



**UNIVERSIDAD  
DEL AZUAY**

**DEPARTAMENTO DE POSGRADOS**

**“Optimización del proceso de voladura usando detonadores electrónicos para  
apertura de cámaras de barrenación larga en la mina Fruta del Norte”**

Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de:

**Magíster en Minas con mención en Planeamiento Minero**

**Autor:**

LUIS ENRIQUE PEÑA MOGROVEJO

**Director:**

ERNESTO PATRICIO FEJOO CALLE

**CUENCA, ECUADOR**

**2025**

Luis Enrique Peña Mogrovejo

Trabajo de Titulación

Ing. Ernesto Patricio Feijoo Calle

Mayo, 2025

**“Optimización del proceso de voladura usando detonadores electrónicos para apertura de cámaras de barrenación larga en la mina Fruta del norte.”**

## **DEDICATORIA**

A mi esposa María José,

Tu amor, apoyo incondicional y paciencia infinita han sido la luz que me ha guiado en este largo camino hacia la culminación de esta tesis. Cada paso, cada desafío y cada logro han sido compartidos contigo, y tu presencia ha sido mi mayor motivación.

Gracias por creer en mí incluso cuando dudaba de mí mismo, por alentarme en los momentos difíciles y celebrar conmigo cada pequeño avance. Tu sacrificio y comprensión han sido fundamentales para que pueda alcanzar este sueño académico.

Con todo mi amor,

**Luis Enrique Peña Mogrovejo**

## **AGRADECIMIENTOS**

Mi más profundo agradecimiento a todas las personas que me han ayudado a lo largo de mi carrera universitaria.

Un agradecimiento al Ing. Patricio Feijoo por su guía, mentoría, paciencia y apoyo a lo largo de este proyecto, a nuestros profesores al Ing. Fernando Valencia, Ing. Leonardo Núñez e Ing. Eduardo Luna y al cuerpo docente internacional por compartir sus conocimientos profesionales, fueron un pilar fundamental para lograr desarrollar las habilidades necesarias para culminar esta maestría de forma satisfactoria.

De manera especial agradecer a Víctor, Luis, Cristian y Juan Carlos compañeros de labores quienes tuvieron que doblar esfuerzos para poder cubrir mis horas de estudio, además de sus discusiones enriquecedoras, ideas innovadoras y colaboración durante el trabajo de campo y análisis de datos.

Finalmente agradezco a mi familia por su apoyo absoluto en cada etapa de mi vida.

**Luis Enrique Peña Mogrovejo**

**RESUMEN:**

La presente investigación evaluó la optimización del proceso de voladura en la mina Fruta del Norte, mediante el uso de detonadores electrónicos, para la apertura de cámaras de barrenación larga.

El estudio comparó técnica y económicamente tres escenarios: aperturas en dos eventos con detonadores pirotécnicos, un solo evento con detonadores electrónicos y una apertura única con cada tipo de detonador. Se analizaron variables como costos de explosivos y accesorios, tiempo de ejecución y condiciones de seguridad post-voladura.

Los resultados muestran que, si bien los detonadores electrónicos presentan un costo inicial mayor, permiten realizar voladuras en un solo evento, reduciendo los tiempos operativos, mejorando las condiciones de seguridad al evitar el reingreso a zonas inestables. La investigación concluyó que el uso de sistemas electrónicos representa una alternativa viable y eficiente para optimizar el ciclo de minado en yacimientos subterráneos.

**Palabras clave:** detonadores electrónicos, detonadores pirotécnicos, optimización, costos, PPV.



---

Ing. Patricio Feijoo Calle  
**Director del trabajo de titulación**

**ABSTRACT:**

This research evaluated the blasting optimization process at the Fruta del Norte mine by using electronic detonators to open long-hole stopes.

The study compared both technically and economically three scenarios: two-stage openings using pyrotechnic detonators, single-stage blasting with electronic detonators, and single-stage blasting with each type of detonator. Variables such as the explosive and accessories cost, execution time, and post-blast safety conditions were analyzed.

The results show that, although electronic detonators involve a higher initial cost, they allow blasting in a single event, reducing operational time and improving safety conditions by avoiding reentering into unstable zones. The study concluded that using electronic systems represents a viable and efficient alternative to optimize the mining cycle in underground operations.

**Keywords:** electronic detonators, pyrotechnic detonators, optimization, costs, PPV.



---

Ing. Patricio Feijoo Calle

**Thesis Director**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>iii</b>
<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>iv</b>
<b>RESUMEN: .....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRACT: .....</b>	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS.....</b>	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>x</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>xi</b>
Introducción .....	1
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>2</b>
1. ANTECEDENTES .....	2
1.1. Industria del explosivo .....	2
1.1.1. Evolución de los explosivos industriales. ....	2
1.2. Información de la empresa.....	4
1.2.1. <i>Acerca de la Mina.</i> ....	4
1.2.2. <i>Ubicación y acceso.</i> .....	4
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>5</b>
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Sistema de minado sublevel stoping .....	5

2.2.	Barrenación larga .....	6
2.3.	Explosivos y accesorios. ....	7
2.3.1.	<i>Explosivos Primarios</i> .....	8
2.3.2.	<i>Iniciadores</i> .....	8
2.3.3.	<i>Detonadores eléctricos</i> .....	9
2.3.4.	<i>Detonadores electrónicos</i> .....	9
2.3.5.	<i>Explosivos Secundarios</i> .....	13
2.4.	Voladuras en cámaras de producción. ....	14
2.5.	Voladuras en cámaras de producción. ....	14
2.5.1.	<i>Velocidad pico partícula</i> .....	15
2.5.2.	<i>Factor de la carga</i> .....	16
2.5.3.	<i>Exactitud</i> .....	17
2.5.4.	<i>Secuencia de disparo</i> .....	19
2.6.	Costos.....	20
2.6.1.	<i>Costos operativos</i> .....	20
2.6.2.	<i>Componentes de los costos operativos</i> .....	20
2.6.3.	<i>Costos generales de voladura.</i> .....	22
2.6.4.	<i>Seguridad laboral en minería subterránea.</i> .....	24
2.6.5.	<i>Matriz de riesgos.</i> .....	25
<b>CAPÍTULO 3</b> .....		<b>30</b>

3. METODOLOGÍA.....	29
3.1. Primera comparativa apertura en 1 evento vs 2 eventos.....	30
3.2. Segunda comparativa apertura en 1 evento vs 2 eventos.....	35
3.3. Tercera comparativa apertura en 1 evento pirotécnico vs 1 evento electrónico .....	40
3.4. Análisis de condiciones de seguridad. ....	47
<b>4. Resultados.....</b>	<b>52</b>
<b>5. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>55</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>57</b>

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1. Ubicación de la mina Fruta del Norte. ....	4
Figura 2. Diseño de perforación de slot para cámaras de producción. ....	7
Figura 3. Diagrama de distribución base de detonadores electrónicos ....	10
Figura 4. Detonadores E*star de Austin Powder Company ....	12
Figura 5. Logger e Iniciador remoto E*star de Austin Powder Company.....	13
Figura 6. Comportamiento de partículas en macisos rocosos.....	14
Figura 7. Determinación de los parámetros característicos de la vibración ....	16
Figura 8. Ejemplo de matriz de evaluación de riesgos. ....	27
Figura 9. VPP por secuencia de voladura ....	43
Figura 10. VPP por secuencia de voladura ....	46
Figura 11. Compilado de costos de voladura.....	47
Figura 12. Evaluación de riesgos subproceso limpieza de anillos.....	50
Figura 13. Evaluación de riesgos subproceso carguío y coladura de slot de producción .....	52

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Datos informativos voladura 1 .....	30
Tabla 2. Costo de explosivo y accesorios voladura 1 .....	30
Tabla 3. Costo final de voladura 1 .....	31
Tabla 4. Datos informativos voladura 2.....	32
Tabla 5. Costo de explosivo y accesorios voladura 2 .....	33
Tabla 6. Costo final de voladura 2 .....	34
Tabla 7. Datos informativos voladura 3.....	35
Tabla 8. Costo de explosivo y accesorios voladura 3 .....	36
Tabla 9. Costo final de voladura 3 .....	37
Tabla 10. Datos informativos voladura 4.....	38
Tabla 11. Costo de explosivo y accesorios voladura 4 .....	38
Tabla 12. Costo final voladura 4.....	39
Tabla 13. Datos informativos voladura 5.....	41
Tabla 14. Costo de explosivo y accesorios voladura 5 .....	41
Tabla 15. Costo final de voladura 5 .....	42
Tabla 16. Datos informativos voladura 6.....	44
Tabla 17. Costo de explosivo y accesorios voladura 6 .....	44
Tabla 18. Costo final de voladura 6 .....	45

## **Introducción**

La constante actualización de la tecnología en los procesos productivos mineros deriva, a la mejora en los insumos, en una optimización de procesos y mejores controles en salud y seguridad. Aunque, es cierto que estos cambios suelen ser catalogados como mejoras de alto costo y que no representa una mejora sustancial en los réditos de la compañía.

Sin embargo, en la actualidad cada vez es mayor el número de casos de empresas que eligen el cambio de insumos de voladura con el objetivo de generar procesos seguros que optimicen recursos a los pasos subsiguientes del ciclo de minado.

Por este motivo, en el presente caso de estudio se buscó comprobar si el cambio de accesorios de voladura, de pirotécnico a electrónico, en las aperturas de las cámaras de producción puede mejorar la calidad del proceso de voladura optimizando los costos operativos y generando mejores condiciones de seguridad.

## **CAPÍTULO 1**

### **1. Antecedentes**

Para la industria minera es fundamental la optimización de los procesos productivos que generen que la empresa pueda considerarse como sustentable. Dentro de este proceso se encuentra el de voladura como parte final del ciclo de obtención del mineral deseado para su futura refinación o recuperación.

Así, uno de los problemas más comunes en la industria es realizar un proceso de voladura segura y económicamente rentable; y que a su vez obtenga un material fragmentado con parámetros que faciliten el menor consumo de energía en el proceso posterior de conminución.

Frente a esta problemática en Lundingold, mina Fruta del Norte, se ha visto necesaria la investigación, análisis e implementación de detonadores electrónicos en las aperturas de cámaras de producción de barrenación larga, con el objetivo de reducir riesgos potenciales a los trabajadores, optimizar recursos y mejorar dimensiones de la roca fragmentada.

#### **1.1. Industria del explosivo**

##### **1.1.1. Evolución de los explosivos industriales**

La invención del explosivo por Alfred Nobel en 1865 mostró el camino del uso de químicos, de forma poco compleja, en perforaciones o cavidades para hacerlos detonar a través de calor. En sus inicios se usaba mecha lenta como retardo tomando en cuenta la distancia relativamente constante en el que se consumía 1 metro.

Posterior a ello, continuaron los detonadores de retardo pirotécnicos eléctricos (alrededor de 1900) y los sistemas de iniciación de cordón detonante. Los segundos detonadores de retardo de intervalo entraron al mercado en la década de 1920. Cada progresión del tipo de detonador tenía sus ventajas y desventajas, y muchas minas en todo el mundo todavía eligen el cordón detonante en la superficie para sus voladuras a gran escala, ya que se considera una forma rentable de iniciación.

Con la llegada de los detonadores de retardo corto MS, introducidos alrededor de la década de 1940, y el tubo de choque patentado por primera vez por Per-Anders Persson en 1967 (Holmberg et al, 2001), nació una forma de iniciación barata y eficaz. Desde que estuvieron disponibles los detonadores pirotécnicos de retardo, eléctricos y no eléctricos; los ingenieros de voladura han estado analizando el tiempo para mejorar muchos aspectos de las voladuras.

Desde la década de 1940 hasta la de 1970, se realizaron muchos estudios sobre las secuencias con retardo y cómo mejoraron la fragmentación y los impactos ambientales. Ya en la actualidad existen mejoras a la par de los avances con la tecnología, por ejemplo, desarrollando detonadores electrónicos, con varias formas de programación en los que interviene cada vez menos el ser humano directamente con el explosivo.

Dentro del territorio ecuatoriano el agente que regula el uso, comercialización, tenencia y uso de explosivos son las fuerzas armadas, así como para la venta regulada se destacan empresas como FAMESA o Explocen C.A. quienes poseen vínculos con empresas internacionales en caso de importación.

## 1.2. Información de la empresa

### 1.2.1. Acerca de la Mina

El yacimiento Fruta del Norte fue descubierto en febrero de 2006 en un proceso de exploración que alcanzó el total de 184.789m de perforación, los mismos que sirvieron para definir la forma y dimensiones del depósito mineral.

Fruta del norte inicia la construcción de la mina en 2017 luego de superar las fases de prospección, exploración, estudios de factibilidad y licenciamiento ambiental. Posteriormente inicia sus operaciones en el año 2019 declarando su primer informe de producción.

### 1.2.2. Ubicación y acceso

La mina está localizada al sureste de Ecuador en la provincia de Zamora Chinchipe, cantón Yantzaza, parroquia Los Encuentros.

El acceso se realiza a partir de la carretera E45 en el recorrido de Zamora – Gualaquiza, luego al llegar a la parroquia Los encuentros se accede a la vía a El Pindal a través del puente colgante sobre el rio Zamora, ruta que conduce hasta la concesión de Lundingold.

*Figura 1. Ubicación de la mina Fruta del Norte.*



*Fuente.* <https://www.google.com/maps/@-3.7544457,-78.6146259,17.24z?entry=ttu>

## CAPÍTULO 2

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Sistema de minado sublevel stoping

El sistema de minado por subniveles es aplicable en yacimientos que tengan características regulares, ángulo de pendiente pronunciada y límites definidos de mineral. Este se basa en el principio de perforación y voladura de caserones de grandes dimensiones, los mismos que posteriormente son rellenados para optimizar la recuperación del mineral.

El sistema puede dividirse en caserones primarios y secundarios generando un ciclo de minado en la que para poder extraer los secundarios es necesario minar, extraer y rellenar los caserones primarios adyacentes. Para el relleno de los caserones se suele utilizar una mezcla de cemento con material estéril que puede ser, por ejemplo, las arenas de los relaves.

En el caso de Fruta del Norte el sistema de mina es determinado de acuerdo a la necesidad y variabilidad de leyes de mineral en cada cámara, para el relleno se utiliza una fórmula única de cemento y relaves que ha sido especialmente diseñado para las características geomecánicas de la mina.

Para preparar las cámaras de producción y acceder al mineral ha sido necesario el desarrollo de galerías principales de 5x5,5m como niveles principales, y cruceros de 5x5m que se internan en el yacimiento mineral.

## 2.2. Barrenación larga

Para el proceso de perforación de cámaras de producción se necesita de alta precisión y eficiencia; esto se logra gracias a máquinas perforadoras con mecanismos de percusión y presión de avance adecuados que derivan en la rotura del macizo gracias al golpe localizado y rotación de la matriz con una broca de botones.

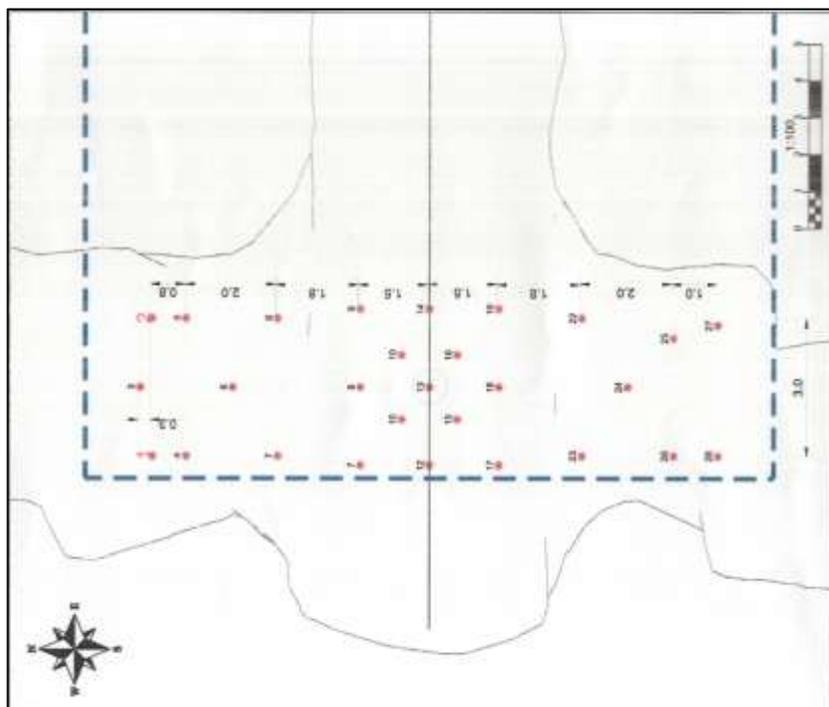
Para perforaciones de pozo largos se pueden utilizar dos tipos de configuraciones: martillo en fondo o martillo de cabeza. Para una configuración de martillo en cabeza la perforadora permanece en la parte superior de la sarta de perforación, es decir en el punto más lejano en relación con el macizo, lo que representa menor control de la desviación al recorrer la energía por toda la sarta de perforación. En cambio, en el martillo de fondo (ITH) el mecanismo de impacto está ubicado en contacto con el macizo rocoso siendo el primer acero que ingresa en el taladro por lo tanto la energía que recorre la sarta es menor previo al contacto con la roca favoreciendo a reducir la desviación de los taladros. De esta forma, para decidir el mecanismo a utilizar es necesario que se determine el diámetro mínimo de perforación y las precisiones requeridas de acuerdo con el diseño.

Finalmente, los mayores problemas en la perforación, como el desgaste de aceros o la desviación, suelen ser derivados de una incorrecta calibración de las presiones de percusión y avance, mala elección del equipo de perforación, además de una pobre evaluación de las características del macizo rocoso. (Ernesto Villaescusa, 2014)

En Fruta del norte para la perforación del slot se desarrollan accesos laterales denominados “Tee”, perpendiculares a los cruceros en dirección N-S, tanto por el nivel de perforación como por el nivel de acarreo, a partir de aquí se genera la cara libre necesaria para la voladura.

En este Slot se ejecuta una perforación vertical a  $90^\circ$  de acuerdo a la figura 2. Dicha perforación se realiza a través del equipo de barrenación larga de la marca Epiroc Simba m4, con un diámetro de 89 mm y una longitud de perforación promedio de 20m. Finalmente para asegurar la eficiencia de la voladura inicial se perfora un taladro céntrico que llevará la función de cara libre de la chimenea, en el caso de la figura 2 dicho taladro se encuentra en el taladro 13 al centro de la labor.

*Figura 2. Diseño de perforación de slot para cámaras de producción.*



*Fuente: Elaboración propia.*

### **2.3. Explosivos y accesorios**

Según Holmberg, R., & Persson, P. A. (1993), los explosivos son sustancias o mezclas de sustancias que, al reaccionar químicamente de manera rápida y violenta, liberan grandes

cantidades de energía en forma de calor, presión y gases. Esta liberación de energía ocurre en un período extremadamente corto de tiempo, generando una onda de choque capaz de realizar trabajo mecánico significativo, como la fragmentación de rocas en operaciones mineras o la demolición controlada de estructuras.

Los explosivos se clasifican por lo general en dos tipos: explosivos primarios u explosivos secundarios. Los primeros poseen una alta sensibilidad y pueden detonar directamente, mientras que los segundos para iniciar su detonación requieren de un iniciador como un detonador.

### **2.3.1. Explosivos Primarios**

Los clasificados como primarios son aquellos que son altamente sensibles a la iniciación y se utilizan para iniciar la columna de explosivo en los barrenos.

### **2.3.2. Iniciadores**

Existen varios sistemas de iniciación, mejor conocidos como detonadores, y todos cumplen la finalidad de iniciar los explosivos confinados en un barreno. La elección de cada tipo de detonador será restringida de acuerdo a las necesidades de secuenciación, características del macizo y la facilidad de alcance en la conexión. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013).

Los iniciadores se encuentran configurados generalmente por una cápsula metálica de aluminio, o de cobre, con el fin de que no genere chispas al roce con la roca; dentro del mismo se aloja un compuesto de trinitrorresorcinato de plomo y azida de plomo adicional a una base compuesta por pentrita, a esta combinación se la denomina carga base y se inicia gracias a una

píldora inflamable (en los detonadores eléctricos, no eléctricos y electrónicos) o a través de una llama si se tratada de detonadores ordinarios. (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

### **2.3.3. Detonadores eléctricos**

Son insumos de iniciación que utilizan energía eléctrica como detonador a través de un inflamador pirotécnico o “cerilla”. Este inflamador es una pequeña resistencia recubierta de pasta explosiva que a su vez va conectada a los hilos y a través de ellos a la la línea de corriente eléctrica.

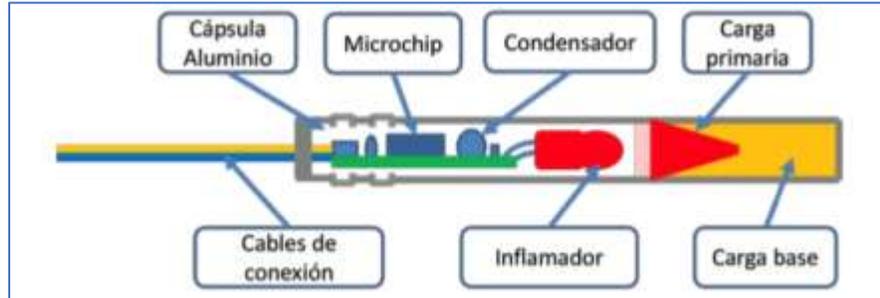
Existen dos grandes tipos de detonadores eléctricos: los detonadores instantáneos y los temporizados; siendo la diferencia entre ellos el espacio temporal que se incluye en los detonadores temporizados

### **2.3.4. Detonadores electrónicos**

Los detonadores electrónicos son un moderno sistema de iniciación para voladuras. Este tipo de sistemas está centrado en resultados específicos, que controla la energía desprendida por una voladura, mejorando la fragmentación, y disminuyendo los daños por vibraciones, además que controla la dilución. Es un sistema que ha ido evolucionando y redefiniendo los conceptos de precisión, exactitud, flexibilidad y sobre todo seguridad (Tito, 2023)

Los detonadores están compuestos por tres componentes primarios propios del sistema: programador/ registrador, verificador / ejecutador y detonador electrónico. Y dos elementos secundarios que son: cable de conector y cable para voladura. Y el sistema se describe con software básico de gestión y el hardware para los componentes primarios. (Tito, 2023)

Figura 3. Diagrama de distribución base de detonadores electrónicos



*Fuente:* (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013)

Físicamente, este tipo de detonadores están constituidos por una capsula metálica de aluminio cerrada por un extremo, encontrándose en su interior un condensador, un microchip, un inflamador, un explosivo primario y un explosivo base; conectados por el área abierta de la cápsula con cables que será quienes transmitan la información al detonador. (Jesus Aranda, 2022).

La pasta pirotecnia que determina el tiempo de retardo es sustituida por un circuito electrónico, en el cual, un microchip es el encargado de realizar la descarga de un condensador en el instante deseado. En los demás tipos de detonadores el retardo viene fijado por el tiempo que tarda en consumirse una pasta pirotecnia. Cada detonador electrónico está identificado inequívocamente con un código alfanumérico que sirve para su posterior programación y disparo. En lo que se basa en la carga explosiva es igual a la que poseen los demás sistemas de detonación, de este modo, las características explosivas son las mismas que las de los otros sistemas de iniciación. La precisión en los tiempos de retardo en los detonadores electrónicos es del 0,1%, mucho mayor que para detonadores de retardo pirotécnico. (Jesús Aranda, 2022)

Su programación va más allá de los 20,000 ms. Exactitud  $\pm 0.01\%$  ( $\pm 0.01$  ms) del retardo programado, garantiza no overlap, acoplamientos o superposición, presentando una aislación adecuada. Además, que posee la seguridad en ambientes con altos voltajes, estática y posibles pérdidas de corriente. La precisión define cuan dispersos esta la nube de datos de la muestra respecto al tiempo nominal del retardo. Se mide por medio de la desviación estándar. La exactitud tiene relación con la distancia entre la media de una muestra y el respectivo valor del detonador. El overlap tiene directa relación con la probabilidad de acoplamiento de las ondas de choque producidas por cargas detonando simultáneamente. Depende de las dispersiones del elemento de iniciación, de las características estructurales y geomecánicas del macizo rocoso. Si bien es más costoso en comparación a los sistemas tradicionales, esta diferencia mejora y eleva la productividad de la mina y los problemas ambientales (Tito, 2023) (Aranda, 2022)

Los beneficios se ven reflejados y enfocados en el tema de seguridad, como por ejemplo en la comunicación con el chip del detonador, chequeo de la continuidad eléctrica del cable, también detecta malogrados en cortes de cable, detonadores no conectados, fugas de corriente y en el mejoramiento de la fragmentación, apilamiento del material volado. En lo referente a la productividad de los equipos de minado, mejora el control de proyecto de rocas, estabilidad de taludes, control de vibraciones y de la cara operante. Así mismo el equipo de ejecución posee una llave codificada y tiene energía suficiente, energía con código y una ventana de diez minutos para iniciar voladura, y un reconocimiento, individualización y condición de cada detonador de la malla del disparo a través del ID y chip inteligente. (Jesús Aranda, 2022).

Para este caso de estudio se utilizaron detonadores de la marca Austin Powder Company, de la línea E\*star; de acuerdo a la casa comercial estos detonadores, en conjunto con los sistemas

de iniciación, han sido diseñados para proporcionar altos estándares de calidad, seguridad y control. Logrando por ejemplo comprobar los detonadores programados con cualquier retardo en un rango de 1 y 20000 ms. Finalmente el sistema de iniciación remota puede abarcar la detonación de 12800 detonadores para 8 diferentes frentes de operación.

*Figura 4. Detonadores E\*star de Austin Powder Company*



*Fuente: Elaboración propia.*

El proveedor determina algunas ventajas del uso de su producto como pueden ser:

- Cápsula de alta resistencia al agua.
- Rango de retardo entre 1 y 20000 ms.
- Diferencia de retardo mínimo 1ms.
- Máxima precisión de 0,1% del retardo nominal.
- Capacidad de carga de hasta 12800 detonadores.
- Versatilidad en las áreas de aplicación como: canteras, túneles, minería a cielo abierto o subterránea.
- Verificación multinivel del estado del 100% de detonadores previo a la detonación.
- Posibilidad de trazabilidad a través de codificación matriz desde fábrica.

Figura 5. Logger e Iniciador remoto E\*star de Austin Powder Company



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, la integración del sistema con todas las etapas de la voladura, traen consigo a la evolución de un sistema autónomo de voladuras con los procesos de mejora continua de las compañías de explosivos y accesorios de voladura a nivel mundial.

### 2.3.5. Explosivos Secundarios

Estos explosivos son menos sensibles que los primarios y requieren un iniciador para detonar.

- **Dinamita:** Es un explosivo compuesto por nitroglicerina absorbida en un material poroso como la diatomea o la tierra de infusorios. Es ampliamente utilizado en minería debido a su facilidad de manejo y versatilidad. (Kihlström & Langefors, 1978)
- **Explosivos de Emulsión ANFO (Ammonium Nitrate Fuel Oil):** Combinación de nitrato de amonio y un combustible líquido (usualmente diésel). Es ampliamente utilizado en minería por su bajo costo y alta eficiencia. (Hinojosa, 2002)
- **Explosivos de Base Perforante:** Incluyen sustancias como el RDX (Ciclotrimetilenotrinitramina) y el PETN (Pentaeritritoltetranitrato), que se utilizan en

combinación con detonadores para la detonación controlada por ejemplo en voladuras de demolición de edificios. (Persson , Holmberg, & Lee, 1993).

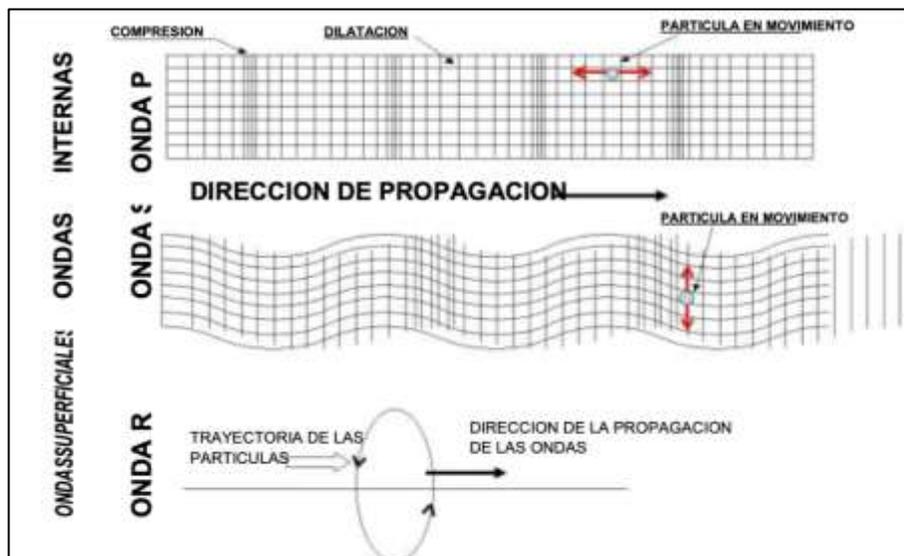
## 2.4. Voladuras en cámaras de producción

Dentro del proceso de voladuras de producción es necesario considerar conceptos fundamentales que determinen el comportamiento del explosivo y el macizo rocoso. Esta relación es clave para conseguir una correcta fragmentación, evitar sobre tamaños, controlar el daño a las paredes resultantes post voladura ya sea en cámaras primarias o secundarias, lo que en consecuencia reducirá los costos operativos y aumenta la seguridad de las labores.

## 2.5. Impedancia

Es la medida de la relación entre la velocidad de transmisión de ondas sísmicas versus la densidad de la roca. Esta onda se transmite de mejor manera mientras más se acerque la impedancia del explosivo al de la roca.

*Figura 6. Comportamiento de partículas en macizos rocosos*



*Fuente: Elaboración propia.*

### Velocidad pico partícula

La velocidad pico de partícula es una medida fundamental utilizada para cuantificar las vibraciones generadas durante una voladura en la industria minera. Representa la máxima velocidad alcanzada por las partículas del terreno en respuesta a las ondas de presión generadas por la explosión. El PPV se mide en unidades de velocidad, como centímetros por segundo (cm/s) o milímetros por segundo (mm/s), y es un indicador importante para evaluar el impacto de las vibraciones en las estructuras y el entorno circundante.

La precisión en la estimación del PPV es esencial para garantizar la seguridad de las personas y las infraestructuras cercanas a las operaciones mineras.

Para realizar el cálculo de este parámetro resultante de la voladura podemos utilizar la siguiente ecuación:

$$V = K \left( \frac{\sqrt{W}}{D} \right)^{1.6}$$

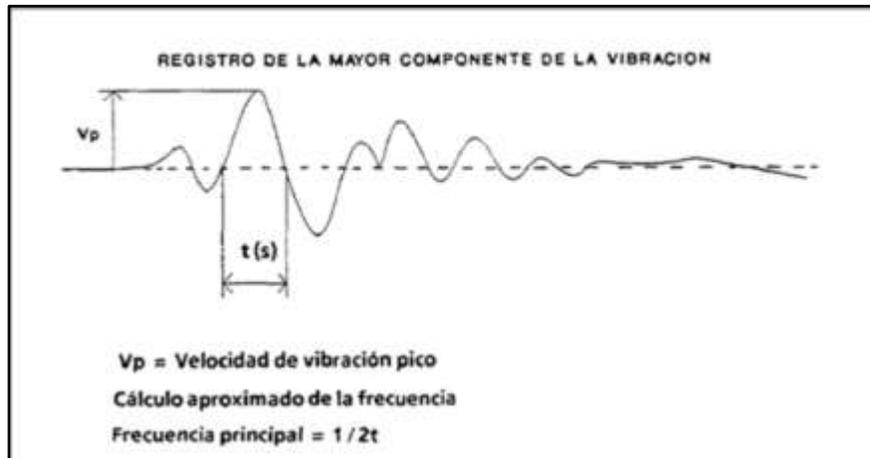
Donde:

- V = Velocidad (PPV) pico de partícula, (mm/s)
- W = Carga explosiva por retardo (kg)
- D = Distancia al lugar (m)
- K = Constante empírica relacionada roca.

Como el valor pico de la velocidad de vibración corresponde al punto de máxima desviación del registro, entonces esta puede ser positiva o negativa; y va a depender de si el movimiento es de aceleración o de desplazamiento.

Así, es necesario realizar por lo menos una medición de los componentes en las tres direcciones perpendiculares entre sí: dirección vertical, Longitudinal (horizontal) o transversal. Posterior se determinará aquella componente que presente un mayor valor pico partícula.

*Figura 7. Determinación de los parámetros característicos de la vibración*



*Fuente:* Elaboración propia.

## Factor de carga

El factor de carga en voladuras mineras es un parámetro crucial que indica la cantidad de explosivo utilizada por unidad de material a fragmentar. Se expresa comúnmente en kilogramos de explosivo por tonelada de roca (kg/t) o en gramos por metro cúbico (g/m<sup>3</sup>). Este factor es esencial para diseñar voladuras eficientes y seguras, ya que influye directamente en la fragmentación de la roca, la estabilidad de las paredes y el control de vibraciones.

El cálculo del factor de carga se basa en la relación entre la cantidad total de explosivo empleada y el volumen o peso del material a volar. Una correcta determinación de este factor

permite optimizar los costos operativos y minimizar los impactos ambientales asociados a la voladura.

Es importante destacar que el factor de carga no es un valor fijo; varía según las características geomecánicas de la roca, el tipo de explosivo utilizado y los objetivos específicos de la voladura. Por ejemplo, en rocas más duras o densas, puede ser necesario aumentar el factor de carga para lograr la fragmentación deseada, mientras que, en materiales más blandos o fracturados, una carga menor puede ser suficiente.

La optimización del factor de carga ha sido objeto de diversos estudios en la minería subterránea. Por ejemplo, en un análisis técnico-económico sobre la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales, se implementaron modelos de carga estandarizados y se aplicaron listas de verificación para mejorar el proceso de voladura. Este estudio evidenció que la reducción del factor de carga, junto con otras mejoras en el proceso, puede generar beneficios económicos significativos y mejorar la eficiencia operativa. (Varela, 2022)

### **Exactitud**

En los procesos de voladura controlada, como los que se realizan en minería, obras civiles o espectáculos pirotécnicos, la sincronización de las detonaciones juega un papel crucial.

La exactitud en el funcionamiento de los detonadores pirotécnicos, es decir, la capacidad de estos dispositivos para detonar en el tiempo preestablecido, es un factor determinante en la eficiencia del proceso y en la seguridad de los trabajadores y estructuras circundantes.

Los detonadores pirotécnicos emplean una composición química que se quema a una velocidad controlada para generar un retardo entre la señal de iniciación y la explosión. Este retardo está calibrado en fábrica, y dependiendo del diseño, puede variar desde unos pocos milisegundos hasta varios segundos. Sin embargo, su precisión está limitada por factores como:

- Variaciones en la fabricación del retardo pirotécnico
- Humedad y temperatura ambiental
- Presión atmosférica
- Envejecimiento del material

Debido a estas variables, los detonadores pirotécnicos suelen presentar tolerancias de  $\pm 10\%$  respecto al tiempo nominal de retardo (Baumel et al., 2015).

La falta de exactitud temporal puede tener consecuencias negativas en el proceso de voladura. Por ejemplo, en minería subterránea, una secuencia incorrecta de detonaciones puede:

- Generar una fragmentación deficiente del macizo rocoso
- Aumentar el rebote de la voladura (back break)
- Incrementar vibraciones sísmicas en superficie
- Comprometer la estabilidad estructural del frente de excavación

Además, los efectos acumulativos de la imprecisión pueden generar solapamientos no deseados entre cargas, generando detonaciones prematuras o retardadas con respecto al diseño (Lee & Oh, 2019).

Sin embargo, Los detonadores electrónicos surgieron como respuesta a las limitaciones de los pirotécnicos. Estos dispositivos utilizan microprocesadores para controlar con alta precisión el tiempo de detonación, alcanzando tolerancias del orden de  $\pm 0.1$  ms (Green & McKenzie, 1983). Esto permite diseñar secuencias complejas de voladura, mejorar la fragmentación y reducir las vibraciones.

En un estudio comparativo, se demostró que el uso de detonadores electrónicos en minería a cielo abierto permitió una reducción significativa en la variabilidad de los resultados y una mayor recuperación del material volado (Baumel et al., 2015).

### **Secuencia de disparo**

La secuencia de disparo tiene como objetivo obtener la mayor cantidad de caras libres para la proyección del material volado y la liberación de energía, con esta no solo se puede desfazar el tiempo de salida entre taladros, sino que se puede direccionar el material volado de acuerdo con una disposición final requerida.

La iniciación secuenciada de los taladros de una voladura constituye una herramienta que permite variar de forma controlada los tiempos de salida de la carga o cargas contenidas en los taladros modificando sustancialmente los esquemas nominales de perforación pasando a valores adaptados de acuerdo con los objetivos de cada voladura (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013). De acuerdo con Bernaola, Castilla & Herrera 2013, los objetivos normales de una correcta secuenciación de taladros deben ser:

- Conseguir mayor fragmentación, esponjamiento y desplazamiento de la roca volada.
- Reducir proyecciones y sobre excavaciones.

- Minimizar la intensidad de las vibraciones transmitidas en el macizo rocoso y la onda aérea producida.

Lógicamente se debe asegurar la conformación de cara libre para liberación de energía, por esta razón en el caso de las voladuras inicialmente se detona el taladro más cercano a la base del escareado hasta alcanzar las paredes que serán los retardos más elevados.

En el caso de los anillos se prioriza la detonación de la primera fila por sobre la segunda y se mantiene esa secuencia de acuerdo con la cantidad de anillos a detonar. Asimismo, se puede detonar en filas y en V al mismo tiempo cambiando la secuencia de los taladros de una misma fila aumentando los retardos a la vez que se aleja del eje de la labor.

## **Costos**

### **Costos operativos**

Los costos operativos en minería abarcan todos los gastos incurridos en la extracción y procesamiento de minerales. Estos costos son cruciales para la evaluación económica de proyectos mineros y su gestión efectiva es fundamental para la sostenibilidad financiera de las operaciones

### **Componentes de los costos operativos**

Los costos operativos se dividen en dos categorías principales: costos directos e indirectos.

Costos Directos son aquellos que guardan una estrecha relación con el servicio, proyecto o producto y se asocian de forma directa a la actividad, son fácilmente cuantificable y se plasman a través de los presupuestos. De estos costos podemos destacar:

- **Mano de obra:** Incluye salarios, beneficios y formación del personal. La mano de obra representa un porcentaje significativo de los costos totales en minería, variando entre el 20% y el 50% dependiendo de la operación (Deloitte, 2020).
- **Materiales y Suministros:** Engloba todos los insumos necesarios, desde explosivos hasta equipos de protección personal. El costo de los insumos puede fluctuar con el mercado, afectando directamente la rentabilidad (World Bank, 2019).
- **Servicios Externos:** Estos son costos asociados a contratistas y proveedores que realizan tareas específicas, como transporte y mantenimiento. El uso de contratistas puede ser más eficiente, pero también puede aumentar la variabilidad de costos (PWC, 2021).

Costos Indirectos son los que se relacionan de manera tangencial con los proyectos o las tareas previstas. Es decir, no son aplicables a un producto o servicio específico. Terminan siendo complicados de plasmar en presupuestos debido a que afectan a varios roles dentro de una empresa.

- **Gastos Administrativos:** Incluyen costos operativos no directamente atribuibles a la producción, como sueldos de personal administrativo, costos de oficina y servicios públicos (Minviro, 2022).
- **Depreciación:** Representa la disminución en el valor de los activos a lo largo del tiempo, un costo no monetario que impacta la contabilidad financiera (KPMG, 2021).

- **Costos de Gestión Ambiental:** Inversiones necesarias para cumplir con normativas ambientales y minimizar el impacto de las operaciones mineras. Esto ha cobrado mayor relevancia en los últimos años (UNEP, 2018).

Los costos operativos están influenciados por múltiples factores:

- **Tipo de Mineral:** Los minerales preciosos suelen tener costos más altos debido a los procesos de extracción y refinación requeridos.
- **Método de Extracción:** La minería a cielo abierto tiende a tener costos más bajos por tonelada extraída en comparación con la minería subterránea, pero puede implicar mayores costos ambientales y sociales (Baker Hughes, 2020).
- **Ubicación Geográfica:** La proximidad a infraestructuras clave, como carreteras y puertos, puede reducir costos logísticos, mientras que las operaciones en zonas remotas suelen enfrentar mayores gastos.
- **Regulaciones y Políticas:** Los requisitos normativos pueden aumentar los costos operativos debido a la necesidad de implementar tecnologías de mitigación y cumplir con estándares de seguridad (OECD, 2019).

### **Costos generales de voladura**

Para el cálculo de los costos operativos de voladura es necesario obtener los siguientes datos:

- **Total, costos por detonador:** se obtiene al realizar la suma del total de las unidades de detonadores a utilizarse en el proceso de voladura multiplicado por el precio de cada

detonador puesto en sitio, estos precios deben considerar valores como: impuestos y transporte.

$$C_1 = Nd * Pd$$

Donde:

- $C_1$ : Costo total de detonadores
  - $Nd$ : Número de detonadores a utilizar
  - $Pd$ : Precio del detonador en sitio
- Total, costos por explosivos: se obtiene al realizar la suma total de los kilogramos de explosivos a utilizarse en el proceso de voladura multiplicado por el precio de cada kilogramo puesto en sitio, estos precios deben considerar valores como: impuestos y transporte.

$$C_2 = Kge * Pe$$

Donde:

- $C_2$ : Costo total del explosivo
  - $Kge$ : Kilogramos de explosivo a utilizar
  - $Pe$ : Precio del explosivo en sitio
- Total, costos por accesorios: se obtiene al realizar la suma total de las unidades de accesorios a utilizarse en el proceso de voladura multiplicado por el precio de cada accesorio puesto en sitio, estos precios deben considerar valores como: impuestos y transporte.

$$C_3 = Na * Pa$$

Donde:

- $C_3$ : Costo total de accesorios
  - Na: Número de accesorios a utilizar
  - Pa: Precio de los accesorios en sitio
- Total, costos por horas/hombre trabajadas: se calcula dividiendo el costo total del salario de un empleado entre las horas trabajadas para ejecutar un proyecto o actividad específica.

$$C_{H/H} = \frac{S}{h}$$

Donde:

- $C_{H/H}$ : Costo total de horas hombre trabajadas
- S: Salario promedio del trabajador en dólares
- h: horas trabajadas

### **Seguridad laboral en minería subterránea**

Dentro de la industria minera, en consecuencia, del alto riesgo al que se ven expuesto el personal y recursos, la seguridad laboral ha tomado gran importancia en los últimos años.

Gracias a este enfoque se han desarrollado investigaciones y estándares internacionales sobre los cuales se basan las políticas de las empresas de gran minería.

Así, dichas investigaciones demostraron que gran parte de los accidentes e incidentes laborales de la industria minera derivaron de una pobre evaluación de riesgos y en consecuencia una mala toma de decisiones preventivas y correctivas.

Por ende, el usar una herramienta de evaluación que nos permita evidenciar y ponderar los riesgos de cada actividad toma una gran importancia; una de las más utilizadas en la actualidad es la matriz de riesgos.

### **Matriz de riesgos**

La matriz de riesgos laborales es una herramienta de gestión que permite determinar cuáles son los riesgos prioritarios para la seguridad y salud de los trabajadores para una actividad o proceso específico. Para esto es necesario cotejar el valor determinado de la probabilidad versus la severidad del mismo para obtener un resultado de nivel de riesgo que puede variar entre trivial y muy alto.

Probabilidad se define como la posibilidad de materialización de un riesgo analizado, el caso que nos ocupa, se trata de una probabilidad teórica si bien estará basada en datos cualitativos o cuantitativos de la tarea a evaluar y valorar.

Se puede determinar 3 escalas de valor diferentes en las que se debe encasillar dicha posibilidad:

- Probabilidad baja: el riesgo puede materializarse rara vez.
- Probabilidad media: el riesgo se podría materializar varias veces.
- Probabilidad alta: el daño ocurrirá siempre o casi siempre.

Al momento de determinar el nivel de probabilidad es necesario conocer algunos datos como el número de veces que se realizará la actividad, medidas implantadas previamente, requisitos legales o la experiencia del personal que ejecutará la actividad.

En cambio, la severidad de un riesgo es el valor asignado al daño más probable que produciría si se materializase y para determinar este potencial es necesario tomar en cuenta las áreas corporales que se verán afectadas o la naturaleza del daño sea desde ligeramente dañino a extremadamente dañino.

De la misma forma se puede determinar 3 escalas de valor diferentes en las que se debe encasillar dicha severidad:

- Severidad baja: daños superficiales o irritaciones que no imposibiliten la actividad normal en un espacio temporal no mayor a 10 días.
- Severidad media: se consideran quemaduras, conmociones, torceduras importantes, fracturas, amputaciones menos graves (dedos), lesiones múltiples; sordera, dermatitis, asma, trastornos músculo-esqueléticos, intoxicaciones previsiblemente no mortales, enfermedades que lleven a incapacidades menores. Lesiones con baja prevista en un intervalo superior a los 10 días.
- Severidad alta: Lesiones graves o incapacitantes, enfermedades crónicas, amputaciones, fallecimiento o lesiones graves a varias personas en simultáneo.

Una vez definidas las consideraciones de cada factor a evaluar se procede a generar una tabla de valor de acuerdo a la imagen.

Figura 8. Ejemplo de matriz de evaluación de riesgos.

		SEVERIDAD		
		Baja	Media	Alta
PROBABILIDAD	Baja	Trivial	Tolerable	Moderado
	Media	Tolerable	Moderado	Alto
	Alta	Moderado	Alto	Muy alto

*Fuente:* Elaboración propia.

De esta derivarán los niveles de riesgo de cada actividad y para las cuales se aplicarán medidas correctivas y su respectivo tiempo de ejecución de acuerdo a la siguiente información:

- Riesgo trivial: No requiere medidas correctivas.
- Riesgo Tolerable: No se requiere implementar medidas correctivas, sin embargo, es necesario considerar mejoras que no representen costos elevados. Asimismo, se requiere de comprobaciones periódicas.
- Riesgo Moderado: se deben realizar inversiones precisas que permitan reducir el riesgo, teniendo un control exacto de los tiempos de ejecución. Finalmente, se realiza una revisión periódica de las medidas correctivas que permita evaluar la efectividad de las mismas.
- Riesgo Alto: Los trabajos no se deben ejecutar hasta que se pueda controlar efectivamente los riesgos, además se destinan considerables recursos económicos en la

corrección. El tiempo de ejecución de las medidas correctivas debe ser menor al del tiempo de espera en la ejecución.

- Riesgo Muy alto: No se debe realizar las actividades si no se controlan los riesgos. Si no se logra reducir el riesgo, incluso si se cuenta con recursos ilimitados, no se debe ejecutar actividades.

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGÍA

En el caso de este proceso investigativo se han realizado la comparativa de 6 voladuras de slot clasificadas de la siguiente manera:

- Primera comparativa de aperturas, en el que se analiza económicamente, una voladura en dos fases en la cámara de producción 1080 C129 panel B, determinada como una voladura estándar, cargada con ANFO como carga de columna y detonadores no eléctricos versus una voladura en un solo evento en la cámara de producción 1080 C136 panel B cargada con ANFO como carga de columna y detonadores electrónicos.

Se han utilizado además los siguientes procesos de investigación:

- **Investigación documental:** Se recopiló información bibliográfica e información de la base de datos de la mina Fruta del Norte facilitados por la empresa Lundingold
- **Investigación de campo:** Se recolectó datos cualitativos fundamentales y se evalúa y comprueba condiciones geomecánicas y de seguridad laboral en interior mina posterior a las pruebas de voladura.
- **Investigación experimental:** Se realizó un análisis de los diseños de voladura y datos obtenidos en campo, además se realiza la comparativa de costos a través del análisis económico de las voladuras.

### 3.1. Primera comparativa apertura en 1 evento vs 2 eventos

#### Cámara de producción 1080 -C129 panel A

#### Datos:

Tabla 1. Datos informativos voladura 1

1080-C129 B (2Voladuras)
Se carga con ANFO- nonel
33 taladros (32 cargados)
2 voladuras ( 7 días hasta iniciar anillos)

*Fuente:* Elaboración propia.

#### Costo total de explosivo y accesorios

Se determina el costo total de esta voladura se multiplica la cantidad en Kg o las unidades de accesorios y explosivos con el precio en campo de las mismas y al obtener los precios de cada insumo se los suma para obtener el total del valor de los accesorios de voladura.

Tabla 2. costo de explosivo y accesorios voladura 1

Descripción	Cantidad	Precio	Total
Sum of Riomax- Anfo (Kg)	3000	\$ 2,80	\$ 8.400,00
Sum of Booster BC-450gr (un)	54	\$ 10,70	\$ 577,80
Sum of Detonador eléctrico - Rock star(un)	2	\$ 9,50	\$ 19,00

Sum of Rionel dual 1000ms/42ms (15m)	20	\$ 7,50	\$ 150,00
Sum of Rionel dual 1000ms/100ms (15m)	13	\$ 7,50	\$ 97,50
Sum of Rionel dual 1000ms/42ms (30m)	0	\$ 10,40	\$ -
Sum of Rionel dual 1000ms/100ms (30m)	29	\$ 10,40	\$ 301,60
		<b>Total 1</b>	\$ 9.545,90

*Fuente:* Elaboración propia.

### Costo de horas hombre necesarias para voladura

Para determinar el costo total de las horas hombre usadas post voladura para habilitar el area para una nueva voladura, se multiplica el número de horas usadas por hombre trabajado, multiplicado por la cantidad de hombres necesarios para limpieza de taladros y por el costo promedio de la hora hombre nacional.

*Tabla 3. Costo final de voladura 1*

Horas para estandarización/ colaborador	8
Horas para limpieza de anillos/ colaborador	16
Costo promedio de hora hombre nacional	\$ 5,00

Descripción	Cantidad	Precio	Total
Estandarización post voladura	16	\$ 5,00	\$ 80,00
Limpieza de taladros para segunda fase / hombre	32	\$ 5,00	\$ 160,00
Tiempo limpieza 1er evento	-	-	-
		<b>Total 2</b>	<b>\$ 240,00</b>
<b>Valor total de apertura</b>			<b>\$ 9.785,90</b>

*Fuente:* Elaboración propia.

El valor económico final de la apertura con detonadores pirotécnicos resulta de \$ **9.785,90** tomando en cuenta que se debe realizar dos eventos, lo que representa un retraso de 2 días adicionales para poder realizar el arranque de los anillos siguientes.

#### **Cámara de producción 1080 C136 panel A**

#### **Datos:**

*Tabla 4. Datos informativos voladura 2*

1130-C123 A (1Voladura)
Se carga con ANFO-detonador electrónico
33 taladros (32 cargados)
1 voladura (6 días hasta iniciar anillos)

*Fuente:* Elaboración propia.

### Costo total de explosivo y accesorios

Se determina el costo total de esta voladura se multiplica la cantidad en Kg o las unidades de accesorios y explosivos con el precio en campo de las mismas y al obtener los precios de cada insumo se los suma para obtener el total del valor de los accesorios de voladura.

Tabla 5. Costo de explosivo y accesorios voladura 2

Descripción	Cantidad	Precio	Total
Sum of Riomax- Anfo (Kg)	2950	\$ 2,80	\$ 8.260,00
Sum of Booster BC-450gr (un)	64	\$ 10,70	\$ 684,80
Sum of Detonador eléctrico - Rock star(un)	0	\$ 9,50	\$ -
Sum of Rionel dual 1000ms/42ms (15m)	0	\$ 7,50	\$ -
Sum of Rionel dual 1000ms/100ms (15m)	0	\$ 7,50	\$ -
Sum of Rionel dual 1000ms/42ms (30m)	0	\$ 10,40	\$ -
Sum of Rionel dual 1000ms/100ms (30m)	0	\$ 10,44	\$ -
Sum of Detonadores electrónicos	64	\$ 50,60	\$ 3.238,40
		<b>Total 1</b>	\$ 12.183,20

*Fuente:* Elaboración propia.

### Costo de horas hombre necesarias para voladura

Para determinar el costo total de las horas hombres usadas post voladura para habilitar el área para una nueva voladura, se multiplica el número de horas usadas por hombre trabajado,

multiplicado por la cantidad de hombres necesarios para limpieza de taladros y por el costo promedio de la hora hombre nacional.

*Tabla 6. Costo final de voladura 2*

Horas para estandarización/ colaborador	8
Horas para limpieza de anillos/ colaborador	16
Costo promedio de hora hombre nacional	\$ 5,00

Descripción	Cantidad	Precio	Total
Estandarización post voladura	16	\$ 5,00	\$ 80,00
Limpieza de taladros para segunda fase / hombre	0	\$ 5,00	\$ -
Tiempo limpieza 1er evento		\$ -	\$ -
		<b>Total 2</b>	<b>\$ 80,00</b>

<b>Valor total de apertura</b>	<b>\$ 12.263,20</b>
--------------------------------	---------------------

*Fuente:* Elaboración propia.

El valor económico final de la apertura con detonadores electrónicos resulta de \$ **12.263,20** tomando en cuenta que se debe realizar un solo evento, lo que representa un ahorro operativo de 2 días para poder realizar el arranque de los anillos siguientes.

### 3.2. Segunda comparativa apertura en 1 evento vs 2 eventos

- Primera comparativa de aperturas, en el que se analiza económicamente, una voladura en dos fases en la cámara de producción 1080 C129 panel B, determinanda como estándar, cargada con ANFO como carga de columna y detonadores no eléctricos versus una voladura en un solo evento en la cámara de producción 1130 C123 Panel A cargada con ANFO como carga de columna y detonadores electrónicos.

#### **Cámara de producción 1080-C129 panel B**

#### **Datos:**

*Tabla 7. Datos informativos voladura 3*

1080-C129 B (2 Voladuras)
Se carga con ANFO- nonel A4
33 taladros (32 cargados)
2 voladuras (7 días hasta iniciar anillos)

*Fuente:* Elaboración propia.

#### **Costo total de explosivo y accesorios**

Se determina el costo total de esta voladura se multiplica la cantidad en kg o las unidades de accesorios y explosivos con el precio en campo de las mismas y al obtener los precios de cada insumo se los suma para obtener el total del valor de los accesorios de voladura.

Tabla 8. Costo de explosivo y accesorios voladura 3

Descripción	Cantidad	Precio	Total
		\$	
Sum of Riomax- Anfo (Kg)	3000	2,80	\$ 8.400,00
		\$	
Sum of Booster BC-450gr (un)	54	10,70	\$ 577,80
		\$	
Sum of Detonador eléctrico - Rock star(un)	2	9,50	\$ 19,00
		\$	
Sum of Rionel dual 1000ms/42ms (15m)	20	7,50	\$ 150,00
		\$	
Sum of Rionel dual 1000ms/100ms (15m)	13	7,50	\$ 97,50
		\$	
Sum of Rionel dual 1000ms/42 (30m)		10,40	\$ -
		\$	
Sum of Rionel dual 1000ms/100ms (30m)	29	10,40	\$ 301,60
		<b>Total 1</b>	\$ 9.545,90

*Fuente:* Elaboración propia.

### Costo de horas hombre necesarias para voladura

Para determinar el costo total de las horas hombre usadas post voladura para habilitar el área para una nueva voladura, se multiplica el número de horas usadas por hombre trabajado,

multiplicado por la cantidad de hombres necesarios para limpieza de taladros y por el costo promedio de la hora hombre nacional.

*Tabla 9. Costo final de voladura 3*

Horas para estandarización/ colaborador	8
Horas para limpieza de anillos/ colaborador	16
Costo promedio de hora hombre nacional	\$ 5,00

Descripción	Cantidad	Precio	Total
Estandarización post voladura	32	\$ 5,00	\$ 160,00
Limpieza de taladros para segunda fase / hombre	32	\$ 5,00	\$ 160,00
Tiempo limpieza 1er evento	8	\$ 5,00	\$ 40,00
		<b>Total 2</b>	<b>\$ 360,00</b>

<b>Valor total de apertura</b>	<b>\$ 9.905,90</b>
--------------------------------	--------------------

*Fuente:* Elaboración propia.

El valor económico final de la apertura con detonadores pirotécnicos resulta de \$ **9.905,90** tomando en cuenta que se debe realizar dos eventos, lo que representa un retraso de 3 días adicionales para poder realizar el arranque de los anillos siguientes.

**Cámara de producción 1130-C123 panel A****Datos:***Tabla 10. Datos informativos voladura 4*

1130-C123 A (1Voladura)
Se carga con ANFO-detonador electrónico
29 taladros (28 cargados)
1 voladura (4 días hasta iniciar anillos)

*Fuente:* Elaboración propia.

**Costo total de explosivo y accesorios**

Se determina el costo total de esta voladura se multiplica la cantidad en kg o las unidades de accesorios y explosivos con el precio en campo de las mismas y al obtener los precios de cada insumo se los suma para obtener el total del valor de los accesorios de voladura.

*Tabla 11. Costo de explosivo y accesorios voladura 4*

<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio</b>	<b>Total</b>
Sum of Riomax- Anfo (Kg)	3150	\$ 2,80	\$ 8.820,00
Sum of Booster BC-450gr (un)	56	\$ 10,70	\$ 599,20
Sum of Detonador eléctrico - Rock star(un)	0	\$ 9,50	\$ -
Sum of Rionel dual 1000ms/42ms (15m)	0	\$ 7,50	\$ -

Sum of Rionel dual 1000ms/100ms (15m)	0	\$ 7,50	-	\$
Sum of Rionel dual 1000ms/42 (30m)	0	\$ 10,40	-	\$
Sum of Rionel dual 1000ms/100 (30m)	0	\$ 10,40	-	\$
Sum of Detonadores electrónicos	56	\$ 50,60	\$2.833,60	
<b>Total</b>			<b>\$12.252,80</b>	

*Fuente:* Elaboración propia.

### Costo de horas hombre necesarias para voladura

Para determinar el costo total de las horas hombre usadas post voladura para habilitar el área para una nueva voladura, se multiplica el número de horas usadas por hombre trabajado, multiplicado por la cantidad de hombres necesarios para limpieza de taladros y por el costo promedio de la hora hombre nacional.

*Tabla 12. Costo final voladura 4*

Horas para estandarización/ colaborador	8
Horas para limpieza de anillos/ colaborador	16
Costo promedio de hora hombre nacional	\$ 5,00

Descripción	Cantidad	Precio	Total
Estandarización post voladura	16	\$ 5,00	\$ 80,00

Limpieza de taladros para segunda fase / hombre	0	\$ 5,00	\$ -
Tiempo limpieza 1er evento		\$ -	\$ -
		<b>Total 2</b>	<b>\$ 80,00</b>

<b>Valor total de apertura</b>	<b>\$ 12.332,80</b>
--------------------------------	---------------------

*Fuente:* Elaboración propia.

El valor económico final de la apertura con detonadores electrónicos resulta de \$ **12.332,80** tomando en cuenta que se debe realizar un solo evento, lo que representa un ahorro operativo de 3 días para poder realizar el arranque de los anillos siguientes.

### 3.3. Tercera comparativa apertura en 1 evento pirotécnico vs 1 evento electrónico

- Tercera comparativa de aperturas, en este caso especial se analiza dos voladuras en cámaras secundarias, en las que las labores laterales e inferior fueron ya recuperadas, se compara la posibilidad de apertura en un solo evento utilizando detonadores pirotécnicos en la cámara 1105 C129 Panel B y una apertura en un solo evento utilizando detonadores electrónicos en la cámara 1170 C132 Panel A. Adicionalmente, se ha modificado el diseño para el uso de un menor número de detonadores pirotécnicos, usando un solo detonador de cada tipo en su respectiva voladura para iniciar su respectiva carga de columna.

#### **Cámara de producción 1105-C129 panel B**

Tabla 13. Datos informativos voladura 5

1105 C129 B (1 Voladura)
Se carga con ANFO- nonel A4
24 taladros cargados
1 voladura (6 días hasta iniciar anillos)

*Fuente:* Elaboración propia.

### Costo total de explosivo y accesorios

Se determina el costo total de esta voladura se multiplica la cantidad en kg o las unidades de accesorios y explosivos con el precio en campo de las mismas y al obtener los precios de cada insumo se los suma para obtener el total del valor de los accesorios de voladura

Tabla 14. Costo de explosivo y accesorios voladura 5

Descripción	Cantidad	Precio	Total
Sum of Riomax- Anfo (Kg)	2223,47	\$ 2,80	\$ 6.225,72
Sum of Booster BC-450gr (un)	48	\$ 10,70	\$ 513,60
Sum of Detonador eléctrico - Rock star(un)	1	\$ 9,50	\$ 9,50
Sum of Rionel dual 1000ms/42ms (15m)	0	\$ 7,50	\$ -
Sum of Rionel dual 1000ms/100ms (15m)	15	\$ 7,50	\$ 112,50
Sum of Rionel dual 1000ms/42 (30m)	0	\$ 10,40	\$ -
Sum of Rionel dual 1000ms/100ms (30m)	15	\$ 10,40	\$ 156,00

<b>Total 1</b>	<b>\$ 7.017,32</b>
----------------	--------------------

*Fuente:* Elaboración propia.

### Costo de horas hombre necesarias para voladura

Para determinar el costo total de las horas hombres usadas post voladura para habilitar el área para una nueva voladura, se multiplica el número de horas usadas por hombre trabajado, multiplicado por la cantidad de hombres necesarios para limpieza de taladros y por el costo promedio de la hora hombre nacional.

*Tabla 15. Costo final de voladura 5*

Horas para estandarización/ colaborador	8
Horas para limpieza de anillos/ colaborador	16
Costo promedio de hora hombre nacional	\$ 5,00

Descripción	Cantidad	Precio	Total
Estandarización post voladura	0	\$ 5,00	\$ -
Limpieza de taladros para segunda fase / hombre	0	\$ 5,00	\$ -
Tiempo limpieza 1er evento	0	\$ 5,00	\$ -
		<b>Total 2</b>	<b>\$ 0</b>

<b>Valor total de apertura</b>	<b>\$ 7.017,32</b>
--------------------------------	--------------------

*Fuente:* Elaboración propia.

El valor económico final de la voladura utilizando detonadores pirotécnicos es de \$ **7.017,32** tomando en cuenta de que se realiza en un solo evento por lo que no existe retraso para el arranque de los anillos por lo que no representa una variable a considerar con respecto a la comparativa con la siguiente voladura.

*Figura 9. VPP por secuencia de voladura*



*Fuente:* Elaboración propia.

El cálculo de la máxima velocidad de partícula se obtuvo utilizando la fórmula de velocidad pico partícula descrita en esta investigación.

Max. velocidad de partícula	36,5	mm/s
-----------------------------	------	------

Para el uso de detonadores pirotécnicos se puede evidenciar una variación teórica en la velocidad de partícula de acuerdo con la cantidad de kilogramos de explosivo utilizado para cada retardo, en los picos de la gráfica se puede identificar la mayor cantidad de explosivo acumulada

que coincide con las paredes de la labor, esto se da gracias a la necesidad de cara libre y la restricción de números de retardos a utilizar en este diseño específico.

### **Cámara de producción 1170-C132 panel A**

*Tabla 16. Datos informativos voladura 6*

1170 C132 A (1 voladura)
Se carga con ANFO-detonador electrónico
22 taladros cargados
1 voladura (6 días hasta iniciar anillos)

*Fuente:* Elaboración propia.

### **Costo total de explosivo y accesorios**

Se determina el costo total de esta voladura se multiplica la cantidad en Kg o las unidades de accesorios y explosivos con el precio en campo de las mismas y al obtener los precios de cada insumo se los suma para obtener el total del valor de los accesorios de voladura.

*Tabla 17. Costo de explosivo y accesorios voladura 6*

<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio</b>	<b>Total</b>
Sum of Riomax- Anfo (Kg)	1936	\$ 2,80	\$ 5.420,80
Sum of Booster BC-450gr (un)	44	\$ 10,70	\$ 470,80
Sum of Detonador eléctrico - Rock star(un)	0	\$ 9,50	-

Sum of Rionel dual 1000ms/42ms (15m)	0	\$ 7,50	\$ -
Sum of Rionel dual 1000ms/100ms (15m)	0	\$ 7,50	\$ -
Sum of Rionel dual 1000ms/42 (30m)	0	\$ 10,40	\$ -
Sum of Rionel dual 1000ms/100 (30m)	0	\$ 10,40	\$ -
Sum of Detonadores electrónicos	44	\$ 50,60	\$ 2.226,40
			\$8.118,00

*Fuente:* Elaboración propia.

### Costo de horas hombre necesarias para voladura

Para determinar el costo total de las horas hombre usadas post voladura para habilitar el área para una nueva voladura, se multiplica el número de horas usadas por hombre trabajado, multiplicado por la cantidad de hombres necesarios para limpieza de taladros y por el costo promedio de la hora hombre nacional.

*Tabla 18. Costo final de voladura 6*

Horas para estandarización/ colaborador	8
Horas para limpieza de anillos/ colaborador	16
Costo promedio de hora hombre nacional	\$ 5,00

Descripción	Cantidad	Precio	Total
Estandarización post voladura	0	\$ 5,00	\$ -
Limpieza de taladros para segunda fase / hombre	0	\$ 5,00	\$ -
Tiempo limpieza 1er evento		\$ -	\$ -
		<b>Total 2</b>	<b>\$ 0</b>

<b>Valor total de apertura</b>	<b>\$ 8.118,00</b>
--------------------------------	--------------------

*Fuente:* Elaboración propia.

El valor económico final de la voladura utilizando detonadores electrónicos es de \$ **8.118,00** tomando en cuenta de que se realiza en un solo evento por lo que no existe retraso para el arranque de los anillos por lo que no representa una variable a considerar con respecto a la comparativa con la voladura previa.

*Figura 10. VPP por secuencia de voladura*



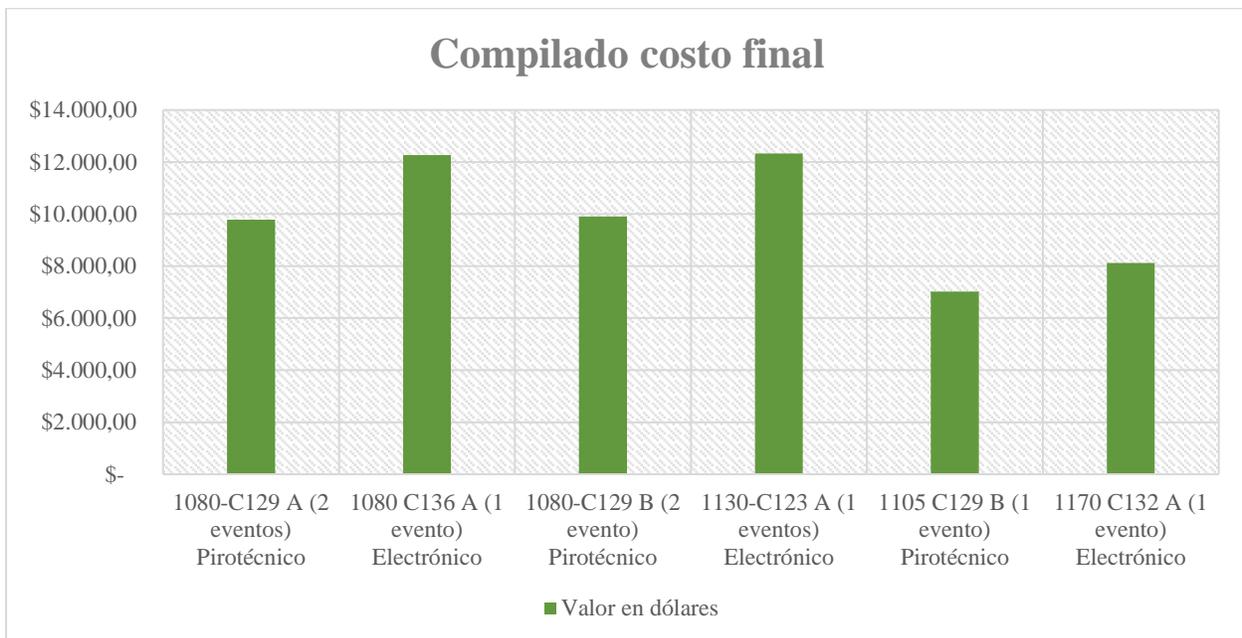
*Fuente:* Elaboración propia.

El cálculo de la máxima velocidad de partícula se obtuvo utilizando la fórmula de velocidad pico partícula descrita en esta investigación.

Max. velocidad de partícula	20	mm/s
-----------------------------	----	------

Una vez finalizada la evaluación económica del conjunto de voladuras analizadas, se obtiene una representación gráfica a manera de compilado del costo final en dólares donde se puede observar la real diferencia entre el uso de detonadores electrónicos versus el uso de detonadores pirotécnicos.

*Figura 11. Compilado de costos de voladura*



*Fuente:* Elaboración propia.

### 3.4. Análisis de condiciones de seguridad

Para el fin de esta investigación se ha realizado el análisis de dos de las actividades productivas en las que se verían personal involucrados posterior a realizarse una voladura de producción, además esta matriz considera los riesgos y sus respectivos peligros previo a la aplicación de controles que eliminen, sustituyan, o administren de forma correcta las condiciones generadas.

Para esto, inicialmente se ha subdividido los procesos en subprocesos, tomando en cuenta que el proceso macro es considerado la voladura de producción, luego se evalúa el primer subproceso determinado como limpieza de taladros o preparación de taladros, aquí se requiere la participación de 2 colaboradores expuestos a los siguientes riesgos con sus respectivas evaluaciones.

- Detritus a través de la proyección de partículas puede generar impactos a los colaboradores, teniendo una probabilidad alta con consecuencias medias, resultando en un riesgo medio.
- Detritus a través de las posiciones forzadas puede generar problemas ergonómicos, teniendo una probabilidad baja con consecuencias medias, resultando en un riesgo medio.
- Herramientas a través del manejo de herramientas cortopunzantes puede generar cortes o laceraciones, teniendo una probabilidad baja con consecuencias medias, resultando en un riesgo medio.
- Energía Potencial a través de presiones anormales puede generar impactos, teniendo una probabilidad baja con consecuencias medias, resultando en un riesgo medio.

- Derrumbes a través de aplastamiento puede generar fatalidad o desmembramiento, teniendo una probabilidad moderada con consecuencias altas, resultando en un riesgo alto.
- Derrumbes a través de caída a distinto nivel puede generar fatalidad, teniendo una probabilidad moderada con consecuencias altas, resultando en un riesgo alto.
- Cámara abierta a través de caída a distinto nivel puede generar fatalidad, teniendo una probabilidad moderada con consecuencias altas, resultando en un riesgo alto. Este se diferencia del anterior por la posibilidad de caída dentro de una perforación de cara libre del EASER.

Es necesario destacar que la posibilidad de derrumbe se presenta en los frentes en los que se realiza la voladura en 2 eventos debido a que la parte superior de la chimenea y slot, de aproximadamente 10m de pilar, queda alterada debido a la voladura previa de la parte inferior.

En el caso de una voladura en un solo evento se obvia este peligro por la razón de que no se necesita el re ingreso de personal para la preparación y limpieza de los taladros.

El resumen de la evaluación se compila en la siguiente matriz obtenida de la matriz general de procesos:

Figura 12. evaluación de riesgos subproceso limpieza de anillos

ACTIVIDAD   ACTIVITY	PUESTOS DE TRABAJO   JOB POSITIONS	NÚMERO DE TRABAJADORES EXPUESTOS   NUMBER OF EXPOSED WORKERS	NÚMERO DE TRABAJADORES CON DISCAPACIDAD   NUMBER OF DISABLED WORKERS	PELIGRO   HAZARD	RIESGO   RISK	EVALUACIÓN INICIAL DEL RIESGO   INITIAL RISK EVALUATION				NIVEL DEL RIESGO INICIAL   INITIAL RISK LEVEL	
						PROBABILIDAD   PROBABILITY	CONSECUENCIA   CONSEQUENCY				
Limpieza Anillos Producción (limpieza manual)	Operador de Simba Ayudante de Simba	2	0	Detritus / rocas	Proyección de partículas	ALTAMENTE PROBABLE   HIGHLY LIKELY	3	4	3	12	Riesgo Medio
					Posiciones forzadas	PROBABILIDAD BAJA   LOW LIKELIHOOD	2	2	2	4	Riesgo Medio
				Herramientas	Manejo de herramientas cortopunzantes	PROBABILIDAD BAJA   LOW LIKELIHOOD	2	2	2	4	Riesgo Medio
					Energía Potencial	Presiones anormales	PROBABILIDAD BAJA   LOW LIKELIHOOD	3	2	3	6
				Derrumbe	Aplastamiento	PROBABILIDAD MODERADA   MODERATE LIKELIHOOD	5	3	5	15	Riesgo Alto
					Caída a distinto nivel	PROBABILIDAD MODERADA   MODERATE LIKELIHOOD	5	3	5	15	Riesgo Alto
				Cámara abierta	Caída a distinto nivel	PROBABILIDAD MODERADA   MODERATE LIKELIHOOD	5	3	5	15	Riesgo Alto

**Fuente:** Elaboración propia.

Luego, se evalúa el segundo subproceso determinado como carguío y voladura de Slot de cámaras de producción, aquí se requiere la participación de 2 a 5 colaboradores expuestos a los siguientes riesgos con sus respectivas evaluaciones.

- Derrumbes a través de aplastamiento puede generar fatalidad o desmembramiento, teniendo una probabilidad moderada con consecuencias altas, resultando en un riesgo alto.
- Derrumbes a través de caída a distinto nivel puede generar fatalidad, teniendo una probabilidad moderada con consecuencias altas, resultando en un riesgo alto.
- Traslado de explosivo a través de la exposición a solventes, disolventes, desengrasantes, gasolina, diésel o derivados del petróleo puede generar intoxicación o enfermedades dérmicas, teniendo una probabilidad baja con consecuencias bajas, resultando en un riesgo bajo.

- Traslado de explosivo a través de la manipulación de cargas lo que puede derivar en afectaciones ergonómicas, teniendo una probabilidad baja con consecuencias medias, resultando en un riesgo medio.
- Detonación fortuita a través de la manipulación de explosivos puede generar en desmembramientos, intoxicación de gases de voladura o fatalidad, teniendo una probabilidad moderada con consecuencias altas, resultando en un nivel de riesgo alto.
- Herramientas a través del manejo de herramientas cortopunzantes puede generar cortes o laceraciones, teniendo una probabilidad baja con consecuencias medias, resultando en un riesgo medio.

Es necesario mencionar que la posibilidad de derrumbe se presenta en los frentes en los que se realiza la voladura en 2 eventos debido a que la parte superior de la chimenea y slot, de aproximadamente 10m de pilar, queda alterada debido a la voladura previa de la parte inferior.

En el caso de una voladura en un solo evento se obvia este peligro por la razón de que no se necesita el re ingreso de personal para un segundo proceso de carguío.

El resumen de la evaluación se compila en la siguiente matriz obtenida de la matriz general de procesos:

Figura 13. Evaluación de riesgos subproceso carguío y coladura de slot de producción

ACTIVIDAD   ACTIVITY	PUESTOS DE TRABAJO   JOB POSITIONS	NÚMERO DE TRABAJADORES EXPUESTOS   NUMBER OF EXPOSED WORKERS	NÚMERO DE TRABAJADORES CON DISCAPACIDAD   NUMBER OF DISABLED WORKERS	PELIGRO   HAZARD	RIESGO   RISK	EVALUACIÓN INICIAL DEL RIESGO   INITIAL RISK EVALUATION				NIVEL DEL RIESGO INICIAL   INITIAL RISK LEVEL	
						PROBABILIDAD   PROBABILITY	CONCECUENCIA   CONCEQUENCY				
Carguío y Voladura de Slot Producción	Operador de Simba Ayudante de Simba	2 a 5	0	Derrumbe	Aplastamiento	PROBABILIDAD MODERADA   MODERATE LIKELYHOOD	5	3	5	15	Riesgo Alto
					Caida a distinto nivel	PROBABILIDAD MODERADA   MODERATE LIKELYHOOD	5	3	5	15	Riesgo Alto
				Traslado de explosivo	Exposición a solventes, disolventes, desengrasantes, gasolina, diesel	NO PROBABLE   NOT LIKELY	1	1	1	1	Riesgo Bajo
					Manipulación de cargas	PROBABILIDAD BAJA   LOW LIKELYHOOD	3	2	3	6	Riesgo Medio
				Detonación fortuita	Manejo de Explosivos	PROBABILIDAD MODERADA   MODERATE LIKELYHOOD	5	3	5	15	Riesgo Alto
				Herramientas	Manejo de herramientas cortopunzantes	PROBABILIDAD BAJA   LOW LIKELYHOOD	2	2	2	4	Riesgo Medio

Fuente: Elaboración propia.

## Resultados

- Luego de la valoración económica de las voladuras evaluadas se observa un mayor costo económico en el uso de detonadores electrónicos con un promedio de costos de \$12,298.00 versus al uso de detonadores pirotécnicos con un promedio de costos de \$9,845,90, esto debido al precio final de adquisición de los accesorios.
- En el caso de las voladuras pirotécnicas en dos fases es necesario el cálculo del costo de horas hombre requeridas para el segundo proceso de limpieza, preparación y carguío de explosivos que resulta en un costo final de horas hombre promedio de \$300.
- La diferencia en el costo final de la voladura entre detonadores pirotécnicos y electrónicos, considerando la apertura del slot en un solo evento es de \$ 1,100.68.
- Las voladuras que se realizan en dos eventos tienen un retraso adicional de 1 o 2 días para empezar el minado de anillos, con respecto a las voladuras en un solo evento, lo que retrasa el plan minero.
- La velocidad de pico partícula se muestra irregular en el cálculo de las voladuras pirotécnicas mientras que en las voladuras electrónicas se ha obtenido un valor estable gracias al control de la exactitud de detonación que poseen estas.
- La afectación al macizo rocoso es menor en detonadores electrónicos y este parámetro se ve alterado básicamente por la cantidad de explosivo que coincidirá con el retardo de cada detonador; la rigidez en la gama de retardos de los detonadores pirotécnicos deriva en que se usen dos o más detonadores en un mismo momento de detonación, mientras que la programabilidad de los

detonadores electrónicos sumado a su exactitud nos permite activarlos siempre en diferentes momentos de detonación.

- El análisis de riesgos determina que el nivel de riesgo posterior al primer evento realizado con detonadores pirotécnicos es mayor en los subprocesos de preparación de anillos y limpieza de taladros; y en el subproceso de carguío de voladura, riesgo que no es evaluable en el uso de detonadores electrónicos ya que se usan para la apertura del slot en un solo evento.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Bajo el resultado de análisis de PPV con respecto a los dos tipos de accesorios, la mejor opción a utilizarse es el detonador electrónico debido a que mantiene una distribución lineal regular en la transmisión de las partículas en el macizo rocoso evitando superposiciones de esfuerzos que podrían generar daños estructurales.
- Desde el punto de vista netamente económico la opción óptima es el uso de detonadores pirotécnicos con una diferencia media de \$3000.
- Si se ajusta el diseño de apertura de acuerdo con la comparativa 3, la diferencia económica entre ambos accesorios se reduce únicamente a \$1000, sobre todo gracias a las modificaciones de diseño del plan de voladura para usar un solo detonador de inicio en cada carga de columna.
- Con respecto al análisis de seguridad la exposición del personal a riesgos altos de consecuencias altas, como por ejemplo los derrumbes con caída a distinto nivel durante el proceso de carguío, es menor con el uso de detonadores electrónicos, por lo que desde este punto de vista se recomiendan éstos frente a los pirotécnicos.
- En el balance final del análisis entre las condiciones seleccionadas en esta investigación, se determina que la mejor opción de accesorios serían los detonadores electrónicos ya que, a pesar de existir una diferencia de costos de 20% aproximadamente entre voladuras, la exposición del personal a áreas perturbadas por eventos previos genera un riesgo alto con poco margen de aplicación de medidas de control.

- Se recomienda realizar una evaluación económica de los problemas operativos futuros en correcciones de hastiales para cámaras secundarias cuando se realice la apertura de cámaras con detonadores pirotécnicos.
- Determinar, en conjunto con los proveedores, planes de mitigación en caso de falta de stock de detonadores electrónicos en sitio.
- Es necesario generar monitoreos de vibraciones y simulaciones constantes para diseños de aperturas de cámaras de producción, para determinar posibles afectaciones al macizo rocoso de las cámaras secundarias o perturbaciones en el relleno de cámaras primarias.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ernesto Villaescusa. (2014). Geotechnical Desing for sublevel Open Stopping. Boca Raton, Florida, EEUU: CRC Press.
- Tito, D. Y. (31 de Diciembre de 2023). Linkedin. Obtenido de <https://www.linkedin.com/pulse/detonadores-electr%C3%B3nicos-dino-yancachajlla-tito-50rje/>
- López, B. (2015). Detonadores Electrónicos. Lima, Perú.
- Hinojosa, E. (2002). Explosivos y voladuras en minería. Publicaciones de la Escuela de Ingeniería de Minas de la Universidad de Chile.
- Persson , P.-A., Holmberg, R., & Lee, J. (1993). Rock Blasting and Explosives Engineering. Balkema Publishers.
- Kihlström, & Langefors. (1978). The modern technique of rock blasting. Wiley.
- Aranda, L. A. (2022). Detonadores electrónicos para mejorar la fragmentación de la roca en minería a cielo abierto. Repositorio institucional UNASAM.
- Bernaola, J., Castilla, J., & Herrera, J. (2013). Perforación y voladura en rocas en minería . Madrid.
- BHP. (2021). Sustainability Report.
- Accenture. (2020). The Future of Mining: How technology is changing the mining landscape.
- Baker Hughes. (2020). A Comprehensive Study on Mining Cost Management.
- Timmons, E. D., & Rumbaugh, J. O. (1999). Blasting principles for open pit mining. Balkema Publishers.
- Deloitte. (2020). Tracking the Trends: Mining Industry Trends.

KPMG. (2021). *Cost Management in Mining: A Strategic Approach*.

McKinsey & Company. (2020). *The Mining Productivity Challenge*.

Minviro. (2022). *Operational Cost Management in Mining*.

OECD. (2019). *Regulatory Framework for Mining in OECD Countries*.

PWC. (2021). *Mine 2021: The Future of Mining*.

UNEP. (2018). *The Role of Mining in Sustainable Development*.

World Bank. (2019). *Mining and the Environment: A Global Perspective*.

Baumel, M., Menezes, R. R., & de Freitas, D. F. (2015). Electronic detonators versus pyrotechnic detonators in open pit mining. *REM: Revista Escola de Minas*, 68(1), 99–105.

Green, S., & McKenzie, J. (1983). Development of precise delay detonators using electronic timing systems. *International Journal of Blasting and Fragmentation*, 3(2), 41–52.

Lee, M. K., & Oh, J. H. (2019). Reduction of ground vibration in tunnel blasting using electronic detonators. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(5), 815.