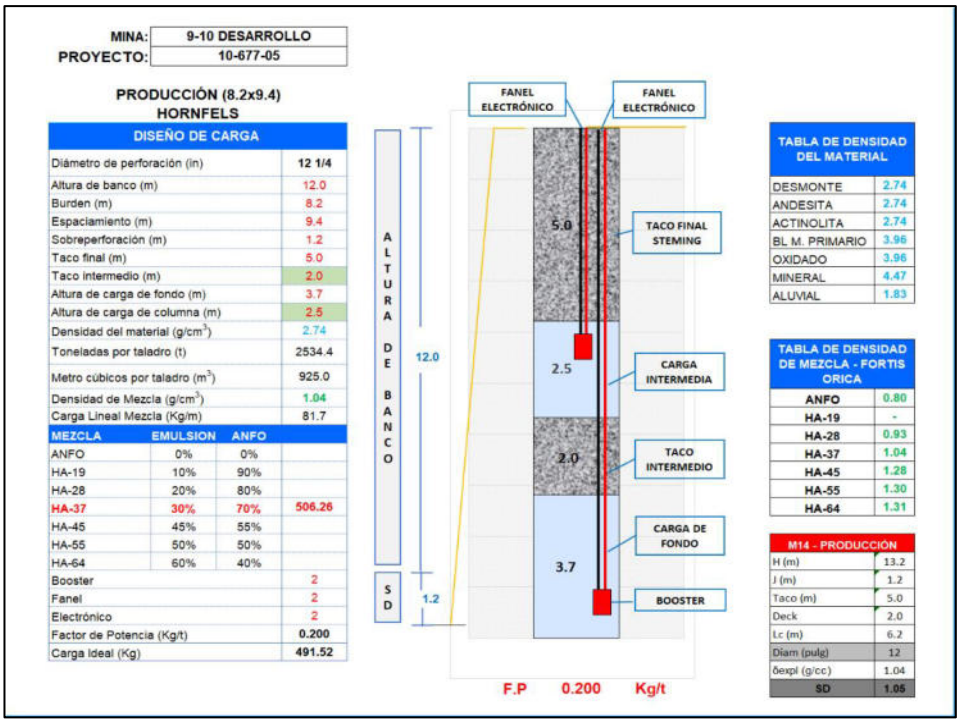
4.1.2. Factor de potencia con voladuras con detonadores Daveytronic.

Para el caso de cálculo de factor de potencia con el uso de detonadores electrónicos Daveytronic, se presenta de igual forma el diseño de carga, donde podemos notar diferencia en la reducción de carga explosiva respecto a los detonadores pirotécnicos.

En este diseño de carga para la columna perforada a disparar con detonador electrónico se tienen en total 5.0 metros de taco final con un taco intermedio de 3.0 metros. Asimismo, para columna explosiva se utilizan 6.2 metros de carga, seccionadas por el taco intermedio, en el cual tenemos como carga inferior 3.7 metros de mezcla de HA-30/70 y la carga intermedia cuenta con 2.5 metros. En la Figura 28 se presenta el diseño de carga de la columna explosiva.

Figura 28

Diseño de columna explosiva con detonadores electrónicos Daveytronic

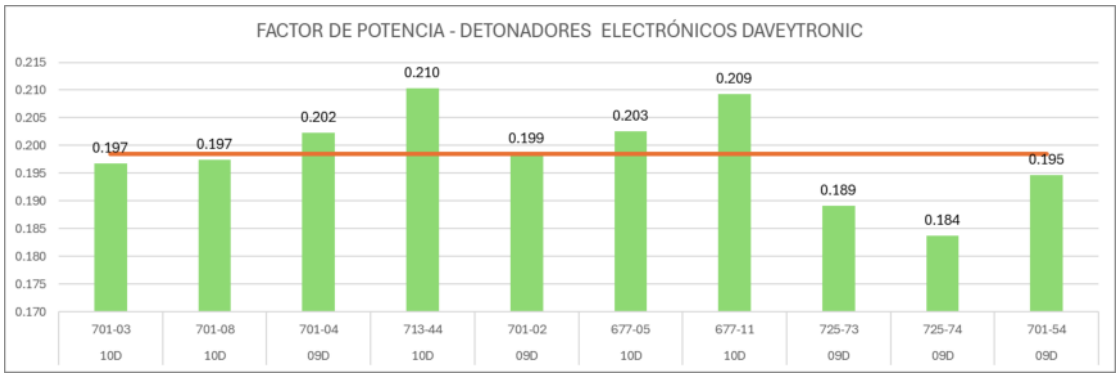


Nota. Elaboración propia

En la Figura 29, se presenta los resultados de los factores de potencias con el uso de detonadores Daveytronic, donde se tiene un valor mínimo 0.184 Kg/TM; un valor máximo de 0.210 Kg/TM, obteniendo así un valor promedio de los 10 proyectos de voladura pirotécnicos de 0.198 Kg/TM.

Figura 29

Grafica de factor de potencia de proyectos con uso de detonadores electrónicos



Nota. Elaboración propia

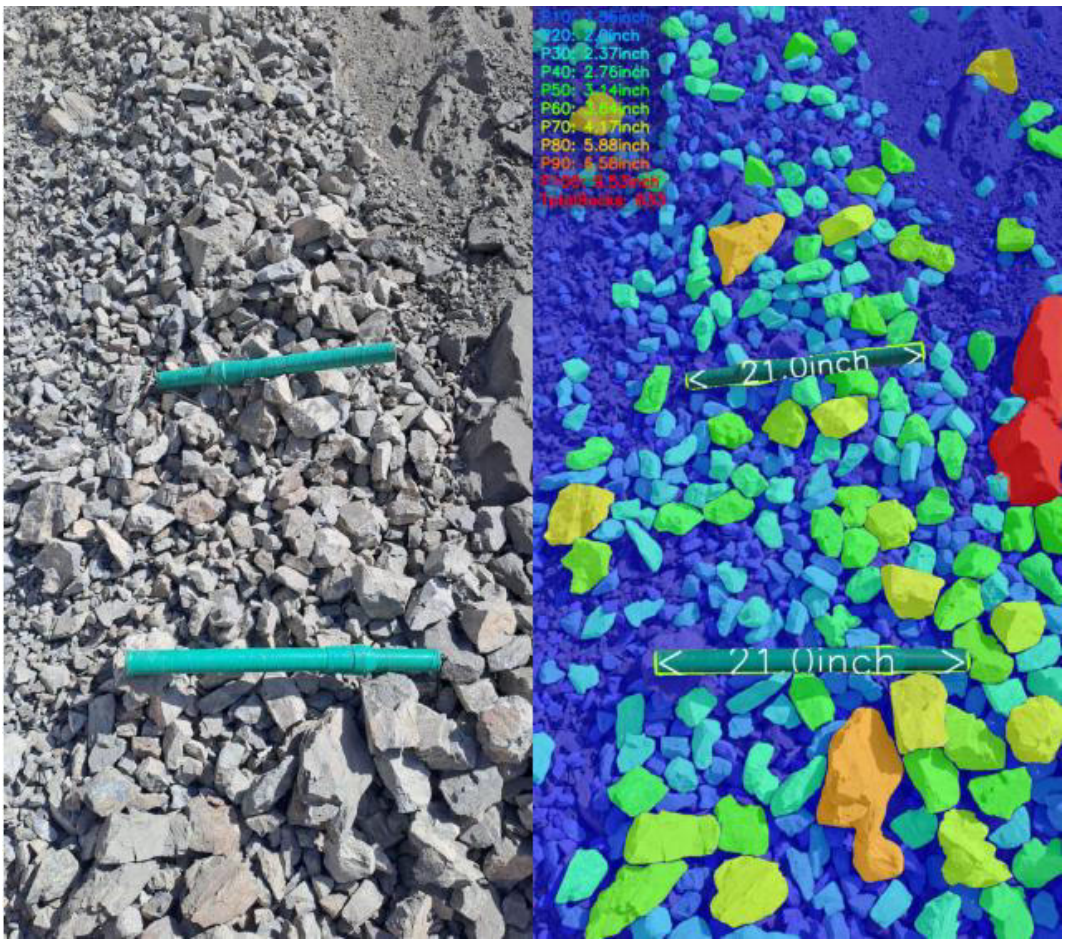
4.2. Evaluación de la fragmentación

Para la medición de la fragmentación se utilizó el software Rocky AI de Mineprism, el cual permite identificar y delimitar automáticamente los contornos de los fragmentos rocosos mediante el procesamiento de imágenes digitales del material volado mediante el uso de la inteligencia artificial. El programa requiere una referencia de escala dentro de la imagen que permite calibrar y dimensionar con precisión cada fragmento detectado, generando posteriormente una curva granulométrica que representa la distribución de tamaños del material fragmentado. Este procedimiento de análisis granulométrico se aplicó de manera sistemática tanto para el material fragmentado producto de voladuras con detonadores pirotécnicos como para aquellas ejecutadas con detonadores electrónicos Daveytronic.

En la Figura 30, se muestra el mapa de calor de las dimensiones de los fragmentos rocosos obtenidos de la voladura del proyecto 677-11 (Voladura electrónica). Esta imagen es generada por el software y nos muestra el P80 obtenido del análisis de la fotografía, lo que permite una evaluación objetiva y cuantificada de la efectividad de ambos sistemas de iniciación en términos de fragmentación.

Figura 30

Análisis granulométrico del material volado (Py. 677-11)



Nota. Elaboración propia

4.2.1. Resultados de fragmentación voladuras con detonadores pirotécnicos

En la Tabla 8 se presentan los resultados de la fragmentación obtenidos mediante el análisis granulométrico de los proyectos de voladura ejecutados con detonadores pirotécnicos, donde se determina el porcentaje promedio de material pasante para cada malla de tamizado, estableciendo la distribución de tamaños del material fragmentado, donde permite la identificación de parámetros característicos como el P80.

Tabla 8

Fragmentación resultante voladura pirotécnico

Pasante	Proyecto voladura pirotécnico									
	701-25	689-26	701-11	713-39	713-21	701-35	713-07	701-38	713-10	713-45
P10	3.817	2.198	3.108	2.921	1.156	2.148	4.302	2.464	2.995	3.303
P20	5.324	3.939	4.254	3.282	3.928	3.199	6.024	3.834	4.465	4.767
P30	6.503	4.942	5.330	4.393	5.832	4.576	7.103	4.994	5.517	6.346
P40	7.512	5.848	6.417	5.242	7.948	5.294	8.260	5.809	6.927	8.601
P50	8.755	7.093	6.757	6.435	10.778	6.520	9.337	6.533	7.722	10.127
P60	9.736	7.986	7.112	7.521	11.266	7.691	10.116	7.844	8.262	11.130
P70	10.369	9.359	8.047	7.939	12.762	8.203	10.253	8.240	9.015	11.134
P80	**11.504**	**9.803**	**9.475**	**9.055**	**13.110**	**9.478**	**12.134**	**9.794**	**9.438**	**11.662**
P90	12.172	10.025	14.317	10.624	13.110	10.520	13.103	13.074	12.192	13.735
P100	15.129	11.689	14.317	11.055	17.814	11.085	13.896	13.420	13.230	14.244

Nota. Elaboración propia

4.2.2. Fragmentación resultante de voladuras con detonadores electrónicos Daveytronic

En la Tabla 9 se presenta el análisis de fragmentación correspondiente a los proyectos de voladura ejecutados con detonadores electrónicos Daveytronic, donde se determinaron los porcentajes de material pasante para cada fracción granulométrica, donde se puede apreciar un P80 promedio de 7.9 pulgadas valor que resulta menor respecto al promedio obtenido de 9.6 pulgadas obtenidos mediante el uso de detonadores pirotécnicos, evidenciándose un mejor desempeño del sistema de iniciación electrónico en términos de fragmentación para las condiciones de roca y diseño de voladura evaluadas.

Tabla 9

Fragmentación resultante voladura electrónico

Pasante	Proyecto voladura electrónico									
	725-73	701-04	677-05	701-03	701-02	713-44	677-11	701-08	725-74	701-54
P10	2.003	0.000	1.559	1.733	0.000	0.000	0.000	2.370	2.359	0.000
P20	3.376	2.376	2.005	3.167	2.425	1.914	2.107	2.940	3.575	2.486
P30	4.248	3.027	2.368	3.987	3.166	2.489	2.901	3.465	4.505	3.204
P40	4.796	3.616	2.762	4.780	3.996	3.013	3.335	3.898	5.157	3.793
P50	5.419	4.401	3.140	5.585	4.549	3.413	3.998	4.493	6.079	4.553
P60	6.287	5.243	3.643	6.068	5.244	4.013	4.693	5.112	6.884	5.607
P70	7.225	6.376	4.173	6.640	6.044	4.832	5.434	5.836	7.538	6.672
P80	**8.228**	**6.474**	**5.883**	**7.954**	**7.712**	**5.614**	**5.823**	**7.631**	**8.243**	**8.049**
P90	9.996	8.038	6.577	9.937	7.974	6.580	6.384	8.250	8.562	10.002
P100	11.130	9.755	9.531	16.263	9.245	12.788	8.043	10.184	9.261	11.263

Nota. Elaboración propia

4.3. Evaluación de costo unitario de voladuras

Para la evaluación de costos de voladura se presenta los costos unitarios de los agentes de voladura, que se presentan en la Tabla 10, los que son usado tanto para los sistemas de iniciación electrónica, así como el sistema de iniciación pirotécnica; se tienen como agentes de voladura a la emulsión, nitrato de amonio grado Anfo, nitrato de amonio tipo Prillex 2000 y Diesel.

Tabla 10

Costos unitarios de agentes de voladura

AGENTES DE VOLADURA	UNIDAD	US$
EMULSION MATRIZ FAMESA	kg	0.874
NITRATO D/AMONIO GRAD. ANFO YU	kg	1.139
NITRATO D/AMONIO "PRILLEX 2000	kg	1.024
DIESEL	gln	3.98

Nota. Elaboración propia

Respecto a los costos unitarios de los accesorios de voladura, ya sea para iniciación electrónica o iniciación pirotécnica; se presentan en la Tabla 11. Se hace mención que el costo de un detonador electrónico Daveytronic es de US$ 21.805 y el costo promedio de un detonador unidireccional (pirotécnico) es de US$ 3.47.

Tabla 11

Costos unitarios de accesorios de voladura

ACCESORIOS DE VOLADURA	UNIDAD	US$
DETONADOR ELECTRONICO DE 20 M REFORZADO	und	21.805
CABLE DE CONEXION PARA DETONADORES ELECTRONICOS	mts	0.254
HDP-1 / BOOSTER HDP-1	und	5.169
FULMINANTE ANTIEST. 600 MILISE	und	4.034
MS- 17 / DETONADOR UNIDIRECCIONAL EXEL CONNECTADET	und	3.468
MS -25 / DETONADOR UNIDIRECCIONAL EXEL CONNECTADET	und	3.457
MS- 42 / DETONADOR UNIDIRECCIONAL EXEL CONNECTADED	und	3.496
MS- 65 / DETONADOR UNIDIRECCIONAL EXEL CONNECTADET	und	3.462
5-P / CORDON DETONANTE 5P	mts	0.289
CARMEX 2.7 / DETONADOR ENSAMBLADO	und	2.144

Nota. Elaboración propia

A continuación, se presenta en la Tabla 12 el registro detallado de los costos correspondientes a los agentes de voladura consumidos tanto en los proyectos que emplearon detonadores pirotécnicos como sistemas de iniciación electrónica. En este cuadro se incluyen los insumos utilizados para la elaboración de la mezcla explosiva.

Tabla 12

Costos total de accesorios de voladura por proyecto

Proyecto	Tipo de Voladura	Costo de Nitrato (USD)	Costo de Emulsión (USD)	Costo de Petróleo (USD)	Costo total de Agentes (USD)
701-03	ELECTRÓNICO	56,229	19,673	3,896	79,798
701-08	ELECTRÓNICO	59,331	20,751	4,110	84,192
701-04	ELECTRÓNICO	60,025	20,138	4,154	84,317
713-44	ELECTRÓNICO	40,220	14,078	2,791	57,088
701-02	ELECTRÓNICO	38,784	13,564	2,679	55,028
677-05	ELECTRÓNICO	98,231	34,364	6,774	139,368
677-11	ELECTRÓNICO	94,698	33,128	6,559	134,385
725-73	ELECTRÓNICO	18,418	6,440	1,252	26,109
725-74	ELECTRÓNICO	15,502	5,422	1,053	21,978
701-54	ELECTRÓNICO	29,899	10,040	2,047	41,986
701-11	PIROTÉCNICO	78,375	27,007	5,414	110,795
713-45	PIROTÉCNICO	47,749	16,706	2,687	67,142
713-21	PIROTÉCNICO	33,521	11,999	2,290	47,810
713-39	PIROTÉCNICO	75,448	26,398	5,215	107,062
713-10	PIROTÉCNICO	36,995	13,293	2,584	52,871
713-07	PIROTÉCNICO	49,433	17,433	3,387	70,252
701-25	PIROTÉCNICO	48,880	17,097	3,375	69,352
701-35	PIROTÉCNICO	44,877	15,470	3,081	63,427
701-38	PIROTÉCNICO	43,168	14,945	2,985	61,099
689-26	PIROTÉCNICO	58,659	20,251	3,967	82,876

Nota. Elaboración propia

En la Tabla 13 se presentan los costos en accesorios de voladura, tanto para los proyectos con sistema de iniciación electrónica, como para los proyectos con sistema de iniciación pirotécnicas, donde en los proyectos con iniciación pirotécnicas se tiene 4 tiempos de 17ms, 25ms,42ms y 65ms. A diferencia de los detonadores Daveytronic que los tiempos son programables.

Tabla 13

Costos unitarios de accesorios de voladura

Tipo de Voladura	Proyecto	Booster 1 Lb (USD)	Fanel MS (USD)	CTD 17ms (USD)	CTD 25ms (USD)	CTD 42ms (USD)	CTD 65ms (USD)	Carmex (USD)	Cordón 5P (USD)	Detonador Daveytronic (USD)	Cable de Conexión M35 (USD)	Costo total (USD)
ELECTRÓNICO	701-03	879	686	0	0	0	0	0	0	3,707	254	5,525
ELECTRÓNICO	701-08	951	742	0	0	0	0	0	0	4,012	381	6,086
ELECTRÓNICO	701-04	915	714	0	0	0	0	0	0	3,859	254	5,742
ELECTRÓNICO	713-44	910	710	0	0	0	0	0	0	3,838	254	5,711
ELECTRÓNICO	701-02	589	460	0	0	0	0	0	0	2,486	127	3,662
ELECTRÓNICO	677-05	2,698	2,106	0	0	0	0	0	0	11,382	508	16,694
ELECTRÓNICO	677-11	2,502	1,952	0	0	0	0	0	0	10,554	508	15,516
ELECTRÓNICO	725-73	1,117	871	0	0	0	0	0	0	4,710	127	6,825
ELECTRÓNICO	725-74	1,023	799	0	0	0	0	0	0	4,317	127	6,267
ELECTRÓNICO	701-54	1,189	928	0	0	0	0	0	0	5,015	254	7,386
PIROTÉCNICO	701-11	1,892	1,476	399	76	84	145	0	867	65	127	5,132
PIROTÉCNICO	713-45	527	411	180	59	63	107	4	0	0	0	1,352
PIROTÉCNICO	713-21	1,091	851	267	35	0	90	4	0	0	0	2,338
PIROTÉCNICO	713-39	941	1,468	451	86	105	138	4	0	0	0	3,194
PIROTÉCNICO	713-10	1,111	867	312	21	7	87	4	0	0	0	2,409
PIROTÉCNICO	713-07	1,452	1,134	361	31	87	59	4	0	0	0	3,128
PIROTÉCNICO	701-25	1,520	1,186	312	145	14	138	0	506	65	127	4,014
PIROTÉCNICO	701-35	1,179	920	191	225	14	121	0	520	65	127	3,361
PIROTÉCNICO	701-38	1,117	871	295	62	14	100	4	578	0	0	3,042
PIROTÉCNICO	689-26	1,447	1,130	288	114	14	104	0	477	22	127	3,722

Nota. Elaboración propia

A continuación, se presentan los costos de los agentes de voladura y el costo total de los accesorios correspondientes a cada proyecto, obteniendo así el costo total de voladura para ambos sistemas evaluados. Asimismo, en la Tabla 14 se muestran las toneladas voladas, lo que permite determinar el costo unitario por tonelada volada (US$/TM) y comparar la eficiencia económica entre el sistema pirotécnico y sistema de iniciación con detonadores Daveytronic.

Tabla 14

Costos unitarios de voladura

Proyecto	Tipo de Voladura	Costos accesorios (US$)	Costo agente (US$)	Costo total (US$)	Toneladas (TM)	Costo por tonelada (US$/TM)
701-03	ELECTRÓNICO	5,525	79,798	85,323	381,181	**0.2238**
701-08	ELECTRÓNICO	6,086	84,192	90,279	400,863	**0.2252**
701-04	ELECTRÓNICO	5,742	84,317	90,060	390,906	**0.2304**
713-44	ELECTRÓNICO	5,711	57,088	62,800	255,148	**0.2461**
701-02	ELECTRÓNICO	3,662	55,028	58,690	260,555	**0.2252**
677-05	ELECTRÓNICO	16,694	139,368	156,063	646,938	**0.2412**
677-11	ELECTRÓNICO	15,516	134,385	149,901	603,578	**0.2484**
725-73	ELECTRÓNICO	6,825	26,109	32,934	129,768	**0.2538**
725-74	ELECTRÓNICO	6,267	21,978	28,244	112,452	**0.2512**
701-54	ELECTRÓNICO	7,386	41,986	49,371	202,369	**0.2440**
701-11	PIROTÉCNICO	5,132	110,795	115,927	439,974	**0.2635**
713-45	PIROTÉCNICO	1,352	67,142	68,494	272,275	**0.2516**
713-21	PIROTÉCNICO	2,338	47,810	50,147	198,998	**0.2520**
713-39	PIROTÉCNICO	3,194	107,062	110,256	414,204	**0.2662**
713-10	PIROTÉCNICO	2,409	52,871	55,281	211,555	**0.2613**
713-07	PIROTÉCNICO	3,128	70,252	73,381	287,159	**0.2555**
701-25	PIROTÉCNICO	4,014	69,352	73,366	280,986	**0.2611**
701-35	PIROTÉCNICO	3,361	63,427	66,789	250,922	**0.2662**
701-38	PIROTÉCNICO	3,042	61,099	64,140	246,483	**0.2602**
689-26	PIROTÉCNICO	3,722	82,876	86,599	334,836	**0.2586**

Nota. Elaboración propia

4.4. Comprobación hipótesis e interpretación.

El presente análisis tuvo como finalidad determinar si el tipo de iniciador, electrónico Daveytronic o pirotécnico, ejerce una influencia significativa sobre los resultados técnicos y económicos de las voladuras en rocas tipo Hornfels evaluado.

Se analizaron tres indicadores principales:

- **Factor de Potencia (Kg/TM):** cantidad de explosivo por tonelada de roca fragmentada.
- **Fragmentación (P80):** tamaño de partícula por debajo del cual se encuentra el 80 % del material volado.
- **Costo unitario voladura (USD/TM):** costo directo asociado a la voladura por unidad de producción.

Los datos fueron evaluados mediante pruebas t de Student, pruebas de Mann-Whitney para medianas, pruebas F para comparar desviaciones estándar y análisis de intervalos de confianza al 95 %, complementados con gráficos de distribución.

4.4.1. Comprobación de hipótesis e interpretación factor de potencia

En el presente estudio de investigación se compararon los resultados obtenidos con dos tipos detonadores; electrónicos Daveytronic y pirotécnicos convencionales. El objetivo fue determinar si los detonadores influyen significativamente en la cantidad de explosivo requerido para lograr una fragmentación de la roca adecuada, donde se presentan el resumen de los factores de potencia obtenido en la Tabla 15.

Tabla 15

Resumen factor de potencia (Kg/TM)

Detonadores electrónicos Daveytronic	Detonadores pirotécnicos
0.184	0.226
0.189	0.230
0.195	0.232
0.197	0.232
0.197	0.233
0.199	0.233
0.202	0.235
0.203	0.237
0.209	0.237
0.210	0.243

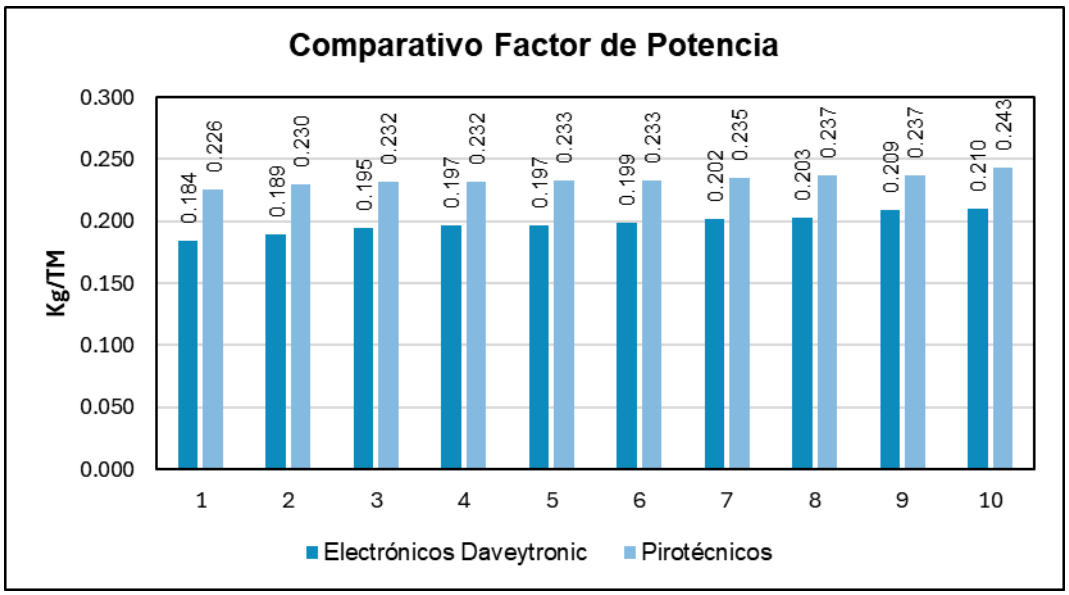
Nota. Elaboración propia

Los resultados experimentales se presentan en la Tabla 15, donde se observan valores de factor de potencia comprendidos entre 0.184 y 0.210 Kg/TM para las voladuras con detonadores electrónicos, y entre 0.226 y 0.243 Kg/TM para las voladuras con detonadores pirotécnicos.

En la Figura 31 se puede observar ya una diferencia apreciable en consumo de explosivo, donde el factor de potencia con el uso del detonador electrónico Daveytronic es menor, respecto al factor de potencia con el uso de detonadores pirotécnicos.

Figura 31

Comparación de factor de potencia electrónico Daveytronic y pirotécnico.



Nota. Elaboración propia

En la Figura 31 (gráfico de barras comparativo) se aprecia claramente que todos los valores de factores de potencia, obtenidos con detonadores electrónicos Daveytronic se sitúan por debajo de los factores de potencia obtenidos con la aplicación de detonadores pirotécnicos, confirmando una tendencia descendente consistente. Donde en la Tabla 16 se presenta el resumen estadístico.

Tabla 16

Resumen estadístico para las dos muestras de datos

Datos	***Electrónico Daveytronic***	***Pirotécnico***
Promedio	0.199	0.234
Desviación Estándar	0.0081	0.0046
Coeficiente de Variación	4.09%	1.96%
Mínimo	0.184	0.226
Máximo	0.210	0.243
Rango	0.026	0.017

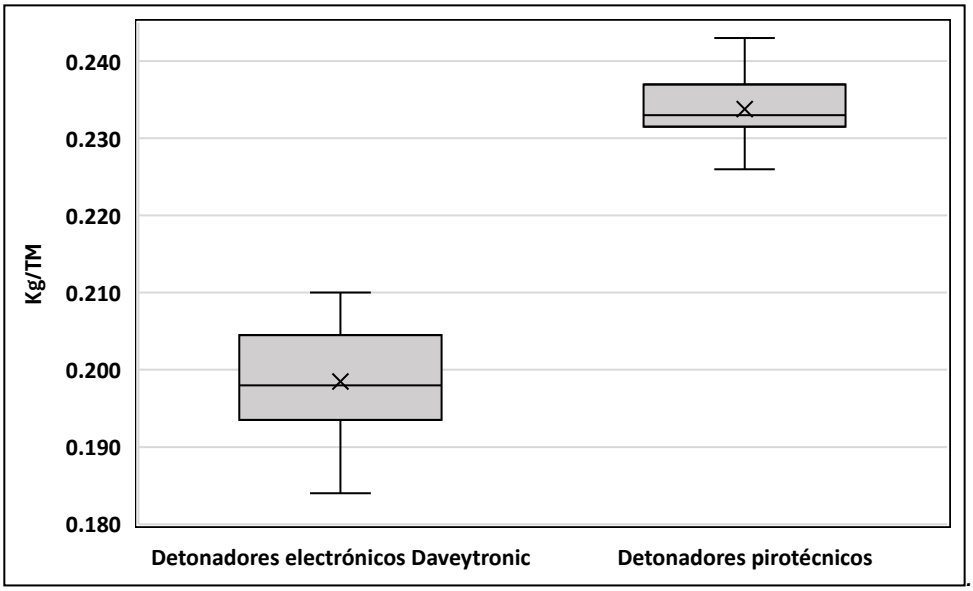
Nota. Elaboración propia

El resumen estadístico mostrado en la Tabla 16 confirma esta tendencia, donde el promedio del factor de potencia con la aplicación de detonadores electrónicos Daveytronic fue de 0.199 Kg/TM, mientras que con la aplicación de detonadores pirotécnicos alcanzó un promedio de 0.234 Kg/TM. Las desviaciones estándar fueron relativamente bajas (0.0081 y 0.0046, respectivamente), lo que indica una dispersión mínima de los datos y una ejecución controlada en ambas series de voladuras. Los coeficientes de variación (4.09 % para los detonadores electrónicos Daveytronic y 1.96 % para los detonadores pirotécnicos) reflejan estabilidad en los procesos, aunque con mayor consistencia en el grupo de los detonadores pirotécnicos, debido a la menor variabilidad del diseño de carga y limitaciones de programación.

El diagrama de caja y bigotes (Figura 32) refuerza visualmente esta diferencia: la mediana y el rango intercuartílico del grupo de detonadores electrónicos Daveytronic se encuentran desplazados hacia valores más bajos, sin superposición de intervalos.

Figura 32

Caja y bigotes para factor de potencia



Nota. Elaboración propia

Comparación de medias

Intervalos de confianza del 95.0% para la media de detonadores electrónicos Daveytronic: 0.199 +/- 0.00580426 (0.192696; 0.204304). Intervalos de confianza del 95.0% para la media de detonadores pirotécnicos: 0.2338 +/- 0.00328338 (0.230517; 0.237083). Intervalos de confianza del 95.0% intervalo de confianza para la diferencia de medias suponiendo varianzas iguales: -0.0353 +/- 0.00619328 (-0.0414933; -0.0291067).

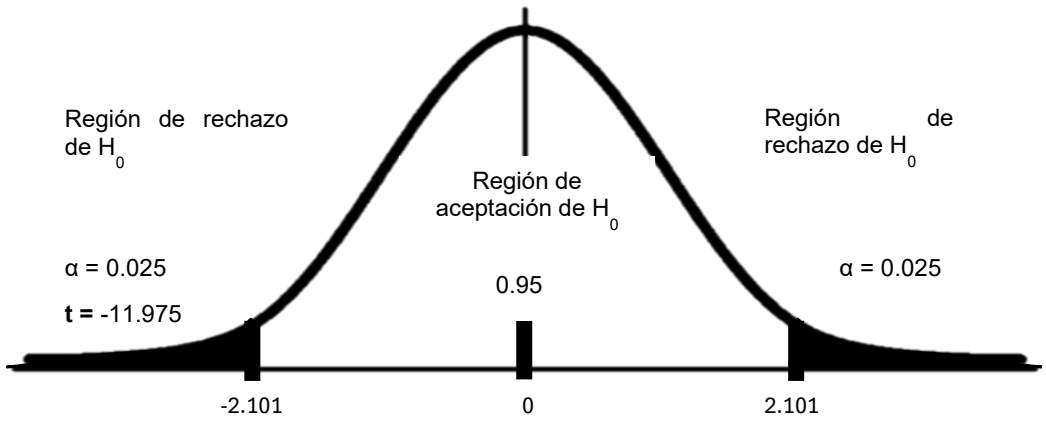
Hipótesis estadística

H_0: La media de factor de potencia (Kg/TM) de detonadores electrónicos Daveytronic es igual a la media de factor de potencia (Kg/TM) de detonadores pirotécnicos.

H_1: La media de factor de potencia (Kg/TM) de detonadores electrónicos Daveytronic es diferente a la media de factor de potencia (Kg/TM) de detonadores pirotécnicos.

Figura 33

Gráfico de aceptación o rechazo de la hipótesis (FP)



Nota. Elaboración propia

El resultado de la prueba t fue t = –11.975 con un valor p = 5.2×10^{-10}, por lo que se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa (H_1), concluyendo que el tipo de iniciador (detonadores) influye de manera significativa en el factor de potencia.

Interpretación técnica y operativa

Los detonadores electrónicos Daveytronic en rocas Hornfels presentan un consumo de explosivo 15.11% menor respecto a los detonadores pirotécnicos, donde se evidencia en un factor de potencia promedio de 0.20 kg/TM con detonadores electrónicos Daveytronic versus un factor de potencia promedio de 0.23 kg/TM con detonadores pirotécnicos. Esta mayor eficiencia se debe a que los detonadores electrónicos Daveytronic permiten programar el secuenciamiento de manera flexible sin estar limitados a retardos predefinidos, además de contar con una menor dispersión del tiempo programado (±0.005 ms) lo que proporciona un mejor control de la energía de la carga explosiva. Esta precisión temporal permite optimizar la transferencia energética hacia la fragmentación de la roca Hornfels, maximizando el aprovechamiento del explosivo mientras se reduce significativamente la generación de vibraciones y proyecciones, resultando en una voladura más eficiente y controlada.

4.4.2. Comprobación de hipótesis e interpretación fragmentación

Se realiza el análisis de los resultados obtenidos con los detonadores electrónicos Daveytronic y detonadores pirotécnicos. El objetivo fue determinar si los detonadores influyen significativamente en la fragmentación resultante de las voladuras realizadas en rocas tipo Hornfels, para ello se analizó el P80, de los proyectos de voladura.

Los resultados experimentales de la Tabla 17 evidencian valores de P80 comprendidos entre 5.614” y 8.243” para las voladuras con detonadores electrónicos Daveytronic, y entre 9.055” y 13.110” para las voladuras con detonadores pirotécnicos.

Tabla 17

Resumen de datos P80

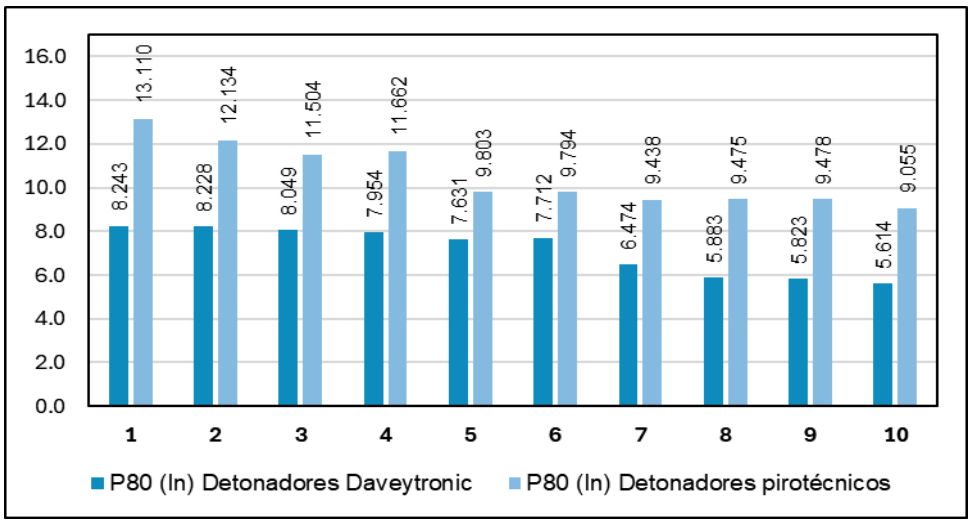
P80 (In) Detonadores Daveytronic	P80 (In) Detonadores pirotécnicos
8.243	13.110
8.228	12.134
8.049	11.504
7.954	11.662
7.631	9.803
7.712	9.794
6.474	9.438
5.883	9.475
5.823	9.478
5.614	9.055

Nota. Elaboración propia

En la Figura 34 se observa que la fragmentación obtenida (P80) con el uso de detonadores electrónicos Daveytronic presenta una tendencia hacia una mejor fragmentación y uniformidad en comparación con los resultados obtenidos de fragmentación con el uso de detonadores pirotécnicos.

Figura 34

Comparación resultado fragmentación (In)



Nota. Elaboración propia

La Tabla 18 respalda cuantitativamente esta observación anterior donde la media de fragmentación fue 7.161" con los detonadores electrónicos Daveytronic y 10.545" con los detonadores pirotécnicos. Las desviaciones estándar (1.082" y 1.418") muestran una ligera dispersión, pero ambas dentro de rangos controlados. Los coeficientes de variación (15.11% y 13.45%) indican buena estabilidad en ambos casos.

Tabla 18

Resumen estadístico para las dos muestras fragmentación

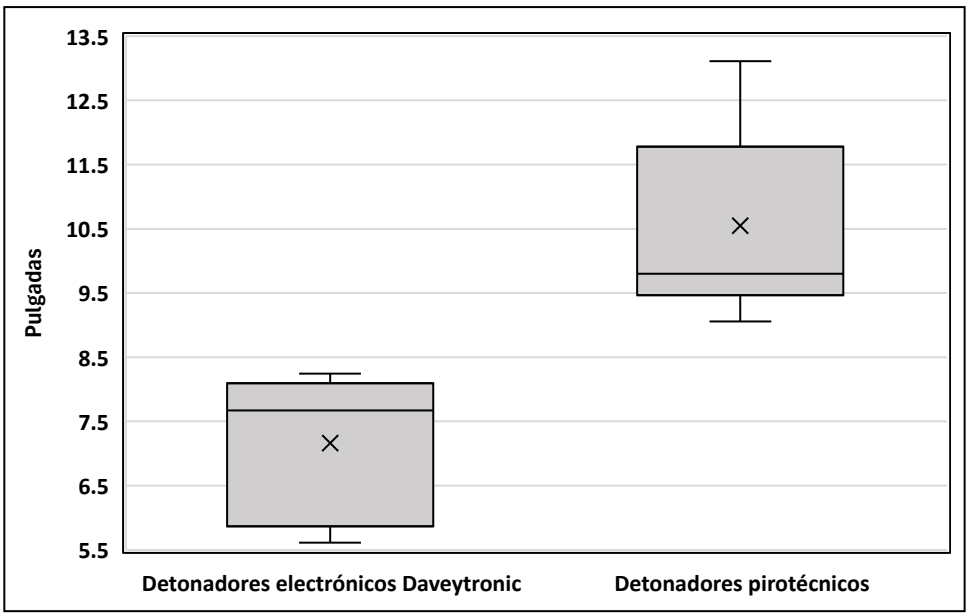
Datos	***P80 (In) Detonadores Daveytronic***	***P80 (In) Detonadores pirotécnicos***
Promedio	7.161	10.545
Desviación Estándar	1.0822	1.4187
Coeficiente de Variación	15.11%	13.45%
Mínimo	5.614	9.055
Máximo	8.243	13.110
Rango	2.629	4.055

Nota. Elaboración propia

El diagrama de caja y bigotes (Figura 35) se evidencia que la mediana y el rango intercuartílico del grupo de aplicación de detonadores electrónicos Daveytronic se encuentran desplazados hacia valores inferiores, sin solaparse con el rango del grupo de proyectos de voladura con detonadores pirotécnicos. Esto refuerza visualmente la superioridad del control de fragmentación que brindan los detonadores electrónicos Daveytronic.

Figura 35

Caja y bigotes para fragmentación



Nota. Elaboración propia

Comparación de medias

Intervalos de confianza del 95.0% para la media de detonadores electrónicos Daveytronic: 7.1611 +/- 0.774139 (6.38696; 7.93524). Intervalos de confianza del 95.0% para la media de detonadores pirotécnicos: 10.5453 +/- 1.0149 (9.5304; 11.5602). Intervalos de confianza del 95.0% intervalo de confianza para la diferencia de medias suponiendo varianzas iguales: -3.3842 +/- 1.18546 (-4.56966; -2.19874).

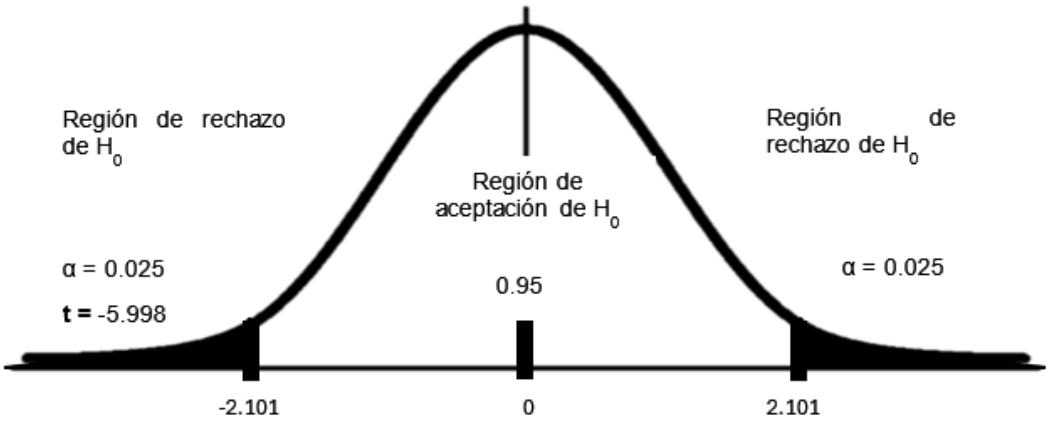
Hipótesis estadística

H_0: La media de fragmentación (P80) de los detonadores electrónicos Daveytronic es igual a la media de fragmentación (P80) de los detonadores pirotécnicos.

H_1: La media de fragmentación (P80) de los detonadores electrónicos Daveytronic es diferente a la media de fragmentación (P80) de los detonadores pirotécnicos.

Figura 36

Grafico de aceptación o rechazo hipótesis



Nota. Elaboración propia

La prueba t de Student de acuerdo a la Figura 36 arrojó un valor t = –5.998 y p = 0.0000113 (< 0.05), por lo que se rechaza H_0 y se acepta H_1, concluyendo que el tipo de iniciador influye significativamente en la fragmentación (P80).

Interpretación técnica y operativa

Con el uso de detonadores electrónicos Daveytronic se obtuvo un P80 promedio de 7.16 pulgadas, mientras que los detonadores pirotécnicos registraron un P80 promedio de 10.55 pulgadas, lo que representa una mejora del 17.5% en la fragmentación. Este mejor rendimiento de los detonadores electrónicos Daveytronic se debe principalmente a que tienen una menor dispersión de tiempo, respecto a los detonadores pirotécnicos. Además, los detonadores electrónicos Daveytronic proporcionan una secuencia de mayor precisión, así también en la

flexibilidad de secuenciamiento de salida que permite que la roca se fracture progresivamente maximizando la transferencia de energía hacia la fragmentación.

4.4.3. Comprobación de hipótesis e interpretación costos de voladura

Se compararon los resultados de costos unitarios de voladura obtenidos con la aplicación de detonadores electrónico Daveytronic, y con la aplicación de detonadores pirotécnicos. El objetivo fue determinar si la aplicación de detonadores Daveytronic influyen significativamente en el costo unitario de voladura.

Los resultados experimentales presentados en la Tabla 19 muestran valores de costo unitario de voladura comprendidos entre 0.224US$/TM y 0.254 US$/TM para las voladuras con detonadores electrónicos, y entre 0.252 US$/TM y 0.266 US$/TM para las voladuras con detonadores pirotécnicos.

Tabla 19

Resumen de costos unitario de voladura (US$/TM)

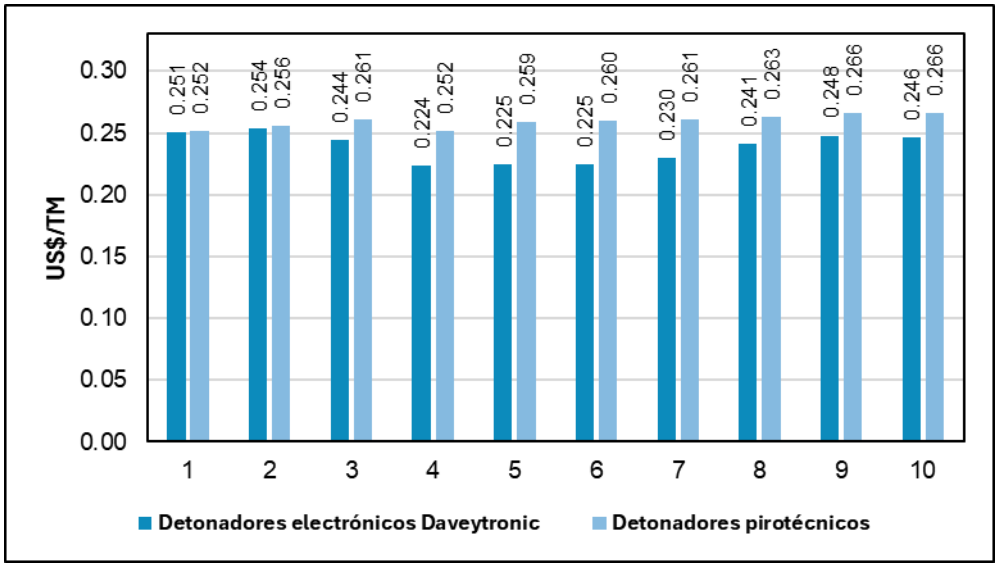
Costo (US$/TM) Detonadores electrónicos Daveytronic	Costo (US$/TM) Detonadores pirotécnicos
0.251	0.252
0.254	0.256
0.244	0.261
0.224	0.252
0.225	0.259
0.225	0.260
0.230	0.261
0.241	0.263
0.248	0.266
0.246	0.266

Nota. Elaboración propia

En la Figura 37 se confirma visualmente que todos los valores obtenidos con la aplicación de detonadores electrónicos Daveytronic se encuentran por debajo de los correspondientes a los proyectos de voladura aplicando detonadores pirotécnicos.

Figura 37

Comparación resultados costos voladura (US$/TM)



Nota. Elaboración propia

En la Tabla 20 se presenta e resumen estadístico, donde se muestra que el promedio de costos unitario de voladura para proyectos con aplicación de detonadores electrónicos Daveytronic es de 0.239 US$/TM, y para proyectos de voladura con la aplicación de detonadores pirotécnicos el costo unitario de voladura es de 0.260 US$/TM, las desviaciones estándar de 0.0117 y 0.0050, lo que refleja baja dispersión y buena consistencia en ambos casos. El coeficiente de variación es ligeramente mayor en el sistema electrónico (4.89 %), pero dentro de un rango aceptable, indicando un comportamiento estable del proceso.

Tabla 20

Resumen estadístico para las dos muestras (costos)

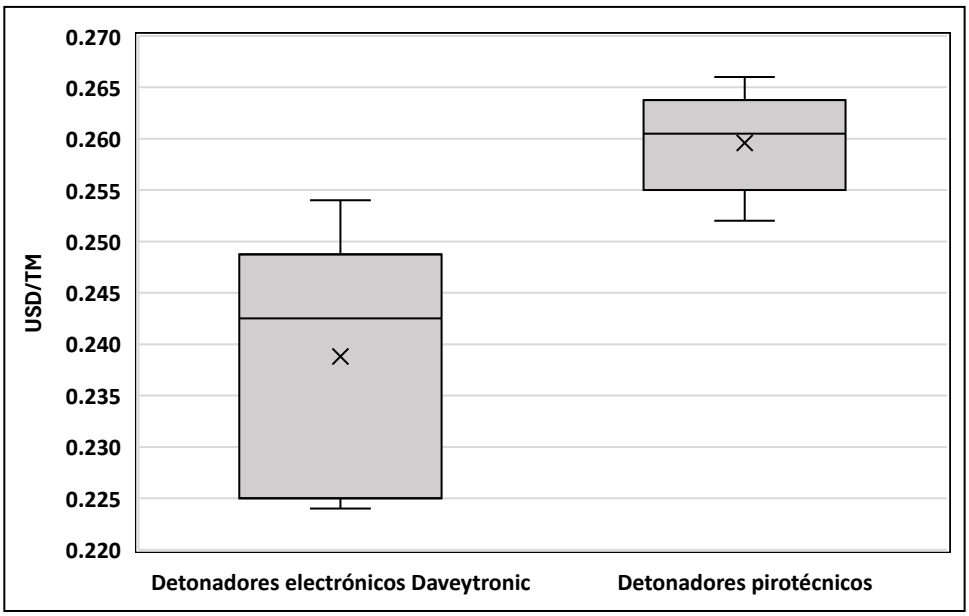
Datos	***Detonadores electrónicos Daveytronic***	***Detonadores pirotécnicos***
Promedio	0.239	0.260
Desviación Estándar	0.0117	0.0050
Coeficiente de Variación	4.89%	1.93%
Mínimo	0.224	0.252
Máximo	0.254	0.266
Rango	0.030	0.014

Nota. Elaboración propia

El diagrama de caja y bigotes presentado en la Figura 38 respalda esta diferencia, mostrando un rango intercuartílico desplazado hacia valores menores para el grupo de proyectos de voladura con aplicaciones de detonadores electrónicos Daveytronic.

Figura 38

Caja y bigotes para costos voladura



Nota. Elaboración propia

Comparación de medias

Intervalos de confianza del 95.0% para la media de detonadores electrónicos Daveytronic: 0.2388 +/- 0.00834789 (0.230452; 0.247148). Intervalos de confianza del 95.0% para la media de detonadores pirotécnicos: 0.2596 +/- 0.0035879 (0.256012; 0.263188). Intervalos de confianza del 95.0% intervalo de confianza para la diferencia de medias suponiendo varianzas iguales: -0.0208 +/- 0.00843865 (-0.0292386; -0.0123614).

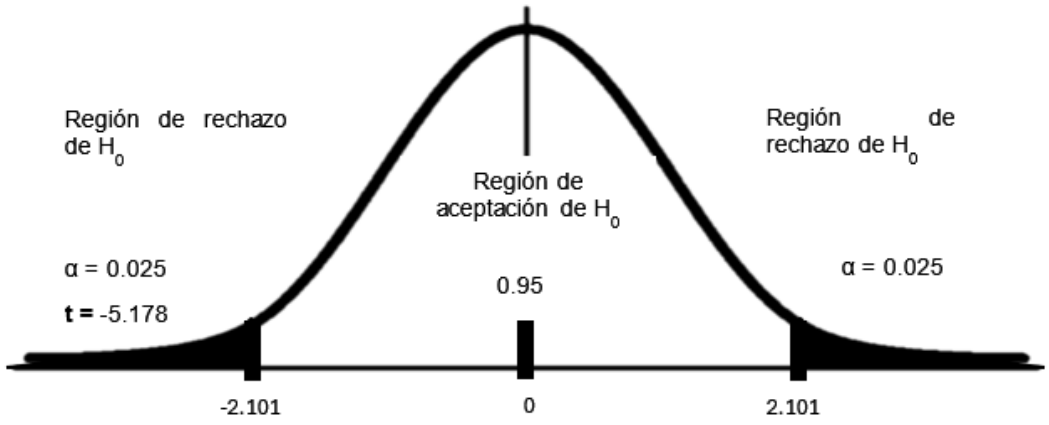
Hipótesis estadística

H_0: La media del costo unitario de voladura con aplicación de detonadores electrónicos Daveytronic (US$/TM) es igual a la media del costo unitario de voladura aplicando detonadores pirotécnicos (US$/TM).

H_1: La media del costo unitario de voladura con aplicación de detonadores electrónicos Daveytronic (US$/TM) es diferente a la media del costo unitario de voladura aplicando detonadores pirotécnicos (US$/TM).

Figura 39

Gráfico de aceptación o rechazo hipótesis.



Nota. Elaboración propia

La prueba t de Student arrojó t = –5.178 y p = 0.0000632 (< 0.05), por lo que se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta H_1, estableciendo que el tipo de detonador influye significativamente en el costo unitario de voladura.

Interpretación técnica y operativa

Los proyectos de voladura realizados con los detonadores electrónicos Daveytronic tiene un costo unitario de voladura significativamente menor respecto a los costos con la aplicación de detonadores pirotécnicos; siendo los electrónicos un promedio de 8.1% menor. Respecto a los costos de agentes de voladura los proyectos con la aplicación de detonadores Daveytronic son menores debido a que presentan un factor de potencia menor. En referencia a los costos de accesorios, los proyectos aplicando detonadores electrónicos Daveytronic son mucho más elevados, debido al costo unitario de los Daveytronic, sin embargo, estos detonadores Daveytronic mejoran el factor de potencia lo que se traduce en mayor tonelaje volado lo que representa un costo unitario total de voladura promedio de 0.238 US$/TM, y los proyectos de voladura pirotécnicas tiene un mayor costo unitario de voladura de un promedio de 0.260 US$/TM.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

La implementación de detonadores electrónicos Daveytronic en la voladura de roca tipo Hornfels permitió optimizar el costo unitario de voladura promedio de 0.260 US$/TM a 0.239 US$/TM, representando una reducción del 8% respecto al sistema de iniciación pirotécnica convencional. Esta disminución de costos se atribuye principalmente a la reducción en el consumo de agente de voladura que se logra con la tecnología electrónica. Al compararse las medias con la prueba estadística de Student, aplicada con un nivel de significancia del 5% ($\alpha = 0.05$), arrojó un valor $p = 0.000063$, por lo que se confirma una diferencia estadísticamente significativa entre ambos sistemas de iniciación. Asimismo, se rechaza la hipótesis nula y se confirmó la existencia de una diferencia estadísticamente significativa. Los resultados demuestran que la utilización de detonadores electrónicos Daveytronic contribuye efectivamente a la reducción del costo unitario total de voladura en la Mina 09-10, validando su viabilidad técnica y económica como alternativa de optimización en operaciones mineras.

La aplicación de detonadores electrónicos permitió obtener una fragmentación más controlada y homogénea, reduciendo el valor promedio del P80 de 10.55 pulgadas a 7.16 pulgadas, lo que representa una mejora del 17.4% en la granulometría del material volado, comparando el sistema de iniciación electrónica y pirotécnica. Con la realización de la prueba t de Student se obtuvo un valor t=5.998 y un valor p= 1.13 x 10 -5, por lo que se rechaza la hipótesis nula y se concluye que el tipo de detonador influye significativamente. Está optimización en la fragmentación se atribuye a las características técnicas de los detonadores Daveytronic, específicamente su alta precisión en los tiempos de retardo (±1 ms) y su capacidad de programación flexible en el secuenciamiento de voladura. Estas ventajas del detonador Daveytronic permitieron

secuenciamiento más uniformes, optimizando de esta forma el aprovechamiento energético y logrando una distribución más eficiente de la energía explosiva en el macizo rocoso.

Con el uso de detonadores electrónicos Daveytronic permitió reducir el factor de potencia promedio de 0.234 kg/TM a 0.198 kg/TM, representando una disminución del 15 % en el consumo de agentes de voladura. Esta optimización se tradujo directamente en la reducción de los costos unitarios de voladura. Así mismo la disminución del factor de potencia no comprometió la calidad de la fragmentación; por el contrario, como se demostró previamente, la granulometría mejoró simultáneamente con la reducción del P80 de 10.55 a 7.16 pulgadas. Este resultado evidencia que la tecnología de detonadores electrónicos Daveytronic permite obtener mejores resultados de fragmentación con un menor consumo de explosivos, gracias a la distribución más eficiente de la energía detonante.

CAPÍTULO VI

RECOMENDACIONES

La mejora en la fragmentación del material en los frentes de minado genera también una reducción directa en los otros costos unitarios del proceso de minado. Un menor P80 de fragmentación disminuye los tiempos de carguío, optimizando el rendimiento de los equipos de acarreo, el cual es fundamental para la mejora del servicio que brinda San Martín Contratistas Generales para Minera Shougang. Por ello, se recomienda realizar una evaluación integral del impacto del uso de detonadores electrónicos Daveytronic en las etapas posteriores del ciclo de minado, con el fin de validar y ajustar los parámetros de diseño de voladura de acuerdo con las características de cada zona y tipo de roca.

Una de las principales ventajas del sistema de detonadores electrónicos Daveytronic es la posibilidad de operar mediante el blaster remoto (DRB), que permite programar, iniciar y verificar la secuencia de disparo de los detonadores electrónicos, así como confirmar la cantidad detonadores activados. Esta característica de control contribuye significativamente a reducir los tiros cortados y a disminuir el riesgo de accidentes asociados a la activación involuntaria de columnas explosivas durante las labores de carguío de material. Por ello, se recomienda realizar un estudio de factibilidad técnica y económica orientado a la implementación total del sistema Daveytronic en las operaciones de voladura de la Mina Shougang Hierro Perú, con el fin de aprovechar los beneficios de los detonadores electrónicos en seguridad y control operacional.

Se recomienda además realizar un estudio de la configuración de las mallas de perforación en desmonte ya que al brindar el servicio de extracción de mineral/desmonte estos ahorros respecto al consumo en la voladura podría optimizar el cálculo del burden y espaciamiento más adecuado y amplio que nos permita mantener los resultados obtenidos respecto a la fragmentación.

Asimismo, se recomienda realizar pruebas de onda elemental a fin de poder sectorizar la respuesta de cada tipo de roca presente en la mina, determinando cuales serían los parámetros de acoplamiento, transferencia y efectos de timing y de esa forma se optimizaría la secuencia de iniciación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alvis, E. (2024). *Optimización de la Fragmentación de Rocas Empleando el Sistema de Voladura Electrónica Fametronic en la Unidad Minera Tacaza*. Puno. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Repositorio institucional de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/9338.

Báez, A. (2021). *Modelamiento de la Granulometría Obtenida de Operaciones de Tronadura Frente a Cambios en el Burden, el Espaciamiento y Tipo de Explosivos: Aplicación a Fases 7 y 10 en Minera Los Pelambres*. Universidad de Chile. Repositorio académico de la Universidad de Chile. https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/180438.

Bernaola, J., Gómez, J., & Herrera, J. (2013). *Perforación y Voladura de rocas en Minería*. (E.D. MADRID, Ed.) Madrid, España.

Bieniawski, Z. T., 1972, *Engineering Classification of Rock*. Jonh Wiley & Sons, New York.

Bravo, I. (2018). *Estudio de Vibraciones inducidas por Tronadura en Minera Spence.* Universidad de Chile. Repositorio académico de la Universidad de Chile. https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/168704.

Cabada, O. (2022) *Aplicación del Sistema de Iniciación Electrónico DigiShot Plus para Optimizar la Fragmentación de Rocas en el Proceso de Voladura en Una Empresa Minera de Cajamarca.* Universidad Privada del Norte. Repositorio institucional UPN. https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/32855.

Cárdenas, R. (2022). *Influencia del Sistema Taponex en la Sobreperforación en Tajo Abierto, Unidad Operativa Shougang.* Universidad Continental.

Repositorio institucional Continental. https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/12025.

Caldas, J. (1987). *Geología de los Cuadrángulos de San Juan, Acarí y Yauca*. INGEMMET, Boletín N.º 30.

Challa, D. (2014). *Alternativa de Variación de Heavy ANFO a Emulsión Gasificada para Mejorar los Costos, Parámetros Técnicos Y Medio Ambientales De Voladura en Mina Cuajone Southern Perú*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Repositorio institucional de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. https://repositorio.unsa.edu.pe/items/d33dc9e5-495c-4741-8e7d-f4e9a6ff4ff3.

Córdova, M. (2021). *Efectividad de la Iniciación Electrónica en Zona de Interacción con Equipos Autónomos Empleando el Sistema Daveytronic Evolution Pack 48, Mina Quellaveco.* Universidad Nacional de Moquegua. Repositorio institucional de la Universidad Nacional de Moquegua. https://repositorio.unam.edu.pe/items/c9663b8b-6062-4114-8eb4-3a4689358a90

Cueva, B. (2018). *Comparación de la Productividad, Fragmentación y Costos del Sistema de Iniciación Electrónica Versus Pirotécnica en Voladura Minera Yanacocha S.R.L.* Cajamarca. Universidad Privada del Norte. Repositorio institucional UPN. https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/14653.

Cuchula, J. & Huari, D. (2021). *Análisis del Uso de Cámaras de Aire para la Reducción de Costos en Voladura en una Mina a Tajo Abierto.* Universidad Continental. Repositorio institucional Continental. https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/10531.

Dimas, P. (2015). *Diseño de Tronaduras y su Impacto en el Costo Mina de Compañía Minera Cerro Negro*. Universidad de Chile. Repositorio académico de la Universidad de Chile. https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/137507.

ENAEX (2010). *Manual de Tronadura 2da edición*. ENAEX S.A., Chile.

EXSA S.A. (2009). *Manual Práctico de Voladura*. 3ra edición. EXSA SA, Chile.

Espeche, M. (2022). *Reducción de Costos Operativos en Mina Farallón Negro – Optimizando Estándares de Perforación & Voladura en Desarrollo - Preparación".* Universidad Nacional de Catamarca. Repositorio institucional de la Universidad Nacional de Catamarca. *https://riaa-tecno.unca.edu.ar/handle/123456789/817.*

FAMESA (2019). *Manual de Perforación y Voladura*. Grupo Editorial Cosas. Lima, Perú.

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*. Universidad Nacional de Moquegua. Repositorio institucional de la Universidad Nacional de Moquegua. https://repositorio.unam.edu.pe/items/758f754a-d619-486a-8b49-5d3f6b3fd17f.

Flores, J. (2022). *Emulsificación Gasificada para Mejorar la Fragmentación Rocosa en la Mina 11 en la Empresa Minera Shougang Hierro Perú S.A.A.* Perú. Universidad Nacional San Luis Gonzaga de Ica. Repositorio institucional de la Universidad Nacional San Luis Gonzaga de Ica. https://repositorio.unica.edu.pe/items/e9fd442d-1d3a-47d9-92ea-db713cfceb47.

Herrera, A. (2021). *Influencia de la Carga Operante en Taladros Largos en la Reducción de Vibraciones en la Compañía Minera Alpayana S.A.* Universidad Nacional de Centro del Perú. Repositorio institucional de la Universidad Nacional de Centro del Perú. https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/7755.

Huerta, G. (2020). *Análisis Comparativo de la Eficiencia de la Triple Iniciación Electrónica en Voladura Versus la Iniciación Electrónica Simple y Doble en la Explotación de un Yacimiento Cuprífero a Cielo Abierto*. Universidad Continental. Repositorio institucional Continental. https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/5488.

Huamán, E. (2021). *Optimización de los Procesos Downstream Mediante la Modificación de la Malla, el Incremento del Factor de Potencia y el Uso de Detonadores Electrónicos en la Empresa Minera Golden SAC*. Universidad Privada del Norte. Repositorio institucional UPN. https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/30486.

Jesús, L. (2022). *Detonadores Electrónicos para Mejorar la Fragmentación de la Roca en Minería a Cielo Abierto*. Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Repositorio institucional de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. https://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/5408.

Konya, C., & Albarrán, E. (1998). *Diseño De Voladuras*. Ediciones Cuicatl. México.

López Jimeno, C., & López Jimeno, E. (1994). *Manual de Perforación y Voladura de Rocas*. (I.G. España, Ed.) Madrid, España.

Lozano, C. (2021). *Evaluación del Sistema de Iniciación Pirotécnica y Electrónica en el Banco 3240 para la Optimización de Costos por Voladura en una*

Empresa Minera a Tajo Abierto en Cajamarca, 2021. Universidad Privada del Norte. Repositorio Institucional UPN. https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/30501.

Lupérdiga, L. (s.f.). *Reporte Técnico Preliminar: Determinación del Burden de Alivio Unidad La Arena*. Scribd. https://es.scribd.com/document/443653774/Burden-de-Alivio.

Mamani, Y. (2023). *Evaluación Geomecánica del Macizo Rocoso de la Mina 9-10 de Shougang Hierro Perú*. Universidad Nacional del Altiplano. Repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano. https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/19537.

Márquez, L. (2024). *Reducción de Fragmentación (P80) en la Zona Fase 4 con la Aplicación de Gravilla de 2 Pulgadas en la Unidad Minera Toquepala*. Universidad Católica de Santa María. Repositorio institucional de la Universidad Católica de Santa María. https://repositorio.ucsm.edu.pe/items/00ec0ffb-feb4-4544-b897-b972ed6a820f.

Material Properties (s.f.). *Nitrato de amonio*. Material Properties. Recuperado el 13 de diciembre de 2024 de https://material-properties.org/es/nitrato-de-amonio/?form=MG0AV3.

McKenzie, C. (1994). *Estado del Arte de la Tronadura*. Santiago, Chile.

Mendoza, F. (2024). *Análisis de Fragmentación y vibración en la Voladura del Tajo San Gerardo de la Minera Atacocha*. Universidad Nacional de Centro del Perú. Repositorio institucional de la Universidad Nacional de Centro del Perú. https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/11343.

Melendres, J. (2024). *Implementación de la Voladura Controlada para Reducir la Sobrerotura en Labores Subterráneas en Unidad Minera Cerro Lindo*. Universidad Nacional de Centro del Perú. Repositorio institucional de la Universidad Nacional de Centro del Perú. https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/11130.

Ninaja, E. (2022). *Implementación de Detonadores Electrónicos en la Voladura para Optimizar los Costos Unitarios en las Operaciones de Mina Toquepala*. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Repositorio institucional de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. https://repositorio.unjbg.edu.pe/items/799936bf-4c43-4aa3-834a-2a900feb03a8.

Orica. (2018). *Técnicas y Tecnologías de Voladura*. Lima.

OSINERGMIN (2017). *Guía de Criterios Geomecánicas para Diseño, Construcción, Supervisión y Cierre de Labores Subterráneas*. Minería y Geología. Perú.

Pacahuala, M. (2015) *Reducción de Costos Operativos en Desarrollos Mediante Actualización de Estándares en Perforación y Voladura, Caso de la Empresa Especializada Mincotrall S.R.L.* Universidad Nacional de Centro del Perú. Repositorio institucional de la Universidad Nacional de Centro del Perú. https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/2179.

Paredes, R. (2014). *Empleo de Detonadores Electrónicos para Optimizar la Fragmentación en Sector Yeso Anhidrita en Mina Modelo a Tajo Abierto – Toquepala*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Repositorio institucional de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. https://repositorio.unsa.edu.pe/items/85f2e892-ef8d-4d76-8e13-8087d1f94084.

Polo, L. (2020). *Implementación de un Nuevo Diseño de Sección de Labor para la Reducción de Costos en las Operaciones de la Unidad Minera Cerro Lindo – Nexa Resources S.A.A.* Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. Repositorio institucional de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/1881.

Quispe, (2023). *Influencia de la Implementación de Detonadores Electrónicos en el Proceso de Voladura en la Unidad Minera Cerro Corona-Cajamarca.* Universidad Nacional Micaela Bastidas De Apurímac. Repositorio institucional de la Universidad Nacional Micaela Bastidas De Apurímac. https://repositorio.unamba.edu.pe/handle/UNAMBA/1309.

Rafaelo, H. (2024). *Relación de la Fragmentación del Mineral con los Procesos Unitarios de la Explotación, al Usar Emulsiones Gasificantes San – G, en la Compañía Minera Aurífera Santa Rosa – Comarsa*. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. Repositorio institucional de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/4329.

Segura, J. (2024). *Aplicación del HA55G para Reducción de Costos de Voladura en la Fase 008 de la Compañía Minera Summa Gold Corporation.* Universidad Nacional de Trujillo. Repositorio institucional de la Universidad Nacional de Trujillo. https://dspace.unitru.edu.pe/items/62e8af4b-dda0-4e66-abe5-46064674f82e

ANEXOS

Tabla 21

Matriz de consistencia

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES
1. Interrogante general	1. Objetivo general	1. Hipótesis general	1. Variable independiente	1. Variable independiente	1. Variable Independiente
¿Cómo puede la aplicación de detonadores electrónicos tipo Daveytronic optimizar el costo unitario de voladura para roca tipo Hornfels en los tajos 09-10 de la Unidad Minera Shougang Hierro Perú?	Optimizar el costo unitario de voladura para roca tipo Hornfels en los tajos 09-10 de la Unidad Minera Shougang Hierro Perú, mediante la aplicación de detonadores electrónicos Daveytronic.	La aplicación de detonadores electrónicos Daveytronic en los tajos 09-10 de la Unidad Minera Shougang Hierro Perú para roca tipo Hornfels, optimiza el costo unitario de voladura.	• Aplicación de detonadores electrónicos Daveytronic.	• Número de detonadores usados. • Número de accesorios usados. • Material roto.	• US$/proyecto • TM/proyecto
2. Interrogantes específicas	2. Objetivos específicos	2. Hipótesis específicas	2. Variable dependiente	2. Variable dependiente	2. Variable dependiente
• ¿Qué impacto tiene el uso de detonadores electrónicos Daveytronic en la fragmentación del material volado para roca tipo Hornfels en los tajos 09-10 de la Unidad Minera Shougang Hierro Perú? • ¿De qué manera contribuyen los detonadores electrónicos a la reducción del consumo de explosivo por tonelada de material roto para roca tipo Hornfels en los tajos 09-10 de la Unidad Minera Shougang Hierro Perú?	• Identificar cómo los detonadores electrónicos Daveytronic afectan la fragmentación del material volado para roca tipo Hornfels en los tajos 09-10 de la Unidad Minera Shougang Hierro Perú. • Determinar el impacto económico de la aplicación de detonadores electrónicos Daveytronic en la reducción del consumo de explosivo por tonelada de material roto, para roca tipo Hornfels en los tajos 09-10 de la Unidad Minera Shougang Hierro Perú.	• La integración de detonadores electrónicos en el proceso de voladura contribuye a una mejor fragmentación del material volado para roca tipo Hornfels en los tajos 09-10 de la Unidad Minera Shougang Hierro Perú. • La integración de detonadores electrónicos en el proceso de voladura contribuye a una reducción del consumo de explosivo por tonelada de material roto para roca tipo Hornfels en los tajos 09-10 de la Unidad Minera Shougang Hierro Perú.	• Optimización de costos unitarios de la voladura en los tajos 09-10 de la Unidad Minera Shougang Hierro Perú para roca tipo Hornfels.	• Costo unitario de voladura. • Fragmentación. • Factor de potencia.	• US$/TM • P80 • Kg/TM

Nota. Elaboración propia

Tabla 22

Operacionalización de variables

Tipo de variable	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores	Herramientas
Independiente Aplicación de detonadores electrónicos Daveytronic.	Implementación y empleo de detonadores electrónicos Daveytronic, diseñados para mejorar el control de detonación en el proceso de voladura.	Número de detonadores usados. Número de accesorios usados. Material roto.	US$/Proyecto TM/Proyecto	Registro de uso. Manuales técnicos. Software de gestión de detonaciones.
Dependiente Optimización de costos unitarios de la voladura en los tajos 09-10 de la Unidad Minera Shougang Hierro Perú para roca tipo Hornfels.	Medida de la eficacia de las voladuras y los costos unitarios asociados.	Costo unitario de voladura. Fragmentación. Factor de potencia.	US$/TM P-80 Kg/TM	Análisis de fragmentación. Informes y reportes de voladura. Software de costos y análisis de datos.

Nota. Elaboración propia

ANEXO 1 – FICHA TECNICA

DaveyTronic® SP

Davey Bickford Enaex

Minería a Cielo Abierto
Sistema de Voladura Digital / Detonadores Electrónicos

PRODUCTIVIDAD

- La valta **precisión** y **confiabilidad** del detonador **DaveyTronic® SP** mejora significativamente el **desempeño de la voladura**:
  - Uniformidad del material y fragmentación
  - Control de la pila (rata de excavación y dilución)
  - Disminución de vibraciones
  - Reproducibilidad de los resultados obtenidos
- Los modos de **Synchroblast™** et **Multiblast** permiten realizar **voladuras más grandes** reduciendo el tiempo de inactividad entre detonaciones.

  Así, desde una ubicación central, puede controlar de forma remota una red de varios controladores de explosión ubicados en diferentes áreas de la mina para disparar varias voladuras simultáneamente.
  - Synchroblast™: hasta 4500 detonadores en un solo evento
  - Multiblast: hasta 5 eventos en diferentes ubicaciones de 1500 detonadores cada uno

SEGURIDAD

DaveyTronic® está diseñado para una seguridad completa durante todo el proceso 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® SP presenta 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 el número único de seguimiento ID de cada detonador completan las funciones de seguridad.

DESCRIPCIÓN

El Sistema digital de voladura **DaveyTronic® SP** 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
- 2 unidades de programación (PU), identificando y 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 mediante el cual recibe las instrucciones, y proporciona energía para disparar hasta 1.500 detonadores por cada DBD

Commercial & technical data sheets - DaveyTronic range - V1.2.0

Los productos descritos en este documento son potencialmente peligrosos y deben usarse de acuerdo con las normas de salud y seguridad aplicables, las leyes federales y estatales, las normas y otras disposiciones legales o reglamentarias. Davey Bickford no puede anticipar todas las posibles aplicaciones, ni las condiciones bajo las cuales esta información y sus productos pueden ser utilizados, es responsabilidad de cada usuario verificar la información en el contexto específico de la aplicación deseada. Davey Bickford rechaza expresamente a todas las garantías, expresas o implícitas, y no será responsable de ningún daño o responsabilidad por el uso resultante en función de la información contenida en este documento.

DaveyTronic® SP

Davey Bickford Enaex

Minería a Cielo Abierto
Sistema de voladura digital



1 - Blaster remoto (DRB2)
2 - Blast driver (DBD)
3 - Unidad de Programación (PU)
4 - Tarjeta RFID
5 - Antenas
6 - Conector Múltiple
7 - Cargador de 12V
8 - Caja trasporte impermeable

CARACTERISTICAS OPERACIONALES	
Detonadores	Solo puede ser utilizado con detonadores DaveyTronic® SP
Modo Monoblast	Hasta 1.500 detonadores
Modo Multiblast	Máximo 5 DBD enlazados de un mismo DRB2 (opción de DBD adicional disponible)
Modo Synchroblast	Hasta 4.500 detonadores en un solo fuego
Programación	Se pueden asociar un máximo de 6 PU a cada DBD
Modo de Conexión	4 modos: Uno a Uno - Fácil Uno a Uno – En Línea - Fácil en Línea
Modo de Programación	3 modos: Manual - Incremental - Automático (diseño en computador)
Conexión de DBD a DRB2	Línea de disparo o Modem Externo o Radio Modem Interno
Accesorios / Cables	El sistema de voladura DaveyTronic® SP solo podrá ser usado con cable y accesorios autorizados

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 92 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 92 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	/	/
Segunda Opción de Seguridad	Opcional	/	/
GPS	Modulo Opcional	/	/
Actualización del Firmware	A través del puerto USB		
Tipo de Batería	Tecnología Li-Ion		
Autonomía	4 h - Nivel de indicador	4 h de stand-by + 1 h en COM	8 h - Nivel de indicador
Cargador	Entrada: 100-240V AC - 50/60 Hz, 2,0 A - Salida: 10-12V DC - Corriente nominal: 4A máx. Tiempo de carga: 4 horas hasta 4 equipos		
Clasificación de Protección de Ingreso	IP 65	IP 67	IP 66
Pantalla	5,7" TFT Color QVGA con retroiluminación	Indicador LED de 4 estados	3,5" FSTN B&W con retroiluminación
Teclado	14 teclas iluminadas	/	18 teclas iluminadas
Altavoz Integrado	Instrucciones vocal / beeps	/	Beeps
Puertos de Comunicación	RS232 / RS 485 - USB - RFID - ETHERNET		USB - RFID - ETHERNET
Capacidad	1 500 detonadores		1 000 detonadores
Rango Inalámbrico	Hasta 3000 metros, ampliables con repetidores (opcional DBD u otros modem)		
Rango de Frecuencia	868 MHz o 923 MHz (excluyendo Europa) 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 de Transporte Impermeable	1 DRB2 + 1 DBD + 2 PU : Pélican 1520 naranja - Cartón: 50 x 40 x 25 cm / 19,7" x 15,7" x 9,8" - 13 kg / 29 lbs 6 PU o 1 DRB2 + 3 DBD : Pélican 1600 naranja - Cartón: 65 x 52 x 25 cm / 25,6" x 20,5" x 9,8" - 17 kg / 37 lbs		
Certificados	Cumple con los estándares europeos CEN TS/13763-26 & 27 Cumple con los estándares sudafricanos SANS 1717-1 y ARP Marca CE 1717-1 - Certificado FCC - IC - C-Tick Clasificación de transporte UN 3481, Cl9, Gr2		

* PU también disponible en Ruso / Finlandés / Sueco / Turco
** La compatibilidad del módem externo debe ser verificada por el soporte técnico de Davey Bickford

Los productos descritos en este documento son potencialmente peligrosos y deben usarse de acuerdo con las normas de salud y seguridad aplicables, las leyes federales y estatales, las normas y otras disposiciones legales o reglamentarias. Davey Bickford no puede anticipar todas las posibles aplicaciones, ni las condiciones bajo las cuales esta información y sus productos pueden ser utilizados, es responsabilidad de cada usuario verificar la información en el contexto específico de la aplicación deseada. Davey Bickford rechaza expresamente a todas las garantías, expresas o implícitas, y no será responsable de ningún daño o responsabilidad por el uso resultante en relación de la información contenida en este documento.

DaveyTronic® SP

Davey Bickford Eraex

Minería a Cielo Abierto
Detonador Eletrónico



Retardo electrónico integrado



Conector de bus duplex

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	
Carga Base	PETN 800mg (Fuerza 48)
Carga de Iniciación	Explosivo primario 200 mg
Material de la Cápsula	Aluminio o aleación de Cobre (para entornos de trabajo pesado)
Cables	Cable STD: Ø = 0,3mm acero - Polietileno naranja Cable HD: Ø = 0,5mm acero - Polipropileno Rojo Cable Doblado: Ø = 0,5mm acero - Polietileno Rosado Cable XD: Ø = 0,5mm acero - Polipropileno rojo con revestimiento PVC azul
Conector	Polipropileno - Gel impermeable de silicona - Compatible con hidrocarburos
Resistencia a Radio Frecuencia	Cumple con la norma EN13763-27 - Hasta 30 V/m para 80 MHz a 2 GHz ancho de banda
Resistencia ESD	Cumple con la norma EN 13763-13 (clase I) 30kV / 3500pF

FUNCIONAMIENTO	
Rango de Retardos	Desde 0 a 14 000 ms – con incrementos de 1 ms
Sistema de Voladura	A utilizar exclusivamente con el sistema DaveyTronic®
Comunicación	Comunicación bidireccional, no polarizada, concepto de doble condensador, autodiagnóstico
Accesorios / Cable	A utilizar exclusivamente con cables y accesorios autorizados Davey Bickford
Hermeticidad de Agua	Certificado 13 bares por 7 días (en carrete) / 4 bares por 7 días (doblado)
Resistencia al Shock Dinámico	>1 000 bares - 15 000 PSI (cápsula Al) / >1 400 bares - 20 000 PSI (cápsula Cu)
Resistencia a la Tracción	Cable STD: 328 N - 74 lbs / Cable HD: 391 N - 88 lbs / Cable doblado: 168 N - 38 lbs / Cable XD: 478N - 107 lbs
Resistencia a la Abrasión	Sobrepasa la norma EN 13763-4 (clase II)
Temperatura de Operación	-20°C a +45°C / -4°F a +113°F (testeado a 70°C - 158°F en emulsiones calientes)
Temperatura de Almacenamiento	-40°C a +70°C / -40°F a +158°F
Vida útil	2 años
Certificados	Cumple con Estándar Europeo CEN TS/ 13763-26-27 y con Directiva de Explosivos 2014/28/UE Certificado por INERIS: EC Certificado de Inspección de Tipo: 0080.EXP.98.0013 Cumple con Directiva Europea REACH 1907/2006/EC Certificación de Transporte y Embalaje UN 0456 - 1.4S

			Cápsula Aluminio		Cápsula Cobre	
			Cable STD/doblado	Cable HD	Cable STD/doblado	Cable HD
Color de etiqueta	Longitud (m/ft)	Unidades / Caja	Peso bruto (kg/lbs)	Peso bruto (kg/lbs)	Peso bruto (kg/lbs)	Peso bruto (kg/lbs)
	4 / 13 (doblado)	144	11,5 / 25,4	-	12,5 / 27,6	-
	6 / 20 (doblado)	112	11,5 / 25,4	-	12,0 / 26,5	-
	8 / 26 (doblado)	96	11,0 / 24,3	-	11,5 / 25,4	-
	10 / 33	80	7,0 / 15,4	8,0 / 17,6	7,0 / 15,4	8,5 / 18,7
	15 / 49	72	8,0 / 17,6	10,0 / 22,0	8,5 / 18,7	10,0 / 22,0
	20 / 66	72	9,5 / 20,9	12,0 / 26,5	10,0 / 22,0	12,5 / 27,6
	25 / 82	72	11,0 / 24,3	14,0 / 30,9	11,5 / 25,4	14,5 / 32,0
	30 / 98	64	11,5 / 25,4	14,5 / 32,0	11,5 / 25,4	15,0 / 33,1
	35 / 115	56	11,5 / 25,4	14,5 / 32,0	11,5 / 25,4	15,0 / 33,1
	40 / 131	56	12,5 / 27,6	16,0 / 35,3	12,5 / 27,6	16,0 / 35,3
	50 / 164	36	10,0 / 22,0	13,5 / 29,8	10,5 / 23,1	13,5 / 29,8
	60 / 197	36	11,5 / 25,4	15,5 / 34,2	12,0 / 26,5	15,5 / 34,2
Empaque			En carrete, caja de cartón: 445 x 230 x 300 mm (0,031 m³) / 17,5" x 9,1" x 11,8" (1879 in³) Doblado, caja de cartón: 430 x 400 x 320 mm (0,055 m³) / 16,9" x 15,7" x 12,6" (3343 in³)			

Para otras opciones, consulte a su representante de DaveyTronic® SP.

Los productos descritos en este documento son potencialmente peligrosos y deben cumplir de acuerdo con las normas de salud y seguridad aplicables, las leyes federales y estatales, las normas y otras disposiciones legales o reglamentarias. Davey Bickford no puede anticipar todas las posibles aplicaciones, ni las condiciones bajo las cuales esta información y sus productos pueden ser utilizados, es responsabilidad de cada usuario verificar la información en el contexto específico de la aplicación deseada. Davey Bickford rechaza expresamente a todas las garantías, expresas o implícitas, y no será responsable de ningún daño o responsabilidad que surja de o sea resultante en función de la información contenida en este documento.

DaveyTronic® SP

Davey Bickford Enaex

Equipo de Implementación
Enaex Mining Technical Solutions (EMTS)

EQUIPOS DE IMPLEMETACIÓN: Asegurar que nuestro sistema DaveyTronic® entregue un valor tangible.

Maximizar la productividad no solo se trata de contar con la última tecnología, todo debe estar acompañado de un uso guiado y dirigido por expertos en la tecnología con el apoyo de ingenieros y expertos en el campo.

Nuestra reputación se basa en mejoras mensurables y tangibles que nuestros clientes pueden ver. Ese es el objetivo de cada solución personalizada que diseñamos, y nuestra gente juega el papel más importante.

De allí es que nuestro Sistema **DaveyTronic®** viene con un alto valor agregado de servicios de implementación:

- Soporte y asesoramiento operativo
- Diagnóstico de necesidades in-situ
- Capacitación a personal en uso del sistema
- Configuración de equipos para su correcto funcionamiento
- Entrenamiento y evaluación en campo
- Medición y evaluación de resultados

El equipo de implementación está conformado por profesionales de la industria en operaciones con clientes, para quienes la seguridad, la eficiencia y el cumplimiento de los compromisos guían sus acciones.



Esto incluye pequeños contratistas locales, compañías mineras medianas y corporaciones mineras globales.

«Enaex Mining Technical Solutions» (EMTS) es un equipo global especializado de ingenieros expertos de todas las unidades de negocios de Enaex (Enaex Servicios, Enaex Britanite y Davey Bickford Enaex), que opera en Australia, América, África, Asia y Europa. Está compuesto desde recién graduados de programas avanzados de educación en minería y voladura hasta doctores expertos con casi 30 años en el campo de la investigación en la ingeniería de voladuras.



Todos tienen experiencia con las principales compañías internacionales de explosivos y son considerados expertos en el campo de optimización de explosión.

Tenemos las siguientes pasiones en común:

- Apoyar a superar sus desafíos de voladura
- Desbloquear el máximo valor en su proceso de producción
- Asegurar un desempeño de clase mundial en responsabilidad social corporativa

EQUIPO EMTS : aportando una gran experiencia en la optimización de operaciones subterráneas (incluidos los túneles) y de perforación / voladura en superficie, cubriendo minería de:

- Oro
- Plata
- Metales básicos
- Minerales Industriales
- Carbón
- Agregados

Al optimizar técnicamente los diseños de voladura, nuestro equipo de EMTS permite a los clientes la capacidad de influir en el resultado de cada evento. Esto crea un valor económico inmediato y de largo plazo para las operaciones de minería y túneles en todo el mundo, con ganancias tangibles tanto en términos de seguridad como medioambientales. Los objetivos, la productividad y el éxito comercial de nuestros socios están en el centro de las preocupaciones de EMTS.

¿Quieres tener contacto con nuestros expertos?

Visite nuestro website
www.DaveyBickfordEnaex.com
o envíenos un email directamente a
info@DaveyBickfordEnaex.com

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	: Claudia Elizabeth Ramírez Chipana
DNI/Carnet de Extranjería/Pasaporte N°	: 72659076
Correo electrónico	: claudia.ramirezchipana@gmail.com
Teléfono/Celular	: 994484630

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 : "APLICACIÓN DE DETONADORES ELECTRÓNICOS DAVEYTRONIC PARA OPTIMIZAR EL COSTO UNITARIO DE VOLADURA PARA ROCA HORNFELS EN LOS TAJOS 09-10 DE LA UNIDAD MINERA SHOUGANG HIERRO PERÚ"
b) Campo del conocimiento OCDE (Indicar el código de clasificación OCDE de la obra : https://catalogos.concytec.gob.pe/vocabulario/ocde_ford.html) : .....
c) Fecha de publicación : ...04 de diciembre de 2025.....

6. DATOS DEL ASESOR:

a) Nombres y Apellidos : CHRIST JESUS BARRIGA PARIA
b) DNI/Pasaporte/Cédula : 44331713
c) ORCID : 0000-0002-7130-9297

FIRMA : .....

DOCUMENTO DE IDENTIDAD : 72659076
NOMBRES Y APELLIDOS : Claudia Elizabeth Ramírez Chipana

"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 : 72659076
NOMBRES Y APELLIDOS : Claudia Elizabeth Ramírez Chipana
FECHA : 04/12/2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

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

Yo, Claudia Elizabeth Ramírez Chipana, bachiller de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, de la Universidad Nacional de Moquegua, identificado (a) con DNI: Nº 72659076, autor(a) de la Tesis / Trabajo de suficiencia profesional titulado "APLICACIÓN DE DETONADORES ELECTRÓNICOS DAVEYTRONIC PARA OPTIMIZAR EL COSTO UNITARIO DE VOLADURA PARA ROCA HORNFELS EN LOS TAJOS 09-10 DE LA UNIDAD MINERA SHOUGANG HIERRO PERÚ"

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, 04 de diciembre de 2025



Huella digital

Nombres y Apellidos: Claudia Elizabeth Ramírez Chipana
DNI: 72659076

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

CLAUDIA ELIZABETH RAMÍREZ CHIPANA

INFORME DE TESIS

TESIS

CONFORMIDAD DE TESIS FINAL

Universidad Nacional de Moquegua

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::1:3410837084

Fecha de entrega
14 nov 2025, 9:27 a.m. GMT-5

Fecha de descarga
18 nov 2025, 10:12 a.m. GMT-5

Nombre del archivo
TESIS_Claudia_Ramirez_-_Rev03.pdf

Tamaño del archivo
3.1 MB

127 páginas

22.715 palabras

128.328 caracteres

UNAM

Firmado digitalmente por BARRIGA PARIA Christ Jesus FAU 20449347448 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 14.11.2025 10:15:01 -05:00

7% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- Trabajos entregados
- Fuentes de Internet

Fuentes principales

0% Fuentes de Internet
7% Publicaciones
0% 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

0% Fuentes de Internet
7% Publicaciones
0% 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 Publicación
Merma Bellido, Martín Julio. "Modelación matemática para el ajuste optimo sobre... <1%

2 Publicación
INSIDEO SOCIEDAD ANONIMA CERRADA - INSIDEO S.A.C.. "ITS para la Modificació... <1%

3 Publicación
Flores Uribe, John-André Junior. "Sanmarquinos en Movimiento: El Movimiento Es... <1%

4 Publicación
Catachura Vilca, Alberto. "Promoviendo el empoderamiento gerencial: un enfoqu... <1%

5 Publicación
Edito Luis Rojas Linares. "A new approach to predictive of fragmentation in the Bl... <1%

6 Publicación
Vicente Lopez, Jesus Pol. "Uso de la google drive como recurso didáctico y el apre... <1%

7 Publicación
Angie Pamela, Dagner Salvador, Juan Cesar Farias Rodríguez. "Relationship Betw... <1%

8 Publicación
Mullisaca Contreras, Eliana. "Evaluar el contenido de mercurio en agua y sedimen... <1%

9 Publicación
Gabriela Guevara-Cue. "Revealing spatial (in)justice: exploring the dynamics of tri... <1%

10 Publicación
Hugo Manuel Sánchez Jiménez. "Inducción, Deducción y Fenomenología en la Inv... <1%

11 Publicación
Vargas Espinoza, Fany. "Inteligencia emocional y aprendizaje significativo en los ... <1%

12 Publicación
Cusihuaman Ramirez, Holga. "El uso del Whatsapp en el aprendizaje remoto del á... <1%

13 Publicación
Huayhua Becerra, Jhon. "Implementación y Operatividad de un Sistema de Monit... <1%

14 Publicación
Jimenez Custodio, Jose Daniel. "Comparativo de problemáticas de la cultura tribut... <1%

15 Publicación
SNC LAVALIN PERU S.A.. "Modificación del Plan de Cierre de Minas de la Unidad M... <1%

16 Publicación
V Zamora-Paredes, L Arauzo-Gallardo, C Raymundo-Ibañez, Moises Perez. "Optim... <1%

17 Publicación
Arcaya Coyuri, Juan Guillermo. "El control interno y su incidencia en la gestión de ... <1%

18 Publicación
Vilcapoma Malpartida, Pedro Manuel. "Método de estudio de caso como estrategi... <1%

19 Publicación
Valeriano Nina, Fredy Alonso. "Caracterización del dominio geomecánico para la ... <1%

20 Publicación
Granda, Stephanny Mariel Abad | Condori, Jenny Pamela Huaman. "Longitud medi... <1%

21 Publicación
Zambrano Poma, Carlos Alberto. "Efecto de cuatro biofertilizantes en el suelo y re... <1%

22 Publicación
Soto Román, Mayra I.. "Percepción de los estudiantes de nivel subgraduado sobre... <1%

23 Publicación
Morales Morales, Luis Gerardo. "Implementar un sistema de gestión en segurida... <1%

24 Publicación
Chura Cahuana, Heinz Miguel. "Determinación de las condiciones de altos esfuerz... <1%

25 Publicación
Condori Turpo, Loayda Abigail. "Evaluación de la calidad de aire y el sistema de ve... <1%

26	Publicación	Li Pandia Villanueva, Fray. "Una aproximación a la curva de transición Clotoide vi... <1%
27	Publicación	ECOANDINA PERU S.A.. "ITS del Proyecto Pallancata-IGA0008941", R.D. N° 229-201... <1%
28	Publicación	María Jesús Torrente Martínez. "Análisis del uso de la red social TikTok en la com... <1%
29	Publicación	Retamozo Valdivia, James Jose. "La gestión de calidad y su incidencia en la compe... <1%
30	Publicación	Flores Llamoca, Deysi Sonia. "Desarrollo de la motricidad fina y gruesa para el for... <1%
31	Publicación	Mestanza Navia, José Santos. "Derecho a la defensa y el debido proceso en las sa... <1%
32	Publicación	"Cretaceous Tectonics of the Andes", Springer Science and Business Media LLC, 1... <1%
33	Publicación	C Camallanqui-Alborque, G Quispe, C Raymundo-Ibañez. "Controlled Trim-Blastin... <1%
34	Publicación	Huayta Flores, Lenin. "Aplicación del Project Management Body of Knowledge pa... <1%
35	Publicación	Jonatan Baños-Chaparro. "Gestión del tiempo y compromiso académico en estudi... <1%
36	Publicación	Chafloc Sandoval, Liliana del Carmen. "Calidad en las Empresas del Sector Privado... <1%
37	Publicación	ENGINEERS & ENVIRONMENTAL PERU SOCIEDAD ANONIMA. "Actualización del Pl... <1%
38	Publicación	Paucar Bolo, Brenda Olga|Paulino Alvarado, Carmen Alicia|Hurtado Torres, Kath... <1%
39	Publicación	WALSH PERU S.A. INGENIEROS Y CIENTIFICOS CONSULTORES. "PMA del Proyecto ... <1%

40 Publicación
"Advances in Emerging Trends and Technologies", Springer Science and Business ... <1%

41 Publicación
Denis N. Morgunov, Leonid S. Labunsky. "Quality of electricity in power supply of ... <1%

42 Publicación
Elvio Tintaya Zegarra, Yony Farfan Robles, Antonio Coronel Molina, Rosa Evangeli... <1%

43 Publicación
Fretel, Julio Anastacio Abad. "Las Competencias Ciudadanas Desarrolladas Por Lo... <1%

44 Publicación
Jorge Silva. "Reasons for bottled water consumption in Mexico and consumer per... <1%

45 Publicación
Sucari León, Anibal. "Efecto del compost de residuos orgánicos urbanos en la rem... <1%

46 Publicación
Ahumada, Lucelly Vanessa Espinoza. "Efectividad del programa "Una Aventura N... <1%

47 Publicación
Bautista Quispe, Judith Annie. "Desarrollo del desempeño docente de matemátic... <1%

48 Publicación
Fisfalen Huerta, Mario Heinrich. "Analisis economico de la carga procesal del pod... <1%

49 Publicación
Martin Romero, Carlos Arango, Nelson Alvis, Juan Camilo Suarez, Aristides Duque... <1%

50 Publicación
Molina Castro, Juan David. "Mecanismos para la inversion y remuneracion de la tr... <1%

51 Publicación
Rodriguez Romero, Diana Jimena. ""Influencia de la aplicacion del programa 'Leit... <1%

52 Publicación
Vilela Ubillus, Mirian Azucena. "Método de caso para el desarrollo de las capacida... <1%

53 Publicación
Marco Antonio Cotrina-Teatino, Jairo Jhonatan Marquina-Araujo, Solio Marino Ara... <1%

54 Publicación

Diego Brito, René Gómez, Gonzalo Carvajal, Lorenzo Reyes-Chamorro, Guillermo ... **<1%**

Universidad Nacional de Moquegua

RESOLUCIÓN DE CONSEJO UNIVERSITARIO
N° 868-2025-CU

Moquegua, 05 de diciembre de 2025

VISTOS:

El Proveído N° 5109-2025-R de fecha 05 de diciembre de 2025 emitido por el Rectorado, Informe N° D0508-2025-UNAM-R-SG de fecha 05 de diciembre de 2025 emitido por el Secretario General, Informe Técnico N° D0176-2025-SEGE-GT emitido por la Especialista Administrativo I–Grados y Títulos, el Acuerdo del Pleno del Consejo Universitario de Sesión Extraordinaria N° 47-2025-SE-CU-UNAM, de fecha 05 de diciembre de 2025, y;

CONSIDERANDO:

Que, conforme al 4to párrafo del artículo 18, de la Constitución Política del Perú, dispone 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 demás normativa aplicable. Concordante con el artículo 1, de la Ley N° 31520, Ley que restablece la autonomía y la institucionalidad de las universidades peruanas, así como la Ley N° 32141, Ley que modifica la Ley N° 30220-Ley Universitaria, a fin de fortalecer la institucionalidad de las Universidades Públicas licenciadas;

Que, el Artículo 58, de la Ley N° 30220-Ley Universitaria, establece que el Consejo Universitario es el máximo órgano de gestión, dirección y ejecución académica y administrativa de la Universidad. Concordante con el artículo 18° del Estatuto de la Universidad Nacional de Moquegua, aprobado bajo Resolución de Asamblea Universitaria N° 015-2025-AU-UNAM;

Que, el artículo 59 de la Ley Universitaria-Ley N° 30220, establece las atribuciones del Consejo Universitario, y específicamente el numeral 59.9, establece; Conferir los grados académicos y los títulos profesionales aprobados por las Facultades y Escuela de Posgrado, así como otorgar distinciones honoríficas y reconocer y revalidar los estudios, grados y títulos de universidades extranjeras, cuando la universidad está autorizada por la Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria. Concordante con el numeral 14, del artículo 20° del Estatuto de la Universidad Nacional de Moquegua;

Que, el Sr. Rector es el personero y representante legal de la Universidad Nacional de Moquegua, conforme a lo dispuesto por la Ley N° 30220-Ley Universitaria, tiene a su cargo la Dirección, Conducción y Gestión del Gobierno Universitario en todos sus ámbitos, concordante con el artículo 24° y numeral 2 del artículo 26° del Estatuto de la Universidad Nacional de Moquegua;

Que, mediante Informe Técnico N° D0176-2025-SEGE-GT de fecha 05 de diciembre de 2025, e Informe N° D0508-2025-UNAM-R-SG de fecha 05 de diciembre de 2025, el Secretario General de la UNAM, remite al Rectorado el expediente para el trámite de Título Profesional de Ingeniero de Minas de la Bachiller: RAMÍREZ CHIPANA CLAUDIA ELIZABETH de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, quien se encuentra apta para la expedición del Título Profesional de Ingeniero de Minas, al haber cumplido satisfactoriamente con los requisitos legales y reglamentarios, exigidos en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional de Moquegua, conforme lo señala la Dirección de Actividades y Servicios Académicos y la Dirección de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, razón por la cual, el señor Secretario General incluye dicho expediente como punto de agenda para ser tratado en Sesión Extraordinaria de Consejo Universitario de fecha 05 de diciembre de 2025;

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 (...). Asimismo, la Ley N° 31803, modifica el artículo en mención adicionando; La Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria (SUNEDU) determina los criterios, así como establece y supervisa el procedimiento administrativo para el reconocimiento de grados y títulos otorgados en el extranjero, en el marco de la normativa vigente;

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, mediante 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-UNAM y N° 081, 484-2024-UNAM 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, bajo el amparo de los considerandos precedentes, el Pleno del Consejo Universitario en Sesión Extraordinaria N° 47-2025-SE-CU-UNAM, de fecha 05 de diciembre de 2025, emitió, el siguiente, Acuerdo, POR UNANIMIDAD: CONFERIR, a nombre de la Nación el Título Profesional de Ingeniero de Minas por la modalidad de sustentación de tesis a la Bachiller: RAMÍREZ CHIPANA CLAUDIA ELIZABETH, de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Nacional de Moquegua;

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

RESOLUCIÓN DE CONSEJO UNIVERSITARIO
N° 868-2025-CU

Moquegua, 05 de diciembre de 2025

En uso de las facultades y atribuciones conferidas por el Art. 18, de la Constitución Política del Perú, la Ley N° 30220 Ley Universitaria, el Estatuto de la Universidad Nacional de Moquegua, y a lo acordado por el pleno del Consejo Universitario:

SE RESUELVE:

ARTÍCULO 1°: CONFERIR, A NOMBRE DE LA NACIÓN a la Bachiller

- **RAMÍREZ CHIPANA CLAUDIA ELIZABETH**

TESIS : "APLICACIÓN DE DETONADORES ELECTRÓNICOS DAVEYTRONIC PARA OPTIMIZAR EL COSTO UNITARIO DE VOLADURA PARA ROCA HORNFELS EN LOS TAJOS 09-10 DE LA UNIDAD MINERA SHOUGANG HIERRO PERÚ", cuyo Asesor Principal fue el Dr. Christ Jesus Barriga Paria.

El **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE MINAS.**

Por la modalidad de SUSTENTACIÓN DE TESIS, de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Nacional de Moquegua.

ARTÍCULO 2°: ENCARGAR, al Secretario General a través de quien corresponda, para que realice las acciones pertinentes relacionadas con la inscripción correspondiente en el Registro de Grados y Títulos de la Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria - SUNEDU.

ARTÍCULO 3°: DISPONER, el cumplimiento de la presente Resolución a todas las dependencias de la Universidad Nacional de Moquegua.

ARTÍCULO 4°: DISPONER la publicación de la presente resolución en el Portal Institucional de la Universidad Nacional de Moquegua www.unam.edu.pe

REGÍSTRESE, PUBLÍQUESE Y CÚMPLASE;

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA SECRETARIA GENERAL

ABOG. EDGAR PINTO HUANCAVILCA
SECRETARIO GENERAL

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA CONSEJO UNIVERSITARIO

DR. HUGO RUBEN MARCA MAQUERA
RECTOR
PRESIDENTE DEL CONSEJO UNIVERSITARIO

DISTRIBUCION:
VRA
VRI
FAIN
EPIM
CyT
DASA
OTI
Interesado
cc: Arch.

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