

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería de Minas

“COMPARACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD,
FRAGMENTACIÓN Y COSTOS DEL SISTEMA DE INICIACIÓN
ELECTRÓNICA VERSUS PIROTÉCNICA EN VOLADURA-
MINERA YANACOCHA S.R.L”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autor:

Breidy Margot Cueva Chuquilín
Irma Lilia Herrera Saldaña

Asesor:

Ing. Yuling Indira Quispe Aronés

Cajamarca - Perú

2018



ACTA DE AUTORIZACIÓN PARA SUSTENTACIÓN DE TESIS

El asesor Yuling Indira Quispe Aronés, docente de la Universidad Privada del Norte, Facultad de Ingeniería, Carrera profesional de **INGENIERÍA DE MINAS**, ha realizado el seguimiento del proceso de formulación y desarrollo de la tesis de los estudiantes:

- Cueva Chuquilín Breidy Margot
- Herrera Saldaña Irma Lilia

Por cuanto, **CONSIDERA** que la tesis titulada: Comparación de la productividad, Fragmentación y costos del sistema de iniciación electrónica versus pirotécnica en voladura- Minera Yanacocha S.R.L. para aspirar al título profesional de: **Ingeniero de Minas** por la Universidad Privada del Norte, reúne las condiciones adecuadas, por lo cual, **AUTORIZA** al o a los interesados para su presentación.

Ing. Yuling Indira Quispe Aronés
Asesora

ACTA DE APROBACIÓN DE LA TESIS

Los miembros del jurado evaluador asignados han procedido a realizar la evaluación de la tesis de las estudiantes: Breidy Margot Cueva Chuquilín e Irma Lilia Herrera Saldaña para aspirar al título profesional con la tesis denominada: “Comparación de la productividad, fragmentación y costos del sistema de iniciación electrónica versus pirotécnica en voladura-Minera Yanacocha S.R.L”

Luego de la revisión del trabajo, en forma y contenido, los miembros del jurado concuerdan:

Aprobación por unanimidad

Aprobación por mayoría

Calificativo:

Excelente [20 - 18]

Sobresaliente [17 - 15]

Bueno [14 - 13]

Calificativo:

Excelente [20 - 18]

Sobresaliente [17 - 15]

Bueno [14 - 13]

Desaprobado

Firman en señal de conformidad:

Ing. Víctor Eduardo Álvarez León
Jurado
Presidente

Ing. Daniel Alejandro Alva Huamán
Jurado

Ing. Oscar Arturo Vásquez Mendoza
Jurado

DEDICATORIA

La vida se encuentra llena de retos y uno de ellos es la universidad, tras verme dentro de ella , me he dado cuenta que más allá de ser un reto, es una base no solo para mi entendimiento del campo profesional si no para lo que consierne a la vida y mi futuro.

A nuestros padres :

Esteban Cueva y María Eva Chuquilín; José Herrera y Florminda Saldaña, Por su apoyo y amor incondicional que nos brindaron en los años como estudiante y porque aún hasta ahora siguen siendo de gran ayuda en mi vida profesional.

A Nuestros hermanos:

por haber estado en los momentos difíciles y brindarnos su apoyo y confianza en todo lo necesario para cumplir todas las metas trazadas.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por darnos la vida y las bendiciones necesarias para lograr nuestras metas.

A nuestros padres, por el apoyo moral que nos han brindado para la culminación de nuestra carrera profesional.

Al Ing. Yorhinio León, jefe del Área de perforación y voladura por su valiosa contribución, su capacidad profesional, por su tiempo lo cual ha permitido el desarrollo del presente trabajo.

Al Ing. Alex Marinovic e Ing. Yuling Indira Quispe Aronés, por su colaboración, apoyo y aporte de ideas para la realización de esta tesis.

A todos mis amigos y familiares por el apoyo que me brindaron día a día durante el transcurso de mi carrera profesional.

Tabla de contenidos

ACTA DE AUTORIZACIÓN PARA SUSTENTACIÓN DE TESIS	2
ACTA DE APROBACIÓN DE LA TESIS.....	3
DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTO	5
ÍNDICE DE TABLAS.....	8
ÍNDICE DE FIGURAS.....	9
RESUMEN.....	10
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	11
1.1. Realidad problemática	11
1.2. Formulación del problema	65
1.3. Objetivos	65
<i>1.3.1. Objetivo general.....</i>	<i>65</i>
<i>1.3.2. Objetivos específicos</i>	<i>65</i>
1.4. Hipótesis	66
<i>1.4.1. Hipótesis general.....</i>	<i>66</i>
<i>1.4.2. Hipótesis específicas</i>	<i>66</i>
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	67
2.1. Tipo de investigación	67
2.2. Población y muestra (Materiales, instrumentos y métodos)	67
2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos	68
<i>2.3.1. Técnicas</i>	<i>68</i>
<i>2.3.2. Instrumento de recolección y análisis de datos.</i>	<i>71</i>
2.4. Procedimiento.....	73
CAPÍTULO III. RESULTADOS	78
3.1. Productividad	78
3.2. Fragmentación.	79
3.3. Costos	86

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	101
4.1. Discusión	101
4.2 Conclusiones	102
RECOMENDACIONES	104
REFERENCIAS	105
ANEXOS	108

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Datos de los sistemas de iniciación.....</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 2 Comparación de la velocidad de excavación por equipo de carguío y por material.....</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 3 Costos por metro lineal, sistemas de iniciación, mixto vs sistema convencional.....</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 4 Tiempos en función al Burden y tipo de roca</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 5 Aspectos positivos y negativos de la calidad de una voladura</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 6 Ventajas y desventajas del sistema electrónico</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 7 Ventajas y desventajas del sistema pirotécnico</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 8 Criterio del macizo rocoso</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 9 Norma Alemana DIN4150</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 10 Norma USBM 8507</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 11 Normativa peruana de vibraciones</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 13 Criterios de daño del macizo rocoso</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 14 Criterios de daño del macizo rocoso</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 15 Promedio de la productividad de la pala del S. Electrónico vs S. Pirotécnico</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 16 Tipo de alteración según tajo</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 17 Comparativo de análisis de fragmentación del S. Pirotécnico Vs S. Electrónico.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 18 Costos unitarios.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 19 Cuadro comparativo de costos según el número de taladros para sistema de iniciación electrónica Vs sistema de iniciación pirotécnica 2017.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 20 Características de voladura- NV 3456.....</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 21 Características de voladura- NV 3456.....</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 22 Características de voladura- NV 3456.....</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 23 Características de voladura- NV 3456.....</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 24 Características de voladura- NV 3444.....</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 25 Características de voladura- NV 3444.....</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 26 Características de voladura- NV 3444.....</i>	<i>94</i>
<i>Tabla 27 Características de voladura- NV 3444.....</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 28 Resumen de monitoreo del VPP en cabana, canal y Vivienda.....</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 29 Resumen de dispersiones.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 30 Dispersión de retardo</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 31 Comparación de los resultados de la productividad y costos del Sistema de iniciación electrónica e iniciación pirotécnica en la Minera Yanacocha, 2017.....</i>	<i>99</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Ubicación</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2. Sección de Alteraciones.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 3. Sección de Alteraciones Típicas de Yanacocha</i>	<i>23</i>
<i>Figura 4. Mecánica de Fragmentación</i>	<i>25</i>
<i>Figura 5. Tres Claves Para Lograr un Rendimiento Óptimo de Explosivos.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 6. Parámetros de la voladura en banco.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 7. Indicaciones Geométricas de un Taladro</i>	<i>31</i>
<i>Figura 8. Profundidad /Distancia Escala (SD)</i>	<i>32</i>
<i>Figura 9. Fases de Mecánica de Rocas de un Taladro</i>	<i>43</i>
<i>Figura 10. Partes de Detonador Electrónico</i>	<i>44</i>
<i>Figura 11. Iniciador de Línea.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 12. Tagger.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 13. Bench Box.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 14. Bloque de conexión.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 15. Cables extensores.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 16. Cable de Disparo.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 17. Booster.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 18. Partes de detonador pirotécnico.</i>	<i>53</i>
<i>Figura 19. Descripción del Sistema de Iniciación</i>	<i>53</i>
<i>Figura 20. Tubo de Choque</i>	<i>54</i>
<i>Figura 21. Características del Tubo de Choque.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 22. Tipos de Ondas.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 23. Procedimiento de Análisis de Datos para Obtener la Tasa de Excavación.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 24. Procedimiento de Análisis de Datos para Obtener los Resultados de</i>	<i>72</i>
<i>Figura 25. Análisis de Fragmentación –Sistema Pirotécnico</i>	<i>81</i>
<i>Figura 26. Análisis de Fragmentación –Sistema Pirotécnico</i>	<i>82</i>
<i>Figura 27. Análisis de Fragmentación –Sistema Electrónico</i>	<i>83</i>
<i>Figura 28. Análisis de Fragmentación –Sistema Electrónico</i>	<i>84</i>

RESUMEN

Hoy en día uno de los desafíos que enfrenta la minería moderna es el control de vibraciones, fragmentación del material y la variación de costos en voladura; la calidad de disparo tiene una influencia significativa en la etapa de extracción del material; la presente investigación tiene como objetivo determinar que sistema de iniciación es el más eficiente dando mejores resultados de fragmentación con un menor costo.

La metodología aplicada en esta investigación muestra la comparación del sistema de iniciación pirotécnica versus sistema de iniciación electrónica, para el análisis de fragmentación, productividad y costos se tomaron datos del tajo Tapado Oeste y del tajo Yanacocha; información que permite determinar la efectividad del sistema de voladura.

La voladura con detonadores electrónicos dio mejores resultados que con pirotécnicos, el P80 con detonadores pirotécnicos fue 3.9” y con detonadores electrónico fue 3.34” con el cual se obtuvo una mejora de un 14.6% ; la productividad de pala con detonadores pirotécnicos es 2982,37 Tm/H y con detonadores electrónicos es 3323.27 Tm/H; con una mejora de 11.4% en productividad; el costo por unidad de detonadores pirotécnicos es menor que el costo del detonador electrónico, obteniendo mejor productividad y fragmentación; optimizando procesos posteriores de chancado y molienda.

Palabras clave: Sistema electrónico, sistema pirotécnico, fragmentación, productividad, Optimización de costos.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

En general la minería a cielo abierto trabaja con el objetivo de minimizar los costos de explotación, y maximizar las ganancias pero siempre tomando en cuenta los parámetros productividad, seguridad y de la mano con el medio ambiente.(Romero Paucar , 2016) En su investigación dice que mejorar la fragmentación producto de la voladura traerá grandes beneficios a la operación con en el minado, chancado y molienda, obteniendo mejores resultados en el costo global mina(Baldeon Quispe, 2011) En su investigación nos dice que la productividad y rendimiento de las operaciones, constituyen indicadores de éxito en las empresas mineras; puesto que el acarreo y transporte son procesos claves para el incremento de la productividad y la disminución de los costos .Un buen proceso de voladura de rocas busca el completo aprovechamiento de la energía del explosivo para obtener una buena fragmentación de la roca, un desplazamiento adecuado el cual permite minimizar el daño a equipos, optimizar los tiempos de carguío, aumentar el rendimiento efectivo en los equipos de extracción y mejora los procesos de chancado, molienda y posterior recuperación metalúrgica. Hay diferentes sistemas de iniciación en la voladura de rocas como los detonadores electrónicos y pirotécnicos, que son encargados de dar el tiempo de iniciación de cada taladro.

(Berguer , 2009) en la revista Minería Chilena señala que los factores más importantes para lograr una fragmentación óptima son: las características del macizo rocoso (en particular la dureza y los tamaños de los bloques predeterminados por la red de fracturas naturales); el “factor de carga” del diseño (cantidad de explosivos por tonelada de roca); el tipo de explosivo a utilizar (su densidad y velocidad o eficiencia de detonación); la distribución del explosivo en la roca, y los retardos (los tiempos y precisión) usados en la secuencia de detonación de los tiros que forman parte del diseño de una tronadura. “Otros factores adicionales que pueden influir o co-participar cuando se desea una determinada fragmentación, pueden ser el control de impactos negativos tales como dilución excesiva del mineral con el estéril, eyecciones de fragmentos (flyrocks), daño a la roca de las paredes de la excavación y también, el impacto al medio ambiente por las vibraciones y onda aérea (airblast), detalla el ejecutivo.

(Chávez Barrientos, 2005) “Uso Y Control De Explosivos Aplicados En Explotación De Bancos De Material” Tesis Universidad de San Carlos de Guatemala, concluyen que los colores de los gases que se liberan en una voladura son indicadores de la eficiencia de la energía liberada. Cuando aparece un vapor gris claro, se libera el máximo de energía y los resultados en el tamaño de la fragmentación de la roca son los deseados. Cuando los gases son de color ocre o amarillo la liberación de energía es ineficiente produciendo una voladura insegura con niveles de vibración y golpe de aire altos y resultados inesperados

(Huamán, 2010) “Implementación De Un Nuevo Sistema De Iniciación Electrónica En Perú - Seguridad Y Versatilidad” Tesis de Universidad Nacional de Ingeniería, tiene como objetivo mostrar las características del sistema electrónico y concluye que La calidad del disparo tiene influencia significativa sobre las etapas posteriores de manejo de material dentro del sistema de extracción de una mina. Es por esta razón que una parte esencial de cualquier disparo es la evaluación crítica de la fragmentación y de las condiciones de excavación. A pesar de que la inspección consume tiempo y recursos, el costo de esta evaluación usualmente se justifica para poder desarrollar un sistema eficiente de disparo. La comparación de velocidades de excavación realizada a los disparos 4-NP-4238-18 (Electrónico) y 4-NP-4238-19 (Pirotécnico) mostrados en la tabla 1. Ambos proyectos han mantenido los mismos patrones de carguío, variando el sistema de iniciación y tiempos entre taladros; Mostrados en la tabla 2.

Tabla 1
Datos de los sistemas de iniciación.

Proyecto	Sistema de Iniciación	SH004
4-NP-4238-18	Electrónico	10ms
4-NP-4238-19	Pirotécnico	17ms

Fuente: Huamán, U (2010)

Tabla 2
Comparación de la velocidad de excavación por equipo de carguío y por material

		SH003		SH004	
		Vel Excavación (Tm/Hr)	T. carguío prom (seg)	Vel. Excavación (Tm/Hr)	T. carguío prom (seg)
PIROTECNICO	Mineral	9356.789841	94.257	11591.38136	75.2778
	Desmonte	11387.71892	77.742	0	0
ELECTRONICO	Mineral	11895.12242	74.6928	12070.93254	72.576
	Desmonte	10846.27295	81.378	9954.686582	85.8024

Fuente: Huamán, U (2010)

(Poma F, 2012) “Importancia De La Fragmentación De La Roca En El Proceso GOLD Mill (Caso Minera Yanacocha)”, Tesis de la Pontificia Universidad Católica del Perú, comentó que: El uso de detonadores electrónicos nos permitió trabajar con tiempos cortos (4ms y 6ms) sin que la desviación estándar de los tiempos de detonación (+/- 0.001%, teórico según proveedor) afecte los resultados propios de las pruebas. En caso se hubiesen realizado las pruebas con detonadores no eléctricos, la desviación estándar de los tiempos de detonación hubiese sido mayor (+/- 2% en fondo y +/- 2% en superficie, teórico según proveedor), con lo cual, no se hubiese podido aprovechar los tiempos óptimos de detonación y se hubiesen traslapado los tiempos, no pudiéndose analizar las mejoras por efectos de los tiempos de detonación.

(Miranda S, 2009) , en el trabajo de investigación “Estudio del rendimiento entre detonadores electrónicos y no eléctricos e implicancia en la economía del proceso y seguridad en tajo abierto”, explica el rendimiento entre detonadores electrónicos y no eléctricos e implicancia en costos y seguridad. Como resultado obtiene: El

rendimiento fue en 8 % en promedio de los detonadores electrónicos frente a detonadores no eléctricos tratándose de costos, y de 1 770 TM por taladro a favor de detonadores electrónicos y de 1 692 TM por taladro para no eléctricos; a su vez se desempeñan mucho mejor en voladura de producción que en precorte. Permitió ahorrar US \$ 180 791 al año, y US \$ 0,004 por tonelada métrica

(Pomaylle & Vásquez , 2013) “Voladura con sistema de iniciación mixto eléctrico y no eléctrico en la profundización del pique N°2, mina teresita”. Tesis de la Universidad Nacional de Huancavelica. La investigación tuvo como objetivo evaluar la aplicación de la voladura con sistemas de iniciación mixta eléctrica y no eléctrico frente a un sistema convencional en el avance de la profundización del pique N° 2 de la mina Teresita, toman como población a los piques en profundización de la U.P. Recuperada-Cia de minas Buenaventura, como muestra de investigación al pique N°2 de la mina teresita, la recolección de datos se realizó mediante observación directa de la muestra, el tipo de investigación es descriptivo-explicativo. El análisis de resultados se determinó que Para una simulación de 112 metros de avance en profundización del pique, se requieren 70 disparos con el sistema de iniciación mixto eléctrico y no eléctrico, y 92 disparos con el sistema de iniciación convencional, esto representa una disminución del 23.91% del número de disparos. Como se puede observar en la tabla 3 En términos de costos, tomando en forma global la perforación, voladura y extracción, con el sistema de iniciación mixto eléctrico y no eléctrico frente al sistema convencional se generó un ahorro del 14.5% por metro lineal equivalente a 664.19s./m de profundización. Para una simulación de 112 metros de avance en profundización de pique, los costos de perforación, voladura y extracción

generados globalmente con el sistema de iniciación mixta eléctrica y no eléctrico frente al sistema convencional se lograría un ahorro de 74 389.28 s/. Resultados de los costos de perforación, voladura y profundización del pique N°2 Mina teresita.

Tabla 3

Costos por metro lineal, sistemas de iniciación, mixto vs sistema convencional

Parámetros	Costo(s./m)	
	Sistema mixto	Sistema convencional
Explosivos	371.67	498.93
Perforación	698.45	952.86
Extracción	2832.92	3115.44
Total(s./m)	3903.04	4567.23

Fuente: Pomaylle, Q & Vásquez, P (2013). En base a los anexos N°7, N°8, N°9, N°10, N°11, Anexos)

(Leiva Torres , 2007) En su trabajo de Investigación menciona que la fragmentación de roca por voladura tiene un significativo impacto en la rentabilidad de la mina, un desarrollo óptimo de la mina es denominada ROM (Run Of Mine), para ello se requiere una adecuada distribución de tamaño para maximizar el desempeño de los procesos posteriores. Si la distribución de tamaño de roca fragmentado es modelada y controlada, la operación habrá hecho un avance significativo hacia la mejora de su desempeño. El modelamiento de la fragmentación de roca por voladura es un importante paso en la optimización de las operaciones mina a molienda (Mine to Mill).

(Torres, 2011) APLICACIÓN SISTEMA ELECTRÓNICO EN VOLADURAS DE AVANCE SUBTERRÁNEO- MINERA SUYAMARCA. Lima- Perú –Perumín 2011. Este trabajo de aplicación presentado en el PERUMIN 2011 muestra como la combinación del sistema de iniciación electrónica y el sistema no eléctrico (nonel-cordón detonante) favorece significativamente en el ahorro sustancial de las operaciones en túneles mediante la obtención de una voladura de contorno óptima y fragmentación óptima.

Definición de términos

Voladura de rocas. - Es un proceso tridimensional, en la cual las presiones generadas por explosivos dentro de taladros originan una zona de alta concentración de energía que producen dos efectos dinámicos: fragmentación y desplazamiento.

Malla. - Es la forma geométrica en la que se disponen los taladros de una voladura, considerando básicamente la relación Burden y Espaciamiento.

Taladro. - Cavidad cilíndrica como consecuencia de una perforación en la cual, se deposita el explosivo de acuerdo a un diseño previo.

Fragmentación. - Es la rotura de la roca en el área de la línea de menor resistencia (Burden) como consecuencia de la acción ejercida por los explosivos.

Burden. - es la distancia del taladro a la cara libre más cercana, orientado perpendicularmente al eje del taladro.

Espaciamiento. - Se define como la distancia entre taladros de una misma fila perpendicular al Burden.

Cara libre. - Superficie de contacto con el medio ambiente tomando como referencia un cubo, es indispensable para la formación y retorno de las ondas de tensión relejadas que provocan la fragmentación.

Desplazamiento. - Consiste en el movimiento de la masa rocosa triturada como consecuencia de la acción ejercida por los explosivos hacia una dirección establecida.

Taco. - Se refiere a la porción superior del barreno que normalmente se rellena con material inerte para confinar los gases de la explosión.

Explosivo. - Es toda sustancia sólida o líquida, que, al recibir un estimulante adecuado, en un infinitésimo de tiempo, se convierte en otras sustancias más estables, generalmente gaseosas; acompañados de una liberación de calor y altas presiones.

Detonador Electrónico. - Se puede comunicar con los otros componentes del sistema. Cada detonador tiene un número de ID único el que es asignado en la fábrica. Parecido a un sistema de telecomunicaciones, donde cada participante tiene un número de teléfono, la nueva tecnología permite doble comunicación desde cada detonador en el circuito. Esto permite que cualquier detonador sea programado desde 1 a 15000 milisegundos con incrementos desde 1 milisegundos.

Booster. - Alto explosivo utilizado para mejorar la detonación de la columna explosiva (aumentar la velocidad de detonación). Por lo general se utilizan explosivos de alta velocidad de detonación, como el Booster de pentolita.

Factor de carga. - Es la cantidad de explosivo en peso que se emplea para fragmentar una tonelada métrica de material de banco.

Carga Explosiva. - Cantidad de material explosivo utilizado en un taladro de voladura, o dispositivo de voladura.

Carguío. - Una de las etapas que forma parte del proceso de explotación a tajo abierto. Se refiere específicamente a la carga de material mineralizado del yacimiento. El carguío se realiza en las bermas de carguío, las que están especialmente diseñadas para esta actividad.

Deflagración: es una reacción química que se mueve rápidamente a través del material explosivo y libera calor o flama vigorosamente la reacción se mueve demasiado lenta para producir ondas de choque significativas y fracturación de la roca.

Detonación: en una detonación la reacción química se mueve a través del material explosivo a una velocidad mayor que aquella del sonido a través del mismo material. Se forma una onda de choque supersónica a través del explosivo.

Minera Yanacocha

Minera de Yanacocha se encuentra ubicado en la zona norte de la cordillera de los Andes, en el Departamento y Provincia de Cajamarca entre los 3500 y 4100 m.s.n.m. La zona de operaciones está a 45 kilómetros al norte del distrito de Cajamarca, y a 600 km al norte de Lima-Perú.



Yanacocha, Cajamarca, Peru. Google Earth Satellite View.
Figura 1. Ubicación
Fuente: google Earth

El acceso se realiza siguiendo la carretera Cajamarca – Bambamarca donde a la altura del Km. 33 se toma el desvío hacia las instalaciones actuales de Minera Yanacocha y luego hacia la zona del proyecto.

Presenta una fisiografía con valles poco profundos en forma de U; la zona representa superficies estriadas en algunos afloramientos silicificados y también depósitos morrenicos (material sedimentario de origen glaciar) al pie de algunas cumbres como Maqui Maqui (aluviales), San José Sur (Sacsha) y Yanacocha que incluye cerro Mariana. Que alcanzan alturas más de 4,000 m.s.n.m.

En algunos sectores los relieves topográficos forman moderadas depresiones ondulantes en las que se ubican las lagunas: Yanacocha, San José, Cinco Lagunas (Maqui Maqui), Chaquicocha y Plateros.

En las laderas de los cerros es común encontrar abundante material coluvial. Esta área es el límite norte de la glaciación ocurrida en los Andes, por lo cual su intensidad fue relativamente baja.

La zona de estudio tiene altitudes que varía entre los 3,600 hasta 4.120 m.s.n.m., correspondiendo a un clima frígido, característico de las zonas andinas.

El clima es frío y húmedo, con periodos secos y de lluvia bien definidos. La temperatura promedio varía de 5.03 °C a 6.38 °C. La humedad relativa varía de 72.9% a 85.1%. El rango de precipitación mensual promedio varía de 16.3 mm a 264 mm. La velocidad del viento promedio es de 2.76 m/s con una dirección predominante hacia el Noreste.

El Distrito de Yanacocha está centrado en unidades volcánicas intermedias a ácidas del Eoceno al Mioceno conocidas como Complejo del Domo de Flujo Yanacocha. La geología refleja los procesos activos tectónicos y volcánicos de los Andes. En el distrito minero, hubo erupciones de magma con sílice o ácido a lo largo de fallas estructurales, produciendo estructuras de domo en el flujo.

Estas composiciones de sílice fueron mineralizadas por soluciones hidrotérmicas ricas en oro y, dado que estas composiciones contienen oro, son el objetivo principal de la extracción.

La mineralización de oro en el distrito de Yanacocha forma parte del cinturón de depósitos polimetálicos que están ubicados a lo largo de la Cordillera de los Andes, y el cual está asociado al volcanismo Cenozoico y las rocas intrusivas (Turner, 1997).

La alteración hidrotermal en Yanacocha es típica de los sistemas ácido-sulfato y/o alta sulfuración. La alteración es intensa y los límites del distrito están definidos por la extensión de las rocas alteradas. Existe un patrón zonal cerca de cada centro, con sílice granular la cual está

cubriendo una alteración de sílice porosa y sílice masiva granular la cual está cubriendo una alteración de sílice porosa y sílice masiva en la parte central, que gradua alejándose del centro, a sílice-alunita+-pirofilita (Argílica avanzada), arcilla-caolinita (argílica), arcilla montmorillonita (argílica), y propilítica. Volumétricamente el tipo de alteración más abundante es argílico, pero la alteración silíceo es la más importante para la mineralización de oro y plata. En la Fig.2 Podemos ver las alteraciones típicas en Yanacocha.

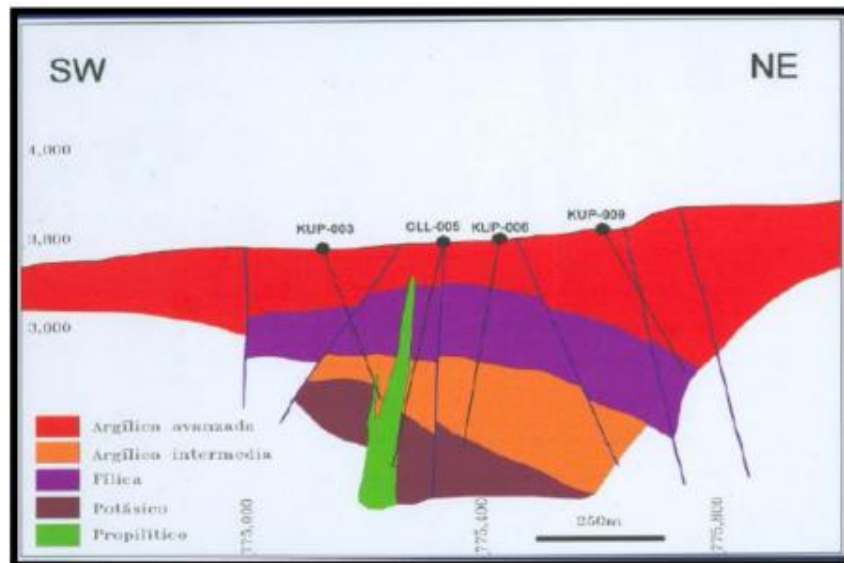


Figura 2. Sección de Alteraciones
 Fuente: Turner Stephen 1997.

La caracterización de Yanacocha se basa en el tipo de alteración, donde el grado de alteración va de una roca silicificada a un argílico avanzado (alunita), pasando por argílico (caolinita, montmorillonita, dominando la presencia de clay) y zonas de propílico.

En la Fig 3. Podemos ver las alteraciones típicas de Yanacocha

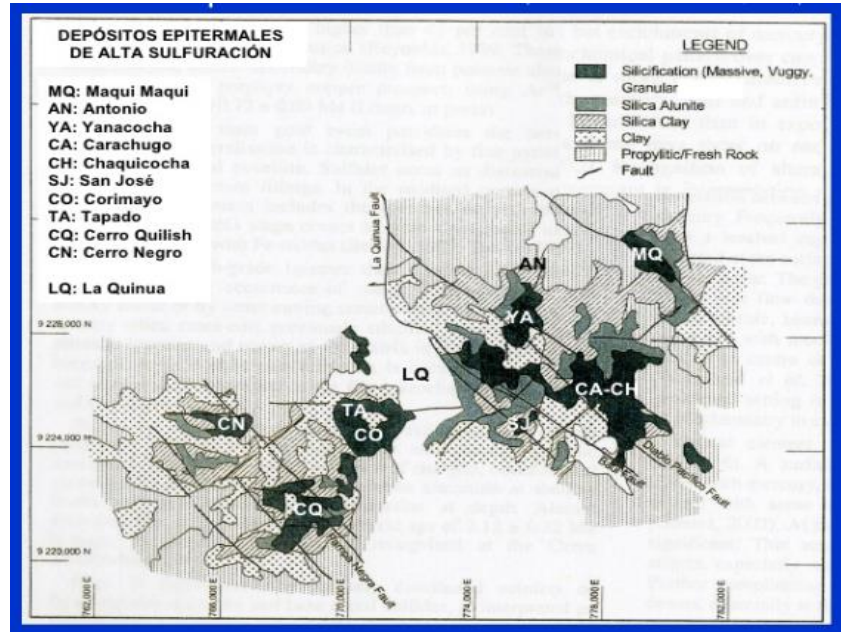


Figura 3. Sección de Alteraciones Típicas de Yanacocha
Fuente: Yanacocha

Voladura de rocas

La voladura es un proceso tridimensional, en el cual las presiones generadas por explosivos confinados dentro de taladros perforados en la roca, originan una zona de alta concentración de energía que produce dos efectos dinámicos: fragmentación y desplazamiento. (EXSA SOLUCIONES. S.A, 2013).

Se entiende por voladura la disposición de un grupo de barrenos, en los que se ha colocado una cierta carga de explosivo y se inicia con una secuencia tal que se consiguen los resultados de fragmentación y desplazamiento deseados, sin afectar a elementos ajenos a la misma (UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID , 2013)

El objetivo de la voladura controlada es evitar el rompimiento de la roca fuera de límites previamente establecidos, es decir evitar la sobre rotura (overbreak). Es un método especial que permite obtener superficies de corte lisas y bien definidas, al mismo tiempo que evita el

agrietamiento excesivo de la roca remanente, con lo que contribuye a mejorar su estabilidad, aspecto muy importante en trabajos subterráneos de orden permanente, para prevención de desplome de techos y otros riesgos, y en superficie para la estabilidad de taludes en cortes de laderas.

Consiste en el empleo de cargas explosivas lineares de baja energía colocadas en taladros muy cercanos entre sí, que se disparan en forma simultánea para crear y controlar la formación de una grieta o plano de rotura continuo. (EXSA SOLUCIONES. S.A, 2013)

La **voladura de contorno** es aquella que limita la voladura con la zona no escavada especialmente en taludes finales, el cual nos permite reducir vibraciones por el diseño de carga que posee, perfilar los taludes sin generar nuevos agrietamientos. (INSTITUTO GEOLÓGICO MINERO DE ESPAÑA, 1994).

La **voladura de Precorte** Consiste en crear en el cuerpo de roca una discontinuidad o plano de fractura (grieta continua) antes de disparar la voladura principal o de producción, mediante una fila de taladros generalmente de pequeño diámetro, muy cercanos, con cargas explosivas desacopladas y disparos instantánea. El disparo de los taladros de precorte también puede hacerse simultáneamente con los de producción, pero adelantándonos una fracción de tiempo de 90 a 120 ms, el disparo es pues en dos etapas (EXSA SOLUCIONES. S.A, 2013).

El mecanismo de rotura de las rocas en ella es empleado la parte de energía del explosivo que corresponde a la onda de detonación y que no alcanza valores superiores al 10% de la energía total del explosivo. En el caso de existencia de una cara libre en las proximidades del taladro, la onda de choque será reflejada en esa superficie, produciendo sobre ella un esfuerzo de tracción, encontrando la roca una libertad de desplazamiento que permite la ampliación del radio fisurado y la fragmentación de la roca en esa cara libre. A esta primera fase de formación de grietas le

sigue una segunda fase, más lenta, en la cual los gases del explosivo a elevada presión y temperatura penetran por estas fisuras 35 originalmente creadas por la onda de detonación, abriéndolas totalmente y lanzando la roca hacia adelante en su frente libre. Ver Figura 5.

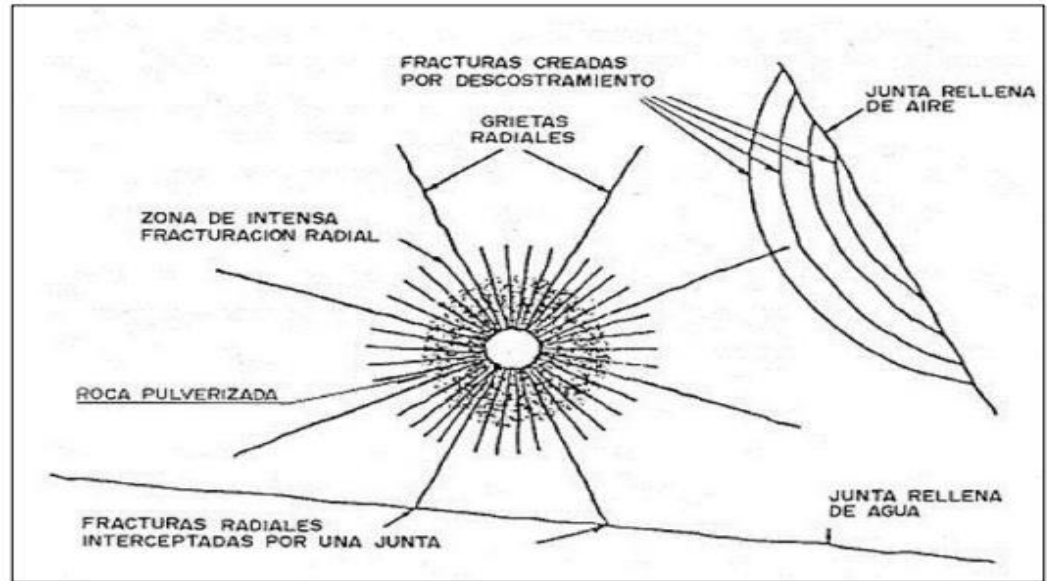


Figura 4. Mecánica de Fragmentación
 Fuente: (Instituto Tecnológico Geo Minero de España , 1991)

Las claves para el rendimiento de una voladura según (EXSA SOLUCIONES. S.A, 2013) Son:

La cantidad de explosivo: Para determinar una correcta cantidad de explosivo existen numerosas fórmulas de cálculo para estimar con mayor o menor precisión la carga de explosivo por barreno. Y así garantizar una buena distribución del explosivo en la voladura, una vez establecida la carga por barreno, éste debe estar repartido de manera homogénea en la voladura, para conseguir un comportamiento del explosivo adecuado para el macizo rocoso en cuestión, de modo que se eviten zonas sobrecargadas o zonas deficitarias de carga.

Distribución de la energía

- La energía debe ser distribuida uniformemente, para lograr un proceso de fragmentación uniforme.
- Tener presente la relación adecuada entre el diámetro del taladro y la altura de banco.
- Tener presente la relación adecuada entre el Burden y el espaciamiento.
- Una implementación cuidadosa del diseño de voladura.
- Perforar en ángulo si se requiere, para una mejor distribución de carga y salida de la primera fila.

Confinamiento de la energía

- La energía explosiva debe ser confinada el tiempo suficiente después de la detonación para establecer fragmentación adecuada y desplazar el material.
- Los taladros deben ser cargados de acuerdo a la representación geológica del macizo rocoso.
- Usar longitud y material de taco adecuado.
- Hacer una configuración de tiempos de acuerdo a las condiciones de campo, y parámetros de Burden y espaciamiento.
- Emplear retardos exactos.
- Para que el explosivo trabaje correctamente es necesario que los gases generados estén confinados en el barreno, de modo que la pérdida de energía por este hecho sea mínima.

Nivel de energía explosiva

- El nivel de energía debe ser suficiente para sobreponerse a la fuerza estructural de la masa rocosa, y a la vez producir desplazamiento controlado.
- Determinar el nivel de energía en el grado de fragmentación y desplazamiento requerido.
- Tener presente la sensibilidad del sitio a disparar.
- Evaluar los explosivos de alta energía para condiciones especiales de terreno (Burden excesivo, toes, pisos, etc.).
- Mantener el control de calidad de los explosivos con pruebas rutinarias.
- Las tres claves para el rendimiento óptimo en voladuras, se resume en el siguiente esquema:



Figura 5. Tres Claves Para Lograr un Rendimiento Óptimo de Explosivos
Fuente: (Hinostraza Sierra, 2014)

Geometría del disparo de la voladura.

Diseño de voladura: Los elementos geométricos del diseño de una voladura para tajos abiertos se pueden observar en la figura N°6. Entre los principales tenemos al burden, al espaciamiento, el taco, la sobreperforación, el diámetro del taladro entre otros.

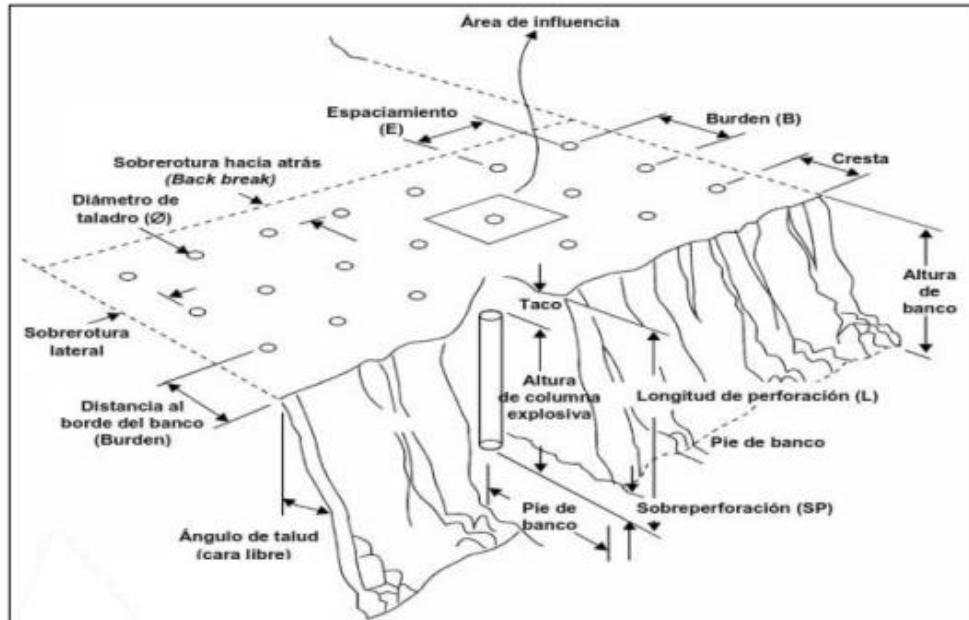


Figura 6. Parámetros de la voladura en banco.
 Fuente: (EXSA SOLUCIONES. S.A, 2013)

Diámetro de taladro: El diámetro de taladro, en muchos casos, es el parámetro más importante en el diseño de perforación y voladura de rocas, porque los demás parámetros están relacionados con esta dimensión. Debe ser evaluada desde dos partes. Primero, es la parte económica de la perforación. Segundo, es el efecto del diámetro en la voladura (fragmentación, proyección de roca, vibración).

Según McKenzie (1994), los factores principales a evaluar para elegir el diámetro de taladro son:

- Costo específico de la voladura ($\$/m^3$ de roca voladura).
- Fragmentación y la relación entre el espaciamiento de los taladros y de las fracturas.
- Control de la exactitud de la perforación, y su efecto en la fragmentación, seguridad e impacto ambiental.
- Tamaño de la perforadora y la accesibilidad al sitio.
- Altura del banco y la proporción del taladro requerido para el taco.

Burden: Es la distancia más corta del taladro a la cara libre o al punto de alivio en el momento que el taladro detona. Se considera que el cálculo del burden es un parámetro muy crítico en el diseño de voladura de rocas. Un apropiado burden garantiza el control de la fragmentación de la roca, control en la proyección de rocas, principalmente.

Si el Burden es demasiado pequeño: Demasiado desplazamiento de la roca volada, Presión dinámica sobre el explosivo de los taladros cercanos, La fragmentación es demasiado fina.

Si el Burden es demasiado grande: Sobre rotura de la cara final, lanzamiento de material hacia atrás, proyección de rocas (fly rock), niveles de golpe de aire alto, formación de cráteres, niveles de vibración altos.

Espaciamiento: Se recomienda usar una malla triangular equilátera, y no una malla cuadrada, porque aporta más efectividad en la fragmentación de la roca. Por tal razón, el espaciamiento se relaciona, generalmente, con el burden.

(McKenzie, 1994) Sostiene que “evidencias teóricas y prácticas sugieren que la relación óptima S/B para operaciones normales en bancos con mallas trabadas (triangulares equiláteros) está en el rango de 1.1 a 1.4”.

Taco: El taco es el relleno de la parte superior del taladro con material estéril. Su misión es la de retener los gases producto de la detonación del explosivo, durante fracciones de segundos, suficientes para evitar que los gases fuguen por la boca del taladro, de esta manera trabaje por completo en el proceso de la fragmentación de la roca.

- Si no hay taco los gases escapan a la atmosfera arrastrando gran cantidad de energía que debería actuar en la fragmentación de la roca.
- Si el taco es insuficiente habrá problemas de fuerte ruido por onda aérea, de craterización y proyección de rocas (fly rock).
- Si el taco es excesivo, se obtendrá gran cantidad de bloques procedentes de la parte superior del banco, por tanto, fragmentación irregular, poco esponjamiento de la pila del material y un nivel de vibración muy alto.

(McKenzie, 1994) Sostiene que “El material óptimo para el taco es un árido granulado (gravilla angular) con un tamaño medio aproximadamente igual a un décimo o un quinceavo del diámetro del hoyo. Luego, un hoyo de 100 mm de diámetro debería utilizar un árido de 10 a 12 mm. Bajo estas condiciones, el largo del taco frecuentemente se puede reducir a casi 20 a 25 veces el diámetro del hoyo”

La teoría Scale Depth of Burial, enunciada por (CHIAPPETTA, 2014), es una de las muchas reglas que existen para determinar la longitud del taco efectivo en un taladro. Esta teoría es bastante usada en los diseños de Voladura.

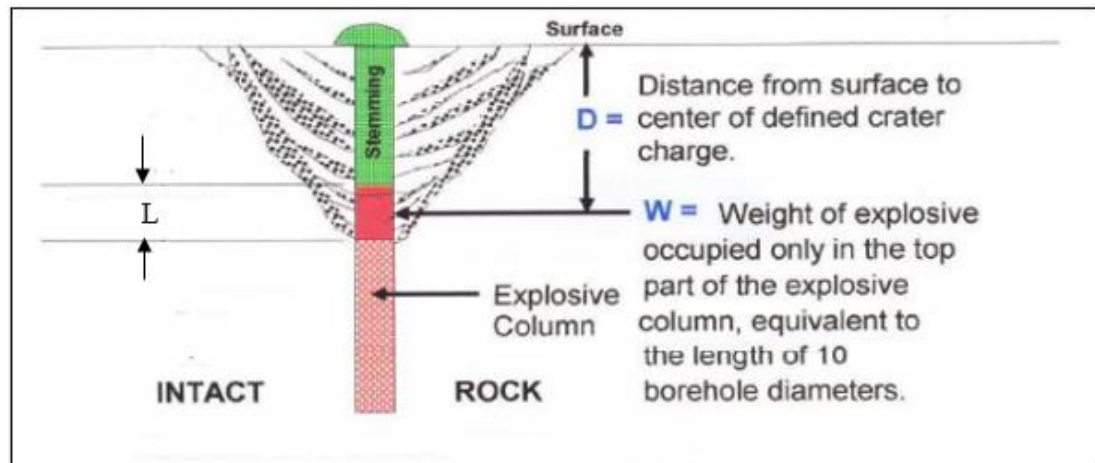


Figura 7.Indicaciones Geométricas de un Taladro
Fuente. (CHIAPPETTA, 2014)

El criterio de Chiappetta se basa en la siguiente expresión:

$$SD: D/W^{1/3}$$

Donde:

D, es la distancia de la superficie al centro de la carga del cráter (m).

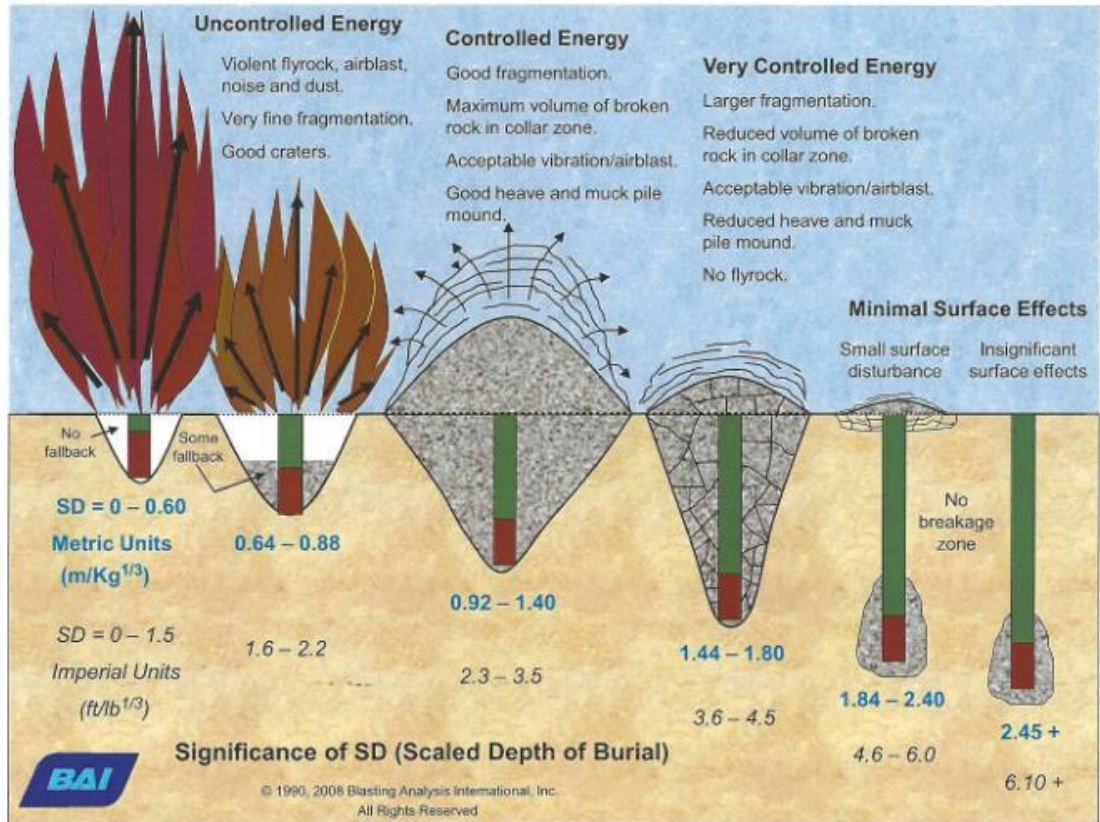
W, es el peso del explosivo en la parte superior de la columna, equivalente a la longitud de 10 diámetros del taladro (kg).

SD, corresponde a las siglas Scaled Depth of Burial.

En el sistema de unidades métricas, como se ve en la Figura 9, los valores de SD menores a 0.88 generan una buena fragmentación pero hay un excesivo desperdicio de energía que provoca flyrocks, polvo y ruido. Por otra parte los valores mayores a 1.84 no generan ninguna perturbación exterior pero tampoco genera un cráter ni una buena fragmentación. Los valores de SD entre 1.44 y 1.80 generan un mínimo de flyrocks y una

fragmentación controlada pero el cráter no es el óptimo. Finalmente en el caso de un SD entre 0.92 y 1.40 hay una generación de flyrocks y ruidos insignificantes. Así mismo, hay una buena fragmentación y una generación del cráter óptimo.

Figura 8. Profundidad /Distancia Escala (SD)



Fuente: (CHIAPPETTA, 2014)

Parámetros en la voladura de rocas

De acuerdo con los criterios de la mecánica de rotura, la voladura de roca es un proceso tridimensional, en el cual las presiones generadas por explosivos confinados dentro de taladros perforados en la roca originan una zona de alta concentración de energía que produce dos efectos dinámicos: fragmentación y desplazamiento.

El primero se refiere al tamaño de los fragmentos producidos, a su distribución y porcentajes por tamaños, mientras que el segundo se refiere al movimiento de la masa de roca triturada.

Teniendo en cuenta los diversos criterios que involucra un trabajo de voladura, como el propósito o uso final del lugar a excavar o el del material a obtener el volumen a ser excavado, el grado de fragmentación promedio requerido, si la roca excavada se quedará in situ o será transportada a otro lugar, el tipo y la dimensión del equipo de remoción y acarreo disponible, la proximidad a instalaciones importantes que puedan ser afectadas por vibraciones o proyecciones, además de otros, es pues necesaria una planificación cuidadosa de la voladura considerando todos los detalles que puedan influir en sus resultados.

Una serie de factores o variables que intervienen directa o indirectamente en la voladura de rocas, que son mutuamente dependientes o que están relacionados uno u otro; unos son controlables y otros no. (EXSA SOLUCIONES. S.A, 2013)

VARIABLES DE UNA VOLADURA



Cuadro N°1: Fuente: *Elaboración Propia*

Otros factores que se deben considerar en el planeamiento de un disparo son el costo de perforación y el costo del explosivo, con base en el consumo total de explosivo por m³ o tonelada de roca movida (factor de carga en kg/m³). También para ciertos tipos de explosivo su vida útil (shelf life).

Evaluación de la voladura

Una voladura se evalúa por los resultados obtenidos. Para calificarla se consideran los siguientes aspectos: volumen de material movido, avance del disparo, pisos, fragmentación, forma de acumulación de los detritos, costo total del disparo.

La voladura, como primera etapa del proceso de conminución de la roca, tiene como misión el preacondicionamiento o preparación de ésta para su posterior procesamiento, a fin de obtener un producto comercializable, en la forma más económica.

Un reciente estudio de Claude Cunningham ("Los detonadores electrónicos: éxito creciente en la transformación de la fragmentación de roca"), precisa que un requisito básico de la minería moderna es reducir el consumo de energía y dos vías para lograrlo son: (a) mejorar la productividad del equipo de minería mediante el mejoramiento de la facilidad de excavación, facilitar el chancado, la trituración, y el ritmo de producción de un tonelaje determinado.

El propósito primario de una voladura es fragmentar la piedra para su posterior manejo o procesamiento. Los efectos en el ciclo minero de una buena fragmentación pueden ser notados en la carga, manejo, machacado, molienda y los procesos secundarios de las voladuras. El beneficio mayor de una evaluación de la fragmentación es proporcionar información al ciclo minero y usar esta información para producir unos diseños de voladuras

Por otro lado, debido a las restricciones de rendimiento de planta y una tendencia a subestimar el poder del diseño de voladura de cambiar las propiedades de flujo de roca desde la mina, existe una tendencia general a aumentar la escala de inversión en los circuitos convencionales de chancado y trituración.

Esquema de configuración de tiempos para una voladura

Propósito de la detonación secuencial: Controlar La energía del explosivo durante la detonación

Tenemos que tener en cuenta los siguientes puntos:

- La secuencia de iniciación controla la energía del explosivo que es aplicada a la masa rocosa.
- Nos permite que los taladros sean disparados manteniendo una secuencia ordenada y correcta con el fin de crear caras libres.
- Controla la energía del explosivo, lo que se traduce en mejorar la fragmentación y el control de proyección de la roca.
- Controlar el confinamiento de la energía del explosivo:
- Prever alivio y controlar el desplazamiento del material disparado.
- Reducción del sobre - quiebre, a los lados y atrás (back y end break).
- Controlar la vibración (Frecuencia, PPV) y golpe de aire.
- El rendimiento de la voladura, se verá afectado si el diseño tiene poco o mucho retardo.
- Mantener la generación de energía del explosivo al máximo.
- El nivel de energía debe ser suficiente la fuerza estructural de la roca y permitir el desplazamiento.
- Intervalos de tiempo inapropiados de retardos, producen dead pressing (muerte de presión: baja generación de energía en algunos explosivos).
- Controlar los kilogramos de explosivo que detonan a un tiempo.

Consideraciones de diseño

Sensitividad del sitio: Niveles de vibración permitidos en estructuras cercanas y así predecir el control de vibración.

Fragmentación requerida: Para obtener una fragmentación uniforme, se requiere la producción constante de continuas caras libres durante el proceso de la voladura. Para obtener una óptima fragmentación en roca masiva, se debe detonar un retardo por taladro, donde dichos períodos, se sugiere espaciar los tiempos en 30 ms como mínimo, con un factor de energía de 215 Kcal/T.

Desplazamiento del material La dirección del desplazamiento depende del paso de menor resistencia de la energía del explosivo en trayectoria. Diseñar adecuadamente el Proyecto de Voladura, en donde la secuencia de tiempos puede controlar la dirección y apilamiento del material disparado. Retardos cortos (menor de 25 ms) entre taladros de una misma fila, reduce la fragmentación pero mejora el desplazamiento; retardos largos (mayores de 100 ms) maximizan el desplazamiento del material.

Control de taludes: Tiempos muy cortos entre taladros de una misma fila ocasiona sobre quiebre (over break).

Tiempos muy cortos entre líneas (menores de 35 ms) ocasionan sobre quiebre (back break) por sobre confinamiento.

Geología: La masa rocosa altamente fracturada, permite el escape de los gases de los explosivos en todas direcciones, incrementando el potencial de corte; en este caso los tiempos entre líneas deben estar por debajo de los 12 ms por metro de Burden. En masas rocosas suaves, requerimos de más tiempo para un mejor desplazamiento del material y un mejor control del over break.

Condiciones de Agua: Los taladros saturados de agua, transmiten hidro-presión, lo que produce el desacople de la carga explosiva o incremento de la densidad hasta el punto donde ya no puede iniciarse.

Todo lo mencionado arriba está en función al perfil del material que se desea obtener y al equipo de excavación con que cuenta la mina.

Diseño básico de tiempos

El diseño de tiempos de retardos, tanto los de superficie como los de interior de taladro, determina las secuencias que sirven para controlar los niveles de vibración, los mecanismos de rotura de la roca, la dirección, el perfil del material, la sobre excavación, y el desplazamiento que puede ser dirigido en diferentes direcciones de acuerdo a los fines deseados. Ver tabla 4.

Tabla 4
Tiempos en función al Burden y tipo de roca

TIPO DE ROCA	Burden de alivio
	Milisegundo por metro (ms/m)
Suave	20
Media	15
Dura	10

Aspectos positivos y negativos de la calidad de la voladura

Tabla 5
Aspectos positivos y negativos de la calidad de una voladura

Buena Voladura	Mala Voladura
	Incremento en consumo de explosivos.
	Costos adicionales de voladura secundaria.
Optimo consumo de explosivos	Mala fragmentación (o muchos bolones o muy fino)
Buena fragmentación	Taludes inestables y se comienza a perder el control
Taludes estables y controlados	Pésimas condiciones de seguridad al personal
Mejores condiciones de seguridad al personal	Mayores costos de voladura
Optimo costo de voladura	

Fuente: Elaboración Propia

Tasa de excavación (DIG RATE)

Es la relación entre las toneladas nominales cargadas y el tiempo de carguío

$$Tasa\ de\ excavación\ \left(\frac{t}{h}\right) = \frac{tonelaje\ nominal}{tiempo\ de\ carguío}$$

Donde:

Tonelaje nominal:

El tonelaje nominal es el valor que resulta de la multiplicación de la capacidad de carga útil del equipo por un factor de ajuste.

Éste factor de ajuste se obtiene de la relación entre el tonelaje VIMS(sistema de administración de información vital) toneladas húmedas menos el % de humedad y el tonelaje reportado por Leica (Leica siempre reporta toneladas secas). Es decir son toneladas que el camión puede cargar.

*tonelaje nominal = capacidad de carga útil del equipo * factor de ajuste*

Tiempo de carguío o load time

Es el tiempo transcurrido desde que se inicia el carguío de un camión hasta que éste es despachado.

*nota importante: la tasa de excavación no considera tiempo de cuadrado (spot time), ni demora (delay), es por ello que la perforación y voladura tiene incidencia directa en ella, a diferencia de la productividad que si considera demoras operativas.

Fragmentación

La fragmentación de rocas por voladura comprende a la acción de un explosivo y a la consecuente respuesta de la masa de roca circundante, involucrando factores de tiempo, energía termodinámica, ondas de presión. Mecánica de rocas y otro, en un rápido y complejo mecanismo de interacción.

En su trabajo de investigación (Mancera, Serrano, & Guerrero Paez, 2011) dice que una de las consideraciones más importantes de la voladura es la fragmentación del material, ya que de acuerdo con la variación, se obtienen resultados importantes en los equipos de carguío y transporte.

El control de la fragmentación requiere que los taladros detonen en una secuencia controlada.

La selección de los retardos por lo tanto está influenciada por el sistema de iniciación usado.

Para obtener una buena fragmentación es vital que los taladros de una malla detonen en una secuencia asignada. Si se le asignara un solo tiempo a toda una fila de taladros, las grietas crecerán entre taladros, pero no hacia la cara libre. Entonces el burden se moverá como una gran hoja de roca, con insuficiente fragmentación en el burden. Ver figura 10.

Si se le asigna un tiempo diferente a cada taladro, la detonación de un taladro fragmenta a la roca circundante que le corresponde, y del mismo modo todos los taladros de una fila. Una óptima asignación de un tiempo de retardo a los taladros se relaciona con la velocidad en que se mueve la roca fragmentada.

Si el movimiento de la masa rocosa es lento se requiere intervalos de tiempo entre taladros más largos. Sin embargo, si el intervalo de tiempo es demasiado largo que el necesario no contribuye a la fragmentación. Rocas duras y masivas se mueven a una velocidad muy alta, comparado con una roca débil y altamente fracturada.

(Romero Paucar , 2016) Concluye en su investigación que el el movimiento de la roca fragmentada depende del grado de fracturamiento y la resistencia de la roca.

La velocidad de movimiento de la roca fragmentada de una malla de burden pequeño es más alto que una malla con burden más grande. Por tanto, la masa rocosa y el diseño de malla definen el intervalo óptimo de tiempos entre taladros para la fragmentación que se desea

(Romero Paucar , 2016) Concluye que La mayor ventaja de los detonadores electrónicos es su precisión y exactitud porque la dispersión de los tiempos en los detonadores pirotécnicos es 21.88ms y en los detonadores electrónicos es 0.24ms.

(Poma Fernández , 2016) En su trabajo de investigación nos dice que en la práctica, la velocidad del movimiento de la roca depende fuertemente del módulo de la roca y del grado de diaclasamiento. Tipos de rocas muy duras, masivas, se moverán con una velocidad más alta que una masa rocosa débil, altamente fracturada. Los parámetros de perforación con burden pequeño también tendrán altas velocidades de burden en relación con mallas con burdens más grandes. La masa rocosa y la malla, por lo tanto, determinan el intervalo óptimo para la fragmentación.

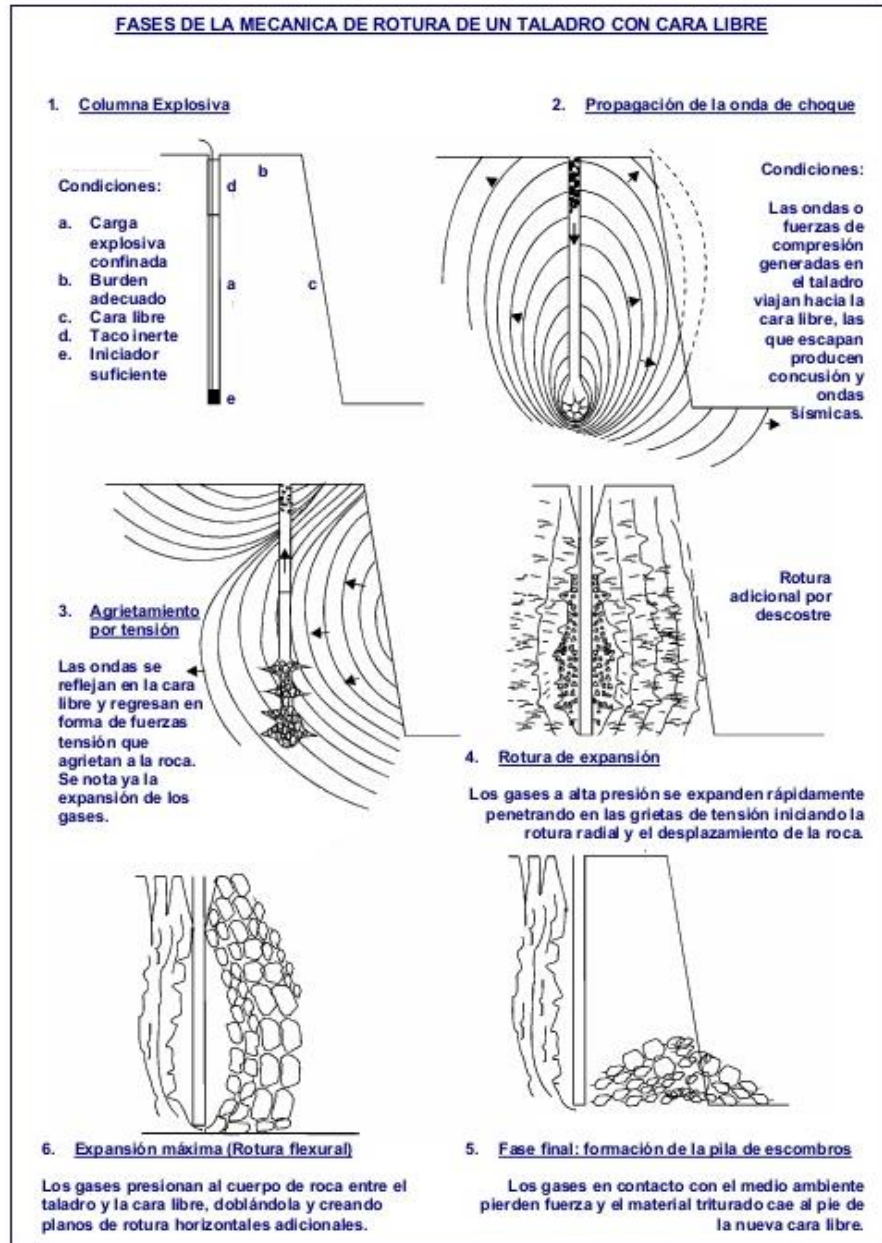


Figura 9. Fases de Mecánica de Rocas de un Taladro
 Fuente: (EXSA SOLUCIONES. S.A, 2013)

Descripción del sistema electrónico

Este tipo de detonadores, de similar estructura que el detonador pirotécnico, están constituidos por una cápsula metálica de aluminio cerrada por un extremo, encontrándose en su interior un condensador, un chip, un inflamador, un explosivo primario y un explosivo base. Estos detonadores tienen como principales características su seguridad y su precisión de detonación.

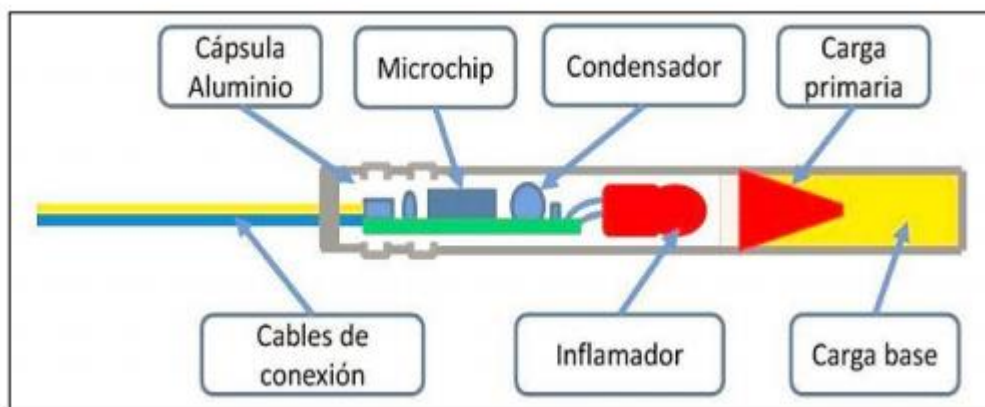


Figura 10. Partes de Detonador Electrónico

Fuente. (Bernaola A, Castilla G, & Herrera H, 2013)

Iniciador de Línea (String Starter).

- El Iniciador de línea se utiliza para conectar una línea de detonadores de 4 vías y convertir las comunicaciones de 4-vías en 2-vías y viceversa.
- Los Iniciadores de línea vienen con el conector terminal incluido, que sirve para cerrar el circuito de una línea de detonadores.
- Todos los Iniciadores de líneas vienen asignado con el número 0 de fábrica, por lo que antes de ser utilizado, debe ser asignado con un número de identificación específica entre el 1 al 50.
- Cada Iniciador de línea tiene capacidad para un máximo de 200 detonadores Shot™.



*Figura 11.*Iniciador de Línea

Tagger

Se utiliza para:

- Probar detonadores de forma individual.
- Probar líneas de detonadores.
- Seleccionar configuraciones de primado
- Asignar retardos entre taladros, entre filas y entre decks.
- Visualizar los tiempos programados en un listado.
- Asignar los detonadores para indicar un cambio en la programación, configuración de primado una ubicación específica dentro de la malla de voladura.
- Asignar Iniciadores de líneas.



Figura 12. Tagger

Bench Box.

- El Bench Box es la unidad que se utiliza en conjunto con el Bloque de conexión, la Llave de disparo y los Iniciadores de línea para iniciar una voladura.
- Cuando se necesita de una mayor distancia para iniciar la voladura, se requiere usar el Bench Box en conjunto con la Estación Base, utilizando comunicación inalámbrica por radio frecuencia o vía de cables de disparo.
- El Bench Box se utiliza también para probar todos los detonadores y los Iniciadores de línea en la malla de voladura (la instalación completa).
- El Bench Box puede iniciar 1600 detonadores usando un Bloque de conexión que tiene 8 canales en total, con una capacidad de 200 detonadores y un máximo de 20 iniciadores de línea por canal.

- Si se utiliza un Bloque de expansión agregando otros 4 canales al sistema, la capacidad aumentará a 2400 detonadores.



Figura 13. Bench Box

Bloque de Conexión.

- El Bloque de conexión conecta los Iniciadores de líneas con el Bench Box a través de los cables de disparo de 2-vías.
- Cada par de conectores ubicados en el Bloque de conexión, se llaman canales. Estos no son sensibles a la polaridad del cable de disparo de 2-vías.
- El Bloque de conexión también tiene una bandera mecánica, que es acoplada al contacto circular mediante electromagnetismo. El acoplamiento tiene lugar cuando se va iniciar el proceso de programación, armado y disparo. A su vez, la bandera mecánica actúa como dispositivo de seguridad, que se desacopla cuando existe un error durante el proceso de programación y armado. También se desacopla después del disparo, quedando la bandera en posición vertical, indicando que se puede aproximar a la malla de voladura.

- Existen 8 canales en el Bloque de conexión.
- Cada canal puede alojar 200 detonadores ShotTM y 20 Iniciadores de línea.
- El Bloque de conexión puede por lo tanto alojar un total de 1600 detonadores y sin embargo hay 20 iniciadores de línea por canal, el sistema completo está limitado a un máximo de 50 iniciadores de línea para asegurar que se mantenga una comunicación eficiente.



*Figura 14.*Bloque de conexión

Base Station.

- La Estación Base es una interfaz en conjunto con el Bench Box que permiten al usuario iniciar una voladura desde una distancia remota utilizando radio frecuencia (RF) o mediante un Cable de disparo de 2-vías.
- La Estación Base tiene la capacidad de armar e iniciar los detonadores electrónicos ShotTM desde distancia a través del Bench Box

Llaves de Disparo (Smart Key).

- Existen dos Llaves de disparo: una es utilizada para activar el Bench Box y la otra para activar la Estación Base.
- Las Llaves de disparo contienen un enlace físico sin el cual no es posible enviar el voltaje hacia los detonadores. También alojan los dispositivos electrónicos requeridos para generar las señales de disparo, como también habilitar la comunicación entre los equipos.
- Si el disparo es realizado desde el Bench Box y no desde la Estación Base, entonces se requiere solo de la Llave de disparo roja para el Bench Box.
- Si el disparo es realizado de forma remota mediante RF o cable de disparo de 2-vías, entonces se requerirá la Llave de disparo amarilla en el Bench Box y la Llave de disparo roja en la Estación Base.
- La Llave de disparo roja contiene las decodificaciones que habilitan los comandos de disparo y debe ser utilizado desde el equipo que ejecutará la orden de disparo.

Cables Extensores.

- Nos permite extender la longitud de los cables de superficie de los detonadores, en mallas cuyo espaciamiento sea mayor.
- Ayuda a conectar otros disparos, ya sean electrónicos o pirotécnicos (precortes, producción, bolonería, etc.).



*Figura 15.*Cables extensores

Cable de disparo de 2 – vías.

- El cable de disparo de 2-vías se utiliza para conectar el Tagger con el o los Iniciadores de líneas, para realizar el testeo en 2-vías final.
- El cable de disparo de 2-vías también se utiliza para conectar el Bloque de conexión y expansión, para realizar el testeo, la programación, el armado y disparo de la malla de voladura desde el Bench Box.
- La longitud máxima del cable de disparo de 2-vías que se puede utilizar va a depender de la cantidad de detonadores ShotTM conectados a la malla de voladura y la longitud de su cable de superficie. Se debe considerar que el límite máximo es de 2.000 m entre el cable de disparo de 2-vías y los cables de 4-vías de superficie de la línea más distante de detonadores en la malla de voladura.



*Figura 16.*Cable de Disparo

Conector Terminal (End Plug).

- El Conector terminal es usado para indicar los extremos o límites de una malla de voladura.
El Conector terminal cumple la función de cerrar el circuito electrónico.
- Se colocan al final de cada línea de detonadores.

Booster

- Son de forma cilíndrica de plástico protege a la mezcla explosiva que contiene, permitiéndole ser más insensible a los golpes o roces, así como una mayor resistencia al ataque del agua presente en algunas perforaciones.
- Es el más eficiente iniciador de agentes de voladura que se fabrica y es especialmente recomendable para diámetros medianos y grandes.



Figura 17.Booster

Descripción del sistema no eléctrico o pirotécnico

Estos sistemas tienen como característica una onda de choque de baja velocidad (aproximadamente 2000 m/s) que se propaga a través de un tubo de plástico o tubo de choque que contiene en su interior una película delgada de explosivo de 20 mg/m y es transmitida hacia el detonador. La reacción no es violenta, y relativamente silenciosa, no causando interrupción ni al explosivo ni al taco.

El detonador pirotécnico se compone de una cápsula de aluminio la cual contiene en su interior una carga base de pentrita, una carga primaria de azida de plomo, un elemento cilíndrico metálico portador de la pasta de retardo llamado portarretardo, un sistema amortiguador de onda de detonación y un tapón de goma semiconductor que sirve como elemento de engarce al tubo de transmisión como se observa en la figura N°18.

La carga base tiene la función de iniciar con suficiente energía de explosivo, mientras que la carga primaria de nitrato de plomo recibe la energía de iniciación de la columna pirotécnica del portarretardo y la transfiere a la carga de pentrita.

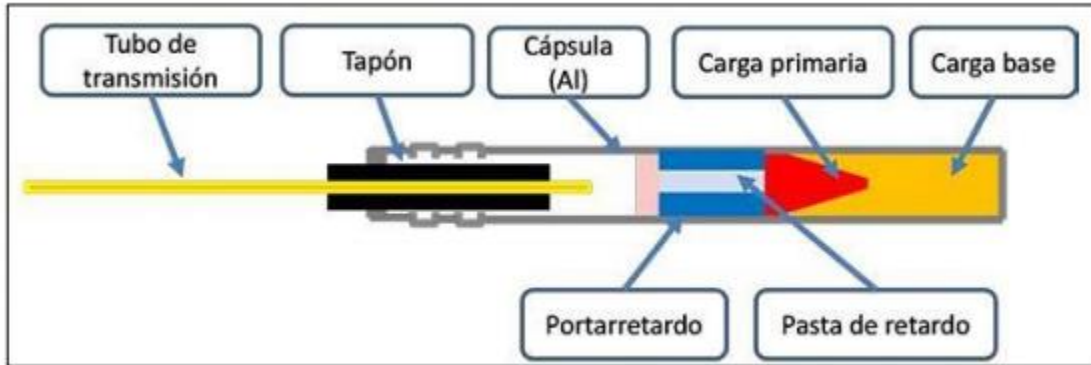


Figura 18. Partes de detonador pirotécnico.

Fuente. (Bernaola A, Castilla G, & Herrera H, 2013)

El sistema de iniciación pirotécnico está compuesto por un fulminante número 12, un tubo de choque de alta resistencia a la tracción y abrasión, un conector plástico resistente “J” y etiqueta. Cuenta con dos puntos de identificación (en el clip y en la etiqueta)

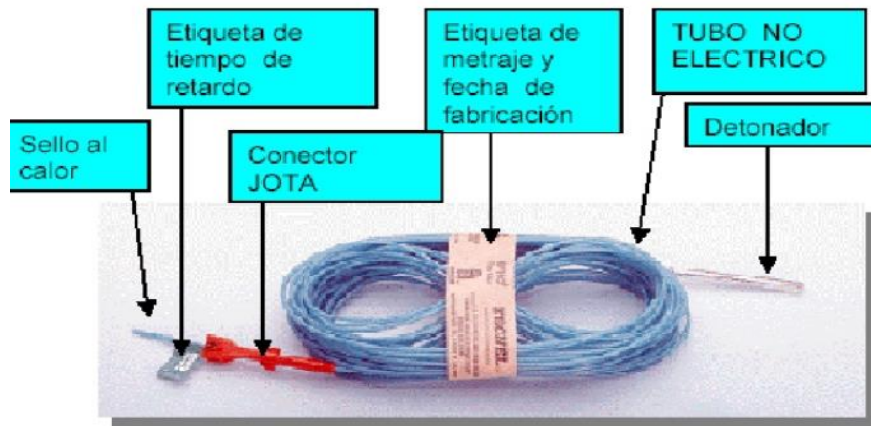


Figura 19. Descripción del Sistema de Iniciación

Tubo De Choque

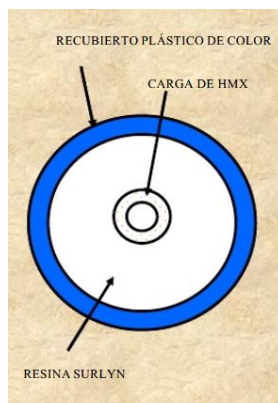
Conduce la onda de detonación de baja energía a una velocidad de aproximadamente 2.000 m/s.

Este fenómeno de onda de choque se propaga con toda fiabilidad a través del mismo aunque en él existan dobleces o nudos.



*Figura 20.*Tubo de Choque

Características del tubo de choque



*Figura 21.*Características del Tubo de Choque

Conectores

Sirve para unir el tubo de choque a una línea troncal de cordón detonante. Se trata de un elemento de retardo de superficie. Este incorpora un bloque conector de plástico con el retardo de baja potencia, engarzado a un tubo de transmisión.



Figura22. Conectores

Etiquetas:

Etiqueta, que indica el periodo de retardo del detonador y el tiempo nominal de detonación.

Ventajas y desventajas de los sistemas de iniciación

Tabla 6
Ventajas y desventajas del sistema electrónico

	VENTAJAS	DESVENTAJAS
SISTEMA DE	<ul style="list-style-type: none"> - Permite un control total de la voladura - Reduce las vibraciones producidas por las voladuras. - No explotan sin un código de activación. - Poseen la capacidad de programar todos los detonadores. - Precisión de tiempo de iniciación.. - Asignar cualquier tiempo de incremento en milisegundos a los detonadores, permitiendo un amplio rango de posibilidades de mejoras en las voladuras nos permite una mejor fragmentación en la roca. - Controlar TQs los que son el mayor riesgo en la voladura 	<ul style="list-style-type: none"> - Mala selección de los tiempos de iniciación lo que genera resultados contrarios a los previstos, lo cual no es difícil que ocurra. Por ejemplo, este hecho puede ocurrir en voladuras en las que la secuenciación elegida haga

INICIACIÓN ELECTRÓNICA	- Precisión y flexibilidad de tiempo de los detonadores electrónicos, permitiendo un apilamiento de material tronado más uniforme	que se disparen al mismo tiempo varios detonadores.
ICA	<ul style="list-style-type: none"> - Obtener un resultado más homogéneo, que permite reducir la cantidad excesiva de material fino y de grandes dimensiones, logrando en general reducciones en el manejo de costos, menores costos por voladura secundaria y una mejora global de la eficiencia - Controlar tiros fuera de secuencia y reducir la cantidad de explosivo utilizado por retardo - Incrementar la productividad de equipos de carguío y transporte. - Incrementar el rendimiento de la chancadora - Acortar los tiempos de ciclo de operación - Mejorar las condiciones de los pisos del banco post voladura - Controlar el perfil de la pila de material tronado - Reducción de riesgos en cuanto a seguridad 	<ul style="list-style-type: none"> - Alto costo unitario y la complejidad en su uso (es necesario contar con un especialista con dedicación exclusiva), han sido grandes obstáculos para que sea un sistema de uso masivo

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7
Ventajas y desventajas del sistema pirotécnico

	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p>SISTEMA DE INICIACIÓN PIROTÉCNICA</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo costo unitario - Este sistema se puede emplear en cualquier tipo de terreno. - Una mayor cantidad de retardos necesarios para el diseño de secuencia en una voladura. Ello minimiza las vibraciones. - Mayor control sobre el diseño del desplazamiento de la roca (fly rock). - El detonador no eléctrico otorga un alto nivel de seguridad contra la iniciación por electricidad estática, corriente y transmisiones de radiofrecuencia. - Incorpora alta resistencia a la tracción, alta resistencia a la abrasión y con fiabilidad en la transmisión de la señal al interior del tubo de choque. 	<ul style="list-style-type: none"> - Imprecisión de tiempos de iniciación - No se le puede asignar cualquier tiempo de incremento en milisegundos a los detonadores, puesto que éstos ya vienen con tiempos establecidos. - presentan una dispersión de $\pm 2\%$ en tiempos largos y $\pm 10\%$ en tiempos cortos. - Mayor presencia de TQs.

Fuente: Elaboración Propia

Vibraciones

Las vibraciones generadas por las voladuras se transmiten en el macizo rocoso como ondas sísmicas cuyo frente se desplaza radialmente a partir del punto de la detonación. Las distintas ondas sísmicas se clasifican en dos grupos: Ondas Internas (primarias o de compresión) y Ondas Superficiales (transversales o de cizallamiento)

Tipos De Ondas: Las principales ondas que se propagan por la corteza terrestre incluyen dos clases, las de tipo volumétrico y las de tipo superficial a saber (Kolsky, 1963):

- **ONDAS P.** Longitudinales o de compresión: son aquellas que provocan la vibración de las mismas partículas en la misma dirección del radio de la onda, siendo análogas a las ondas sonoras.
- **ONDAS S.** Transversales o de corte: con vibración de la partícula perpendicular al radio de la onda, teniendo una velocidad inferior a las de las ondas P y no se propaga en medios fluidos.
- **ONDAS R.** o de Rayleigh: se propaga a lo largo de la superficie de la tierra con amplitudes que disminuyen exponencialmente con la profundidad, trasportando la mayor parte de la energía sísmica (semejantes a las ondas que se crean cuando cae un objeto sobre la superficie de un lago)

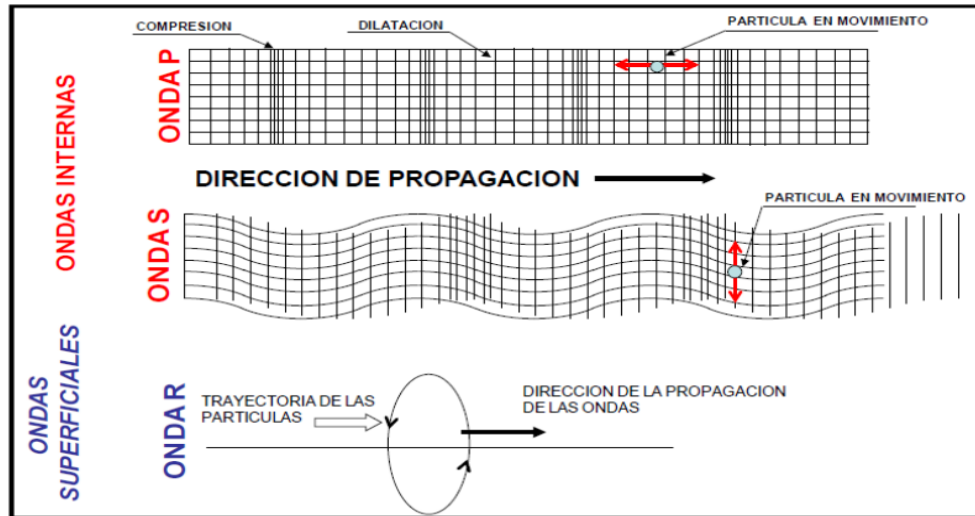


Figura 22. Tipos de Ondas
 Fuente. (Giraldo, 2010)

Factores que afectan a las vibraciones

Los parámetros que afectan a la generación de vibraciones generadas por voladura se pueden enumerar a continuación

- Cantidad de explosivo que detona simultáneamente

El factor más intuitivo que influirá en la generación de vibraciones producidas por voladuras es la cantidad de explosivo detonado en la voladura a la vez. En cambio, este valor no coincide con la carga total de la voladura, puesto que, debido a la secuencia de detonación diseñada, no detonan todos los barrenos a la vez. Está demostrado que la vibración generada por dos barrenos detonados con un retardo de 8 ms entre sí no supone una mayor vibración en el terreno, puesto que las ondas no se solapan y se pueden considerar disparos independientes. Así, aquellos barrenos que detonan con un retardo de 8 ms o menos, implica un solape de las ondas de vibración, y, por tanto, un mayor valor en la vibración generada. Así, se denomina carga operante a la suma de todos los barrenos que detonan en una ventana de 8 ms, suponiendo, en

este caso que el efecto sería el equivalente a la vibración generada por la suma de dichos barrenos.

- Grado de confinamiento

El grado de confinamiento influye en la generación de vibraciones puesto que un mayor grado de confinamiento implica una mayor dificultad en fragmentar y mover la roca, por lo que la energía generada por la detonación se transformará en energía sísmica que se transmitirá por el terreno. Visto desde el lado opuesto, un menor grado de confinamiento, implicará que la energía de la detonación se transformará con mayor facilidad en energía de fragmentación, así como en energía mecánica empleada en desplazar la roca volada.

- Características de la roca

Otro factor que tiene gran influencia en la generación de vibraciones es el comportamiento de la roca en la cual se ha producido la alteración sísmica. Esto es debido a que cada tipo de roca transmite de manera diferente las vibraciones, debido principalmente a su composición y a su densidad.

La densidad de la roca hace que cuanto mayor sea la densidad del medio, mayor capacidad de transmitir las ondas de vibración.

- Distancia al lugar de la detonación

Resulta evidente que un factor fundamental en la determinación de las vibraciones producidas es la distancia al lugar de la detonación. Así, es clave escoger los puntos de vibración sobre todo cuando estos puntos son puntos especialmente sensibles que afectar por las vibraciones en el terreno.

De este modo, es un factor determinante en el diseño adecuado de la voladura cuando el lugar de disparo se encuentra cerca de núcleos habitados o instalaciones industriales especialmente sensibles. En el otro extremo se situaría el caso en el que la voladura se encuentra en lugares aislados o remotos, donde una mayor generación de vibraciones no influye de manera notable en el entorno.

- Geología del terreno

La generación de vibraciones por voladura también se ve afectada por la estructura geológica del macizo rocoso, puesto que una gran fracturación o estratificación, hace que existan multitud de planos de reflexión de las ondas, actuando cada contacto entre estratos, o entre juntas, como un plano de discontinuidad del medio.

Por otro lado, cada tipo de roca tiene un comportamiento diferente en función de las características tensionales del medio. En este aspecto existen rocas más plásticas y otras más elásticas, de modo que son capaces de absorber las ondas vibratorias de modo diferente, y, por tanto, de transmitir las también de modo diferente.

Criterio de Daño al macizo Rocosos en taludes

(Hook and Bray)

Tabla 8
Criterio del macizo rocoso

Forma de daño	Velocidad de partícula (mm/seg)
Quiebre de roca	2500
Inicio de quiebre	650

Caída de rocas en galerías no revestidas.	300
Daño meno, agrietamiento de yeso o estuco	130

Fuente: Hook and Bray

Normativas para el Control de Vibraciones

A continuación, describiremos las diferentes normativas existentes tanto internacionales como nacionales para determinar si las voladuras causan daño en estructuras cercanas.

Normativas Internacionales: Los países desarrollados siempre han tratado de tener el mejor control de vibraciones en sus operaciones para evitar problemáticas ambientales. Se han creado instituciones que mediante estudios han establecidos normas y leyes de protección en su entorno.

Las normas internacionales más destacadas son las siguientes:

- Alemania: DIN 4150
- Francia: GFEE
- Gran Bretaña: BS 7385
- Suecia: SS460 48 66
- Portugal NP-2074
- Internacional: ISO 2631
- Estados Unidos: USBM RI 8507

Normativa Alemana DIN4150: La normativa alemana DIN 4150 en su tercera parte trata los efectos en edificios y sus elementos estructurales de vibraciones de carácter internas o externas.

Para esta normativa, el objetivo es marcar los límites en las vibraciones que no supongan para el edificio perder su uso habitual. La reducción del uso del edificio por efecto de las vibraciones incluye la afectación de la estabilidad del edificio o de alguno de sus componentes. Para las estructuras incluidas en los tipos “Tipo 2” y Tipo 3” su uso se puede ver reducido si aparecen fisuras o grietas en las superficies de las paredes, empeoran fisuras o grietas existentes.

Tabla 9
Norma Alemana DIN4150

Tipo de Edificación	FRECUENCIA (Hz)		
	<10 (Hz)	10 - 50 (Hz)	50 - 100 (Hz)
	VELOCIDAD (mm/S)	VELOCIDAD (mm/S)	VELOCIDAD (mm/S)
TIPO I: Edificios públicos o industriales	20	20 ... 40	40 ... 50
TIPO II: Edificios de viviendas	5	5 ... 15	15 ... 20
TIPO III: Edificios históricos o por su construcción son sensibles a la vibración	3	3 ... 8	8 ... 10

Fuente: (Giraldo, 2010)

Estados Unidos: USBM RI 8507

Baja frecuencia: < 40 Hz, todo pico espectral se produzca por debajo de 40 Hz y dentro de una faja de 6 dB (o sea 5% de la amplitud verificada a la frecuencia predominante) justifica el empleo del criterio de baja frecuencia.

Alta frecuencia: > 40 Hz (Giraldo, 2010)

Tabla 10
Norma USBM 8507

Tipo de estructura	Baja frecuencia	Alta frecuencia
Casas modernas con paredes revestidas de material diferente del revoque común (yeso, etc..)	19 mm/s	50 mm/s
Casas antiguas, con paredes revocadas	12.5 mm/s	50 mm/s

Fuente: (GIRALDO, 2010)

Norma Nacional

Normativas Peruanas de Vibraciones (Guía Ambiental para P&V)

La normativa peruana de vibraciones está basada en la Guía Ambiental para Perforación y Voladura en Operaciones mineras. Ver tabla 11, nuestro límite *máximos de vibración en función de la distancia*.

Tabla 11
Normativa peruana de vibraciones

Distancia (D) desde el área de voladura en pies	Velocidad de partícula pico máxima permitida (Vmax)	Factor de distancia a escala		
		por monitoreo sísmico	aplicación	sin

**para vibraciones de tierra en
pulgadas / segundo.**

0 a 300	1.25	50
301 a 5000	1.00	55
5001 a mas	0.75	65

Fuente: guía Ambiental de perforación y voladura

1.2. Formulación del problema

¿Qué sistema de iniciación será más efectivo en términos de productividad, fragmentación y costos, en minera Yanacocha S.R.L?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Compara qué sistema de iniciación es más eficiente para obtener una voladura con mayor productividad, mejor fragmentación y menores costos de producción, en minera Yanacocha S.R.L.

1.3.2. Objetivos específicos

- Analizar los resultados para la productividad del equipo de carguío, con el sistema de iniciación electrónica versus el sistema de iniciación pirotécnica.
- Evaluar los resultados de voladura en fragmentación, con el sistema de iniciación electrónica versus el sistema de iniciación pirotécnica.
- Analizar los beneficios de costos entre el sistema de iniciación electrónica y el sistema de iniciación pirotécnico.

- Evaluar los resultados de vibraciones en voladura en los diferentes puntos de monitoreo, con el sistema de iniciación electrónicos versus el sistema de iniciación pirotécnica.

1.4.Hipótesis

1.4.1.Hipótesis general

Los sistemas de iniciación electrónica y pirotécnica en voladura están relacionados con los resultados de la productividad, fragmentación y costos.

1.4.2.Hipótesis específicas

- El sistema de iniciación electrónica es más eficiente para obtener una voladura con mayor productividad.
- El sistema de iniciación electrónica es más eficiente para obtener una voladura con mejor fragmentación.
- El sistema de iniciación electrónica es más eficiente para obtener una voladura con menores costos de producción.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación es Experimental y el diseño es Pre-Experimental, transversal, aplicativo.

Diseño Transversal:

G ₁	X, Y
G ₂	X, Y

Dónde:

G₁: Tajo Tapado Oeste

G₂: Tajo Tapado Yanacocha

X: Voladura con Detonador Electrónico

Y: Voladura con Detonador Pirotécnico

2.2. Población y muestra (Materiales, instrumentos y métodos)

Población

Todas las voladuras en Minera Yanacocha 2017 del tajo Tapado Oeste y tajo Yanacocha.

Muestra

Voladuras del tajo Yanacocha y Tapado Oeste desde el mes de febrero hasta abril del 2017 en Minera Yanacocha.

2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos

Detalla los métodos, técnicas e instrumentos para recolectar y analizar los datos.

2.3.1. Técnicas

La secuencia para el análisis de datos durante la investigación es la siguiente:

Base de datos: recopilación de toda la información necesaria de Minera Yanacocha.

Excel: procesamiento de datos, y elaboración de gráficos.

- **Calculo de la Velocidad pico partícula**

Modelamiento de vibraciones

Ecuación de comportamiento de vibraciones modelo DEVINE Y DUVALL

$$PPV = K \left[\frac{d}{\sqrt{W}} \right]^\alpha$$

Donde:

PPV: Velocidad Pico Partícula

d: Distancia entre la carga explosiva y el detonador

W: Peso de la carga Explosiva

K y α : Constante de propiedad de la Roca

- **Criterios de daño del macizo rocoso**

En taludes

Tabla 12
Criterios de daño del macizo rocoso

Forma de daño	Velocidad de partícula (mm/seg)
Quiebre de roca	2500
Inicio de quiebre	650
Caída de rocas en galerías no revestidas	300
Daño menos, agrietamiento de yeso o estuco	130

Fuente: Hook and Bray

Tabla 13
Criterios de daño del macizo rocoso

Efectos sobre el macizo rocoso	Velocidad de partícula (mm/seg)
No hay peligro en roca sana	<250
Puede aparecer descostramiento de lajas por rotura de tracción	250-650
Grandes roturas por tracción o algunas grietas radiales	650-2500
Agrietamiento total del macizo rocoso	<2500

Fuente: Manual de Perforación y Voladura de rocas

- **Cálculo de la tasa de excavación (DIG RATE)**

$$Tasa\ de\ excavación\ \left(\frac{t}{h}\right) = \frac{tonelaje\ nominal}{tiempo\ de\ carguío}$$

Donde:

Tonelaje nominal:

El tonelaje nominal es el valor que resulta de la multiplicación de la capacidad de carga útil del equipo por un factor de ajuste.

Éste factor de ajuste se obtiene de la relación entre el tonelaje VIMS(sistema de administración de información vital) toneladas húmedas menos el % de humedad y el tonelaje reportado por Leica (Leica siempre reporta toneladas secas). Es decir, son tonelada que el camión puede cargar.

$$tonelaje\ nominal = capacidad\ de\ carga\ útil\ del\ equipo * \\ factor\ de\ ajuste$$

2.3.2. Instrumento de recolección y análisis de datos.

La secuencia a seguir durante la investigación para el análisis tanto para la tasa de excavación como para el análisis fragmentación se pueden ver en la fig. 23 y fig. 24 respectivamente.

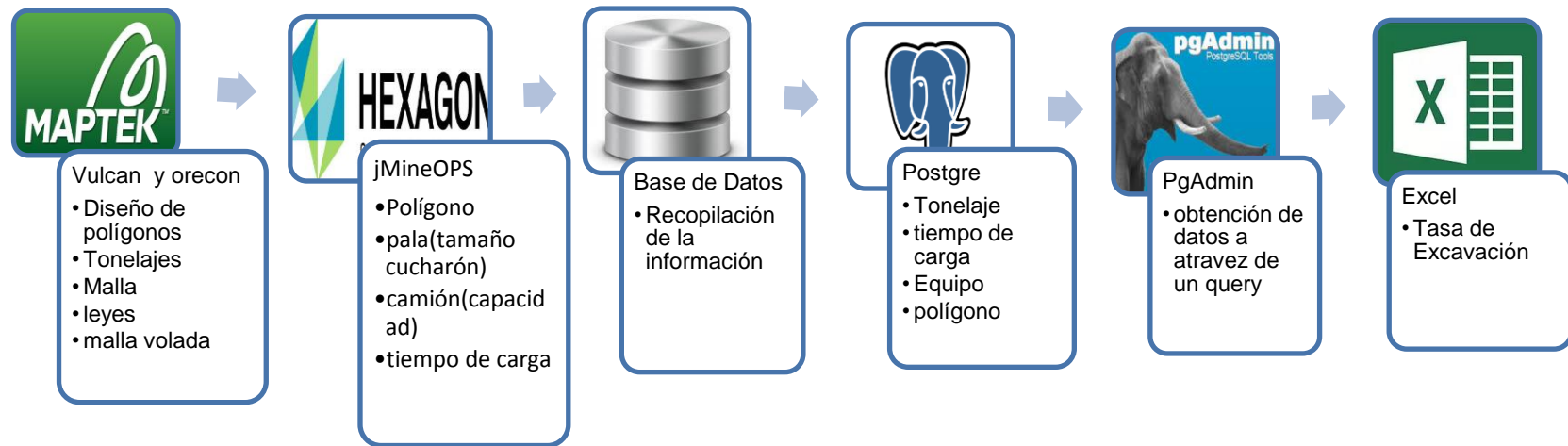


Figura 23. Procedimiento de Análisis de Datos para Obtener la Tasa de Excavación
 Fuente: elaboración Propia.



Figura 24. Procedimiento de Análisis de Datos para Obtener los Resultados de Fuente. Elaboración Propia.

2.4. Procedimiento

Describir los pasos en el desarrollo de la investigación. En el caso de estudios en ingeniería este apartado recibirá la numeración 2.3

- **Procedimiento para el sistema de iniciación electrónico**

Objetivo: *Desarrollar la tarea de forma segura y eficiente.*

Equipos y materiales

- Equipo de comunicación: Radio Handie
- Wincha con pesa de plomo, tijera estándar, rafia.
- Plano de carguío de taladros
- Medidor de temperatura

Procedimiento

1. Se realiza el diseño de malla.
2. En campo se procede a realizar las perforaciones según el diseño de malla.
3. Se inserta un detonador a la vez (detonador no eléctrico EXSANEL y detonador electrónico DIGISHOT) al Booster.
4. Se baja la prima (iniciador y detonador) cuidadosamente, evitando golpear con la pared del taladro, ya que puede dañarse la línea descendente.
5. Luego que la prima llega al fondo del taladro, se jala 30 centímetros aproximadamente, para que el Booster quede a esa misma distancia del fondo del taladro.

6. Se ata el sobrante de la línea descendente a una estaca, el sobrante de la línea descendente debe ubicarse en forma paralela al tránsito del Camión Mezclador de explosivos.
7. El personal autorizado realiza el etiquetado de taladros con el Tagger. Para llevar el control de taladros que se van a disparar.
8. Luego el Operador de Camión Mezclador ingresa a la zona de carguío, siendo este guiado en todo momento.
9. La secuencia de carguío debe ser ordenada (carguío por filas); por ningún motivo el Operador de Camión iniciará el carguío sin el winchero.
10. El control de carga en taladros es por kilos y taco. El winchero mide la longitud del taco e indica si se requiere aumentar la carga; adicionalmente el Operador de Camión controla los kilos.
11. El responsable Identifica el primer taladro, señala con estaca para tener claro el sentido de ingreso del fuego, asimismo, determina la orientación de salida de los taladros.
12. Se extiende el cordón detonante sobre los taladros cargados formando paquetes paralelos hacia el primer punto o fila de salida.
13. Se procede a amarrar la línea descendente con la línea tendida sobre los taladros y asegurándose que formen ángulos de 90° en el amarre, evitando dejar colas mayores que puedan ocasionar cortes.
14. Se procede con la distribución y colocación de retardos bidireccionales en los extremos de cada paquete según diseño de plano de amarre (de preferencia, utilice bidireccionales de mayor tiempo).

15. Para la iniciación, sea con línea silenciosa o con detonador electrónico, utilice cinta aislante para asegurar el empalme y contacto entre el cordón con el detonador de inicio.
16. Revisar minuciosamente todas las conexiones y comunique al supervisor inmediato la conformidad del amarre.
17. El Operador de Piso verifica si el taladro está cargado tensando la línea descendente, a continuación, retira las piedras de la boca del taladro que podrían ocasionar cortes a la línea descendente.
18. El Operador de Piso desata la línea descendente de la estaca, verifica si la longitud sobrante de esta es mayor a dos (2) metros. Si esta es mayor, tensa la línea, alejándose del taladro e indica al Operador del Mini Cargador que proceda al tapado. En caso sea menor, aumenta esta distancia con rafia hasta que tenga la distancia segura para tensar y alejarse del taladro para iniciar con el tapado.

- **Procedimiento para el sistema de iniciación pirotécnico**

Objetivo: Desarrollar la tarea de forma segura y eficiente.

Equipos y materiales

- Equipo de comunicación: Radio Handie
- Wincha con pesa de plomo, tijera estándar, rafia.
- Plano de carguío de taladros
- Medidor de temperatura

Procedimiento

1. Se realiza el diseño de malla.
2. En campo se procede a realizar las perforaciones según el diseño de malla.
3. Se inserta un detonador no eléctrico EXSANEL al Booster.
4. Se baja la prima (iniciador y detonador) cuidadosamente, evitando golpear con la pared del taladro, ya que puede dañarse la línea descendente.
5. Luego que la prima llega al fondo del taladro, se jala 30 centímetros aproximadamente, para que el Booster quede a esa misma distancia del fondo del taladro
6. Se ata el sobrante de la línea descendente a una estaca, el sobrante de la línea descendente debe ubicarse en forma paralela al tránsito del Camión Mezclador de explosivos.
7. El personal autorizado realiza el etiquetado de taladros con el Tagger. Para llevar el control de taladros que se van a disparar.
8. Luego el Operador de Camión Mezclador ingresa a la zona de carguío, siendo este guiado en todo momento.
9. La secuencia de carguío debe ser ordenada (carguío por filas); por ningún motivo el Operador de Camión iniciará el carguío sin el winchero.
10. El control de carga en taladros es por kilos y taco. El winchero mide la longitud del taco e indica si se requiere aumentar la carga; adicionalmente el Operador de Camión controla los kilos.
11. El responsable Identifica el primer taladro, señala con estaca para tener claro el sentido de ingreso del fuego, asimismo, determina la orientación de salida de los taladros.

12. Se extiende el cordón detonante sobre los taladros cargados formando paquetes paralelos hacia el primer punto o fila de salida.
13. Se procede a amarrar la línea descendente con la línea tendida sobre los taladros y asegurándose que formen ángulos de 90° en el amarre, evitando dejar colas mayores que puedan ocasionar cortes.
14. Para la iniciación, sea con línea silenciosa o con detonador electrónico, utilice cinta aislante para asegurar el empalme y contacto entre el cordón con el detonador de inicio.
15. Revisar minuciosamente todas las conexiones y comunique al supervisor inmediato la conformidad del amarre.
16. El Operador de Piso verifica si el taladro está cargado tensando la línea descendente, a continuación, retira las piedras de la boca del taladro que podrían ocasionar cortes a la línea descendente.
17. El Operador de Piso desata la línea descendente de la estaca, verifica si la longitud sobrante de esta es mayor a dos (2) metros. Si esta es mayor, tensa la línea, alejándose del taladro e indica al Operador del Mini Cargador que proceda al tapado. En caso sea menor, aumenta esta distancia con rafia hasta que tenga la distancia segura para tensar y alejarse del taladro para iniciar con el tapado.

CAPÍTULO III. RESULTADOS

3.1.Productividad

Para la presente investigación se tomó datos del tajo tapado Oeste donde se compara la productividad de la pala tanto para el sistema pirotécnico como para el sistema electrónico, se consideró el promedio de los datos tomados en el mes de Febrero, marzo y abril (ver tabla completa en el anexo 1); ambos proyectos han mantenido los mismos patrones de carguío sólo se ha variado el sistema de iniciación y los tiempos.

Tabla 14
Promedio de la productividad de la pala del S. Electrónico vs S. Pirotécnico

MES	Productividad de la pala (Tm/h)	
	S. PIROTÉCNICO	S. ELECTRÓNICO
FEBRERO	3049.6	3420.03
MARZO	2990.4	3246.31
ABRIL	2907.11	3303.47
Promedio	2982.37	3323.27
	11.4%	

Fuente: Elaboración Propia

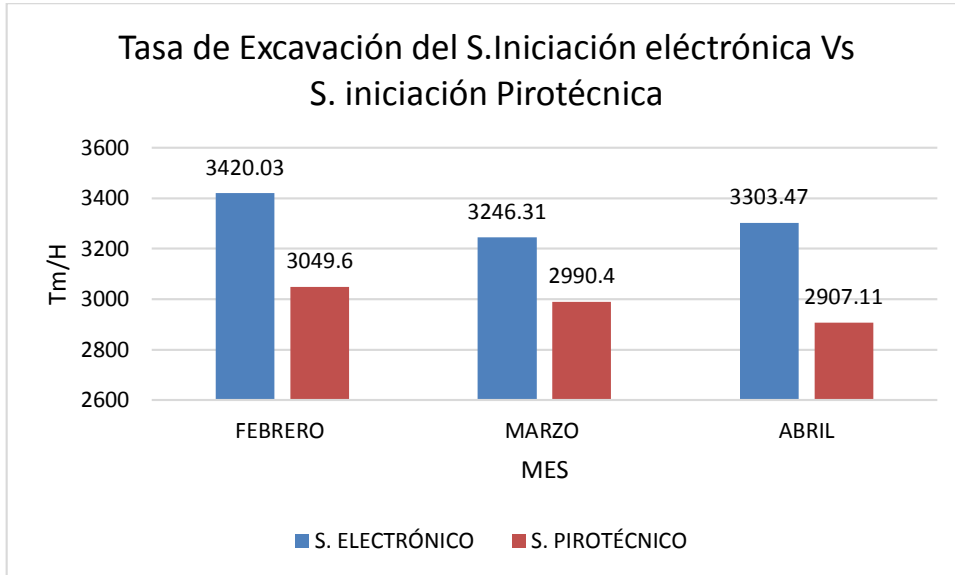


Grafico N°3: Resumen de Tasa de la productividad de la pala para ambos sistemas (ver tabla completa Anexo 1)

Fuente: Elaboración Propia

Análisis de Productividad

La productividad de la pala con detonadores pirotécnicos es 2982.37 Tm/h. Mientras que la productividad con detonadores electrónicos es de 3323.27Tm/H. La pala mejora en un 11.4% en productividad.

3.2.Fragmentación.

Para realizar el análisis de los resultados se toma en cuenta la siguiente tabla con la información recogida mediante los reportes de fragmentación brindados por EXSA.

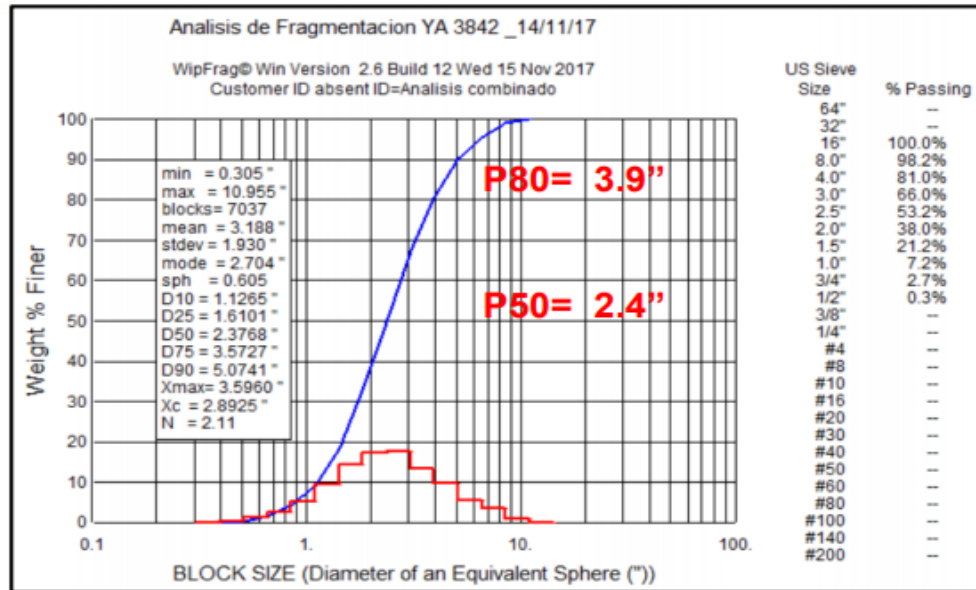
Tabla 15
Tipo de alteración según tajo

	Tipo de Roca	Tipo de iniciación	Densidad de la Roca (gr/cc)
Tajo Tapado Oeste	Roca propilítica y sílice masiva	Electrónica	2.2
Tajo Yanacocha	Roca propilítica y sílice masiva	Pirotécnica	2.3

Fuente. Extraído de base de datos EXSA-Yanacocha.

a. Análisis de fragmentación con el sistema de iniciación pirotécnica.

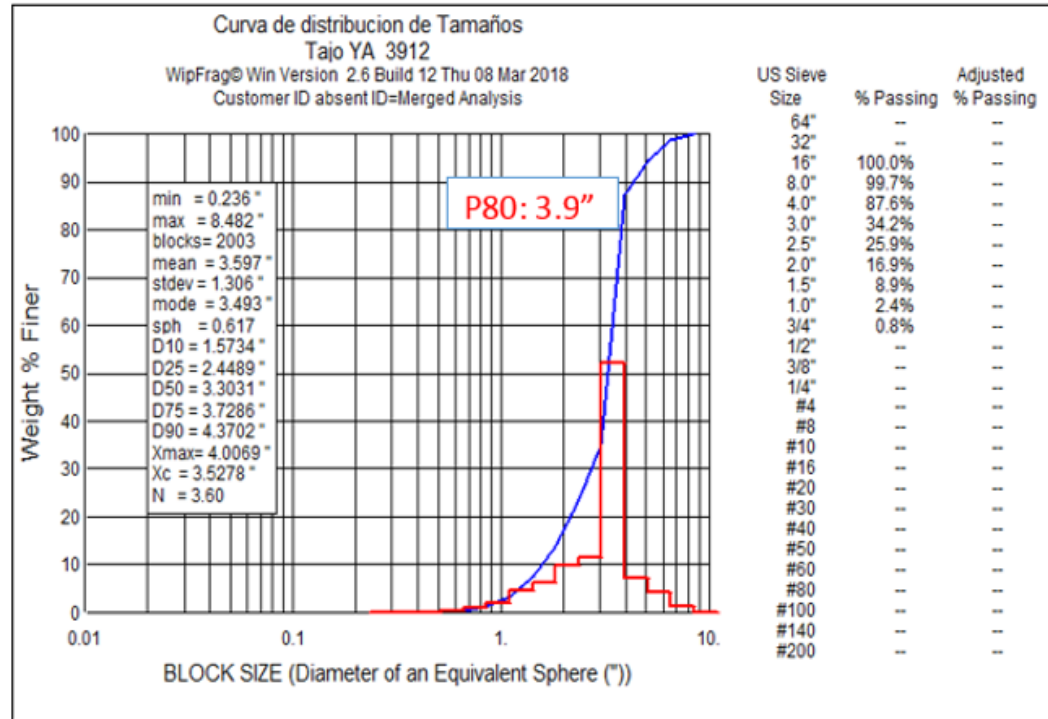
Se ha realizado el análisis de fragmentación de la roca del área de trabajo mediante el SOFTWARE WipFrag, en el tajo YANACOCCHA dando como resultado un P80= 3.9”. En la figura se muestra el análisis de Fragmentación.



Nivel	xc	n	P80	P50
3842	2.8925"	2.11	3.9"	2.4"

Figura 25. Análisis de Fragmentación – Sistema Pirotécnico

Se ha realizado el análisis mediante el SOFTWARE WipFrag, en el tajo TAPADO OESTE dando como resultado un P80= 3.9". En la figura se muestra el análisis de Fragmentación



Nivel	xc	n	P80	P50
3912	3.5278	3.60	3.9"	3.2

Figura 26. Análisis de Fragmentación – Sistema Pirotécnico

b. Análisis de fragmentación con el sistema de iniciación Electrónica. .

Se ha realizado el análisis mediante el SOFTWARE WipFrag, en el tajo Tapado Oeste, dando como resultado un P80= 3.3". En la figura se muestra el análisis de Fragmentación

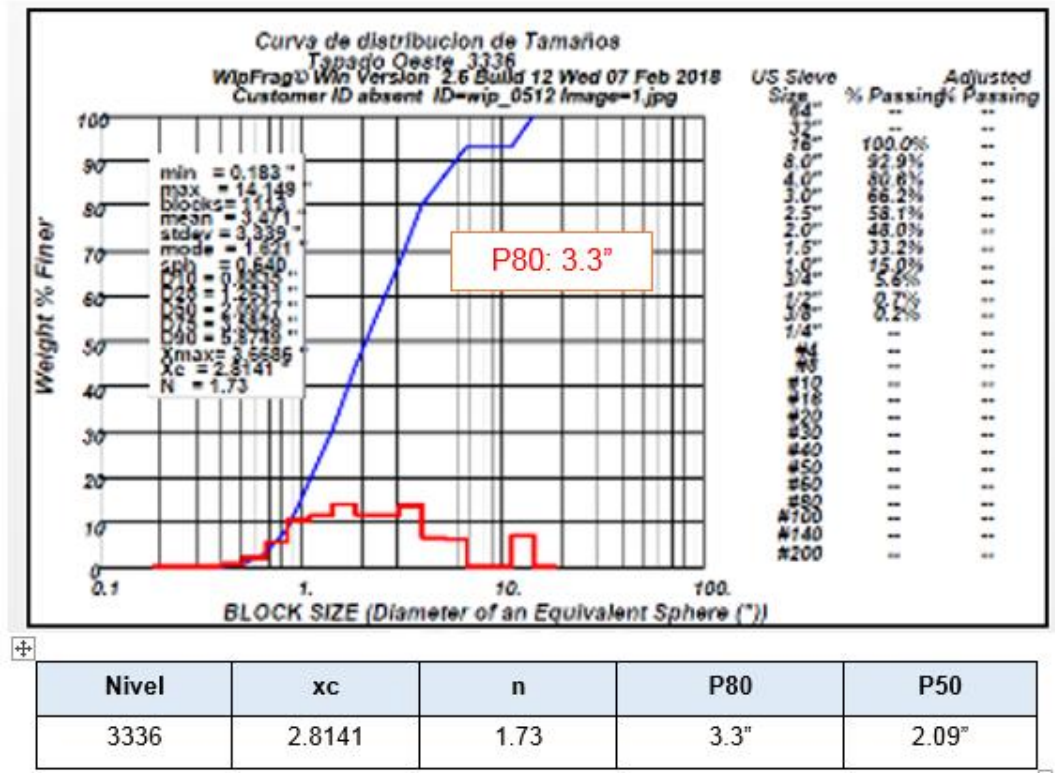
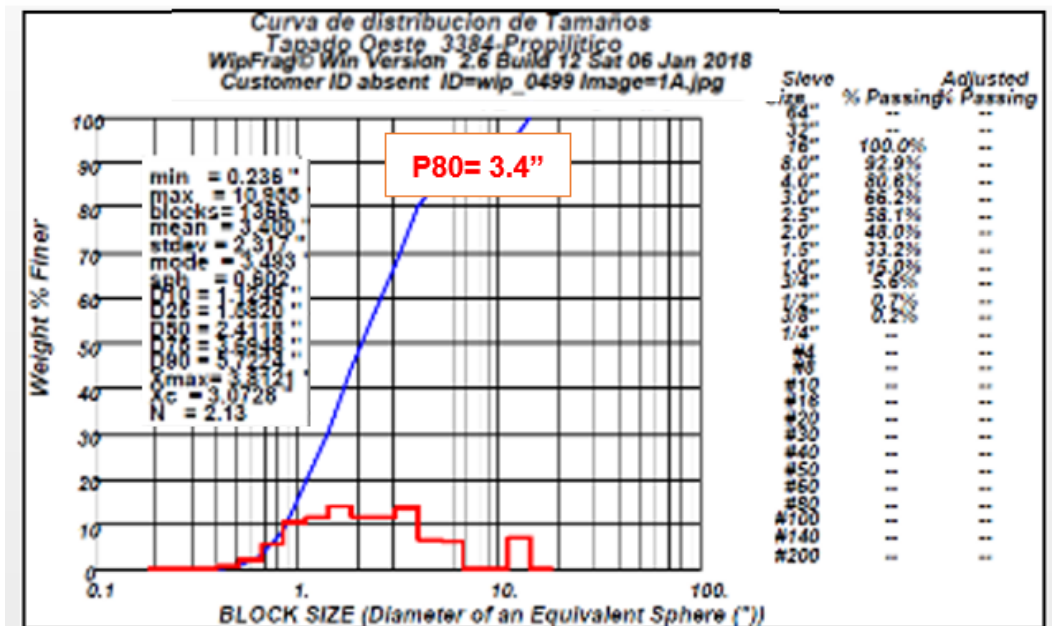


Figura 27. Análisis de Fragmentación – Sistema Electrónico

Se ha realizado el análisis mediante el SOFTWARE WipFrag, en el tajo TAPADO OESTE dando como resultado un P80= 3.4". En la figura se muestra el análisis de Fragmentación



Nivel	xc	n	P80	P50
3384	3.0728	2.13	2.4"	2.4118

Figura 28. Análisis de Fragmentación – Sistema Electrónico

Tabla 16
Comparativo de análisis de fragmentación del S. Pirotécnico Vs S. Electrónico

Iniciación	Nivel	Tipo de malla	Diámetro del taladro (pulg)	Taco(m)	Burden(m)	Espaciamiento	Tipo de explosivo	Factor e carga	Tiempo entre taladros(ms)	Tiempo entre filas(ms)	P80(pulg)
S. Pirotécnico	3842	p	10 5/8	5.5	7	8	MEQ73	0.23	17	42	3.9
S. Pirotécnico	3912	P	9 7/8	5.5	6.5	7.5	MEQ73	0.204	17	65	3.9
											3.9
S. Electrónico	3336	p	10 5/8	5.0	7	8	MEQ73	0.31	3	97	3.3
S. Electrónico	3384	P	10 5/8	5.0	7	8	MEQ73	0.27	3	97	3.4
											3.34
											14.6%

Fuente. Elaboración Propia.

Análisis de fragmentación

Realizado la comparación de fragmentación en una alteración sílice masiva, El promedio P80 de la voladura con detonadores pirotécnicos es 3.9pulg. Mientras El P80 con detonadores electrónicos es 3.34 pulg (mejoró en un 14,6 % comparado a la voladura con detonadores pirotécnicos). Los resultados mejoran con el uso de detonadores electrónicos.

3.3. Costos

Para el análisis de costos se considera número de taladros desde el mes de enero hasta diciembre del 2017.

Se evaluará el costo total para el sistema de iniciación electrónico y pirotécnico

Donde:

Costo unitario del electrónico= costo del electrónico + pirotécnico

Costo unitario del pirotécnico= costo del pirotécnico + cable

Tabla 17
Costos unitarios

Costo del Electrónico	21.5	\$/unidad
Costo del Pirotecnico	2.51	\$/unidad
costo del cable	3.56	\$/unidad
Costo del Electrónico(electrónico+pirotécnico)	24.01	\$/unidad
Costo del Pirotecnico (Pirotécnico+cable)	6.07	\$/unidad

Tabla 18

Cuadro comparativo de costos según el número de taladros para sistema de iniciación electrónica Vs sistema de iniciación pirotécnica 2017

	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
Nº DE TALADROS	3,985	4,533	5,004	4,863	3,802	4,143	4,323	4,333	4,153	3,487	3,467	3,491
COSTO ELECTRONICO	95,679.85	108,837.33	120,146.04	116,760.63	91,286.02	99,473.43	103,795.23	104,035.33	99,713.53	83,722.87	83,242.67	83,818.91
COSTO PIROTECNICO	24,198.99	27,526.73	30,386.89	29,530.66	23,087.72	25,158.45	26,251.50	26,312.23	25,219.18	21,174.88	21,053.43	21,199.17
Costo total por año electrónico	Costo total por año pirotécnico											
2017	1,190,511.84					301,099.83						

Fuente: Elaboración propia

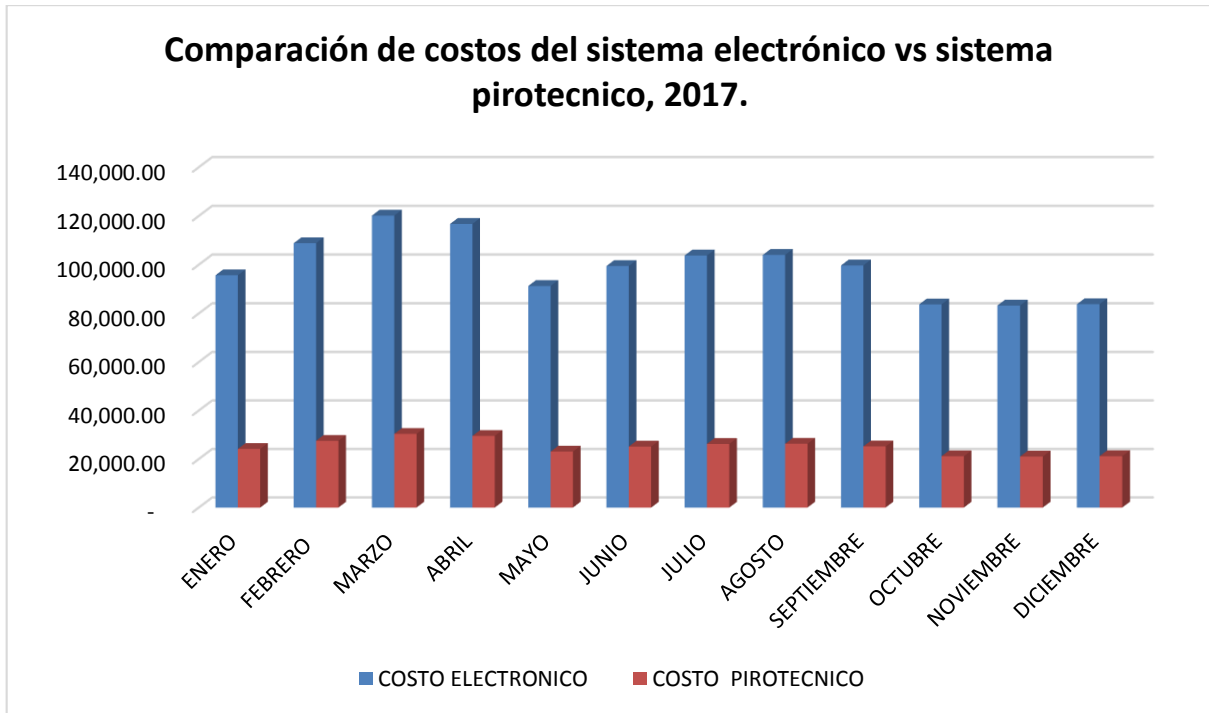


Gráfico N°4: Comparación de costos del S. Electrónico VS S. Pirotécnico

Análisis de Costos

El costo del detonador pirotécnico por unidad es de \$6.07, se analizó según el número de taladros utilizados para cada mes; el costo total para el sistema pirotécnico del año 2017 es de 301,099.83. Con respecto al costo del sistema electrónico por unidad es de \$21.5, para este análisis en minera Yanacocha cuando se realiza con sistema electrónico utilizan tanto el electrónico como el pirotécnico por temas de seguridad para que se aseguren la salida de todos los taladros. El costo total para el sistema electrónico del año 2017 es de 1190511.84. El costo del uso de detonador electrónico es mayor en 889412.01. Dólares, es innegable que la tecnología moderna no puede ser menor que la tecnología obsoleta.

Vibraciones.

La información recopilada para vibraciones se realizó en el Tajo Tapado Oeste en el mes de marzo y abril. El tipo de iniciación utilizada es electrónica, los puntos de monitoreo son Cabana, Canal y Vivienda, Para esta investigación se van a considerar P1, P2 y P3 Respectivamente.

a. Análisis con detonadores electrónicos

Reporte N°1: Proyecto: TO – Nv. 3456

El presente reporte se realizó con las siguientes características que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 19
Características de voladura- NV 3456

CARACTERÍSTICAS								DISTANCIA DESDE LA VOLADURA HASTA EL PUNTO DE MONITOREO
NIVEL	FECHA	TIPO DE MALLA	NÚMERO DE TALADROS	B*E (m)	TIEMPO ENTRE TALADROS (ms)	TIEMPO ENTRE FILAS(ms)	DENSIDAD gr/cc)/ DUREZA	CABANA
TO-3456	16/03/2017	Producción	95	8*9	35	180	1.8 Media	726

Fuente: Elaboración propia

Reporte N°2: Proyecto: TO – Nv. 3456

El presente reporte se realizó con las siguientes características que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 20
Características de voladura- NV 3456

CARACTERÍSTICAS										DISTANCIA DESDE LA VOLADURA HASTA EL PUNTO DE MONITOREO
NIVEL	FECHA	TIPO DE MALLA	NÚMERO DE TALADROS	B*E (M)	TIEMPO ENTRE TALADROS (MS)	TIEMPO ENTRE FILAS(MS)	DENSIDAD GR/CC)/ DUREZA	CABANA	CANAL	
TO-3456	16/03/2017	PROD UCCI ÓN	88	8*9	35	180	1.8 MEDIA	720	512	

Fuente: Elaboración propia

Reporte N°3 Proyecto: TO – Nv 3456

El presente reporte se realizó con las siguientes características que se muestran en la siguiente **tabla**:

Tabla 21
Características de voladura- NV 3456

CARACTERÍSTICAS										DISTANCIA DESDE LA VOLADURA HASTA EL PUNTO DE MONITOREO
NIVEL	FECHA	TIPO DE MALLA	NÚMERO DE TALADROS	B*E (m)	TIEMPO ENTRE TALADROS (ms)	TIEMPO ENTRE FILAS(ms)	DENSIDAD gr/cc)/ DUREZA	CABANA	VIVIENDA	
TO-3456	21/03/2017	Producción	65	8*9	17	180	1.8 Media	717	708	

Fuente: Elaboración propia

Reporte N°4: Proyecto TO – Nv 3456

El presente reporte se realizó con las siguientes características que se muestran en la siguiente **tabla**:

Tabla 22
Características de voladura- NV 3456

CARACTERÍSTICAS								DISTANCIA DESDE LA VOLADURA HASTA EL PUNTO DE MONITOREO
NIVEL	FECHA	TIPO DE MALLA	NÚMERO DE TALADROS	B*E (m)	TIEMPO ENTRE TALADROS (ms)	TIEMPO ENTRE FILAS(ms))	DENSIDAD gr/cc/ DUREZA	CABANA
TO-3456	27/03/2017	Producción n	101	8*9	17/57	180	1.8 Media	800

Fuente: Elaboración propia

Reporte N° 5: Proyecto TO – NV 3444

El presente reporte se realizó con las siguientes características que se muestran en la siguiente **tabla**:

Tabla 23
Características de voladura- NV 3444

CARACTERÍSTICAS									DISTANCIA DESDE LA
									VOLADURA HASTA EL PUNTO DE MONITOREO
NIVEL	FECHA	TIPO DE MALLA	NÚMERO DE TALADROS	B*E (m)	TIEMPO ENTRE TALADROS (ms)	TIEMPO ENTRE FILAS(ms)	DENSIDAD gr/cc)/ DUREZA	CABANA	
TO-3444	11/04/2017	Producción	78	8*9	17/57	180	2.0 Duro	757	

Fuente: Elaboración propia

Reporte N° 6: Proyecto TO – NV 3444

El presente reporte se realizó con las siguientes características que se muestran en la siguiente

tabla:

Tabla 24
Características de voladura- NV 3444

CARACTERÍSTICAS								DISTANCIA DESDE LA VOLADURA HASTA EL PUNTO DE MONITOREO		
NIVE L	FECHA	TIPO DE MALLA	NÚMER O DE TALADR OS	B*E (m)	TIEMPO ENTRE TALADROS (ms)	TIEMPO ENTRE FILAS(ms)	DENSIDAD gr/cc/ DUREZA	CABANA	CANAL	VIVIENDA
TO- 3444	15/04/201 7	Producción	83	8*9	14	180	1.8 MEDIA	757	635	677

Fuente: Elaboración propia

Reporte N° 7: Proyecto TO – NV 3444

El presente reporte se realizó con las siguientes características que se muestran en la siguiente **tabla**:

Tabla 25
Características de voladura- NV 3444

CARACTERÍSTICAS								DISTANCIA DESDE LA VOLADURA HASTA EL PUNTO DE MONITOREO	
NIVEL	FECHA	TIPO DE MALLA	NÚMER O DE TALADR OS	B*E (m)	TIEMPO ENTRE TALADROS (ms)	TIEMPO ENTRE FILAS(ms)	DENSIDAD gr/cc/ DUREZA	CABANA	VIVIENDA
TO- 3444	19/04/20 17	Producción	47	8*9	17/25	180	1.8 Media	747	780

Fuente: Elaboración propia

Reporte n° 8: proyecto TO – NV 3444

El presente reporte se realizó con las siguientes características que se muestran en la siguiente **tabla**:

Tabla 26
Características de voladura- NV 3444

		CARACTERÍSTICAS						DISTANCIA DESDE LA VOLADURA HASTA EL PUNTO DE MONITOREO		
NIVEL	FECHA	TIPO DE MALLA	NÚMERO DE TALADROS	B*E (m)	TIEMPO ENTRE TALADROS (ms)	TIEMPO ENTRE FILAS(ms)	DENSIDAD gr/cc)/ DUREZA	CABANA	CANAL	VIVIENDA
TO-3444	21/04/2017	Producción	71	8*9	17/25	180	1.8 Media	-	590	-
TO-3444	21/04/2017	Producción	71	8*9	17/25	180	1.8 Media	-	642	-

Fuente: Elaboración propia

Resumen de monitoreo de VPP en tres puntos de los meses marzo y abril

Tabla 27

Resumen de monitoreo del VPP en cabana, canal y Vivienda

NIVEL	FECHA	N° taladros	KG de explosivo / tal	CABANA			CANAL			VIVIENDA		
				DISTANCIA (m)	TIEMPO ENTRE TALADROS (ms)	VPP (mm/s)	DISTANCIA (m)	TIEMPO ENTRE TALADROS (ms)	VPP (mm/s)	DISTANCIA (m)	TIEMPO ENTRE TALADROS (ms)	VPP (mm/s)
TO - 3456	16/03/2017	95		726	35	6.63	516	35	31.6			
TO - 3456	18/03/2017	88	314.8	720	35	8.05	512	35	14.26			
TO - 3456	21/03/2017	65	332.25	717	17	5.07				708	17	2.74
TO - 3456	27/03/2017	101	314.8	800	35	2.37						
TO-3468	27/03/2017	101	314.8	800	17/57	2.37						
TO-3444	11/04/2017	78	346.28	757	17/57	9.7						
TO-3444	15/04/2017	83	346.28	575	14	9.45	635	14	6.25	677	14	5.08
TO-3444	19/04/2017	47	343.41	747	17/25	5.25				780	17/25	3.71
TO-3444	21/04/2017	71	343.41				590	17/25	5.66			
TO-3444	21/04/2017	71	343.41				642	17/25	2.79			

Fuente: Elaboración propia

b. Análisis de vibraciones con detonadores pirotécnicos

Con respecto al tipo de iniciación pirotécnica no se realizó pruebas en este lugar, porque se realizó una prueba de dispersión y se alcanzó los siguientes resultados (ver tabla n° 27 y tabla n° 28) En la cual se obtuvo una dispersión promedio de 5.5% por lo que no se utilizó detonador pirotécnico en esta zona.

Tabla 28
Resumen de dispersiones

N°	FECHA DE ANALISIS	TIEMPO NOMINAL (MS)	INICIO (MS)	FINAL (MS)	RETARDO (MS)	DISPERSIÓN (%)	FILMACIÓN (F X S)
1	07/05/2017	17	8025	8043	18	5.88	250
2	07/05/2017	17	8136	8155	19	11.76	250
3	07/05/2017	17	8249	8266	17	0.00	250

Fuente. Elaboración propia

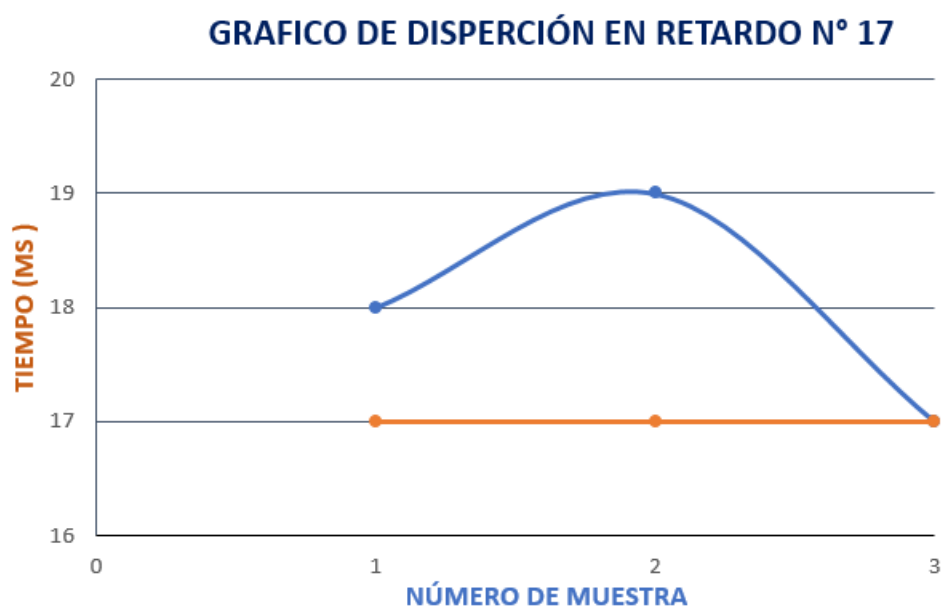


Grafico N°2: dispersión de retardo

Tabla 29
Dispersión de

retardo

N° DE MUESTRAS	TIEMPO MIN. (MS)	TIEMPO MAX (MS)	MEDIA (MS)	DESVEST	DISPERSIÓN (%)
3	17	19	18	1	5.5

Fuente. Elaboración propia

Análisis de vibraciones

El monitoreo de vibraciones nos permite observar que conforme aumenta la distancia, la intensidad de las vibraciones disminuyen. Para una distancia de 800m se obtuvo un VPP DE 2.37 mm/s y para una distancia de 512 m se obtuvo un VPP de 14.26 mm/s, los valores obtenidos se encuentra dentro de los límites de la norma peruana y las normas DIN. Las pruebas se realizaron solamente con tipo de iniciación electrónica para este caso no se realizaron pruebas con iniciación pirotécnica. Puesto que se realizó un análisis de dispersión y se obtuvo como resultado 5.5%.

Contrastación de hipótesis

Tabla 30

Comparación de los resultados de la productividad y costos del Sistema de iniciación electrónica e iniciación pirotécnica en la Minera Yanacocha, 2017

PRODUCTIVIDAD Y COSTOS	MEDIDA	INICIACIÓN		SIGNIFICANCIA P
		ELECTRÓNICA	PIROTÉCNICA	
		X ± DE	X ± DE	
TASA DE EXCAVACIÓN	Num.	3323.27 ± 88.54	2982.37 ± 71.58	P < 0.05
		X ± DE	X ± DE	
FRAGMENTACIÓN	Num.	3.35 ± 0.07	3.90 ± 0.00	P < 0.05
		X ± DE	X ± DE	
COSTOS	Num.	99209.32 ± 12397.22	25091.65 ± 3135.46	P < 0.05

Fuente: Ficha de recolección de datos sobre la productividad y costos de la Minera Yanacocha

Descripción:

En la Tabla 31 se observa que la tasa de excavación promedio de la iniciación electrónica es 3,323.27 con desviación estándar de 88.54 y de la iniciación pirotécnica es 2,982.37 con desviación estándar de 71.58; haciendo una diferencia promedio de 340.90 siendo ello significativo ($P < 0.05$). La fragmentación promedio de la iniciación electrónica es 3.35 con desviación estándar de 0.07 y de la iniciación pirotécnica es 3.90 con desviación estándar de 0.00; haciendo una diferencia promedio de -0.55 siendo ello significativo ($P < 0.05$). También se observa que los costos promedio de la iniciación electrónica es 99,209.32 con desviación estándar de 12,397.22 y de la iniciación pirotécnica es 25,091.65 con desviación estándar de 3,135.46; haciendo una diferencia promedio de 74,117.67 siendo ello significativo ($P < 0.05$). Por lo tanto se demuestra existe diferencia significativa entre los dos sistemas de iniciación, por ende el Sistema de iniciación

resultados productivos pero tiene más costos que la iniciación pirotécnica en Minera Yanacocha.

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1. Discusión

Resultados de productividad

La productividad de la pala en voladuras con detonadores pirotécnicos es 2982.37 Tn/H, mientras que con detonadores electrónicos la productividad es de 3323.27 Tn/H; siendo 11.4 % la mejora con el uso de los detonadores electrónicos con respecto a los detonadores pirotécnicos

Según (Huamán, 2010) en su investigación concluye que la calidad del disparo tiene influencia significativa sobre las etapas posteriores de manejo de material dentro del proceso de extracción de material. En cuanto a los resultados su productividad de la pala SH003 fue de 9356.79Tn/h con pirotécnico y 11895.12 con electrónico. En el cual se puede visualizar que la productividad con el sistema de iniciación electrónico es mayor que con pirotécnico

Resultados de la fragmentación

En nuestro estudio de investigación El P80 con detonadores electrónicos es de 3.34” y 3.9” con detonadores pirotécnico (la voladura con detonadores electrónicos mejoró en un 14.6% con respecto a los pirotécnicos).

(Romero Paucar , 2016) Afirma que el uso de los detonadores electrónicos permite optimizar el P80; en el Lado Oeste en 5.4%, mientras que en el lado Este el P80 mejoró en 16.7% comparado a de la voladura con detonadores pirotécnicos.

(Romero Paucar , 2016) En su investigación dice que su mayor ventaja de los detonadores electrónicos es su precisión y exactitud porque la dispersión de los tiempos en los detonadores pirotécnicos es 21.88ms y en los detonadores electrónicos es 0.24ms.

Evaluación económica

Con los resultados obtenidos, el precio alto de los detonadores electrónicos con respecto a los detonadores pirotécnicos es recompensado en la fragmentación, además de que mejora el proceso posterior como chancado y molienda.

En su investigación (Miranda S, 2009) obtiene que el rendimiento entre detonadores electrónicos y no eléctricos es mayor y Como resultado nos dice que el rendimiento fue en 8 % en promedio de los detonadores electrónicos frente a detonadores no eléctricos tratándose de costos, Permitió ahorrar US \$ 180 791 al año, y US \$ 0,004 por tonelada métrica

4.2 Conclusiones

Se Determinó que el sistema de iniciación electrónica es más eficiente para obtener una voladura con mayor productividad una mejor fragmentación y menores costos de producción.

Se analizó los resultados de voladura para la tasa de excavación para ambos sistemas y se obtuvo que con el uso del sistema de iniciación electrónico se alcanzó una buena fragmentación debido a lo cual la productividad mejoró en un 11.4% con respecto al sistema pirotécnico.

Se analizó los resultados de voladura para la fragmentación, con el sistema de iniciación electrónica y el sistema de iniciación pirotécnica. Obteniendo el siguiente resultado el uso de detonadores electrónicos permite optimizar el P80 en un 14.6% con respecto a los detonadores pirotécnicos.

En cuanto al sistema de iniciación electrónica el costo unitario por taladro es más caro. Pero éste mayor costo se ve recuperado en los procesos posteriores donde la productividad de la pala, el chancado y molienda mejora significativamente.

Se analizó los resultados solo para el sistema de iniciación electrónica y teniendo como resultado un VPP MAX DE 14.26 y un VPP MIN de 2.37 en los tres puntos de monitoreo los cuales cumplen con los estándares de la norma peruana. Con respecto al sistema de iniciación pirotécnico no se realizaron pruebas.

RECOMENDACIONES

Tener una continuidad en la verificación de los reportes de producción diaria para analizar la tasa de excavación (Ton /H) según la fragmentación obtenida.

A los futuros tesisistas realizar las pruebas de estudio para la comparación de resultados en un mismo macizo rocoso para todas las variables del estudio, para tener datos más exactos.

Obtener mayor muestras de análisis de fragmentación de la roca, para poder determinar en cada disparo dicho parámetro para que posteriormente se pueda evaluar y realizar cambios en el diseño de voladura.

A la empresa Minera Yanacocha S.R.L. continuar con los análisis de pruebas para seguir en la mejora continua, para obtener la voladura de rocas de forma segura, lograr una fragmentación adecuada, optimizar el tiempo para la tasa de excavación y minimizar los costos de producción.

REFERENCIAS

- Baldeon Quispe, Z. L. (2011). *Gestion En Las Operaciones De Transporte Y Acarreo Para El Incremento De La Productividad En Minera Condestable S.A. (tesis de Pregrado).universidad PUCP. Lima-Perú.*
- Berguer , E. (2009). Tecnología y seguridad ala mano . *Minería chilena*, 5.
- Bernaola A, J., Castilla G, J., & Herrera H , J. (2013). *Perforación y Voladura de Rocas*. Madrid, España.
- Chávez Barrientos, L. A. (2005). *Uso Y Control De Explosivos Aplicados En Explotación De Bancos De Material.(Tesis Pregrado). Universidad san Carlos de Guatemala. Guatemala.*
- CHIAPPETTA, F. (2014). “*New Innovative Blasting Techniques to Improve Fragmentation, Final Highwalls and Plant Throughput*. Pennsylvania-USA.
- EXSA SOLUCIONES. S.A. (2013). *Manual Práctico de Voladura*.
- Gaona Gonzales , A. J. (2015). *Optimización de la voladura ,Mina la Virgen -de la Compañía Minera San Simón- Huamachuco Trujillo(Tesis de pregrado). Piura : Universidad Nacional de Piura .*
- GIRALDO, F. (2010). *CONTROL DE VIBRACIONES PARA CASAS DE TIERRA EN PERU*. Lima, Perú: (Tesis de Título Profesional),Universidad Nacional de Ingeniería.
- Giraldo, F. (2010). *Control de Vibraciones para Casas de Tierra en Perú.(Tesis de Pregrado).UNI. Lima-Perú.*
- Hinostroza Sierra, J. R. (2014). *Optimización de la fragmentación en las rocas con la aplicación de la doble iniciación electrónica en la explotación de cobre porfirítico a*

- pregrado*). Universidad Nacional Mayor DE San Marcos. Lima, Perú.
- Huamán, B. A. (2010). *Implementación De Un Nuevo Sistema De Iniciación Electrónica En Peru - Seguridad Y Versatilidad*”. Lima-Perú.
- INSTITUTO GEOLÓGICO MINERO DE ESPAÑA. (1994). *Manual de Voladura Rocas*. España.
- Instituto Tecnológico Geo Minero de España . (1991). *Manual de Perforación y Voladura* . Madrid -España .
- Kenzie, M. (1994). *Estado del Arte de la Tronadura*. Santiago de Chile .
- Legorburo, V., & Sánchez , L. (S.f). *Evolución de los Explosivos Industriales*.
- Leiva Torres , A. (2007). *Influencia de la Optimización de la Fragmentación de Roca en la Rentabilidad de las operaciones Mina- Molienda. (Tesis de Pregrado)*. Pontificia Universidad católica del Perú, Perú.
- Mancera, O. A., Serrano, O. A., & Guerrero Paez, A. (2011). Comparación entre el sistema de iniciación nonel y electrónico en las voladuras y su efecto en la fragmentación, forma de la pila costos de producción y vibraciones . pág. 17.
- McKenzie. (1994). *Estado del Arte de la Tronadura*. Santiago de Chile .
- Miranda S, Y. (2009). *Estudio del rendimiento entre detonadores electrónicos y no eléctricos e implicancia en la economía del proceso y seguridad en tajo abierto.(tesis de pregrado)*. . Lima-perú.
- Poma F, J. (2012). *Importancia de la fragmentación de la roca en el proceso Gold Mill Caso Minera Yanacocha- (Tesis de pregrado)*. PUCP. Lima- Perú.
- Poma Fernández , J. L. (2016). *Importancia de la Fragmentación de la roca en el proceso Gold Mill(Tesis de Pregrado)*. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima .

P. (2013). *Voladura con sistema de iniciación mixto eléctrico y no eléctrico en la profundización del pique N°2 , mina teresita(Tesis Pregrado). Universidad Nacional de Huancavelica. . Huancavelica- Perú.*

Romero 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) . Huancayo. Perú .*

Torres, F. (2011). *Aplicación Sistema Electrónico En Voladuras De Avance Subterráneo- Minera Suyamarca. Lima- Perú.*

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID . (2013). *Perforación y Voladura de Rocas. ESPAÑA.*

ANEXOS