

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de **INGENIERÍA DE MINAS**

“**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**”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autores:

Oscar Ivan Cabada Castañeda

Jeisy Jomeiny Diaz Abanto

Asesor:

Mg. Ing. Rafael Ocas Boñón

<https://orcid.org/0000-0001-9519-2532>

Cajamarca - Perú

JURADO EVALUADOR

Jurado 1 Presidente(a)	Daniel Alejandro Alva Huaman	43006890
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

Jurado 2	Miguel Ricardo Portilla Castañeda	45209190
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

Jurado 3	Oscar Vázquez Mendoza	46795074
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

DEDICATORIA

Este trabajo de investigación está dedicado a mi padre Oscar Inocente Cabada Terrones y a mi madre Enma Marina Castañeda Salazar, a mis hermanos y demás familiares que siempre me brindaron su apoyo incondicional para poder llegar a este punto de mi vida profesional.

También se lo dedico a mis amigos y docentes que fueron parte importante de este proceso tan importante en mi vida.

Ivan Cabada

Primordialmente a Dios porque es el ser que me ha dado fortaleza y protección en cada día de mi vida. Seguidamente a mis padres; Elizabeth Abanto Araujo y Adler Díaz Farje, los cuales son mi motor y principal apoyo en todos los ámbitos de mi vida, ya que gracias a sus enseñanzas han inculcado en mí, valores, respeto y honestidad.

Jeisy Díaz

AGRADECIMIENTO

Agradecer a Dios, por guiarme en este camino y brindarme su protección.

A mis padres que siempre estuvieron brindándome consejos y su apoyo para poder cumplir mis objetivos en el ámbito profesional.

A todos los docentes que se tomaron su tiempo para poder guiarme durante mi vida universitaria y poder ser un gran profesional.

Ivan Cabada

A mis padres, ya que por ellos he podido cumplir mis metas y dar este gran paso hacia la vida profesional; además de los valores que desde pequeña me han ido inculcando continuamente.

A mis docentes e ingenieros, quienes con sus bastos conocimientos y experiencia ayudaron en mi formación tanto personal como profesional.

Jeisy Díaz

TABLA DE CONTENIDOS

JURADO EVALUADOR	2
DEDICATORIA	3
AGRADECIMIENTO	4
TABLA DE CONTENIDOS	5
ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE ECUACIONES	9
RESUMEN	10
ABSTRACT	11
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	12
1.3. Objetivos	31
1.3.1. Objetivo general	31
1.3.2. Objetivos específicos	31
1.4. Hipótesis	31
1.4.1. Hipótesis general	31
1.4.2. Hipótesis específicas	32
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	33
2.2. Población y muestra	33
2.2.1. Población:	33
2.2.2. Muestra:	34
2.3.1. Recopilación de información documental	34
2.3.2. Análisis de datos	34
2.4. Procedimiento	35
CAPÍTULO III. RESULTADOS	46
3.1. Análisis de fragmentación	46
3.3. Análisis de VOD	53
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	58
REFERENCIAS	62
ANEXOS	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características técnicas del agente explosivo SANG APU.....	22
Tabla 2: Características del sistema de iniciación electrónico DigiShot Plus.....	26
Tabla 3: Beneficios del sistema de iniciación electrónico DigiShot Plus	27
Tabla 4: Resultados de fragmentación para cada dominio geotécnico.....	28
Tabla 5: Mejores resultados para análisis de vibración.....	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Propagación de onda de choque y expansión de gas	16
Figura 2: Rotura radial por transferencia de energía	17
Figura 3: PortaMetrics	18
Figura 4: Plataforma del análisis de fragmentación	19
Figura 5: Componentes de un detonador electrónico	20
Figura 6: Agente de voladura SANG APU	21
Figura 7: Sistema de iniciación electrónico Digishot Plus 4G	23
Figura 8: Diagrama de disparo con Digishot Plus 4G	25
Figura 9: Diseño de la malla de perforación.....	35
Figura 10: Ubicación del punto de disparo del banco 3336 - 033.....	36
Figura 11: Imagen pre voladura del banco 3336 - 033.....	36
Figura 12: Parámetros del diseño de la malla de perforación.....	37
Figura 13: Diseño de carga.....	37
Figura 14: Registro de consumos	38
Figura 15: Control de densidad de SANG APU	39
Figura 16: Control de densidades	40
Figura 17: Diseño de amarre y secuencia de salida.....	40
Figura 18: Líneas de isotiempo y desplazamiento del material.....	41
Figura 19: Detonador electrónico	41
Figura 20: Booster	42
Figura 21: Conexión del detonador electrónico en superficie.....	42
Figura 22: conexión de detonadores con Commander	43
Figura 23: Inicio de testeo	44
Figura 24: Reporte Bench Commander	44
Figura 25: Sistema de análisis PortaMetrics	45
Figura 26: Imagen post voladura	45

Figura 27: Gráfico de tamaño de distribución del material fragmentado.....	47
Figura 28: Análisis de fragmentación mediante la aplicación del sistema PortaMetrics	48
Figura 29: Gráfico resumen - Mineral.....	49
Figura 30: Cuadro resumen de análisis de fragmentación del 21 al 26 de 02 del 2022	49
Figura 31: Cuadro resumen de análisis de onda elemental	50
Figura 32: Ubicación del geófono	51
Figura 33: Registro de vibraciones.....	51
Figura 34: Análisis de onda elemental a 70 metros.....	52
Figura 35: Tiempo de retardo VS vibraciones	53
Figura 36: Ubicación de los taladros seleccionados para el análisis VOD	54
Figura 37: Resumen ejecutivo proyecto 3336 – 033 – PV	54
Figura 38: Gráfico de VODs proyecto 3336 – 033 – PV	55
Figura 39: Gráfico de VOD taladro 10110.....	55
Figura 40: Gráfico de VOD taladro 10109.....	56
Figura 41: Velocidad de régimen taladro 10110	56
Figura 42: Velocidad de régimen taladro 10109	57

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Ecuación de Kuznetsov	30
---	----

RESUMEN

Esta investigación tiene como finalidad la optimización de la fragmentación de las rocas en el proceso de voladura aplicando el sistema de iniciación electrónico Digishot plus; de tal manera que traiga ingentes beneficios para la industria minera. Para el fructífero avance se ha realizado la investigación en el área geológica de la zona, así como recopilación bibliográfica de distintas fuentes sobre fragmentación y macizos rocosos, asimismo sobre todo lo que a voladura respecta; como muestra se tomó el banco minado ubicado en el nivel 3336 del tajo de la minera en estudio, con los datos obtenidos se pudo visualizar la gran ventaja que tiene ante procesos de voladura pirotécnicos; ya que se obtiene una voladura más controlada, registrando control de vibraciones, mejor obtención de P80, inclusive mejor esponjamiento; de esta manera, junto con el SANG APU el cual fue el agente explosivo utilizado, son unos grandes aliados para la industria ya que no solo se optimiza significativamente los costos finales en mina, sino también ayuda a disminuir daños por vibraciones a proyectos o labores cercanas, al mismo tiempo que reduce impactos ambientales y hasta sociales en cuanto a las zonas de influencia. Como conclusiones se obtuvo que mediante la aplicación del sistema de iniciación electrónico DigiShot plus si se consiguió mejores resultados en el proceso de fragmentación ya que estuvo acorde con los estándares establecidos; asimismo mayor control en la estabilidad de taludes y vibraciones. Por otra parte, nos ayuda a controlar tiempos mejorando así la producción en mina.

Palabras clave: Fragmentación de roca, iniciadores electrónicos, Digishot Plus, Voladura

ABSTRACT

The purpose of this research is to optimize the fragmentation of rocks in the blasting process by applying the Digishot plus electronic initiation system; in such a way that it brings huge benefits to the mining industry. For the fruitful advance, research has been carried out in the geological area of the area, as well as a bibliographic compilation of different sources on fragmentation and rock masses, also on everything related to blasting; As a sample, the mined bank located at level 3336 of the pit of the mining company under study was taken, with the data obtained it was possible to visualize the great advantage it has before pyrotechnic blasting processes; since a more controlled blasting is obtained, registering control of vibrations, better obtaining of P80, even better swelling; In this way, together with the SANG APU, which was the explosive agent used, they are great allies for the industry since not only is the final cost in the mine significantly optimized, but it also helps to reduce vibration damage to nearby projects or works, at the same time that it reduces environmental and even social impacts in terms of the areas of influence. As conclusions, it was obtained that by applying the DigiShot plus electronic initiation system, better results were achieved in the fragmentation process since it was in accordance with the established standards; also greater control in the stability of slopes and vibrations. On the other hand, it helps us to control times, thus improving production in the mine.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

El proceso de voladura es uno de los más importantes pilares dentro de las actividades del ciclo de minado; por ello, es necesario realizar cálculos específicos para poder determinar con anticipación las posibles complicaciones que puedan afectar el suministro de material al siguiente proceso que es el de carguío y acarreo de mineral. La fragmentación del mineral no solo es importante para el carguío, sino también para el siguiente proceso que es el de lixiviación, donde se debe optimizar la recuperación metálica; por lo cual, tener un adecuado modelo de fragmentación es de vital importancia.

Asimismo, para poder cumplir con una buena fragmentación es necesario conocer las características del macizo rocoso, es en base a estas características que nos permitirá realizar los cálculos adecuados de voladura.

Durante el proceso de voladura se han dado notorios y distintos contratiempos como pueden ser; fallas en las detonaciones, fugas, retardos de explosión, etc. Los cuales reducen considerablemente la productividad en las operaciones. Es por ello, que actualmente la minería está inmersa en un cambio constante en el ámbito tecnológico y con eso busca mejorar su productividad al menor coste posible para que le permita ser sostenible en el tiempo, segura y de calidad en cada uno de sus procesos productivos.

Debido a los diversos inconvenientes, obtener una buena fragmentación del macizo rocoso es muy importante en el proceso de voladura, ya que un material debidamente

fragmentado significa ahorro en los procesos siguientes; puesto que reduce costos de transporte y de recuperación, ayudando de esta manera en la optimización de costos en la empresa minera.

La empresa minera en estudio realiza sus operaciones a tajo abierto, dedicándose a la extracción de oro a partir de un cuerpo mineralizado de óxido; además presenta complicaciones en el proceso de voladura ya que existe la presencia de bosques ecológicos en la parte baja de los tajos, y el proceso de lixiviación es realizado con el material fragmentado tal y como sale de la voladura, es por eso que aquí es muy importante tener el nivel óptimo de P80.

Por consiguiente; esta investigación tiene como objetivo, estudiar la aplicación del sistema de iniciación Digishot Plus para optimizar la fragmentación de rocas en el proceso de voladura en la empresa minera en estudio.

El uso de detonadores electrónicos en los últimos años ha ido mejorando los resultados de fragmentación de las rocas, según (Bernaola, Castilla, & Herrera, 2013) en el libro perforación y voladura de rocas en minería nos dice que “ Los detonadores electrónicos son la última evolución de los sistemas de iniciación para la voladura de rocas, su desarrollo comenzó hace bastantes años, pero el uso de este tipo de sistema está centrado a ciertas aplicaciones donde se buscan resultados específicos”(pg. 117), la empresa minera en estudio está aplicando el sistema de iniciación electrónico ya que le permite obtener un grado de fragmentación adecuado de la roca.

Los sistemas de iniciación electrónicos a diferencia de los sistemas convencionales de iniciación, tienen un circuito electrónico que está compuesto por un micro chip que

será el encargado de activar el dispositivo en el tiempo deseado, cada uno de los detonadores electrónicos tiene un código que es usado para la programación y disparo. Sus características explosivas de los detonadores electrónicos son las mismas que otros sistemas de iniciación, pero tiene una mayor precisión que los detonadores pirotécnicos, además de que se les puede programar su tiempo de inicio de detonación.

Durante los últimos años la industria minera tomo la decisión de utilizar los avances tecnológicos en sus diferentes etapas y procesos, los detonadores electrónicos han aportado a la minería moderna una herramienta de optimización para los procesos de voladura que años atrás no estaba disponible con los detonadores pirotécnicos.

El resultado de la utilización de este sistema de iniciación es que se ha obtenido grandes beneficios financieros y mayor control sobre las funciones principales y secundarias de la fragmentación de rocas, como consecuencia esto ha optimizado la productividad, carguío y recuperación del mineral. Además de ser el beneficio económico uno de los principales, también ha generado una mayor confianza en la voladura, ya que permite a los usuarios revisar la funcionalidad del sistema completo antes de disparar, de esta manera ayuda a prevenir errores en el proceso de voladura.

En ese sentido la tecnología de los explosivos, ha ido evolucionando en los últimos años, (DAVEYTRONIC, 2014) Sistema de Detonación electrónica Daveytronic SP Aplicaciones en el Perú, la conclusión es: “El equipo Davey Bickford en julio del 2012 inició pruebas del detonador Daveytronic IV en el tajo La Quinoa – Tapado Oeste en Yanacocha simulando un conjunto de escenarios, variando el tiempo entre pozos, filas, punto de inicio, dirección y desplazamiento en un ordenador con la finalidad de

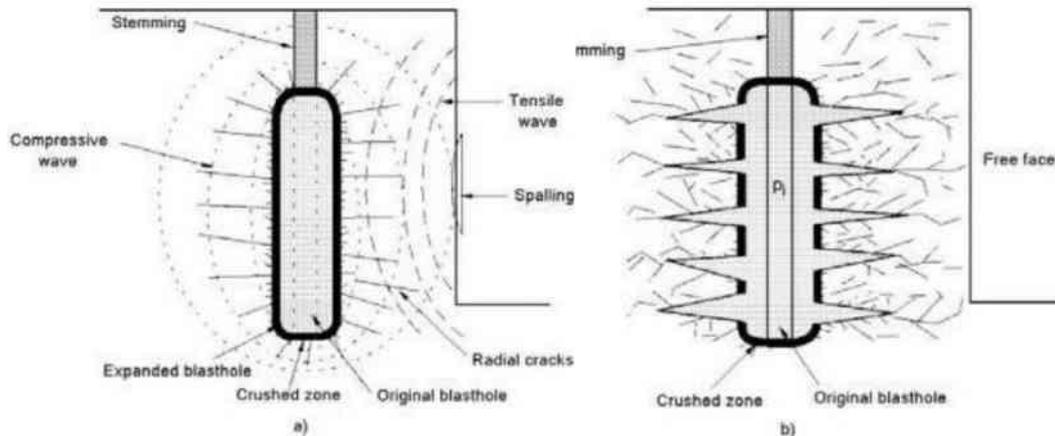
eliminar acoplamientos y demás fallas en la secuencia de detonación. En este proceso se alcanzó una fragmentación pasante al 80% de 2.60 pulgadas, tamaño característico de 3.54 pulgadas y un índice de uniformidad de 1.53 pulgadas en el frente de minado. Concluyendo que los detonadores electrónicos son una solución a los problemas de fragmentación, siendo una herramienta eficiente de control. Además, el mayor precio de un detonador pirotécnico convencional y las ventajas mencionadas van en beneficio de una reducción de costos globales en el ciclo de minado”. (Pg. 33).

La aplicación del sistema de iniciación electrónica en Perú ha traído consigo considerables mejoras en los niveles de P80, esto nos dice; (Romero Paucar, 2016) Voladura con detonadores electrónicos para optimizar la fragmentación y seguridad en el tajo Toromocho – Minera Chinalco Perú S.A. llego a la conclusión que “Los estudios realizados en la Minera Chinalco con respecto a la voladura con detonadores electrónicos permiten optimizar la fragmentación del macizo rocoso, reduciendo el P80 en la zona oeste 5%, zona este 16.7% con respecto a la voladura con detonadores pirotécnicos. Trayendo como consecuencia una mejora en la producción de 2.1% (zona oeste) y 7.0% (zona este) generando mayor rentabilidad para la mina”. (Pg. 2), de esta manera mejorando la fragmentación de la roca, se logra reducir costos en los de voladura secundaria, carguío, acarreo y chanchado.

El proceso de fragmentación del macizo rocoso en minería superficial o subterránea se da por transferencia de energía, que es producto de la aplicación del detonador electrónico DIGISHOT PLUS y un agente explosivo, que en este caso es el SANG APU 100 % gasificable. En la voladura la onda de choque y la presión del gas liberado colaboran en la fragmentación de roca.

Figura 1

Propagación de onda de choque y expansión de gas



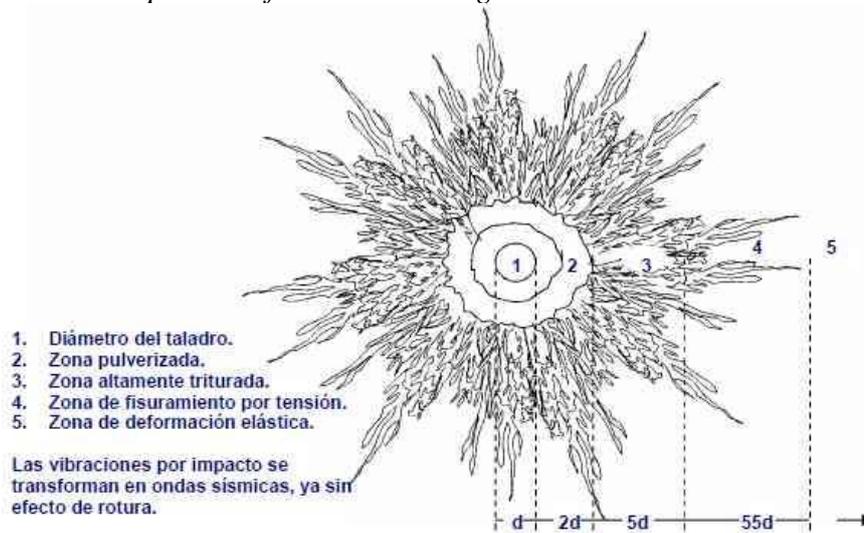
Fuente: Scoot (1996).

En el proceso se encuentran dos fases, las ondas de choque que producen un impacto fuerte en las paredes del hoyo perforado, y la liberación y expansión de los gases que son producto de la explosión, (EXSA, 2015) nos dice lo siguiente con respecto al fracturamiento de rocas: “ La fragmentación de las rocas por voladura comprende a la acción de un explosivo a consecuente respuesta de la masa de roca circundante, involucrando factores de tiempo, energía, ondas de presión, mecánica de rocas y otros, en un rápido y complejo mecanismo de interacción.” (Pg. 15); estas ondas liberadas en tiempos relativamente cortos más la expansión del gas dentro de un taladro son las encargadas de fragmentar el macizo rocoso a un tamaño óptimo de P80.

La detonación del explosivo y la generación de la onda de choque, que esta a su vez transferida hacia las paredes de la masa rocosa para que se dé inicio al agrietamiento, en seguida la liberación y expansión de los gases a alta presión y temperatura provocarán el fracturamiento y movimiento de la masa rocosa, para que al final quede apilada y pueda ser cargada y trasladada hacia el pad de lixiviación.

Figura 2

Rotura radial por transferencia de energía



Fuente: EXSA (2015)

La medición de la fragmentación se realiza para analizar el ciclo de carguío pala-camión; mediante la granulometría, esta es medida mediante imágenes con el sistema PortaMetrics que es el encargado de arrojar los resultados del análisis de fragmentación. PortaMetrics está compuesto por una Tablet portátil que utiliza imágenes 3D estereoscópicas y un sistema de procesamiento que proporciona información precisa sobre la fragmentación.

Este sistema es fácil de usar y posee tres cámaras de alta resolución, el operador selecciona la zona de interés a analizar, toma la fotografía, y los resultados se muestran al instante mediante una interfaz gráfica. La principal ventaja de este sistema es que el personal ya no necesita ir a oficina a ingresar a un software los datos tomados en campo.

Figura 3

PortaMetrics

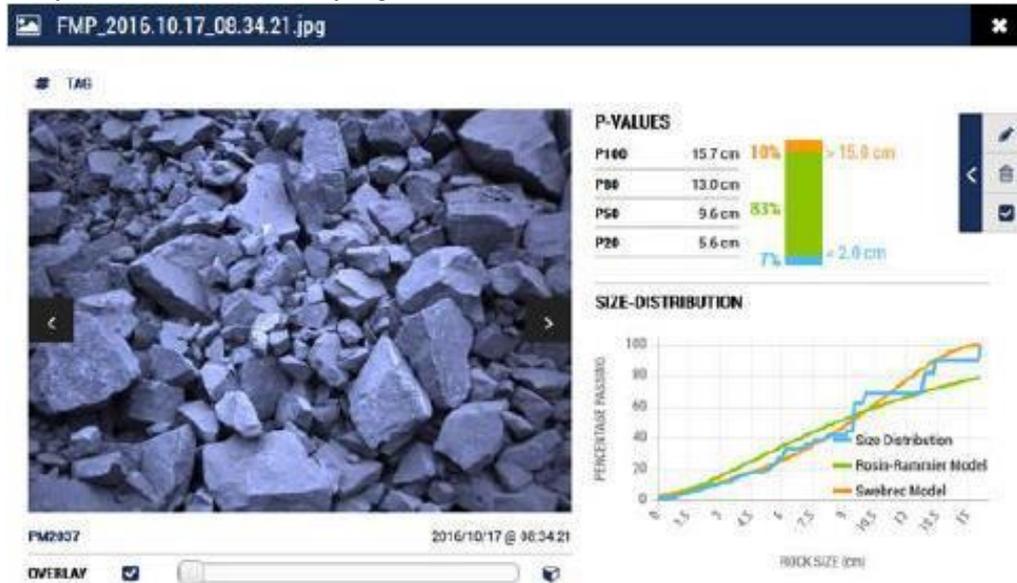


Fuente: Mining technology

Por su parte, (Mining Technology, 2017) nos dice que el sistema PortaMetrics “Genera instantáneamente informes que incluyen gráficos de distribución del tamaño de la roca, estadísticas de rango de tamaño, medidas de pendiente y más. El GPS integrado asocia las imágenes capturadas con voladura específicas, mientras que la conectividad MetricsManagePro permite compartir de forma remota los resultados de la fragmentación.”, de esta manera contribuyendo en la optimización de tiempos en el análisis de fragmentación de las rocas.

Figura 4

Plataforma del análisis de fragmentación



Fuente: Mining technology

Para que el proceso de voladura se inicie, de la manera correcta es indispensable el uso de técnicas y medios adecuados que nos permitan dar inicio al proceso de detonación de los explosivos, y como consecuencia se pueda obtener una buena fragmentación de la masa rocosa.

Los detonadores son los encargados de dar inicio a los altos explosivos, estos detonadores a diferencia de los detonadores eléctricos o no eléctricos es que la pasta pirotécnica que se encarga de determinar el tiempo de retardo ha sido reemplazada por un circuito electrónico, en el cual, un micro chip es el encargo de realizar de energía de un condensador en el instante deseado.

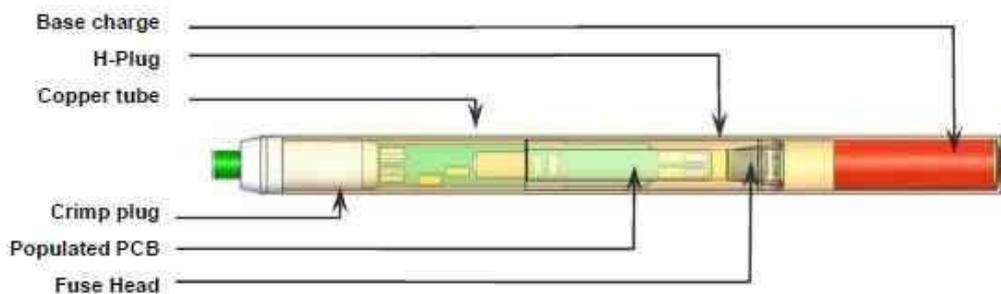
Este tipo de detonadores están constituidos de tal manera que, una capsula metálica de

aluminio cerrada en un extremo, que permite que en su interior se encuentre un condensador, un chip, un inflamador, un explosivo iniciador o primario, y un explosivo base o secundario, la principal característica de estos detonadores es la seguridad y precisión.

Los detonadores se activan instantes antes de su detonación mediante una corriente eléctrica codificada para su iniciación, («Explosivos industriales», 2016) nos dice que: “Se pueden programar con un tiempo de retardo de 1 a 14000 ms. en intervalos de 1 ms, con este tipo de detonadores no existen los conectores ya que el retardo de cada barreno viene determinado por su detonador”. Esto nos permite mayor precisión en los retados, además nos permite obtener una voladura de acuerdo a nuestro diseño, permitiendo controlar las vibraciones, ruido, despeamientos y lo más importante que es el tamaño óptimo de fragmentación de la masa rocosa.

Figura 5

Componentes de un detonador electrónico



Fuente: Digishot Plus 4G (2018)

Estos detonadores son la última innovación para los sistemas de iniciación de voladuras, siendo una de las principales diferencias de los otros tipos de detonares que la pasta pirotécnica que determina el tiempo de retardo ha sido reemplazada por un

circuito electrónico.

Por su parte, se cuenta con un gran aliado para realizar con éxito la fragmentación del material en el proceso de voladura; SANG APU como agente explosivo está lleno de ventajas a comparación de otros agentes, obteniendo una mejor granulometría y factor de potencia en menor tiempo.

Figura 6

Agente de voladura SANG APU



Fuente: Propia

Este explosivo está hecho a base de una emulsión gasificable la cual está formada por una solución oxidante; asimismo, puede ser sensibilizada antes del carguío con la solución gasificante para que la explosión sea menos densa, viscoso y resistente al agua. SANG APU se ha diseñado para ser utilizada en minería superficial; otro de sus beneficios es que puede ser cargado mediante bombeo o gravedad; por otro lado, también puede utilizarse en distintas condiciones en la que se encuentre el terreno y cualquier tipo de roca.

Como otras de sus beneficiarias características se puede decir que es seguro trabajar

con él, ya que cuando este se sensibiliza y antes de ingresar en los taladros es un producto no explosivo; no obstante, una vez cargados esta desarrolla toda su energía, gracias a que al cargar los taladros las columnas explosivas se acoplan por completo.

Las principales características de SANG APU se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 1

Características técnicas del agente explosivo SANG APU

Densidad relativa de la matriz (g/cm ³)	1.32±3%
Densidad relativa de la matriz sensibilizada (g/cm ³)	0.80 a 1.20
Viscosidad de la matriz en condiciones normales, (cP)	Min. 12 000
Velocidad de detonación de la matriz sensibilizada (m/s)	4 600 a 5 800
Presión de detonación (kbar)	51 a 98
Energía (kcal/kg)	805
Volumen normal de gases (L/kg)	1 025
Potencia relativa en peso (%)	90
Potencia relativa en volumen (%)	152
Resistencia al agua	Excelente
Categoría de humos	Primera
Diámetro crítico (mm)	76 (3 pulgadas)
Tiempo de permanencia en el taladro (días)	7

Fuente: Famesa

El SANG es un explosivo con resistencia al agua, lo que indica que puede detonar en taladros donde haya presencia de agua, presenta una velocidad de detonación muy elevada en comparación al ANFO y ANFO pesado, esto esta medido por el VOD que es la rapidez con la que una onda de choque viaja por la columna del explosivo, la cual

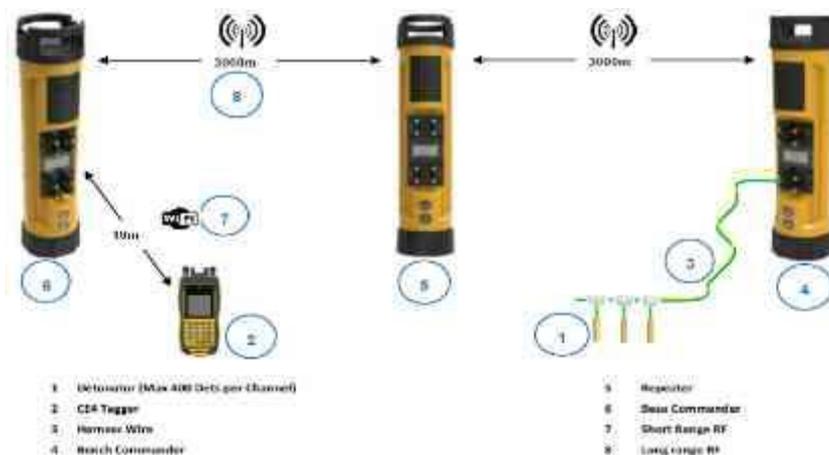
es de consideración importante para el barrenado; esta puede depender de la densidad, componentes, tamaño de partículas y grado de confinamiento. El aumento de la velocidad de detonación puede deberse al incremento del diámetro de la carga o confinamiento, así como también la disminución del tamaño de partículas.

El VOD se puede medir tanto en pruebas de laboratorio como en pruebas de campo; para la segunda se coloca un cable coaxial y un cable resistivo de resistencia calibrada a lo largo del barrenado cortocircuitado en su extremo inferior, este cable va conectado al microtrap, que se encargara de realizar la medición del tiempo que tarde en quemarse dicho cable,

Digishot Plus, es un sistema de iniciación electrónico para voladuras, que pertenece a la empresa Dyno Nobel, este sistema presenta una precisión en los tiempos de retardo exacta, y tiene un diseño que permite que sea utilizado en cualquier condición climática, este sistema es completamente programable y tiene una interfaz muy amigable debido a su fácil manipulación.

Figura 7

Sistema de iniciación electrónico Digishot Plus 4G



Fuente: Digishot Plus 4G (2018)

El sistema de iniciación consta de dos dispositivos principales, Digishot Plus 4G Commander y CE4 Tagger; la unidad commander es configurable como bench commander que sería utilizada para la conexión de detonadores, o también puede ser configurada como base commander que se utiliza para comunicarse de forma remota con un bench commander, otra aplicación del commander es la de repetidor de frecuencia, que serviría para aumentar el alcance de voladura remota.

El CE4 tagger es un dispositivo utilizado en el banco para probar los detonadores y asignar los tiempos de retardo, este tagger permite conectarse de forma inalámbrica a la base commander, para poder realizar un testeo rápido de todos los detonadores conectados al bench commander, una vez realizado el testo este tagger nos permite dar inicio a la voladura.

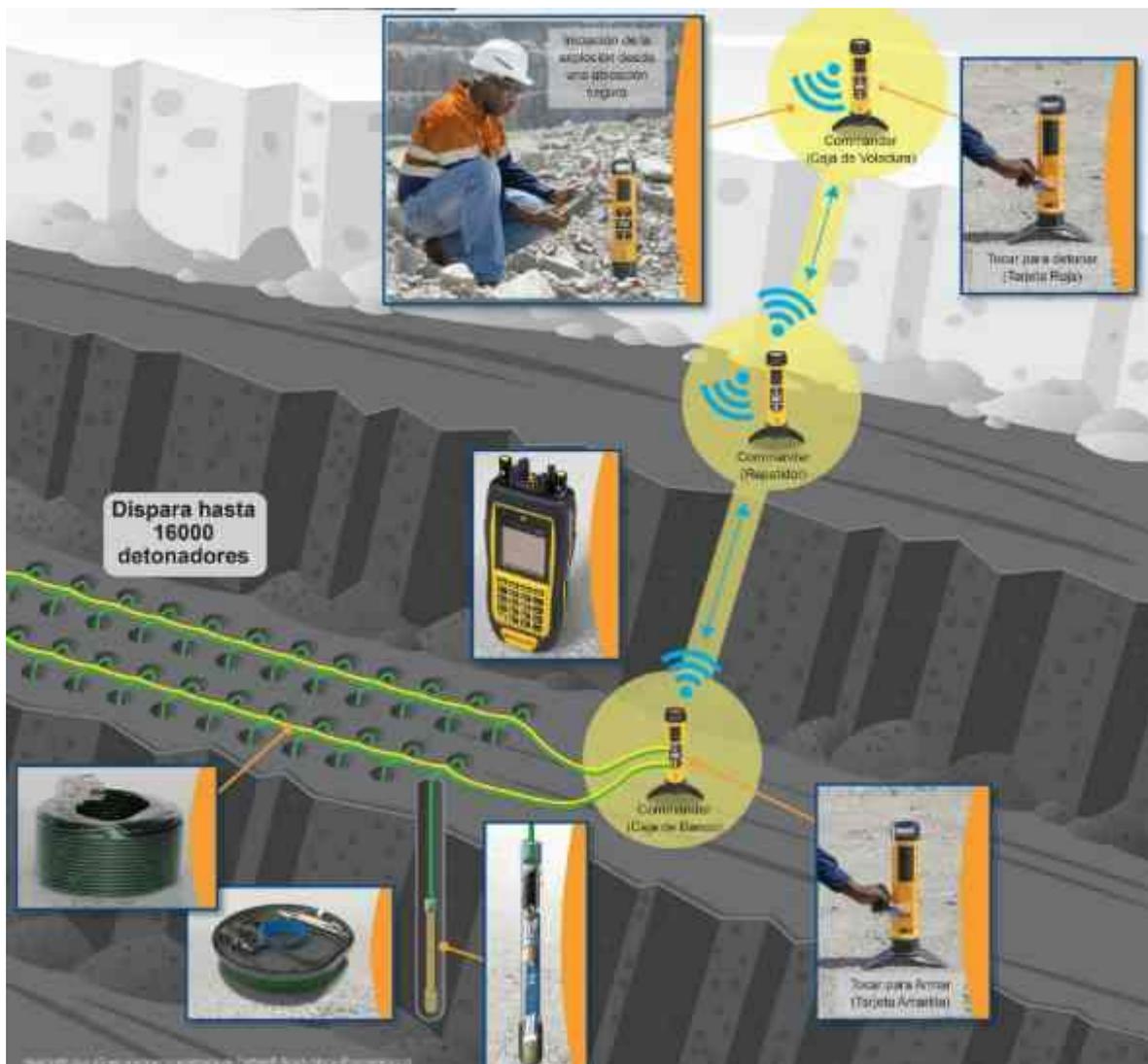
En tal sentido (Dyno Nobel, 2018) nos dice que el: “El nuevo sistema de iniciación DigiShot Plus 4G de Dyno Nobel es el líder del mercado de tecnología avanzada para tronadura que garantiza la mejor explosión, a tiempo y en cada ocasión. Ahora, el sistema es conocido por su facilidad de uso, lo que se traduce en una rápida implementación y programación que, a su vez, eliminan los costosos retrasos en la tronadura.” Reafirmando así de esta manera lo fácil que es el uso de este sistema y también lo importante que es el proceso de la fragmentación de las rocas.

El sistema posee grandes ventajas, entre ellas podemos encontrar: la verificación automática de los detonadores a través del tagger para asegurar su conformidad con la capacidad de diseño; monitoreo de energía del detonador directo hasta el punto de la voladura, detección autónoma y prueba de los detonadores antes de cada voladura,

velocidad de programación más rápida que los sistemas actuales, el proceso de voladura es controlado de forma inalámbrica, ubicación por coordenadas GPS del detonador.

Figura 8

Diagrama de disparo con Digishot Plus 4G



Fuente: Digishot Plus 4G (2018)

El sistema de iniciación electrónico Digishot Plus 4G, permite realizar voladuras hasta con 1600 detonadores electrónicos de manera independiente, estos detonadores se

conectan directamente al equipo de voladura. Este sistema puede ser operado a una distancia máxima de 3000 m siempre y cuando sea visible, de lo contrario permite repetidor opcional para aumentar la capacidad de disparo remoto.

La asignación de los tiempos de retardo de disparo es asignada ya sea de manera automática en el software View Shot (software de diseño de tiempo) o manualmente, seleccionando los tiempos de retardo por cada detonador, el tiempo de retardo puede ser modificado en cualquier etapa hasta el momento de la voladura, con este sistema ya no es necesario volver al lugar donde se instaló el detonador.

Tabla 2

Características del sistema de iniciación electrónico DigiShot Plus

Gran capacidad de explosión
Disparo remoto
Flexibilidad en el diseño de la explosión
Capacidad total de pruebas
Método de implementación de "etiquetado por plano" fácil y sencillo.
Verificación automática del Tagger de que los detonadores por canal se encuentran en conformidad con la capacidad de diseño.
Monitoreo de energía del detonador directo hasta el punto de tronadura.
La velocidad de programación es 7 veces más rápida que en los sistemas actuales.
Proceso de tronadura controlado de forma inalámbrica a través del Tagger CE4
Posición del orificio del detonador en el banco simplificada, mediante la ubicación por GPS del detonador almacenado en el Tagger CE4
Longitud máxima de cableado por canal de 16 000 m

Fuente: Dyno Nobel (2018)

El sistema es compatible con una computadora o laptop, para poder descargar los diseños de voladura realizados mediante un software, estos diseños son debidamente

simulados para poder tener un diseño adecuado en la carga de cada talador, y así se pueda llegar a obtener los objetivos deseados durante el proceso de voladura. Este sistema tiene diversos veneficios, que están descritos en la síguete tabla.

Tabla 3

Beneficios del sistema de iniciación electrónico DigiShot Plus

Mayor control	De Vibración, producción de la trituradora, la estabilidad de la pared vertical, eficiencia operativa.
Fácil de usar	El software accionado por menú minimiza el tiempo de capacitación del usuario final. El proceso de conexión es más rápido porque el plazo del retraso puede ingresarse con anticipación.
Los componentes simplifican el uso	Tan solo el detonador electrónico en el pozo se engancha fácilmente a la línea de 2 cables en la superficie
Convivencia	Los patrones y la sincronización de las explosiones pueden programarse con anticipación o el día del disparo, lo que sea más conveniente.
Secuencia de retraso automática o programable	Seleccione la sencilla programación automática para ahorrar tiempo y reducir los errores o el modo manual programable para ajustar virtualmente cualquier esquema de retraso.
Seguridad	Los dinamiteros están protegidos por contraseña y requieren una Clave Inteligente específica que usa una señal codificada para detonar la explosión

Fuente: Area de Geología empresa minera

Estos son los beneficios del sistema de iniciación electrónico DigiShot Plus, lo que ayuda a la empresa minera en la reducción de tiempo, costos, en el proceso de voladura, también al ser un sistema más controlado no malogra la pared de los bancos dando mayor estabilidad a los mismos.

Para poder conseguir los resultados deseados es muy importante la información geológica, es por eso que se realiza un estudio de los detritus de las mallas de perforación, estos análisis están en relación a dureza de la roca, de esta manera nos permite realizar un adecuado diseño de la carga, que aportara la energía suficiente para

obtener una fragmentación adecuada de la roca.

De acuerdo a la información proporcionada por el área de geología el proyecto se encuentra emplazado en las siguientes alteraciones: Argílico, Argílico Avanzado y salificación moderada, la dureza de la roca corresponde a las alteraciones presentes en el tajo; Dureza I, Dureza II y Dureza III para cada una de las alteraciones respectivamente.

Los factores de roca y resultados de fragmentación máximos y mínimos obtenidos para cada dominio geotécnico presentes en el tajo de estudio se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 4

Resultados de fragmentación para cada dominio geotécnico

Alteración	Factor de roca (A) Max	Factor de roca (A) Min	P80 (Pulg) Max	P80 (Pulg) Min	F.P (Kg/t)
Argílico Avanzado	6.08	5.42	5.15	3.01	0.42
Argílico Moderado	4.74	4.63	5.58	1.73	0.37
Sílice moderada	6.75	6.33	4.13	2.29	0.39

Fuente: Area de Geología empresa minera

Para el análisis de la fragmentación se utilizará el modelo de Kuz Ram, que fue propuesto por Claude Cunningham (1983), utilizando funciones de Swebrec y Rosin Rammler, corregidos en los parámetros de diseño de voladura y calibrados en la distribución de fragmentación mediante el análisis de imágenes por el software Portametrics.

En la empresa minera en estudio, la estimación de la medida de fragmentación se realiza mediante el sistema PortaMetrics, el cual se basa en un análisis digital de

imágenes, la Tablet permite realizar un análisis en tiempo real; el target es de 4.0 pulgadas para el mineral.

El análisis de imágenes con el sistema portometrics proporciona una estimación de la medida de la fragmentación “X50”, índice de uniformidad “n”, siendo considerados en este caso como la base de datos experimental del modelo, el cual nos ayudara a determinar el X50 real y n real.

Correspondiente al modelo realizado por Cunningham (1983), basado en publicaciones rusas que desarrollan una relación entre parámetros de voladura y el tamaño medio de fragmentación “X50”, siendo usado extensamente alrededor del mundo. El nombre que lleva el modelo corresponde a una abreviación de los dos principales contribuyentes al desarrollo del modelo; Kuznetsov y Rosin-Rammler.

Kuznetsov desarrollo una ecuación para la estimación del tamaño promedio de fragmentado X50; basado en la energía del explosivo y en el factor de potencia. Cunningham introdujo un índice de uniformidad “n” como una función de exactitud de la perforación, la geometría de la voladura y un factor de roca “A” que es asociada con un índice de volabilidad, que es calculado de las condiciones de las juntas en el mismo sitio, también la densidad y dureza del macizo rocoso del área a volar; (Leiva Alberto, 2007) nos dice al respecto: “ Sabiendo el tamaño promedio y el coeficiente de uniformidad, la ecuación de distribución de Rosin-Rammler puede derivarse y calcularse la distribución de tamaños de fragmentos en la voladura.” (Pg. 46); de esta manera se logra determinar el modelo de Kuz Ram, que nos ayudara a determinar la ecuación del modelo predictivo de fragmentación para la mina en estudio.

El tamaño de rotura que ocurre con una cantidad conocida de explosivo, en este caso puede ser estimado por SANG APU 100% GASIFICABLE, mediante la ecuación de Kuznetsov:

Ecuación 1

Ecuación de Kuznetsov

$$X_{AV} = A \cdot \left(\frac{v_0}{Q_T}\right)^{0.8} \cdot Q_T^{\frac{1}{6}}$$

Donde:

X_{AV} : Tamaño medido de los fragmentos en (cm).

A: Factor de roca (índice de volabilidad), 7 para rocas medias, 10 para rocas duras y 13 para rocas duras débilmente fracturadas.

V_0 : Volumen de roca (M^3) que es calculado por la multiplicación de (Burden x Espaciamiento x Altura de banco).

Q_T : Masa (kilogramos) de explosivo que contiene cada taladro.

La justificación de la investigación está fundamentada, en que existe poca información sobre la fragmentación de la roca y el sistema de iniciación electrónico en la empresa minera en estudio, los resultados obtenidos en esta investigación serán de mucha ayuda para futuras investigaciones y aplicaciones de este sistema en la optimización de procesos y costos diferentes empresas mineras.

1.2. Formulación del problema

¿Cómo aplicar el sistema de iniciación electrónico Digishot plus para optimizar la fragmentación de rocas en el proceso de voladura en una empresa minera de Cajamarca-2022?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Aplicar el sistema de iniciación electrónico Digishot plus para optimizar la fragmentación de rocas en el proceso de voladura en una empresa minera de Cajamarca-2022.

1.3.2. Objetivos específicos

- Garantizar el cumplimiento de los KPIs de fragmentación del macizo rocoso que permita lograr una óptima recuperación metalúrgica en el proceso de lixiviación.
- Determinar cómo mejora el control de vibraciones mediante la aplicación del sistema de iniciación electrónico DigiShot Plus.
- Verificar si la velocidad de detonación se mantiene estable mediante la aplicación del sistema de iniciación electrónico DigiShot Plus.

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

Con la aplicación del sistema de iniciación electrónico DigiShot Plus se optimizará la fragmentación de rocas en el proceso de voladura.

1.4.2. Hipótesis específicas

- La aplicación del sistema de iniciación electrónico DigiShot Plus cumple con los KPIs requeridos para lograr una óptima recuperación metálica en el proceso de lixiviación
- La aplicación del sistema de iniciación electrónico DigiShot Plus mejora el control de vibraciones.
- La aplicación del sistema de iniciación electrónico DigiShot Plus mantiene una velocidad de detonación constante

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. Tipo de investigación

Según las características del estudio, esta investigación se considera aplicada, descriptiva ya que se enfoca en explicar detalladamente los beneficios de incorporar el sistema de iniciación electrónico DigiShot Plus en el proceso de voladura; lo cual, en efecto, es un gran avance para la industria minera. Según el enfoque es cualitativa ya que describe a detalle el uso, funcionamiento y aplicación.

Murillo (2008), la investigación aplicada recibe el nombre de “investigación práctica o empírica”, que se caracteriza porque busca la aplicación o utilización de los conocimientos adquiridos, a la vez que se adquieren otros, después de implementar y sistematizar la práctica basada en investigación. El uso del conocimiento y los resultados de investigación que da como resultado una forma rigurosa, organizada y sistemática de conocer la realidad.

Según Tamayo y Tamayo (2006), el tipo de investigación descriptiva, comprende la descripción, registro, análisis e interpretación de la naturaleza actual y la composición o procesos de los fenómenos; el enfoque se hace sobre conclusiones dominantes o sobre cómo una persona, grupo, cosa funciona en el presente; la investigación descriptiva trabaja sobre realidades de hecho, caracterizándose fundamentalmente por presentarnos una interpretación correcta.

2.2. Población y muestra

2.2.1. Población:

Todos los bancos a ser minados de la empresa minera en estudio que son considerados para la producción de mineral

2.2.2. Muestra:

El banco de minado ubicado en el nivel 3336 del tajo de la empresa minera en estudio, durante los días 21 de febrero del 2022 hasta el 26 de febrero del 2022, en dicho periodo de tiempo se realizó la voladura de un total de 149 taladros de producción.

2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos

2.3.1. Recopilación de información documental

Recopilación de información documental. En la actividad minera, el ciclo de minado es muy importante ya que se deriva en ahorro de costos y de tiempo; por ende se realizó la recopilación de información bibliográfica de fragmentación de macizos rocosos, voladura en minería superficial, agentes de voladura, detonadores electrónicos, y del propio sistema de iniciación electrónico DigiShot Plus, a la vez se obtuvo información de los diseños de las mallas de perforación, diseño de carguío de los taladros, análisis de la fragmentación que fue realizado mediando el sistema PortaMetrics, también información de control de vibraciones, y ahorros de consumo de cable, todo esto brindado por la empresa minera en estudio.

2.3.2. Análisis de datos

El análisis de datos se fue dando de manera escalonado, con cada una de las etapas del proceso de voladura, donde se realizó el diseño y simulación de la malla de perforación de 149 taladros a través del software View Shot, luego de haber obtenido el diseño óptimo se procede con la perforación en campo, para que posteriormente sean detonados, el diseño mencionado es almacenado en el CE4 Tagger ya que a través de él se realizara el monitoreó del diseño en campo, verificando que todo el amarre este realizado correctamente, que los tiempos de retardo entre taladro estén con forme a diseño; una vez todo este correcto se procede al proceso de voladura para luego realizar

el análisis de fragmentación in situ mediante el sistema Portametrics, esto es realizado mediando la toma de fotografías a todo el material fragmentado, dando a si a conocer si la voladura cumple con el P80 requerido por mina.

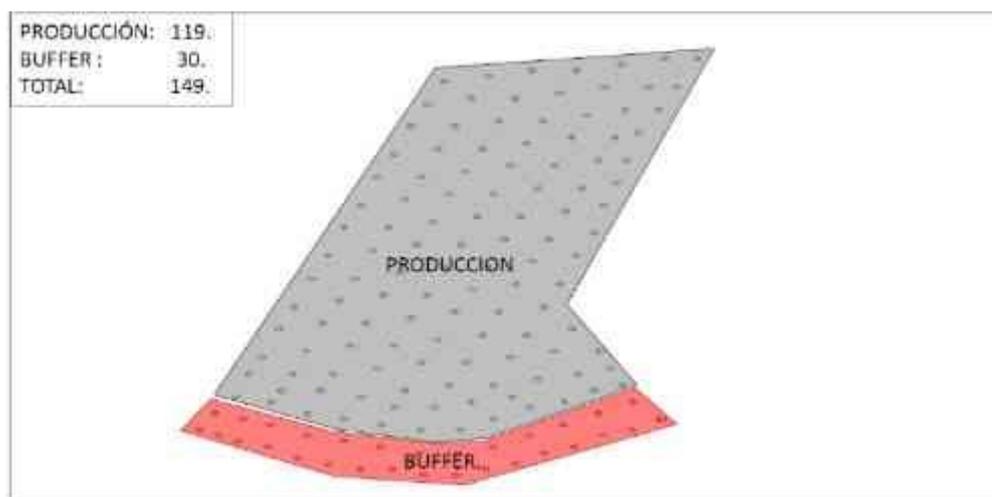
2.4. Procedimiento

El procedimiento fue realizado en dos etapas, la primera que consta de toda la recolección de información teórica sobre el sistema de iniciación electrónico DigiShot plus, además de profundizar en el uso y aplicación del sistema PortaMetrics.

La segunda parte es en la que se llevó a cabo el procesamiento de datos, donde se realizó el diseño de la malla de perforación de un total de 149 taladros de los cuales fueron 119 taladros destinados a la producción de mineral y los 30 restantes son de BUFFER, de los cuales los 119 taladros tienen su propio diseño de carga, en los 30 restantes existe dos diseños de carga.

Figura 9

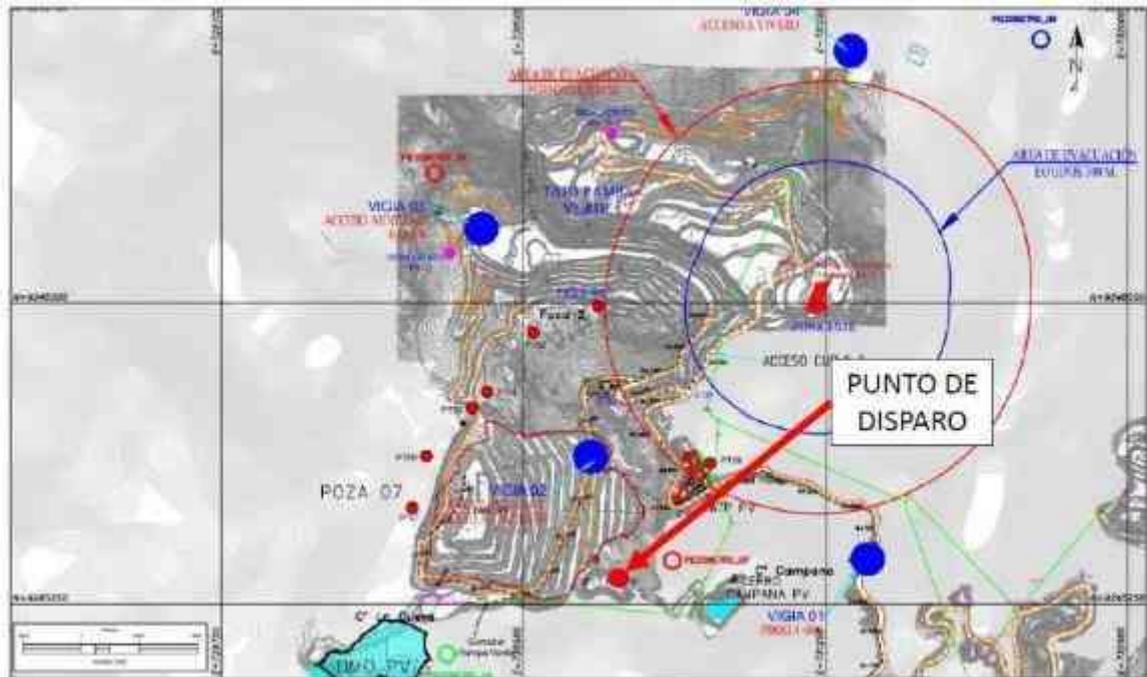
Diseño de la malla de perforación



Fuente: Empresa minera

Figura 10

Ubicación del punto de disparo del banco 3336 - 033



Fuente: Empresa minera

En el estudio se realizó el disparo de un total de 149 taladros, debidamente diseñados y simulados, con su secuencia de detonación, diseño de movimiento de material, diseño de cargas.

Figura 11

Imagen pre voladura del banco 3336 - 033



Fuente: Propia

El diseño de la malla de voladura tiene los siguientes parámetros:

Figura 12

Parámetros del diseño de la malla de perforación

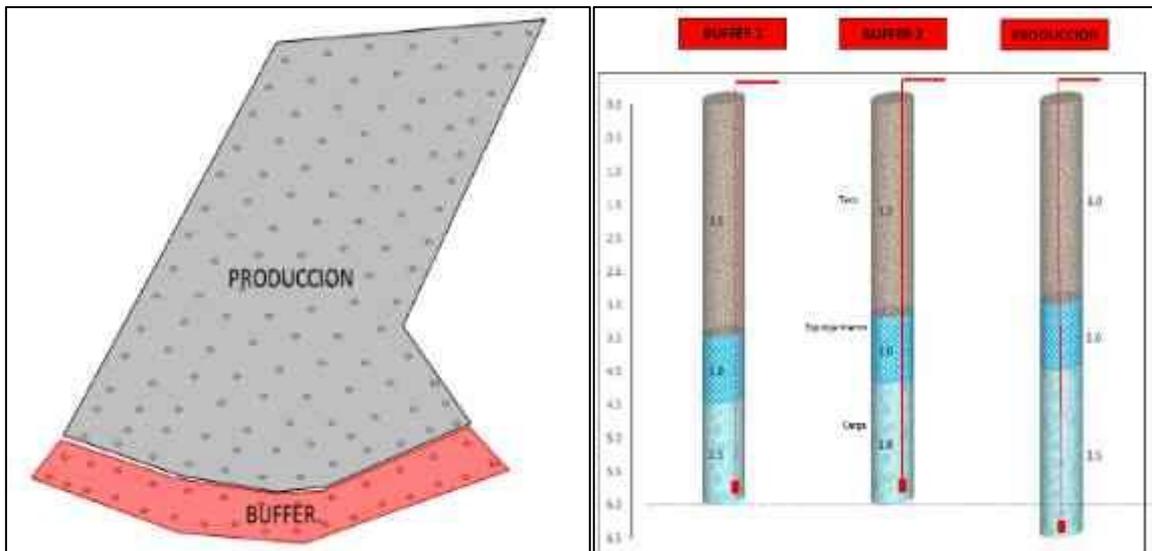
Diseño de Perforación			
Parámetros	Buffer 1	Buffer 2	Producción
Burden (m.)	3.0	3.5	4.2
Espaciamiento (m.)	3.5	4.0	4.8
Diámetro (pulg.)	6 ¾	6 ¾	6 ¾
Altura de banco (m.)	6	6	6
Sobreperforación (m.)	0.5	0.5	0.5
Tipo de Malla	Triangular	Triangular	Triangular

Fuente: Area de voladura empresa minera

En el diseño se presentan 3 tipos de diseño de taladros, 2 de Buffer y 1 de producción, donde todos los taladros tienen el mismo diámetro de perforación 63/4", el tipo de malla es triangular o diamante, esto debido a que no existe una cara libre hacia donde se pueda desplazar el material fragmentado, todos los 149 taladros tienen una sobre perforación de 0.5 metros, además de contar con un Burden y espaciamiento específico ya sea para Buffer 1, Buffer 2 y producción.

Figura 13

Diseño de carga



Fuente: Area de voladura empresa minera

Los taladros correspondientes al buffer están divididos en 2 líneas, y están diseñados con menos carga explosiva, esto es para reducir el impacto contra el talud, este buffer servirá como filtro para el tren de energía; los taladros de producción tienen aproximadamente 2.5 metros de carga explosiva con un esponjamiento aproximado del explosivo de 1 metro.

El día 21 de febrero del 2022 se realizó la voladura del proyecto 3336 – 033 – PV, de la malla de producción con un total de 149 taladros, y 151 detonadores Intelli Shot 4G, de los cuales 2 taladros fueron cargados con doble prima, dicho proyecto con diseño de salida tipo “Diamante”, usando una secuencia de 13 ms entre taladros y 110 ms entre filas, con el sistema de iniciación electrónico DigiShot Plus, registrándose la detonación total de los taladros programados.

Figura 14

Registro de consumos

FECHA	21-02-22
PROYECTO	3336-033
TAJO	

N° DE TALADROS	149
N° DE DETONADORES INTELLISHOT	151
N° DE DETONADORES NO ELECTRICOS FANEL	151
CABLE JUMPPER (m)	260
N° DE BOOSTER	151
BURDEN (m)	4.20
ESPACIAMIENTO (m)	4.10

Fuente: Area de voladura empresa minera

El proyecto fue cargado con emulsión SANG APU al 100% y un Booster de 1 Lb, los taladros fueron cargados de acuerdo al diseño aprobado. Los taladros de Buffer llevan una carga de 75 kg de agente explosivo, y los taladros de producción llevan una carga de 100. El agente fue cargado con una densidad de 1.10 gr/cm³.

La densidad del explosivo varía de acuerdo a la dureza de la roca, en este la voladura se realizará en una roca no muy competente, por ende, él tiene un mayor esponjamiento, pero menor capacidad explosiva, se le agrega un aproximado de 0.92 a 0.95% de nitrito para obtener una densidad aproximada de 0.90 g/cm³.

Figura 15

Control de densidad de SANG APU



Fuente: Propia

La densidad promedio inicial y final obtenida en la emulsión SANG APU, del proyecto 33336 – 033 – PV fue de 1.301 g/cm³ al inicio de la medición y 0.91 g/cm³ al finalizar el control final de la densidad, este proceso de llevo a cabo en un lapso de 20 minutos.

Figura 16

Control de densidades.

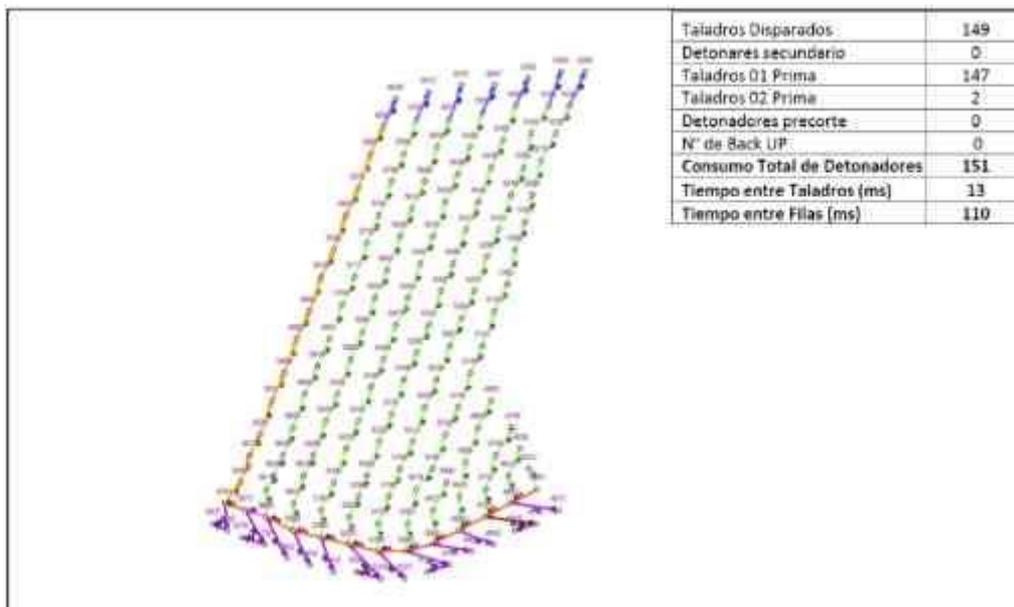


Fuente: Area de voladura empresa minera

El amarre de los detonadores electrónicos realizado de acuerdo al diseño de la malla, siguiendo una secuencia de salida para la detonación y para el desplazamiento del mineral.

Figura 17

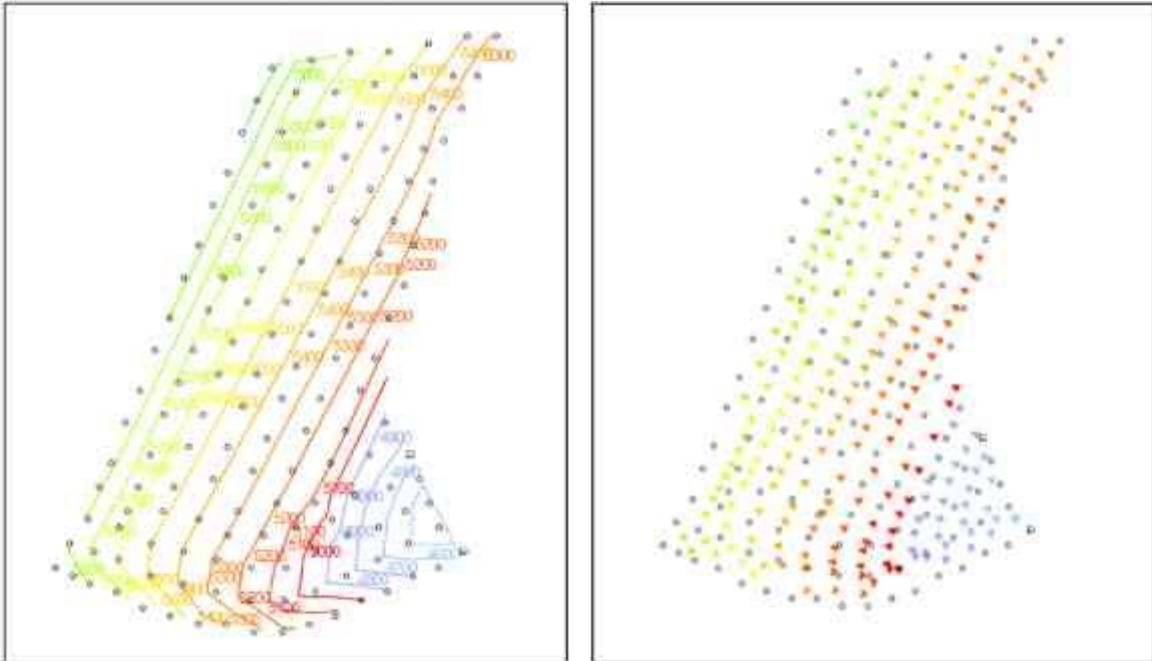
Diseño de amarre y secuencia de salida



Fuente: Area de voladura empresa minera

Figura 18

Líneas de isotiempo y desplazamiento del material



Fuente: Area de voladura empresa minera

En campo se procede al amare de acuerdo al diseño, donde se utilizó aproximadamente 800 metros de cable; 151 detonadores electrónicos y 1 Booster.

Figura 19

Detonador electrónico



Fuente: Propia

Figura 20

Booster



Fuente: Propia

Figura 21

Conexión del detonador electrónico en superficie



Fuente: Propia

Los detonadores son conectados en superficie con el cable de amarre, este es un cable de 0.63 mm de espesor, que cumple la función unir cada uno de los detonadores en superficie y luego llevar hasta el commander. Para la conexión con la base commander el recorrido de este cable no debe exceder los 2500 metros

Figura 22

conexión de detonadores con Commander



Fuente: Propia

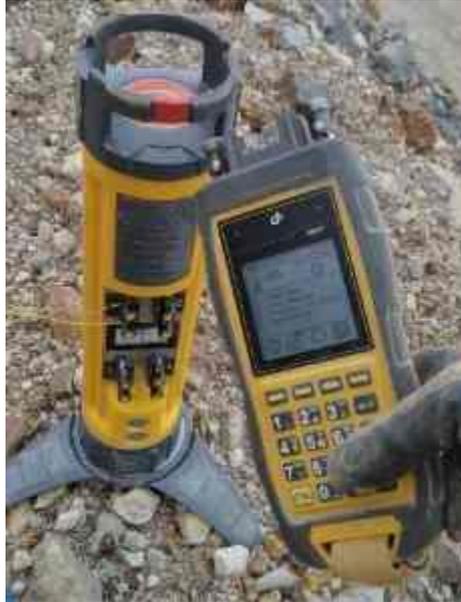
Teniendo el amarre completado y la conexión a la base commander, se procede a realizar el testeado del correcto amarre con el CE4 Tagger. Aquí se puede verificar si el amarre está correcto, que todos los detonadores electrónicos estén conectados a la base.

Es en esta etapa del proceso donde se agregan los retrasos a cada uno de los detonadores electrónicos, esto de acuerdo al diseño de la malla. También se procede al testeado de conformidad de los 151 detonadores electrónicos, una vez finalizado el testeado mencionado, obtendremos los resultados de bench commander, donde indicara el número de detonadores conectado, numero de error encontrados. Si todo está

conforme se dispone de 3 horas para proceder a realizar la voladura.

Figura 23

Inicio de testeo



Fuente: Propia

Figura 24

Reporte Bench Commander

BLAST REPORT

Date: 2022-02-21
 Blast Supervisor:
 Blast Site:
 Notes: P1136-031_PV

4G Ce4 Commander
 Box Serial Number: 1530002FA
 Blast Time: 2022-02-21 12:27:27
 Detonators In List: 151
 Errors: None

Electrical Characteristics:

Channel	Wire Length	Max Voltage	Max Current	Max Leakage
1	2265 m	25 V	2.05 mA	0.395 mA
2	0 m	25 V	0.41 mA	0.351 mA
3	0 m	25 V	0.41 mA	0.351 mA
4	0 m	25 V	0.488 mA	0.41 mA

Fuente: Area de voladura empresa minera

Estando todo con forme se procede al disparo de la malla. Para proseguir con el análisis de la fragmentación mediante el sistema PortaMetrics.

Figura 25

Sistema de análisis PortaMetrics



Fuente: Propia

En el proceso de voladura no hubo evidencia de gases nitrosos, también se realizó el monitoreo de vibraciones mediando un GEOFONO instalado en el mirador este 3427, además el registro de VOD se encuentra dentro del rango establecido para las densidades del producto y diámetro del taladro. Se observo un buen esponjamiento del material volado, además de apreciarse una buena fragmentación superficial.

Figura 26

Imagen post voladura



Fuente: Propia

CAPÍTULO III. RESULTADOS

Según la obtención de datos para el problema presentado, el cual está fundamentado; ¿Cómo aplicar el sistema de iniciación electrónico Digishot plus para optimizar la fragmentación de rocas en el proceso de voladura?; se obtuvo diversos resultados en la utilización de este sistema, dichos resultados son muy beneficios para la empresa minera ya que mejora de una manera muy significativa el proceso de voladura dando una fragmentación mucho más homogénea de P80 que mina requiere, esto por consecuencia produce una mejor eficiencia en el ciclo de carguío, y también una mejor recuperación metalúrgica en el los pads de lixiviación

3.1. Análisis de fragmentación

Se procedió al análisis de fragmentación del material volado del proyecto 3336 - 033 - PV, realizado el día 21 de febrero del 2022, que fue llevada a cabo dentro del horario establecido y no ubo presencia de contratiempos. Este análisis fue desarrollado durante los días 21 de febrero al 26 de febrero del 2022

La muestra analizada el día del disparo del proyecto 3336 - 033 - PV, es de 4 fotos, mediante el sistema PortaMetrics, el resumen de reportes diarios se muestra en los anexos del 1 al 10. El análisis de fragmentación se muestra en el siguiente reporte; como menciona anteriormente, existe buena fragmentación, con el 69.7 % de material fragmentado cumpliendo con el target de P80 requerido por la planta de lixiviación, solo el 10.3 % excede el tamaño del target, y el 20 % está por debajo del P80 requerido. Dando como resultado una buena fragmentación con la aplicación del sistema de iniciación electrónico DigiShot Plus.

Figura 27

Gráfico de tamaño de distribución del material fragmentado



Fuente: Area de voladura empresa minera

El P80 que arrojo el análisis de fragmentación es de 3.35 pulgadas, demostrando una mejora significativa con la aplicación de este sistema de iniciación, ya que antes de esta aplicación se no obtenía una buena fragmentación, porque los niveles de P80 eran superiores a las 10 pulgadas.

Figura 28

Análisis de fragmentación mediante la aplicación del sistema PortaMetrics.

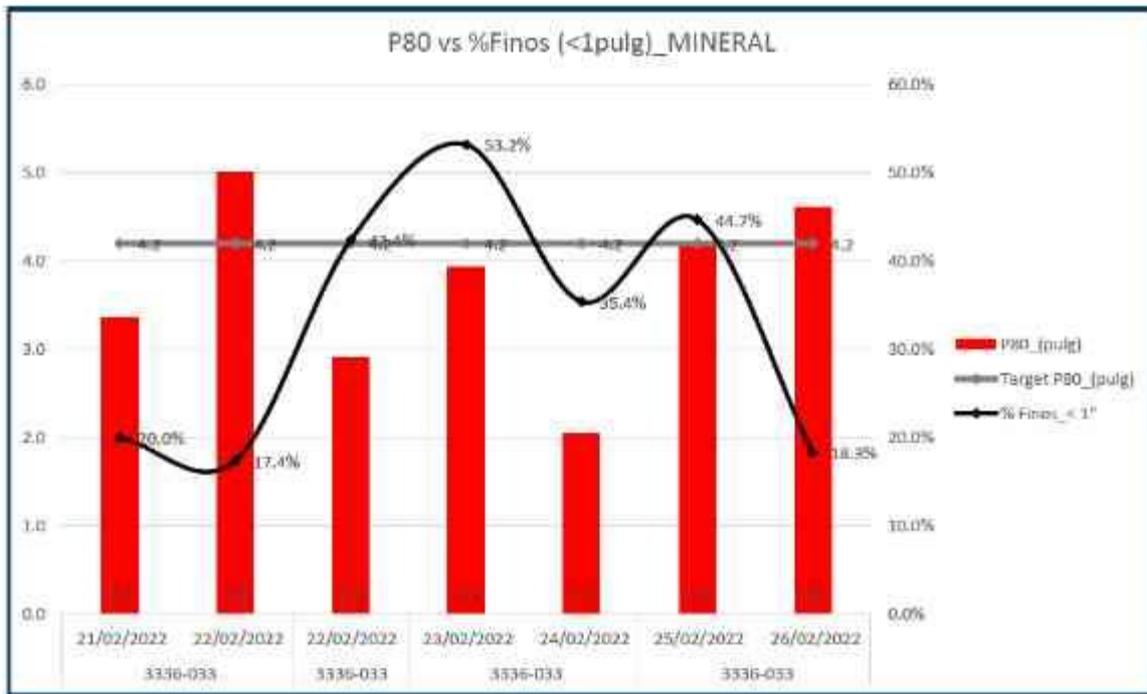


Fuente: Area de voladura empresa minera

El análisis se desarrolla mediante la toma de fotografías en el frente de minado, el sistema Portametrics es el encargado de realizar el análisis del material fragmentado mediante el modelo predictivo de Kuz-Ram, este a partir de los parámetros de voladura y la granulometría requerida.

Figura 29

Gráfico resumen - Mineral



Fuente: Area de voladura empresa minera

El P80 que mina requiere para el pad de lixiviación es de 4.2 pulgadas, por lo tanto, podemos observar que los días 22 y 26 son los únicos que el análisis arroja una fragmentación superior a lo que mina requiere.

Figura 30

Cuadro resumen de análisis de fragmentación del 21 al 26 de febrero del 2022.

Fecha de análisis	Equipo	Tajo	Proyecto	Tipo de Material	Nro. De fotos	Xc (pulg)	n	% Finos < 1"	P20 (pulg)	P50 (pulg)	P80 (pulg)	P90 (pulg)	Xmax (pulg)
21/02/2022	RE-1165-AL	PV	3336-033	MINERAL	4	2.77	1.638	20.00%	1.02	2.13	3.35	4.06	7.56
22/02/2022	RE-1165-AL	PV	3336-033	MINERAL	4	3.79	1.732	17.40%	1.22	3.07	5.00	5.94	8.54
22/02/2022	EXC-59	PV	3336-033	MINERAL	4	1.70	1.080	42.40%	0.35	1.34	2.91	3.86	7.44
23/02/2022	EXC-59	PV	3336-033	MINERAL	4	0.75	0.618	53.20%	0.08	0.83	3.94	5.59	7.8
24/02/2022	EXC-59	PV	3336-033	MINERAL	4	1.28	1.476	35.40%	0.71	1.31	2.05	2.48	4.92
25/02/2022	RE-1165-AL	PV	3336-033	MINERAL	4	1.33	0.639	44.70%	0.12	1.38	4.21	5.59	8.07
26/02/2022	RE-1165-AL	PV	3336-033	MINERAL	4	2.69	1.224	18.30%	1.14	2.76	4.61	5.63	9.53

Fuente: Area de voladura empresa minera

Teniendo ya los resultados de análisis de fragmentación, y obteniendo buenos

resultados en comparación a años anteriores de voladura donde los niveles de P80 superaban las 9 pulgadas, el sistema de iniciación electrónico nos permite realizar voladura más controladas para la fragmentación, vibración y velocidad de detonación.

3.2. Análisis de vibraciones

Para el análisis de control de vibraciones, se realiza el control de tiempos mediante onda elemental, el monitoreo se realizó el 21 de febrero en el proyecto 3336 – 033 – PV, en zona de mineral donde se obtuvo 1 onda elemental, que fue analizada mediante el empleo un software “VPP Calculo de VPP, Max frecuencia” para el análisis de la onda elemental, obteniendo el siguiente resultado.

Figura 31

Cuadro resumen de análisis de onda elemental

P3336-033 PV	
Distancia de OE (m)	Tiempo de retardo(ms)
70	14

Fuente: Area de voladura empresa minera

Según el análisis de onda elemental el tiempo de retardo optimo entre taladros para un debido atenuamiento de vibraciones debe de estar entre 13 a 15 ms. La prueba fue se realizó en el proyecto 3336 – 033 – PV donde se instaló un geófono cercano a la malla (70m). Para la debida evaluación se tuvo un taladro aislado, con una ventana de tiempo de 1000 ms, para obtener un buen registro de onda elemental.

Figura 32

Ubicación del geófono

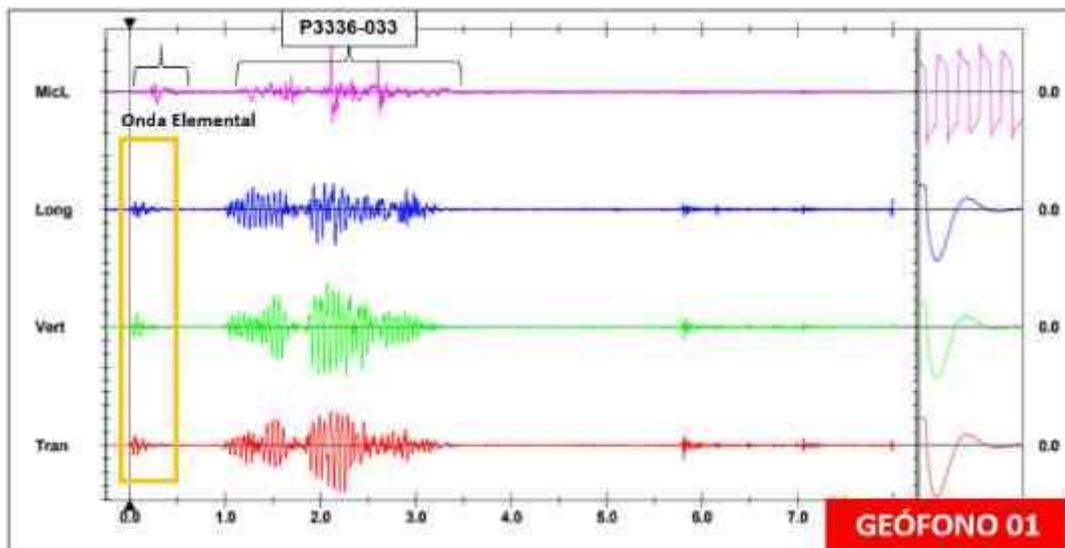


Fuente: Propia

Para el análisis de onda elemental se consideró un evento de un solo geófono, donde se pudo evaluar una onda elemental en sus tres ejes.

Figura 33

Registro de vibraciones



Fuente: Area de voladura empresa minera

En la En la tabla se muestran los resultados del análisis de onda elemental desde los 10 ms a los 40 ms, los menores valores de VPP asociados a sus tiempos de retardo son:

Figura 34

Análisis de onda elemental a 70 metros

Tiempo entre Taladro (ms)	LONG VPP (mm/s)	VERT VPP (mm/s)	TRANS VPP (mm/s)	PROMEDIO VPP (mm/s)
10	7.32	9.13	7.25	8.01
11	6.33	9.54	9.25	8.37
12	7.27	8.92	7.74	7.61
13	7.57	8.18	6.89	7.58
14	6.98	7.90	7.01	7.30
15	7.70	8.17	8.79	8.06
16	9.14	7.93	8.34	8.46
17	10.42	9.17	6.43	8.67
18	11.17	7.83	7.87	
19	9.64	12.57	11.18	11.19
20	8.44	11.29	10.69	12.14
21	7.51	15.88	16.48	13.29
22	6.87	12.55	13.65	11.08
23	8.52	9.92	11.11	9.98
24	9.09	7.85	11.93	9.62
25	8.83	7.02	12.36	9.39
26	10.35	8.15	12.45	10.32
27	11.74	9.71	12.18	11.21
28	12.67	8.50	12.84	11.33
29	13.54	7.03	13.50	11.36
30	14.07	6.81	13.36	11.40
31	12.72	8.14	11.96	10.94
32	12.06	8.43	9.93	10.14
33	11.61	8.73	9.67	10.00
34	10.94	8.49	9.64	9.68
35	11.89	7.99	9.53	10.30
36	14.21	8.41	9.58	10.73
37	14.06	8.38	9.71	10.77
38	13.33	9.24	9.96	10.84
39	12.97	9.37	11.34	11.23
40	12.08	9.68	12.72	11.48

Fuente: Area de voladura empresa minera

Tabla 5

Mejores resultados para análisis de vibración

Longitudinal	6.33 mm/s para un tiempo de 11 ms
Vertical	6.81 mm/s para un tiempo de 30 ms
Transversal	6.43 mm/s para un tiempo de 11 ms

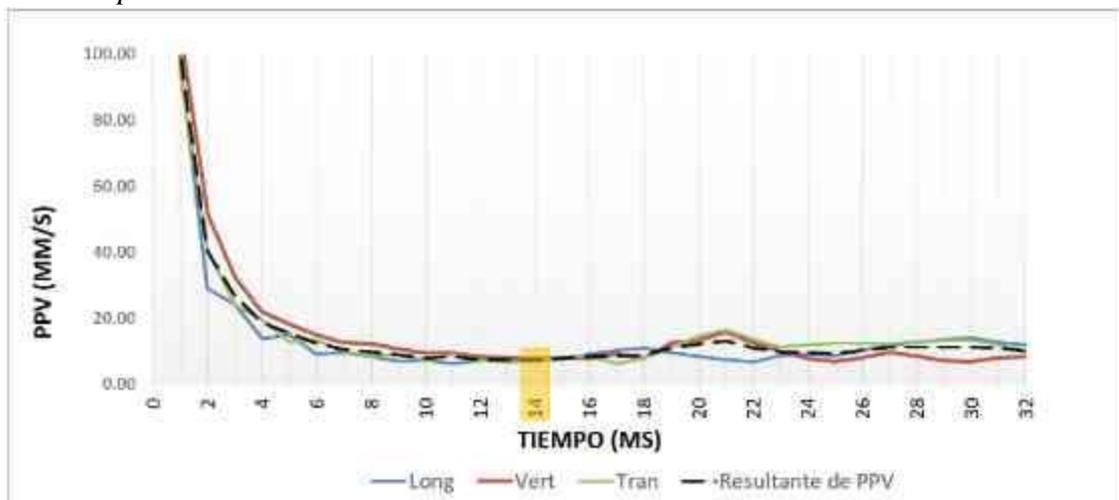
Fuente: Propia

Promediando las 3 componentes se obtiene que el menor valor de VPP es de 7.30 m/s correspondiente al tiempo entre taladro de 14 ms.

Para la selección del tiempo más óptimo se debe considerar los valores más bajos de la resultante VPP (Promedio) y darle un mayor peso a la componente longitudinal (eje que influye más en la vibración). Para este análisis de onda elemental el tiempo óptimo sería 14 ms.

Figura 35

Tiempo de retardo VS vibraciones



Fuente: Area de voladura empresa minera

El tiempo óptimo para el atenuamiento de vibraciones en el proyecto 3336 – 033 – PV, de la empresa minera luego del análisis de onda elemental arrojo el siguiente resultado: En el análisis de onda elemental a 70 metros dio un tiempo de retardo óptimo de 14 ms. El tiempo para esta zona del tajo (dureza media) debe estar en el orden de 13 ms a 15 ms. como la secuencia de detonación, cambios de litología que pueden alterar los niveles de vibración.

3.3. Análisis de VOD

Para en análisis de VOD del proyecto 3336 – 033 – PV, se tomaron los datos de dos

taladros, taladro 10110 y taladro 10109, con sus características de diseño y carga ya mencionadas.

Figura 36

Ubicación de los taladros seleccionados para el análisis VOD



Fuente: Area de voladura empresa minera

A continuación, se muestra el resumen ejecutivo del proyecto 3336 – 033 – PV, diseñado a conocer la carga por taladro, tipo de iniciador, tipo de detonador, y características del diseño de la malla de voladura.

Figura 37

Resumen ejecutivo proyecto 3336 – 033 – PV

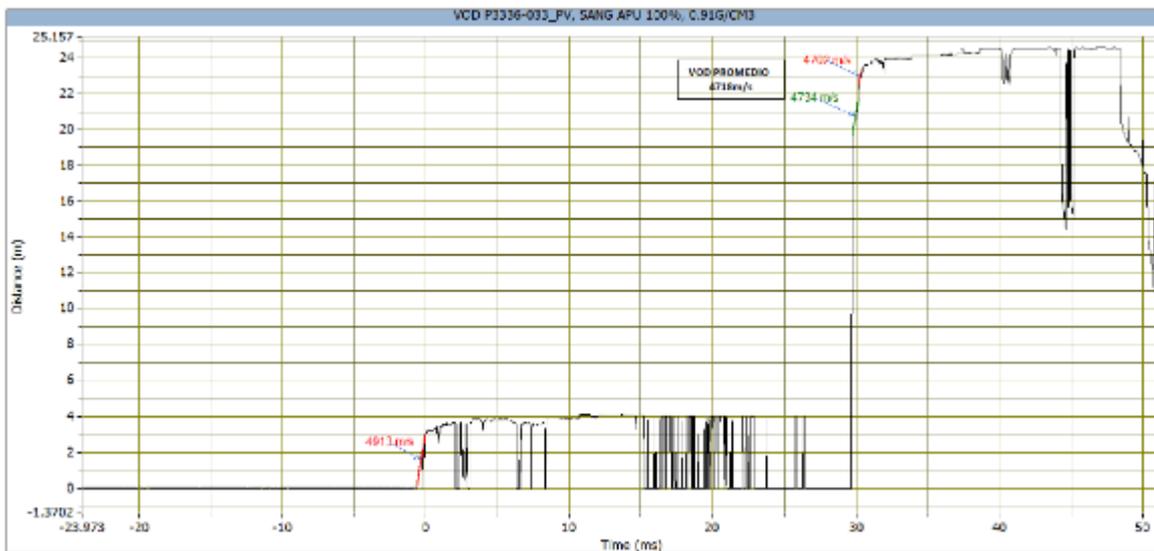
PROYECTO			DISEÑO DE VOLADURA		
3336-033			Malla (BxE) (m)	4.2	4.8
FECHA			Diámetro (pulg)		
21/02/2022			6.3/4		
			Subdrill (m)		
			0.5		
CARACTERÍSTICAS DEL EXPLOSIVO			DATOS DEL INICIADOR		
MMU	SANG APU 100%	SANG APU 100%	Detonador	INTELLISHOT 4G	INTELLISHOT 4G
Explosivo	SANG APU 100%	SANG APU 100%	Tipo iniciador	BOOSTER 11B	BOOSTER 11B
Marca explosivo	FAMESA	FAMESA	Altura de Booster (m)	0.20	0.20
Kilogramos de explosivo	100.0	100.0	Densidad de la roca	2.52	2.52
Densidad inicial (g/cm3)	1.301	1.303	Factor de potencia (kg/ton)	0.3281	0.3281
Densidad final (g/cm3)	0.91	0.91			
Esponjamiento	1.10	1.00			
DATOS DE TALADRO			RESULTADOS		
ID taladro	10110	10109	ID taladro	10110	10109
Longitud (m)	5.9	6.30	VOD (m/s)	4913	4718
Tercio inicial (m)	4.00	3.80	Distancia Velocidad		
Tercio final (m)	2.90	2.80	Regimen (m)	-	-

Fuente: Area de voladura empresa minera

El diseño de carga para los taladros seleccionados para el análisis, se encuentran en los Anexos 11 y 12. El registro de análisis VOD para el proyecto 3336 – 033 – PV, cargado con el agente explosivo SANG APU 100%, nos arroja una velocidad promedio de 4718 ms.

Figura 38

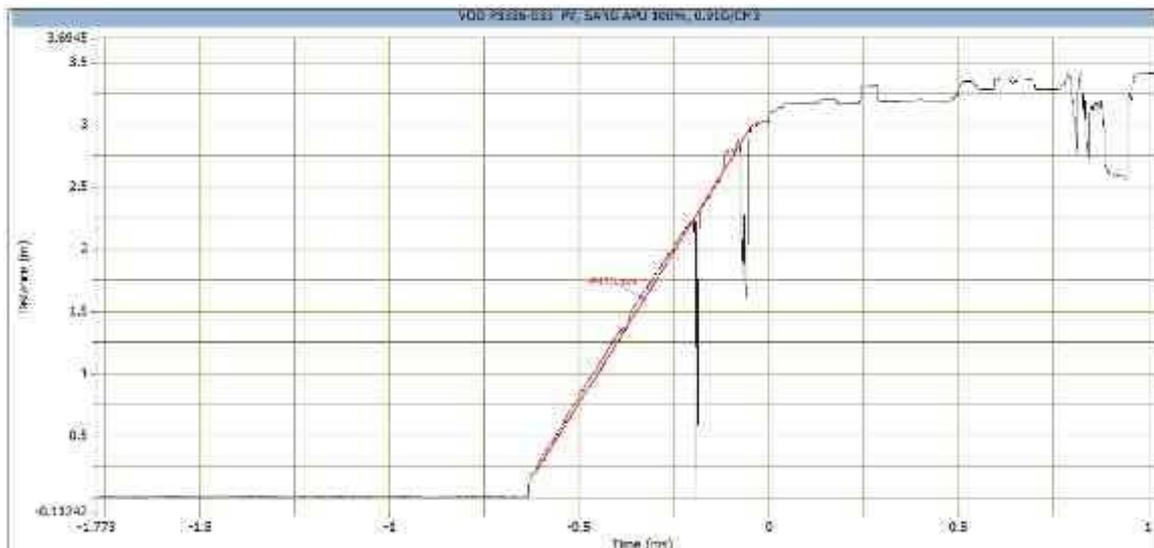
Gráfico de VODs proyecto 3336 – 033 – PV



Fuente: Area de voladura empresa minera

Figura 39

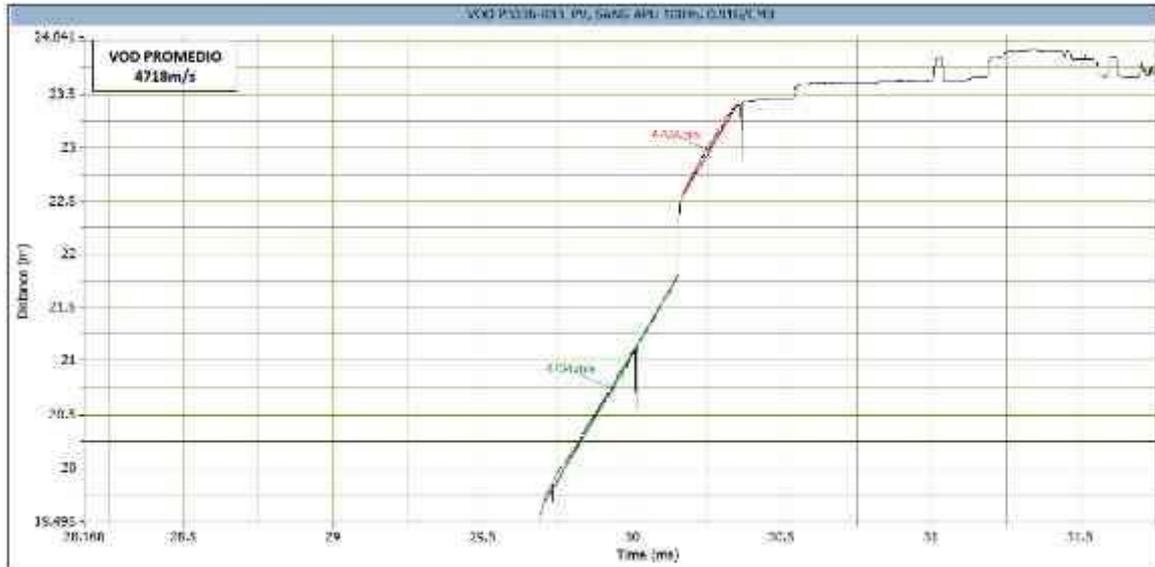
Gráfico de VOD taladro 10110



Fuente: Area de voladura empresa minera

Figura 40

Gráfico de VOD taladro 10109

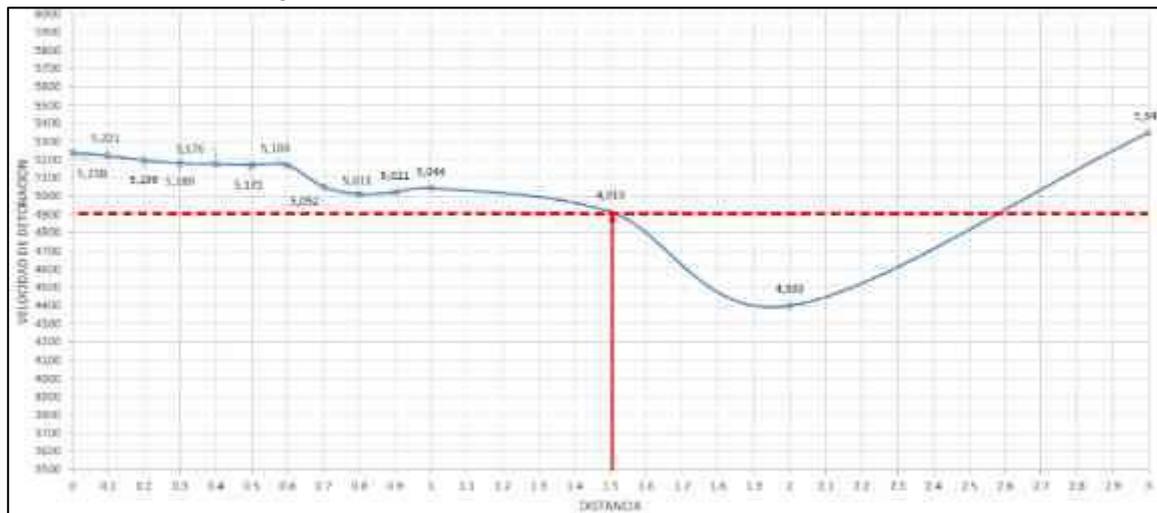


Fuente: Area de voladura empresa minera

La mezcla explosiva mantuvo una velocidad de detonación mayor a la velocidad régimen en la mayor parte de la columna de carga.

Figura 41

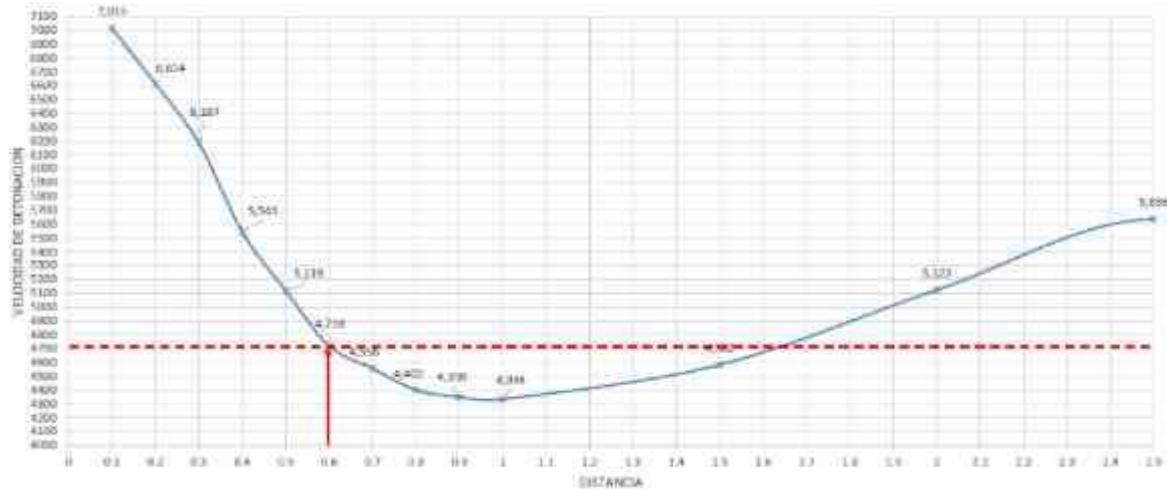
Velocidad de régimen taladro 10110



Fuente: Area de voladura empresa minera

Figura 42

Velocidad de régimen taladro 10109



Fuente: Area de voladura empresa minera

El análisis VOD realizado en la voladura 3336 – 033 – PV con la aplicación del agente explosivo SANG APU, se obtiene una mejor liberación de energía, esto nos indica que hay mejores resultados en la fragmentación de la roca, y con eso se facilitan los procesos siguientes como son carguío, transporte, y recuperación; obteniendo un ahorro en costos y tiempo que son muy favorables para la empresa minera.

La velocidad de detonación para los dos taladros analizados nos da un promedio de 4718 m/s, siendo cifras muy favorables para la liberación de energía, el agente explosivo SANG APU fue cargado con una densidad de 0.91 gr/cm³ en los taladros de 6 ¾ de pulgada de diámetro.

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1 Discusión

Con el uso y aplicación de la información teórica existente se ha logrado entender y conocer más a profundidad el tema de voladura aplicado a minería superficial, desde sus primeras aplicaciones hasta sus últimas evoluciones tecnológicas de los últimos años, se ha logrado apreciar dichas evoluciones en los curvos inventos para los accesorios de voladura, agentes explosivos, y otros recursos que ayudan a tener un mejor control del proceso de voladura en minería superficial.

Toda la información a servido como una importante base en la comprensión y aplicación del sistema de iniciación electrónico DigiShot Plus, teniendo unos resultados muy alentadores en su aplicación durante el proceso de voladura, este sistema nos permitió tener una fragmentación óptima del macizo rocoso, tener mayor control al momento de realizar el diseño de la malla de perforación, mejor control de las vibraciones en el momento de la voladura, también nos permitió tener un mayor control al momento de agregar los tiempos de retardo esto debido a la utilización del iniciador electrónico.

También se presentaron limitaciones, todo esto debido a las políticas de privacidad de la empresa minera en estudio, debido a estas políticas solo se nos proporcionó información específica de una malla de voladura, de igual manera la información brindada fue muy importante para lograr entender que mediante la aplicación del sistema de iniciación electrónico DigiShot Plus se puede obtener el tamaño de fragmentación de roca que uno desee, para el presente estudio se tuvo un tamaño de P80 promedio de 3.72 pulgadas, un mejor control de vibración y mantener una

velocidad promedio de VOD de 4718 m/s gracias al agente explosivo SANG APU; siendo este último uno de los factores más importantes en la fragmentación de la roca todo ello con un factor de potencia de 0.3281 Kg/ton, todo siempre bajos los estándares y cuidado ambiental que amerita para una empresa minera.

Esto nos permite conocer el aporte de la tecnología en la industria minera, todo el sistema de iniciación electrónico más un agente explosivo nos dan resultados muy favorables en la fragmentación de las rocas post voladura; Faramarzi, Farsangi y Mansouri (2013) en su investigación describe, “que la fragmentación de rocas ha sido la preocupación de muchos trabajos de investigación debido a que es considerada como el aspecto más importante de la producción, ya que afecta a los costos de los trabajos de perforación, voladura y la eficiencia de todos los subsistemas, tales como; la carga, el transporte y otros de las operaciones mineras.” Es por eso que en la actualidad los sistemas buscan ser más sofisticados para obtener los resultados óptimos en la fragmentación de rocas.

Por su parte Hinostroza Sierra, Jaime (2014) en su trabajo de investigación mencionan que, “ En los resultados presentados de las diferentes pruebas que se han realizado de la doble iniciación se ha demostrado que la fragmentación de las rocas ha mejorado, el P80 ha reducido, la velocidad de carguío de las palas ha disminuido, y de manera visual se ha observado que el factor de llenado de las tolvas de volquetes es mejor produciendo menos espacios perdidos en las tolvas, la producción diaria del mineral ha incrementado.” Esto corrobora la presente investigación ya que con la aplicación del sistema de iniciación electrónico se han obtenido mejores resultados de fragmentación que en años anteriores el tamaño de P80 era superior a las 9 pulgadas.

4.2 Conclusiones

Mediante la aplicación del sistema de iniciación electrónico DigiShot Plus en el proceso de voladura se logró obtener mejores resultados en la fragmentación de la roca con un P80 promedio de 3.72 pulgadas, además se obtuvieron mejores resultados en el control de estabilidad de taludes, minimizar el daño de las vibraciones, reducir la ocurrencia de flyrock.

El uso del sistema de iniciación electrónico mejora cuantitativamente la fragmentación de las rocas, ya que se tiene una determinada gama de tiempos entre taladros y entre filas para cada tipo de alteración, lo cual permite una mejor obtención de resultados en las zonas de producción, generando una adecuada fragmentación de la roca dentro de los estándares establecidos por la empresa minera, con eso se logra obtener un mejor beneficio en tiempos de carguío y acareo de mineral, y una mejor recuperación metalúrgica en el proceso de lixiviación.

El análisis de onda elemental que se realizó a 70 metros de la malla de voladura durante un lapso de tiempo de 1000 ms, que nos permitió determinar los tiempos óptimos para lograr disminuir el daño por vibraciones en los proyectos cercanos al talud final, siendo este tiempo de retardo optimo entre taladro de 14 ms. Aunque esto puede variar de acuerdo a factores como secuencia de detonación, cambios de litología.

La aplicación del agente explosivo SANG APU nos permite tener una velocidad de detonación (VOD) promedio de 4718 m/s generando así una mayor liberación de

energía que ayuda a la fragmentación de la roca, esto gracias al factor de potencia de 0.3281 kg/ton que es calculado a partir de los 149 taladros cargados y la carga de explosivo de cada uno.

Por todo lo mencionado se puede concluir que el sistema de iniciación electrónico DigiShot plus es muy confiable por sus aspectos operacionales, confiabilidad y seguridad, y por su gran precisión al momento de la detonación y obtención de resultados requeridos, además de ser un nuevo estándar para la minería moderna.

REFERENCIAS

Hinostroza, J. (2014). *Optimización de la fragmentación en las rocas con la aplicación de la doble iniciación electrónica en la explotación de cobre porfirítico a cielo abierto*. (Tesis de pregrado), Universidad Nacional Mayor de San Marcos; Lima, Perú.

Bernaola, J; Castilla, J; & Herrera, J. (2013). *Perforación y voladura de rocas en minería*. Universidad Politécnica de Madrid; Madrid, España.

Paucar, R. (2016). *Voladura con detonadores electrónicos para optimizar la fragmentación y seguridad en el tajo Toromocho – minera Chinalco Perú s.a*. (Tesis de pregrado), Universidad Nacional del Centro del Perú; Huancayo, Perú.

Konya, J. (1998). *Diseño de Voladura*. Madrid, España.

DAVEYTRONIC. (2014). *Sistema de detonación electrónica DAVEYTRONIC SP aplicaciones en el Perú*. Davey Bickford High-tech Intiation Company, Santiago de Chile.

<https://www.dynonobel.com/south-america/innovacion-practica/recent-innovations/electronics>

Dyno Nobel. Sistema de iniciación electrónico, recuperado de: <https://www.dynonobel.com/south-america/innovacion-practica/recent-innovations/electronics>

Dyno Nobel. DigiShot plus, Recuperado de: <https://www.dynonobel.com/south-america/innovacion-practica/dsp4g>

DigiShot Plus 4G. (2018) Commander System.

ANEXOS

ANEXO N° 1. *Gráfico de tamaño de distribución del material fragmentado equipo RE-1165-AL, realizado el 22 de febrero del 2022.*



ANEXO N° 2. *Análisis de fragmentación equipo RE-1165-AL, realizado 22 de febrero del 2022.*

1.

Percent Passing	Value (%)
P100	4.09
P80	2.44
P50	1.18
P20	0.24



2.

Percent Passing	Value (%)
P100	7.76
P80	2.48
P50	1.02
P20	0.28



3.

Percent Passing	Value (%)
P100	7.32
P80	5.20
P50	2.99
P20	0.75



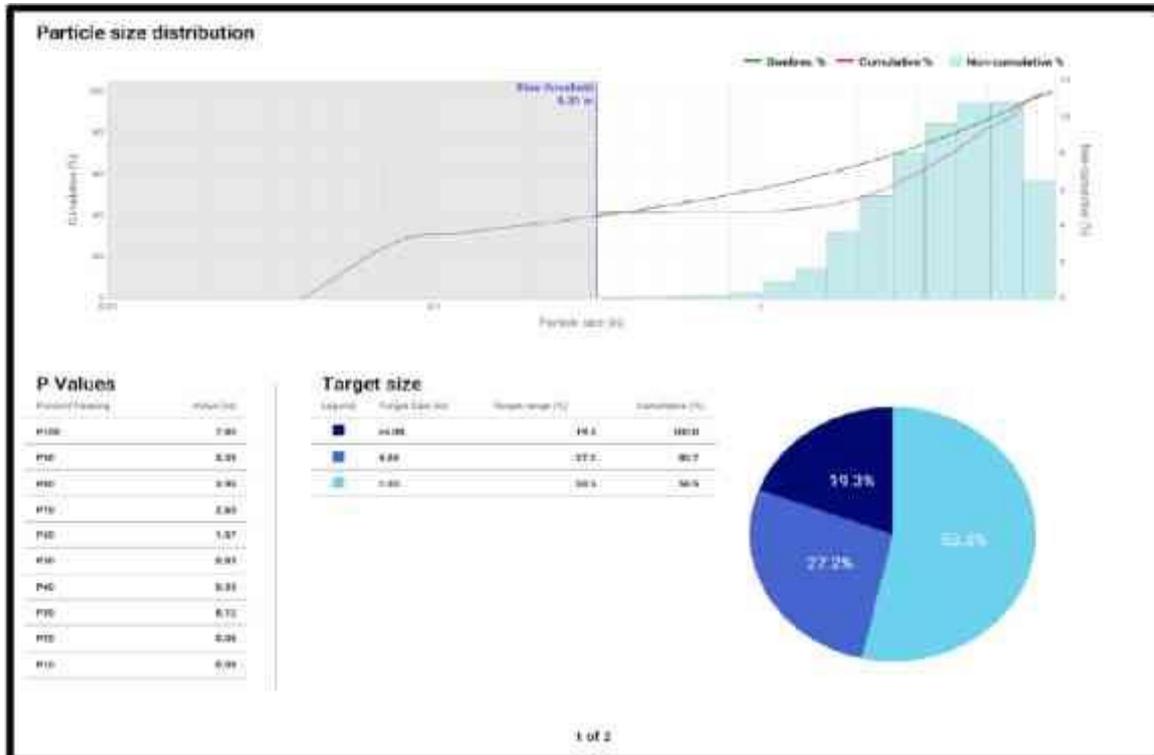
4.

Percent Passing	Value (%)
P100	8.54
P80	5.43
P50	3.10
P20	1.02



2 of 2

ANEXO N° 3. Gráfico de tamaño de distribución del material fragmentado equipo EXC-059, realizado el 23 de febrero del 2022



ANEXO N° 4. *Análisis de fragmentación equipo EXC-059, realizado el 23 de febrero del 2022.*

Sample logs

Displayed logs: 4 logs

1.

Percent Passing	Value (%)
P100	3.58
P80	1.65
P50	0.31
P20	0.08



2.

Percent Passing	Value (%)
P100	7.20
P80	4.61
P50	1.57
P20	0.09



3.

Percent Passing	Value (%)
P100	7.80
P80	5.75
P50	2.97
P20	0.35



4.

Percent Passing	Value (%)
P100	6.46
P80	3.94
P50	1.14
P20	0.08



ANEXO N° 5. Gráfico de tamaño de distribución del material fragmentado equipo EXC-059, realizado el 24 de febrero del 2022.



ANEXO N° 6. *Análisis de fragmentación equipo EXC-059, realizado el 24 de febrero del 2022*



ANEXO N° 7. Gráfico de tamaño de distribución del material fragmentado equipo RE-1165-AL, realizado el 25 de febrero del 2022



ANEXO N° 8. *Análisis de fragmentación del equipo RE-1165-AL, realizado el 25 de febrero del 2022.*

Sample logs
Displayed logs: 4 logs

1.

Percent Passing	Value (%)
P100	4.87
P80	2.84
P50	0.88
P20	0.06



2.

Percent Passing	Value (%)
P100	6.89
P80	4.76
P50	2.40
P20	0.38



3.

Percent Passing	Value (%)
P100	5.31
P80	2.91
P50	0.47
P20	0.08



4.

Percent Passing	Value (%)
P100	8.07
P80	5.31
P50	2.88
P20	0.47



2 of 2

ANEXO N° 9. Gráfico de tamaño de distribución del material fragmentado equipo RE-1165-AL, realizado el 26 de febrero del 2022.



ANEXO N° 10. *Análisis de fragmentación del equipo RE-1165-AL, realizado el 26 de febrero del 2022*

Sample logs
Displayed logs: 4 logs

1.

Percent Passing	Value (%)
P100	4.87
P80	2.84
P50	0.55
P20	0.06



2.

Percent Passing	Value (%)
P100	6.39
P80	4.76
P50	2.40
P20	0.38



3.

Percent Passing	Value (%)
P100	5.31
P80	2.91
P50	0.47
P20	0.08



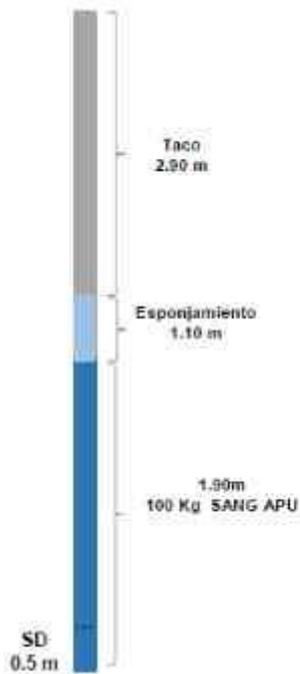
4.

Percent Passing	Value (%)
P100	8.07
P80	5.37
P50	2.88
P20	0.47



2 of 2

ANEXO N° 11. *Diseño de carga P3336-033 Taladro 10110*

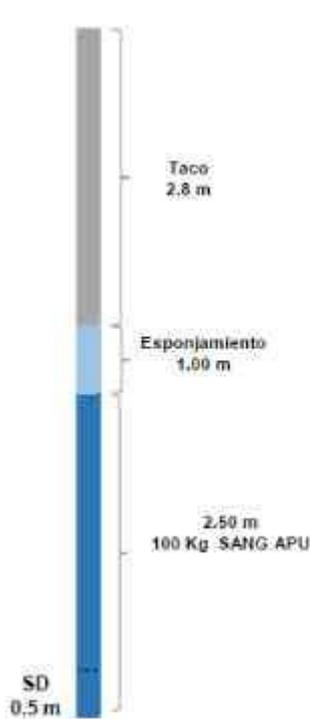


DATOS DE TALADRO	
ID taladro	10110
Longitud (m)	5.90
Taco inicial (m)	4.00
Taco final (m)	2.90

CARACTERISTICAS DEL EXPLOSIVO	
MMU	ASK-776
Explosivo	SANG APU 100%
Marca explosivo	FAMESA
Kilogramos de explosivo	100.0
Densidad inicial (g/cm ³)	1.301
Densidad final (g/cm ³)	0.910
Esponjamiento	1.10

DATOS DEL INICIADOR	
Detonador	INTELLISHOT 4G
Tipo iniciador	BOOSTER 1LB
Altura de Booster (m)	0.2
Densidad de la roca	2.52
Factor de potencia (kg/ton)	0.3281

ANEXO N° 12. *Diseño de carga P3336-033 Taladro 10109*



DATOS DE TALADRO	
ID taladro	10109
Longitud (m)	6.30
Taco inicial (m)	3.80
Taco final (m)	2.80

CARACTERISTICAS DEL EXPLOSIVO	
MMU	ASK-776
Explosivo	SANG APU 100%
Marca explosivo	FAMESA
Kilogramos de explosivo	100
Densidad inicial (g/cm ³)	1.301
Densidad final (g/cm ³)	0.910
Esponjamiento	1.00

DATOS DEL INICIADOR	
Detonador	INTELLISHOT 4G
Tipo iniciador	BOOSTER 1LB
Altura de Booster (m)	0.20
Densidad de la roca	2.52
Factor de potencia (kg/ton)	0.3281