



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE MINAS

**“ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL COMPUTARIZADO EN  
LA PERFORACIÓN PARA DESARROLLOS HORIZONTALES”**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

SAMU INDIGO CORTÉS ZABLOCKI

PROFESOR GUÍA:  
HANS GÖPFERT HIELBIG

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
FERNANDO SILVA CALONGE  
HÉCTOR TORO VEGA

SANTIAGO DE CHILE  
2018

# RESUMEN

El método de perforación y tronadura es vastamente usado en las operaciones de excavación subterránea a lo largo del mundo para el desarrollo de túneles y galerías. Debido a la gran incidencia de la calidad de la perforación en los costos, resultados de esta operación y en el resto de las actividades del ciclo, es necesario desarrollar y evaluar nuevas tecnologías que hagan más eficiente la operación.

El control computarizado en la perforación es una tecnología muy utilizada en las últimas décadas en obras civiles, que ha ido ganándose su puesto en las operaciones mineras del mundo, ya que permite un mejor control del contorno del túnel, mayor eficiencia de disparo, obtener frentes más lisas y mejorar los rendimientos tanto de la perforación como del ciclo completo de perforación y tronadura.

Epiroc es una empresa líder en el desarrollo de nuevas tecnologías para equipos mineros, con una gran importancia en el mercado a nivel mundial. La empresa desarrolló un sistema de control computarizado de la perforación, que se ha estado introduciendo al mercado nacional en los últimos años con buenos resultados. Con el fin de analizar esta tecnología en aspectos técnicos, económicos y operacionales, se realizaron levantamientos de datos en dos minas de Chile. El principal estudio se realizó en El Teniente, donde una gran flota de equipos operada por la empresa contratista Salfa Montajes, que cuentan con este sistema, están realizando labores de perforación para desarrollar el Proyecto Nuevo Nivel Mina.

El estudio muestra que, con los mismos equipos, para el mismo tipo de roca, diagrama de disparo y tipo explosivos, la implementación del control computarizado en la perforación para desarrollos horizontales reduce la sobre excavación de 22% a 11% y aumenta la eficiencia de disparo de 85% a 90%.

# ABSTRACT

The drilling and blasting method is widely used in underground operations for excavating tunnels around the world. Due to the high incidence of drilling precision in the tunnel quality, operating costs and in the rest of the activities of the cycle, it is necessary to develop and to test new technologies that make the operation more efficient.

Computerized control applied to drilling has been a widely used technology in the last decades in civil works, and it has been earning its place in the underground mining operations since it allows a better control of the contour of the tunnel, greater pull per blast, smooth tunnel faces, and improves the performance of both the drilling and the drilling and blasting cycle.

Epiroc is a leading company in the development of new technologies for mining equipment, covering a great portion of the world market. The company developed a computerized drilling control system for jumbo rigs, and it has been introduced to the national market in recent years with good results. In order to analyze this technology in technical, economic and operational aspects, data surveys were conducted in two mines in Chile. The main study was carried out in El Teniente, where a large fleet of computerized drilling rigs operated by the contractor Salfa Montajes, are being used for excavating the tunnels for the "Proyecto Nuevo Nivel Mina".

The study shows that using the same rig, drilling pattern, type of explosive and under the same type of rock, the use of computerized drilling reduces the overbreak from 22% to 11% and increases the pull per blast from 85% to 90%.

*Para mi querido abuelo Andrzej*

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a todas las personas que han sido parte en este largo proceso de aprendizaje. En especial a mi abuela Doris por confiar en mí, por apoyarme y por enseñarme cosas que no podría haber aprendido en ninguna otra parte.

A mi abuelo Andrzej, quien además de guiarme y traspasarme su experiencia en la minería subterránea, estuvo de principio a fin aportando y presionando para que pudiera completar este trabajo. Estaré eternamente agradecido por haber tenido la oportunidad de seguir sus pasos.

A mi polola Alexandra, por su cariño, por creer en mí y por haber estado conmigo en los peores momentos.

A mi profesor guía, Hans Göpfert, por su paciencia, tiempo y aportes al trabajo.

A Natalia, mi madre, por apoyarme en los momentos difíciles y por ayudarme a ser una mejor persona.

A todo el personal de Epiroc, por hacer posible este trabajo, en especial a Ignacio y Cristian.

# Tabla de contenido

1.	CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	Generalidades .....	1
1.2	Problemática .....	2
1.2.1	Calidad de la perforación.....	2
1.2.2	Implementación de nueva tecnología .....	2
1.3	Motivación .....	3
1.3.1	Ruta hacia la automatización .....	3
1.4	Objetivos .....	4
1.4.1	Objetivos Generales.....	4
1.4.2	Objetivos Específicos .....	4
1.5	Alcances.....	4
1.6	Antecedentes .....	5
1.6.1	Atlas Copco .....	5
1.6.2	Epiroc .....	5
1.6.3	Sandvik.....	7
1.6.4	Codelco, División El Teniente, Proyecto Nuevo Nivel Mina.....	7
1.6.5	Salfa Montajes.....	8
1.6.6	Faena Cabildo, Grupo Minero Las Cenizas.....	8
2.	CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO .....	9
2.1	Desarrollo de túneles y galerías .....	9
2.2	Conceptos básicos de perforación y tronadura para desarrollos horizontales	14
2.2.1	Ciclo de Perforación y Tronadura .....	14

2.2.2	Nomenclatura de tiros .....	15
2.2.3	Tipos de rainura .....	16
2.3	Sistemas de control de perforación .....	17
2.3.1	Perforación Convencional .....	17
2.3.2	Perforación Computarizada.....	18
2.4	Sobre y sub excavación .....	24
2.4.1	Factores que la influncian.....	24
2.4.2	Efectos de la sobre excavación.....	24
2.4.3	Efectos de la sub excavación .....	25
2.5	Eficiencia de disparo .....	25
2.6	Equipos de perforación frontal para pequeñas galerías .....	26
2.6.1	Jumbo Boomer 282, Epiroc .....	26
2.6.2	Jumbo Boomer S2 C, Epiroc.....	27
2.6.3	Jumbo Boomer S1 D, Epiroc.....	27
2.6.4	Jumbo DD422i Sandvik.....	28
2.6.5	Boomer M2C Epiroc .....	28
3.	CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO.....	29
3.1	Estudio de las características de los sistemas .....	29
3.2	Levantamiento de datos .....	29
3.3	Análisis técnico-económico de los datos .....	29
4.	CAPÍTULO 4: CASOS DE ESTUDIO .....	31
4.1	Caso de estudio: KGHM Polonia [1].....	31
4.2	Caso de estudio: Boliden Garpenberg [2] [4].....	32
4.3	Caso de estudio: Autopista Nor-Oriente, Dukraft [3] .....	33
5.	Capítulo 5: RESULTADOS .....	35

5.1	Mina Cabildo, Las Cenizas.....	35
5.1.1	Sobre y sub excavación .....	35
5.1.2	Eficiencia de disparos.....	36
5.2	Proyecto Nuevo Nivel Mina, El Teniente, Codelco .....	37
5.2.1	Flota de equipos de perforación frontal .....	38
5.2.2	Control del contorno de las galerías.....	38
5.2.3	Eficiencia de disparo .....	43
6.	CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....	45
6.1	Control del contorno del túnel.....	45
6.1.1	Mina Cabildo, Grupo Minero Las Cenizas .....	45
6.1.2	Proyecto Nuevo Nivel Mina .....	47
6.2	Eficiencia de disparo .....	49
6.3	Análisis Económico: Perforación Convencional vs Control Computarizado .....	51
6.4	Emparejamiento de frente .....	59
6.5	Operación.....	61
7.	CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES .....	63
8.	CAPÍTULO 8: ANEXOS.....	65
8.1	Diseño de diagramas de disparo [9].....	65
8.1.1	Diseño de rainura Large-Hole-Cut.....	65
8.1.2	Diseño del resto del diagrama.....	69
8.2	Especificaciones técnicas de los equipos.....	71
8.3	Litología de El Teniente.....	73
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	75

# Índice de Figuras

Figura 1-1 Los 4 niveles de la automatización de Epiroc.....	3
Figura 2-1 Túnel del Simplón.....	9
Figura 2-2 Perforadora neumática Puma.....	10
Figura 2-3 Boomer H281, Atlas Copco. ....	11
Figura 2-4 Jumbo Computarizado, Epiroc. ....	11
Figura 2-5 Tunelera Cochrane 2, fabricada por Herrenknecht, completa un túnel en Malasia. ....	12
Figura 2-6 Mobile Miner, Tunelera de Epiroc.....	13
Figura 2-7 Ciclo de perforación y tronadura convencional.....	14
Figura 2-8 Nomenclatura de tiros. ....	15
Figura 2-9 Ángulo de divergencia en tiros de contorno, para dejar espacio para la próxima perforación.....	15
Figura 2-10 Rainura Large-Hole-Cut. ....	16
Figura 2-11 Sistema DCS de un Boomer 282. Epiroc.....	17
Figura 2-12 Rig Control System (RCS 5). Epiroc.....	19
Figura 2-13 Pantalla del RCS 5. ....	20
Figura 2-14 Sistema SICA (Sandvik Intelligent Control System Architecture) de Sandvik.....	22
Figura 2-15 Reporte de perforación con RCS 5.....	23
Figura 2-16 Jumbo Boomer 282, Epiroc. ....	26
Figura 2-17 Jumbo Boomer S2. Epiroc.....	27
Figura 2-18 Jumbo Boomer S1 D, Epiroc. ....	27
Figura 2-19 Jumbo DD422i. Sandvik. ....	28
Figura 2-20 Boomer M2. ....	28
Figura 4-1 Metros de avance por disparo promedio anual, KGHM Polonia.	31
Figura 4-2 Túnel desarrollado con DCS convencional y túnel desarrollado con instrumentos similares a los del control computarizado. ....	32
Figura 4-3 Túnel Montegordo de la autopista Nor Oriente, desarrollado por Dukraft.....	34

Figura 5-1 Sobre excavación y Sub excavación en mina Cabildo. ....	35
Figura 5-2 Reporte de perforación obtenido con RCS 5, para diagrama de 5.0x5.0m.....	37
Figura 5-3 Perfil topográfico de la zanja 11 del nivel de producción, equipo con control computarizado. ....	39
Figura 5-4 Perfil topográfico de la una galería del sub nivel de ventilación, equipo convencional.....	40
Figura 5-5 Histograma: Sobre excavación para todos los datos.....	41
Figura 5-6 Histograma: Sobre excavación de equipos con control computarizado.....	41
Figura 5-7 Histograma: Sobre excavación de equipos convencionales.....	42
Figura 5-8 Eficiencias de disparo obtenidas con equipos con control computarizado.....	43
Figura 5-9 Eficiencia de disparos obtenidas con equipos que operaron de manera convencional. ....	43
Figura 5-10 Metros de avance por disparo, perforación convencional vs computarizada.....	44
Figura 6-1 Galería sobre excavada en mina Cabildo, (230-4). ....	46
Figura 6-2 Perfiles topográficos de una galería del nivel de transporte intermedio del PNNM. ....	48
Figura 6-3 Histograma de eficiencias de disparo para todos los datos obtenidos en PNNM. ....	49
Figura 6-4 Histograma de eficiencias de disparo obtenidas con equipos con control computarizado en PNNM.....	49
Figura 6-5 Histograma de eficiencias de disparo obtenidas con equipos convencionales.....	50
Figura 6-6 Emparejamiento de frente con control computarizado. ....	59
Figura 6-7 Tope de goma en malas condiciones. ....	61
Figura 8-1 Mapa geológico del nivel de ventilación del PNNM. Se pueden ver los distintos tipos de roca para cada zona y cada túnel. ....	73
Figura 8-2 Mapa geológico del nivel de transporte intermedio del PNNM. .	74

# Índice de Tablas

Tabla 2-1 Niveles de automatización del RCS 5.....	21
Tabla 4-1 Estudio comparativo entre RCS y DCS, Dukraft.....	33
Tabla 5-1 Estadísticas descriptivas de la sobre excavación medida en Cabildo.....	36
Tabla 5-2 Estadísticas descriptivas de la sub excavación medida en Cabildo.....	36
Tabla 5-3 Estadísticas descriptivas de la eficiencia de disparos en mina Cabildo.....	36
Tabla 5-4 Flota de equipos de perforación frontal de Salfa Montajes para PNNM.....	38
Tabla 5-5 Estadísticas descriptivas de la sobre excavación en galerías del PNNM.....	39
Tabla 5-6 Estadísticas descriptivas de la sub excavación en galerías del PNNM.....	42
Tabla 5-7 Estadísticas descriptivas de la eficiencia de disparos en los avances del PNNM.....	44
Tabla 6-1 Cálculo del impacto de la eficiencia de disparo en los costos y avances.....	50
Tabla 6-2 Equipos utilizados en la evaluación, Boomer 282 convencional y Boomer S2 computarizado, con sus especificaciones. ....	52
Tabla 6-3 Duración del proyecto en base al tiempo de ciclo y avance por disparo promedio.....	53
Tabla 6-4 Ahorros en aceros de perforación (barras y bits).....	53
Tabla 6-5 Ahorros en perforación. ....	53
Tabla 6-6 Ahorros en explosivos, por menor número de ciclos. ....	54
Tabla 6-7 Ahorro en marinas, por menor sobre excavación. ....	55
Tabla 6-8 Costos de mantención. ....	55
Tabla 6-9 Costo de mano de obra. ....	56
Tabla 6-10 Costos de depreciación del equipo.....	56

Tabla 6-11 Costos por actividad del proyecto. Valores en \$USD. ....	57
Tabla 6-12 Ahorros potenciales por actividad, de un equipo con control computarizado sobre uno convencional. Valores en \$USD. ....	57
Tabla 6-13 Análisis económico de la operación de los jumbos por un año.	58
Tabla 8-1 Cálculo de geometría del diagrama de disparo. ....	70
Tabla 8-2 Características del Boomer 282.....	71
Tabla 8-3 Características del Boomer S2 C.....	71
Tabla 8-4 Mejoras ofrecidas por el Boomer S2 frente a su antecesor 282.	72
Tabla 8-5 Características principales DD422i Sandvik. ....	72

## Índice de Ecuaciones

Ecuación 2-1 Eficiencia de disparo.....	25
Ecuación 8-1 Relación para cambiar tiro escariador por un mayor número de tiros de menor diámetro .....	67
Ecuación 8-2 Dimensiones del primer cuadrante. ....	67
Ecuación 8-3 Cálculo del burden del segundo cuadrante.....	68
Ecuación 8-4 Concentración lineal de carga en el fondo.....	69
Ecuación 8-5 Burden en función de la concentración lineal de carga en el fondo.....	69

# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 Generalidades

En la actualidad, la minería se ve enfrentada a condiciones desafiantes. Los nuevos yacimientos tienen menores leyes y son más profundos o de difícil acceso, las normativas ambientales son cada año más estrictas y las comunidades están muy atentas respecto a lo que sucede en la industria. Esto ha impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan reducir los costos operacionales, optimizando el consumo de energía e insumos y evitando la exposición del personal a riesgos innecesarios.

El desarrollo de túneles y galerías es una actividad importante en un proyecto minero subterráneo, comprendiendo desde grandes rampas de acceso hasta pequeñas galerías por las que se accede al mineral.

Los avances en comunicaciones y tecnologías digitales han permitido el desarrollo de equipos inteligentes, capaces de realizar de manera autónoma y más eficiente la perforación de tiros siguiendo un diagrama diseñado. Esto se utiliza comúnmente en el desarrollo de túneles para obras civiles y en minería de rajo abierto. Sin embargo, debido a que la minería subterránea es una operación compleja, en la cual la perforación se realiza en un entorno más adverso, la incorporación de la tecnología ha sido más lenta.

La sobre excavación, la sub excavación y la baja eficiencia de disparo son los principales problemas operacionales en el desarrollo de túneles y galerías, reduciendo la productividad y aumentando los costos de la operación.

Epiroc lleva años desarrollando y perfeccionando sus tecnologías de automatización para la minería. Utilizando el control computarizado de la perforación, los Jumbo son capaces de perforar de manera semiautónoma todos los tiros de un diagrama de disparo (menos los 2 tiros esquineros), con una precisión milimétrica de acuerdo con lo planificado, minimizando la sobre excavación y optimizando la operación.

## **1.2 Problemática**

### **1.2.1 Calidad de la perforación**

La calidad de la perforación tiene un gran impacto en el resto de las actividades del ciclo de perforación y tronadura, además de afectar los resultados de este. Una perforación de buena calidad comprende tiros alineados y direccionados según lo planificado, es decir, dimensiones del túnel según lo planificado y un avance de los mismos metros que los perforados.

La sobre excavación tiene una serie de efectos negativos para la operación, partiendo por un menor rendimiento causado por demoras en el ciclo de perforación y tronadura, al tener que extraer más toneladas de marinas y realizar una fortificación más exhaustiva, además de aumentar los costos de la operación. Por otra parte, la sub excavación también causa problemas, principalmente por el hecho de que el diseño de las galerías se hace en base a los equipos que se trasladarán por ella, y si hay sub excavación lo más probable es que sea necesario realizar una tronadura adicional.

El control computarizado permite aumentar la precisión de los tiros, un control del largo de perforación para dejar el frente parejo tras la tronadura y en general mejores rendimientos y calidad de perforación.

### **1.2.2 Implementación de nueva tecnología**

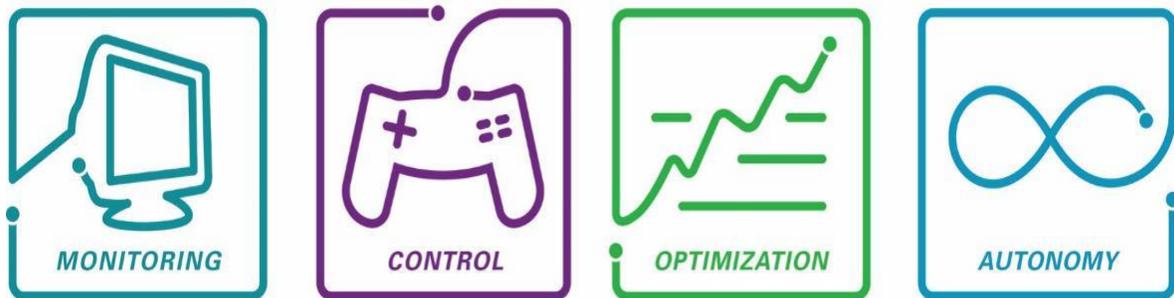
La minería en Chile es conocida por ser un área conservadora, por el hecho de que las inversiones iniciales son muy altas, lo que causa que la implementación de nuevas tecnologías sea un gran desafío. La resistencia al cambio, el dinamismo y el alto nivel técnico de la operación hacen que muchas mineras mantengan prácticas antiguas por el hecho de estar comprobadas tras años de experiencia.

Sin embargo, las condiciones de la minería en la actualidad hacen que sea necesario innovar y utilizar nuevas prácticas, que permitan reducir los costos y hacer más eficiente la operación.

## 1.3 Motivación

### 1.3.1 Ruta hacia la automatización

El futuro del sector apunta a que la operación sea cada vez más automatizada, incrementando la productividad y fortaleciendo la seguridad. Epiroc no se ha quedado atrás en este ámbito, desarrollando equipos y herramientas que ayudan a sus clientes en la transición hacia la automatización. Así nace el concepto de la ruta hacia la automatización, como una secuencia de pasos a seguir para ir incorporando esta tecnología por partes.



*Figura 1-1 Los 4 niveles de la automatización de Epiroc.*

El concepto de automatización tiene 4 niveles:

1. Monitoreo: recolección de datos de producción, utilización y condiciones de los equipos, lo que permite planificar y analizar las operaciones.
2. Control: soluciones de control remoto que permiten incrementar la precisión, seguridad y comodidad en la perforación y transporte del material.
3. Optimización: detectar la mejor forma de realizar cada tarea y repetirla, para optimizar la capacidad de los equipos.
4. Autonomía: ofrece el potencial completo de la automatización, incorporando los tres niveles anteriores.

La empresa busca impulsar la automatización en Chile, donde hay un gran potencial de mercado. Para esto, se realiza un estudio que busca mostrar los resultados obtenidos en casos reales de la aplicación del nivel de monitoreo.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivos Generales**

El objetivo general de este estudio es realizar una evaluación técnica, económica y operacional de la implementación del control computarizado, en la perforación para el desarrollo de túneles y galerías pequeñas y medianas para la minería.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Estudiar los procesos y actividades involucradas en el desarrollo de túneles y galerías en las operaciones mina Cabildo y Proyecto Nuevo Nivel Mina, evaluando sus recursos, métodos de trabajo y costos.
- Medir los resultados de la perforación con equipos convencionales y con equipos que usan la nueva tecnología.
- Estudiar los contornos de los túneles desarrollados con ambas tecnologías.
- Realizar una comparación entre las tecnologías, minimizando el impacto de factores externos como las condiciones geológicas, la maestría del operador y las dimensiones de la galería.
- Estudiar los factores operacionales y entregar recomendaciones respecto a la implementación de la nueva tecnología a la empresa Epiroc.

## **1.5 Alcances**

De acuerdo con los antecedentes disponibles, se definieron los siguientes alcances:

- Es importante considerar los diversos factores externos al equipo y al sistema de perforación que afectan los resultados de la perforación.
- El estudio se enfocará en el desarrollo de túneles y galerías de pequeñas y medianas secciones, de no más de 6x6 metros.
- Se limitará el estudio al nivel ABC Regular de automatización, ya que en la actualidad el uso del ABC total en minería subterránea aún es muy limitado. Ambos niveles de automatización están descritos en 2.3.2.2.

## **1.6 Antecedentes**

### **1.6.1 Atlas Copco**

Atlas Copco es una empresa fundada en Suecia en 1873, dedicada a la fabricación de equipamiento industrial, con sucursales en más de 20 países. Atlas Copco se instaló en Chile el 29 de mayo de 1954.

Atlas Copco, se ha posicionado como un proveedor líder de soluciones de productividad sostenible para la minería y otras industrias, con presencia en la mayoría de las operaciones mineras del país.

### **1.6.2 Epiroc**

A fines de 2017, se divide la empresa en dos sociedades, Atlas Copco, enfocada en clientes industriales, y Epiroc, enfocada en clientes de minería e ingeniería civil, con el objetivo de enfocar mejor la gestión y el manejo del capital.

En la actualidad, las operaciones mineras se enfrentan a diversos desafíos ambientales, debido a que las normativas cada año son más estrictas y a una mayor conciencia, lo que se traduce en una sociedad más preocupada por el medioambiente. Por esto, ha crecido el interés por tecnologías más eficientes y sustentables. Epiroc no se ha quedado atrás en el tema, impulsando el uso de la energía eléctrica en sus equipos de perforación y de carguío, desarrollando equipos que operan con baterías. Además, la empresa se destaca por su innovación en automatización para la operación minera, la que permite aumentar la productividad, disminuir los costos y evitar la exposición de los operadores a riesgos innecesarios.

Epiroc cuenta con 6 divisiones:

- a. URE (Underground Rock Excavation): División en la cual se realizó el presente trabajo, dedicada a la venta y servicios post-venta de equipos para labores realizadas bajo tierra, tanto para obras civiles como para la minería. Entre estos equipos se encuentran las perforadoras de desarrollos frontales (Boomer) y las de producción (Simba), equipos de carguío y transporte de bajo perfil, equipos

de fortificación, sistemas de ventilación, etc. El servicio post-venta depende del acuerdo entre Epiroc y el cliente; comúnmente se realiza una puesta en marcha y capacitación del personal, donde se le enseña a los operadores y mantenedores de la mina o proyecto a utilizar y mantener el equipo de la mejor manera posible, además de proveer respaldo y servicio técnico.

- b. ADS (Advanced Drilling Solutions): Encargada de desarrollar herramientas y tecnologías de automatización y manejo de datos para sus productos, entre los cuales encontramos Certiq y Mobilaris. El primero corresponde a un software que recibe y procesa los signos vitales y parámetros claves de producción de los equipos que tienen el sistema instalado, principalmente para poder programar de mejor manera las mantenciones preventivas y así evitar fallas críticas en los equipos que sean más costosas y requieran de más horas de reparación. Mobilaris corresponde a un sistema similar al “Dispatch”, comúnmente utilizado en la minería de rajo abierto pero aplicado a la minería subterránea, para monitorear la posición y actividad que están realizando los equipos y el personal en la mina. ADS también es responsable del desarrollo de los sistemas de automatización para los equipos de perforación y LHD.
- c. SED (Surface and Exploration Drilling): Maneja todo lo relacionado a perforadoras de precorte y producción de rajo abierto y equipos de exploración geológica.
- d. HAT (Hydraulic Attachment Tools): Esta división se encarga de la venta de herramientas que se acoplan a los brazos de los equipos, generalmente de demolición, como los martillos percutores, cortadores de hormigón, pinzas para excavadoras e imanes.
- e. RDT (Rock Drilling Tools): Provee de herramientas e insumos para la excavación, como los martillos de fondo (Down-To-Hole), martillos de cabeza (Top-Hammer), diamantinas para exploración, aceros, etc.

- f. MRS (Mining and Rock Excavation Service): Se encarga de gestionar al personal que realiza las capacitaciones, puestas en marcha y asistencias técnicas a los clientes.

### 1.6.3 Sandvik

Fundada en Suecia en 1862, Sandvik es otra gran empresa dedicada a la fabricación de maquinaria para la minería. La empresa ha logrado grandes avances tecnológicos, en especial en el área de automatización de equipos de carguío y transporte de bajo perfil. Entre los equipos que ofrece Sandvik encontramos cargadores y camiones de bajo perfil, equipos de fortificación y perforadoras para la minería subterránea y de rajo abierto.

### 1.6.4 Codelco, División El Teniente, Proyecto Nuevo Nivel Mina

La división El Teniente de Codelco está ubicada en la VI región, a 60km de la ciudad de Rancagua. Es considerada la mina de cobre subterránea más grande del mundo, con una producción de 475,000 toneladas de cobre fino al año. Con el fin de garantizar la continuidad de la mina por los próximos 50 años, se aprobó la explotación de reservas de mineral a nivel profundo, llamado PNNM. El proyecto iniciará su operación el 2023 incorporando Andes Norte, con 375 Mton de reservas a una ley promedio de 1.02%. La extracción en régimen será de 35 ktpd que serán alcanzadas en 7 años de ramp up.

El método de explotación del proyecto es panel caving con hundimiento convencional. Se realizará una socavación baja en la zona superior que asegure la conexión con los niveles superiores. Para disminuir la propagación y el riesgo sísmico de las zonas, se plantea pre acondicionar con fracturamiento hidráulico la columna completa, para redistribuir los esfuerzos. Además, se realizará fracturamiento hidráulico descendente bajo el nivel de producción para proteger la infraestructura.

La perforación y tronadura en los túneles del PNNM tiene la característica de que se realiza un empernado en el frente previo a la perforación de avance, colocando aproximadamente 16 pernos Split set para una frente de 5,2x5,1 con 3 pernos helicoidales lechados. Además, se deja un “velo” de malla desde la corona. Todo esto para evitar exponer operadores a frentes no acondicionados y a riesgos de estallidos de roca. La empresa contratista que realiza esta actividad es Salfa Montajes.

### **1.6.5 Salfa Montajes**

Salfa Montajes es una empresa de montajes industriales del grupo SalfaCorp. Esta empresa es la encargada de realizar los avances horizontales del PNNM. La empresa opera 5 Boomer Epiroc para realizar los desarrollos del proyecto, incluyendo los niveles de hundimiento, producción, subnivel de ventilación y la sala de chancado.

### **1.6.6 Faena Cabildo, Grupo Minero Las Cenizas**

La faena Cabildo del Grupo Minero Las Cenizas está ubicada en la provincia de Petorca, en la V región, donde se extraen 85 mil toneladas al mes que son procesados en una planta concentradora para obtener concentrado de cobre.

La faena cuenta con dos minas; El Sauce y Carmen-Margarita, las cuales son explotadas por el método de Sublevel Stopping. La construcción de galerías de avance es del orden de 700 metros al mes y se efectúa con equipos electrohidráulicos Jumbo Boomer.

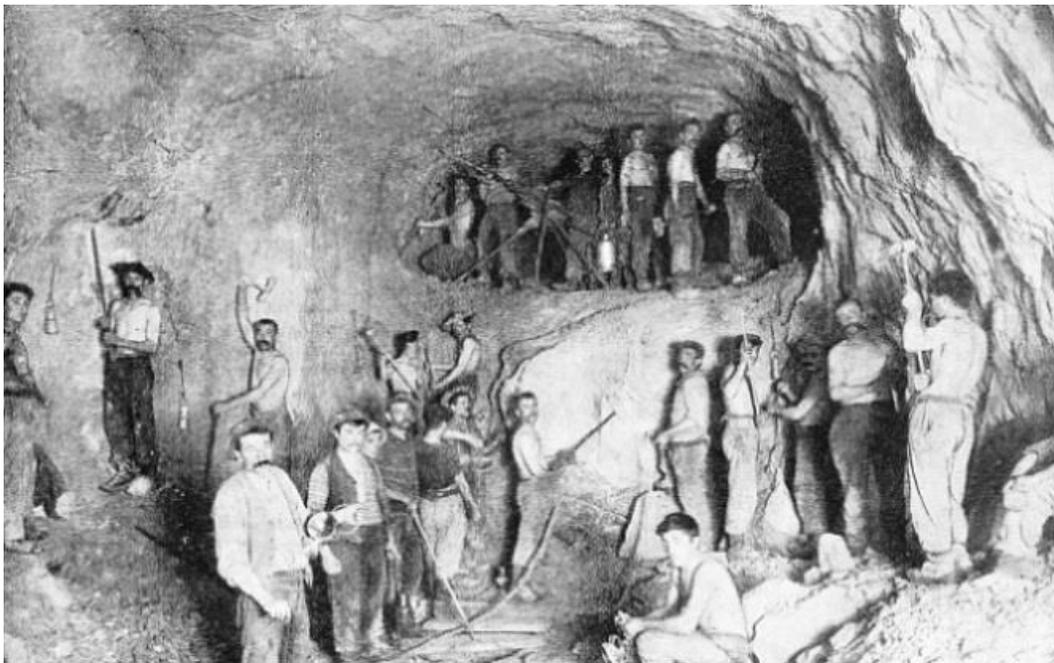
## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

---

### 2.1 Desarrollo de túneles y galerías

La historia de los túneles arranca con la minería. La mina más antigua que se conoce en el mundo data del año 40 mil a.C. en Swazilandia. De ella se extraía hematita, roca muy apreciada simbólicamente por su color rojizo. El método que se utilizaba consistía en abrir fuego en la frente para luego apagarlo de manera abrupta con agua fría, esto fracturaba la roca haciendo más fácil su extracción.

Durante la mayor parte de la historia, los túneles se abrieron a mano, por obreros con picotas, en condiciones precarias. A comienzos del siglo XIX se desarrollaron perforadoras a vapor, pero estas no podían ser utilizadas en la minería debido a que aún no se podía transportar el vapor por largas distancias y por las complicaciones que trae tener una caldera al interior de la mina en la ventilación. A mediados del siglo XIX se desarrollaron las primeras perforadoras neumáticas (que operan con aire comprimido, el cual puede ser transportado sin pérdidas de energía), las cuales fueron clave para la industria de los túneles y la minería.



*Figura 2-1 Túnel del Simplón.*

El túnel del Simplón, que cruza los Alpes suizos, fue excavado casi exclusivamente a mano por miles de obreros a principios del siglo XX. Recién en las etapas finales se utilizaron perforadoras manuales para hacer agujeros en la roca en los que se colocaba dinamita. El desarrollo de este túnel cobró 67 vidas.

Durante muchos años fue común el uso de perforadoras neumáticas en conjunto con explosivos para el desarrollo de túneles, convirtiendo este método de perforación y tronadura en un nuevo estándar.



*Figura 2-2 Perforadora neumática Puma.*

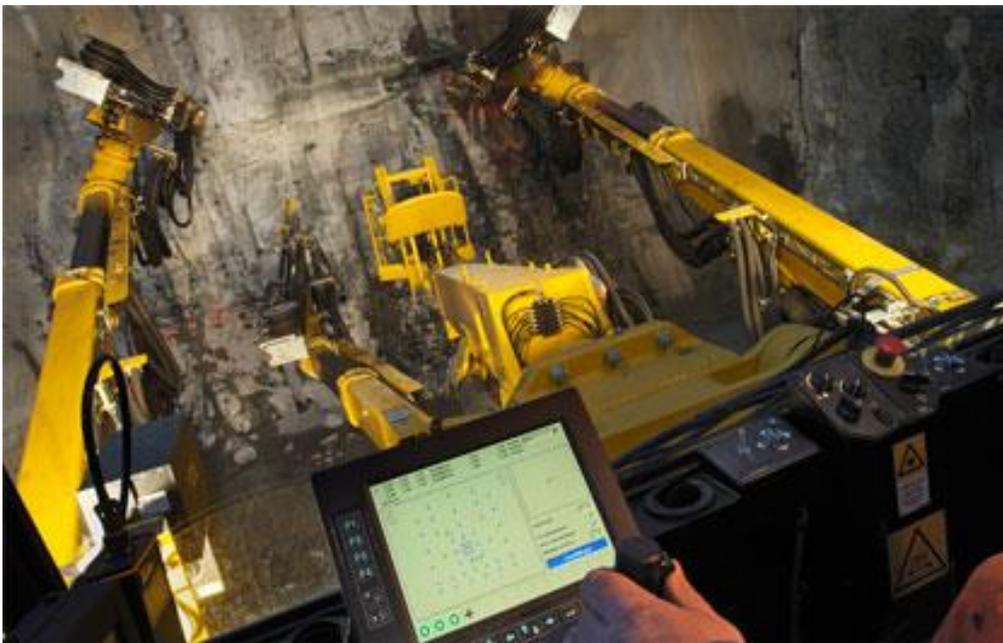
Utilizando estas perforadoras, se lograba llegar a rendimientos del orden de 10-12 metros perforados por hora hombre. Sin embargo, los riesgos a los que se exponían los trabajadores aún eran inminentes y las condiciones de trabajo eran bastante precarias; altas temperaturas, polvo, agua, etc.

A mediados del siglo XX, se introducen los Jumbo para realizar las labores de perforación, equipos hidráulicos que cuentan con múltiples brazos, cada uno con una viga que cuenta con una perforadora y una barra, logrando 60 metros perforados por hora hombre por brazo. Así, se reduce considerablemente la exposición de los trabajadores a riesgos y a malas condiciones de trabajo.



*Figura 2-3 Boomer H281, Atlas Copco.*

Estos equipos siguen siendo utilizados en la actualidad debido a su buen rendimiento y bajos costos operacionales. Sin embargo, los Jumbo computarizados, una versión mejorada de estos equipos, han estado ganando presencia en el mercado desde el 2000. Estos equipos incluyen instrumentos y herramientas que mejoran la precisión de los tiros y ofrecen la opción de realizar la perforación de manera remota o autónoma, llegando a los 90 metros perforados por brazo por hora.



*Figura 2-4 Jumbo Computarizado, Epiroc.*

Hoy en día las únicas empresas que fabrican equipos de perforación computarizada son Sandvik y Epiroc, mientras que hay un gran repertorio de empresas fabricantes de jumbos convencionales como Mine Master, Komatsu, Resemin y Siton entre otras.

El método de perforación y tronadura no es el único para desarrollar túneles. Vale la pena mencionar a las tuneleras (Tunnel Boring Machine), que han sido utilizadas desde fines del siglo XIX como alternativa al método anterior. Las tuneleras se usan para excavar túneles de sección circular, cortando y fracturando la roca. Entre las ventajas que presentan se tiene que son rápidas y se reduce el daño al contorno del túnel, lo que disminuye el costo de fortificación. Sin embargo, las tuneleras requieren de una gran inversión para construirlas y pueden ser difíciles de transportar, además, su eficiencia es proporcional al largo del túnel y requieren de radios de curvatura mayores, lo que hace que sean poco viables para trabajos de desarrollo de minería.



*Figura 2-5 Tunelera Cochrane 2, fabricada por Herrenknecht, completa un túnel en Malasia.*

En 2018, Epiroc lanzó al mercado una tunelera flexible y con mejor movilidad, enfocada en la minería, el Mobile Miner. A diferencia de las TBM convencionales, este equipo realiza túneles rectangulares, entregando una producción continua, lo que produce mejoras en la planificación y minimiza la sobre excavación. Esta nueva tecnología está siendo probada en Idaho y Sudáfrica, donde será utilizada para extraer mineral de vetas a más de 3 km de profundidad.



*Figura 2-6 Mobile Miner, Tunelera de Epiroc.*

## 2.2 Conceptos básicos de perforación y tronadura para desarrollos horizontales

### 2.2.1 Ciclo de Perforación y Tronadura

Este método es el más utilizado para excavaciones subterráneas alrededor del mundo, debido a que se puede utilizar en todos los tipos de rocas con bajos costos iniciales, a diferencia de las tuneladoras (TBM) que implican un mayor costo de capital, menor flexibilidad, dificultades en el transporte y otras complicaciones que hacen que aún no sean óptimas para la minería subterránea, a pesar de que pueden realizar la misma labor entre 4 a 6 veces más rápido. El ciclo de avance de túneles con perforación y tronadura empleado en la mayoría de las operaciones mineras subterráneas del país comprende las siguientes etapas:

- Perforación de tiros con equipos Jumbo.
- Carguío de explosivos y voladura.
- Ventilación para remover los gases de tronadura.
- Extracción de marinas.
- Acuñadura.
- Fortificación con pernos, malla y shotcrete.
- Examinación y marcación de topografía.



Figura 2-7 Ciclo de perforación y tronadura convencional.

## 2.2.2 Nomenclatura de tiros

La nomenclatura de los tiros se basa en la ubicación del tiro en el diagrama de disparos. Esta se puede ver en la Figura 2-8.

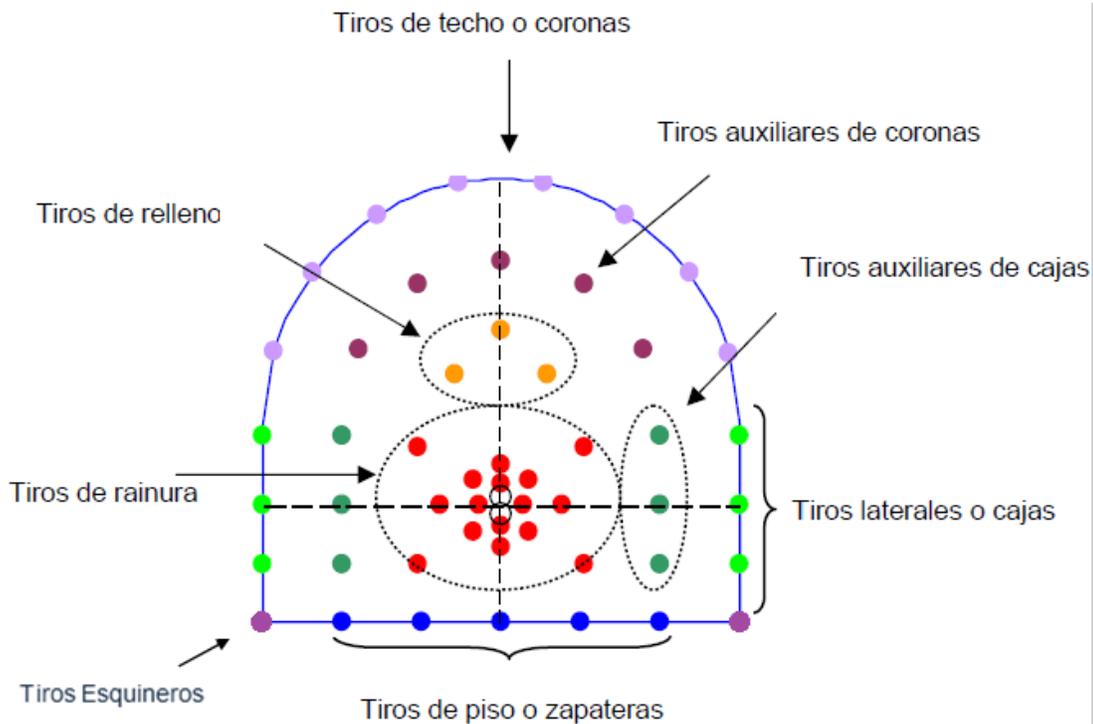


Figura 2-8 Nomenclatura de tiros.

Los tiros de Contorno corresponden a los de corona y caja, y son los que le dan la forma final al túnel y se disponen con un reducido espaciamiento y orientados hacia el interior del macizo, como se puede ver en la Figura 2-9, para evitar que se cierre la frente, esto se conoce como “Look out” o “ángulo de divergencia”.

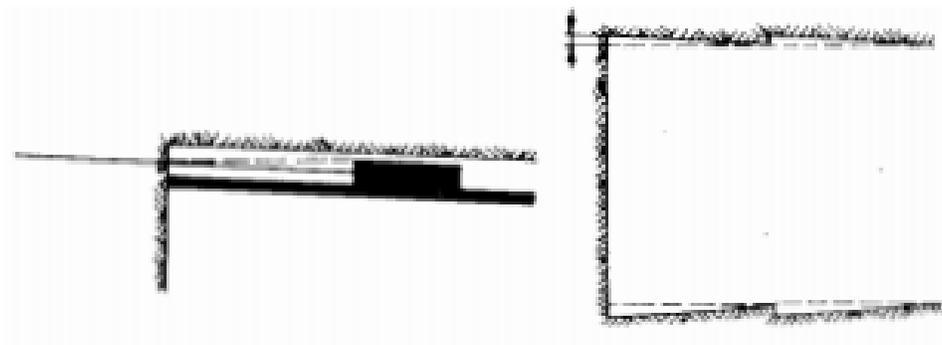


Figura 2-9 Ángulo de divergencia en tiros de contorno, para dejar espacio para la próxima perforación.

### 2.2.3 Tipos de rainura

Los desarrollos horizontales están caracterizados por tener sólo una cara libre, a diferencia de las tronaduras de producción en minería de rajo que pueden tener dos o más. Por esto, es necesario crear caras libres para permitir una propagación óptima de la energía de la tronadura, cuyo propósito es fragmentar la roca ubicada donde se posicionará el túnel, minimizando el impacto en el contorno. Esto se logra con los tiros de rainura.

Los tipos de rainura más utilizados en el desarrollo de túneles son:

- Large-hole-cut.
- En “V” o en cuña.
- Piramidales.
- Tipo abanico.
- Burn-Cut.

En este caso, se analizarán las large-hole-cut, ya que son las más utilizadas en la minería y las que se usan en las minas visitadas.

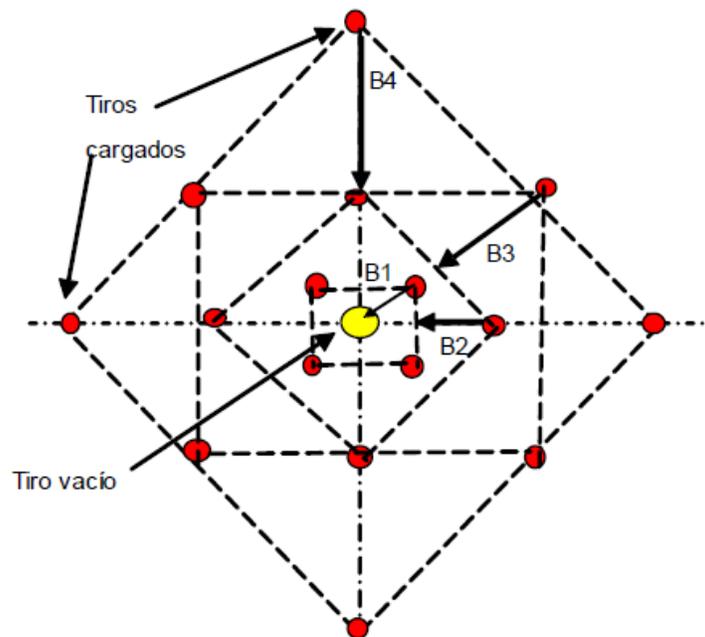


Figura 2-10 Rainura Large-Hole-Cut.

## 2.3 Sistemas de control de perforación

Corresponde a la interfaz mediante la cual el operador interactúa con el equipo. Estos sistemas pueden ser hidráulicos o electrohidráulicos.

### 2.3.1 Perforación Convencional

En este estudio se le llamará perforación convencional a la perforación realizada con equipos con sistemas hidráulicos, sin paneles electrónicos o pantallas. Todo el control y las regulaciones del equipo se realizan de forma análoga, con manillas, palancas y válvulas. Estos equipos son los más utilizados en la minería a nivel mundial.

Los equipos convencionales para pequeñas y medianas galerías más comunes son los 282, 281, S1D, S2D, y M2D fabricados por Epiroc, los DD421, DD422 fabricados por Sandvik, los Troidon de Resemin y los DR-1SB, DR-2SB de Joy Global (Komatsu).

#### 2.3.1.1 Direct Control System (DCS)

Sistema hidráulico convencional que se ha utilizado por muchos años; para mover cada brazo se tiene un panel individual con numerosas manillas, palancas y niveles. Por lo general, este sistema no tiene ningún sistema para controlar el ángulo de la perforación, por lo que los resultados de la perforación dependen fuertemente de la experiencia y capacidades del operador, y de la buena marcación de la frente.



*Figura 2-11 Sistema DCS de un Boomer 282. Epiroc.*

### **2.3.1.2 Protocolo de operación**

La operación de un jumbo convencional comienza tras la marcación total de la frente que debe perforar el equipo. El equipo se posiciona a unos metros de la frente, en una posición que le permita posicionar el o los brazos en todos los puntos. Luego de conectar el equipo a la corriente mediante el cable que lleva en su carrete, el equipo puede comenzar a perforar. Los tiros de contorno llevan un ángulo de divergencia que se lo da el operador basado en las condiciones de la frente, lo pedido por el jefe de turno y su juicio. Tras realizar todas las perforaciones el operador retira el equipo de la frente para que proceda el equipo de explosivos a cargar.

### **2.3.2 Perforación Computarizada**

En este estudio, cuando se menciona la perforación computarizada o el control computarizado, se refiere a los equipos de perforación que cuentan con sistemas inteligentes de control, es decir, cuentan con instrumentos, sensores, válvulas y controles tanto hidráulicas como electrónicas, que van conectadas al computador mediante el cual el operador puede manipular el equipo, además de regular de forma fácil los parámetros de este.

Estos sistemas incluyen sensores de longitud de perforación, permitiendo conocer la posición de la perforadora en la viga, y con esto el largo perforado, sensores de movimiento y dirección en los brazos para determinar la dirección y posicionamiento de estos y sistemas de calibración con láser. Todos estos sensores e instrumentos captan datos que son procesados por un computador ubicado en la cabina, que muestra la información relevante en una pantalla, mediante la cual el usuario puede interactuar.

En la actualidad, la mayor parte de los equipos de perforación que se compran son pedidos con esta tecnología, ya que presenta varias mejoras, reduciendo la sobre excavación, aumentando la eficiencia de disparo y los rendimientos en general, lo que reduce los costos de la operación y del proceso minero aguas abajo.

### 2.3.2.1 Rig Control System (RCS)

El RCS (Rig Control System) corresponde a la interfaz electrónica a través de la cual el operador interactúa con los equipos modernos de Epiroc. Atlas Copco (hoy Epiroc) lanzó la primera versión en 1998 y desde entonces ha trabajado para perfeccionar esta interfaz. El RCS 5 corresponde a la última versión, la cual fue premiada por el IdeaAward el año de su lanzamiento.



*Figura 2-12 Rig Control System (RCS 5). Epiroc.*

La principal mejora que ofrece el RCS 5 frente a su antecesor (RCS 4) y a la competencia está en la simpleza. Con una pantalla táctil de 15", el sistema combina el fácil manejo de los teléfonos inteligentes con la potencia de herramientas tecnológicas de automatización. Como se puede ver en la Figura 2-12, los controles del RCS 5 son mucho más pequeños que los hidráulicos como el DCS (Direct Control System) convencional, por lo que la cabina es mucho más espaciosa y cómoda para el operador.

El RCS incluye instrumentos y sensores que monitorean la dirección y posición de los brazos y permite enlazar la frente con el diagrama de disparo cargado previamente al computador del equipo. Esto hace que no sea necesario marcar todos los tiros de la frente, sino que solamente el eje y la gradiente. En la Figura 2-13 se puede ver en el círculo rojo donde está posicionado el brazo

seleccionado y en el círculo azul se ve el ángulo de inclinación, seguido por la distancia de divergencia al final del tiro que es generada por este ángulo y finalmente el ángulo de rotación del brazo. Esto es muy útil a la hora de darle el ángulo de divergencia preciso a los tiros de contorno y darle la misma dirección a todos los tiros restantes. Esto permite un mayor control del contorno del túnel y una mayor precisión de la perforación para aumentar la eficiencia de disparo.

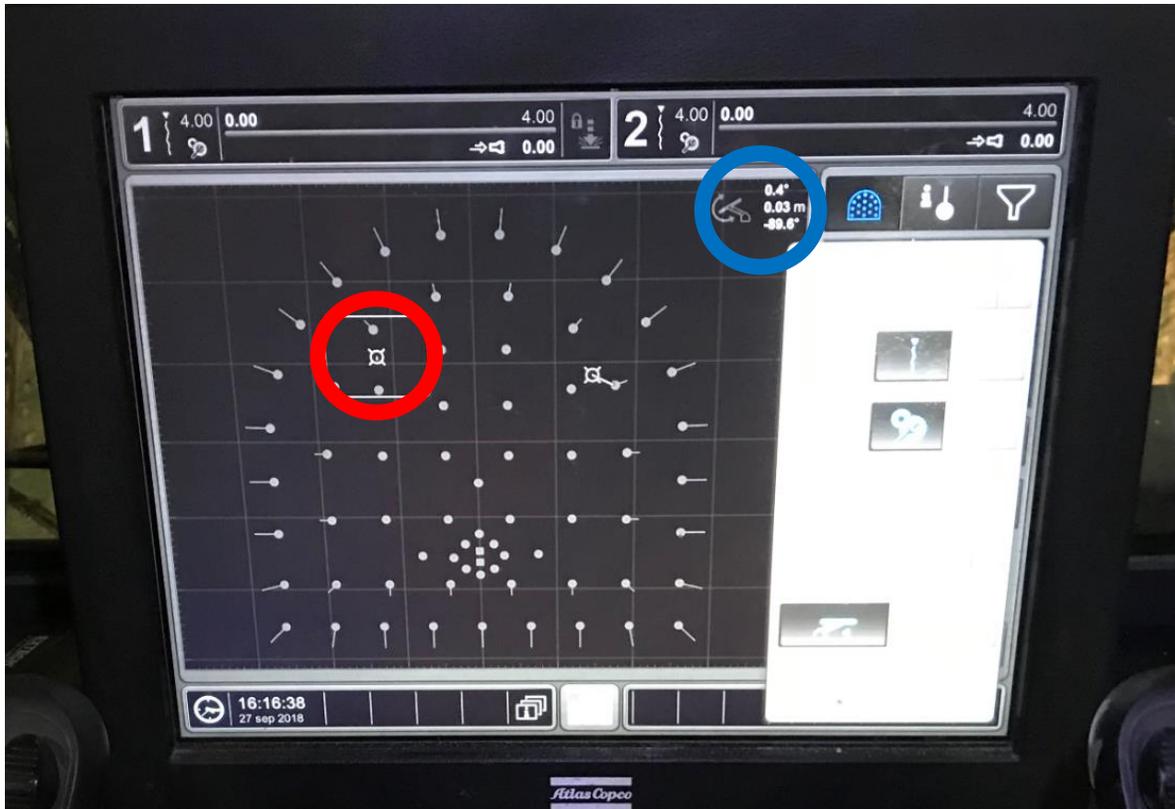


Figura 2-13 Pantalla del RCS 5.

Ejemplos de equipos que utilizan esta tecnología para el desarrollo de pequeñas y medianas galerías son el Boomer S2C y M2C y el Jumbo DD422i.

### 2.3.2.2 Niveles de automatización RCS

Epiroc entrega 3 opciones de automatización en sus jumbos que vienen con el sistema RCS 5, siendo el ABC Pure o Básico el que viene por defecto. Los clientes pueden optar por comprar niveles más avanzados, los que se detallan en la Tabla 2-1. Para fines de este estudio, los niveles ABC Regular y Total son considerados como sistemas de control computarizado.

*Tabla 2-1 Niveles de automatización del RCS 5.*

Nivel	Descripción
<b>ABC Básico (Pure)</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Sistema básico, opera como un equipo hidráulico convencional, pero mantiene beneficios de menor consumo de acero, mayor rapidez y mejoras en los controles y la comodidad del operador.</li></ul>
<b>ABC Regular</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Asiste al operador en el posicionamiento del brazo, con un diagrama de tiros digital en pantalla.</li><li>• Optimiza la tronadura, para reducir la sobre excavación.</li><li>• Reporta datos útiles para el análisis de la operación.</li></ul>
<b>ABC Total</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Además de lo anterior, puede automatizar la perforación, perforando de tiro a tiro siguiendo una secuencia dada por el operador, aumentando la utilización de la perforadora.</li></ul>

### 2.3.2.3 Protocolo de operación con RCS 5, ABC Regular

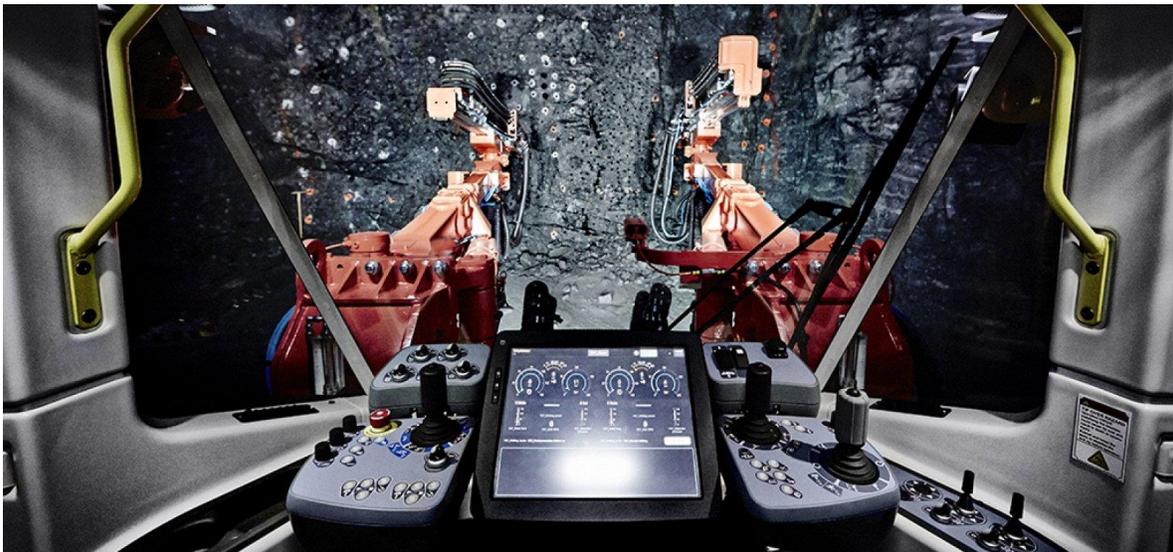
El equipo se traslada al a frente tras la marcación de esta. Al utilizar esta tecnología solo es necesario marcar el eje y la gradiente de la frente, sin embargo, en PNNM se marca toda la frente, ya que no todos los equipos tienen incorporada la tecnología o por si llegara a fallar algún sensor o calibración. Luego de esto, el equipo se posiciona y se conecta a la red eléctrica de la misma forma que uno convencional.

Antes de comenzar a perforar el equipo se “navega”, esta es la forma de referirse a que el equipo se enlaza con la frente. Esto se hace posicionando uno de los brazos del jumbo en la intersección del eje y la gradiente y seleccionando en la pantalla la opción “navegación”, esto abre la carpeta de diagramas cargados en el equipo, entre los cuales se debe buscar el adecuado para la frente. Una vez completado esto, el equipo puede comenzar a perforar.

La perforación es realizada con la asistencia en la pantalla al operador en posición y dirección de los tiros. Finalmente, el equipo genera un registro de la labor realizada que puede ser exportado mediante una unidad de almacenamiento USB y se retira de la frente.

#### **2.3.2.4 Sandvik Intelligent Control System Architecture (SICA)**

SICA, el sistema de control computarizado de la empresa Sandvik, es bastante similar al sistema RCS, incorporando instrumentos y sensores de longitud y posicionamiento a los brazos de los jumbos. Este sistema es muy utilizado en los equipos de perforación de superficie, con buenos resultados, lo que llevó a Sandvik a incorporarlo en sus jumbos. Actualmente el único jumbo de la empresa que cuenta con esta tecnología es el DD422i.



*Figura 2-14 Sistema SICA (Sandvik Intelligent Control System Architecture) de Sandvik.*

La empresa ofrece distintos niveles de automatización, silver, gold y platinum, llegando a un nivel totalmente autónomo donde el equipo una vez posicionado y enlazado con la frente puede perforar un diagrama de manera completa sin requerir de un operador, aunque al igual que en los equipos Epiroc, es aconsejable que los tiros de zapatera y esquineros se realicen de manera manual.

### 2.3.2.5 Underground Manager

El Underground Manager es un software que entrega diversas herramientas para el desarrollo de galerías. Permite diseñar diagramas de disparo, optimizar la tronadura, analizar en profundidad como se realizó cada perforación y estimar las condiciones de la roca, ya que incorpora un sistema que registra cada perforación, su número, tipo, dirección, largo y dirección, para poder compararla con lo planificado. Esta es una herramienta muy útil, ya que se puede comparar el diagrama diseñado con la perforación que realizó el operador en un reporte como se puede ver en la Figura 2-15, para así evaluar cómo se realizó el trabajo y encontrar la causa de problemas operacionales que se ven en la frente.

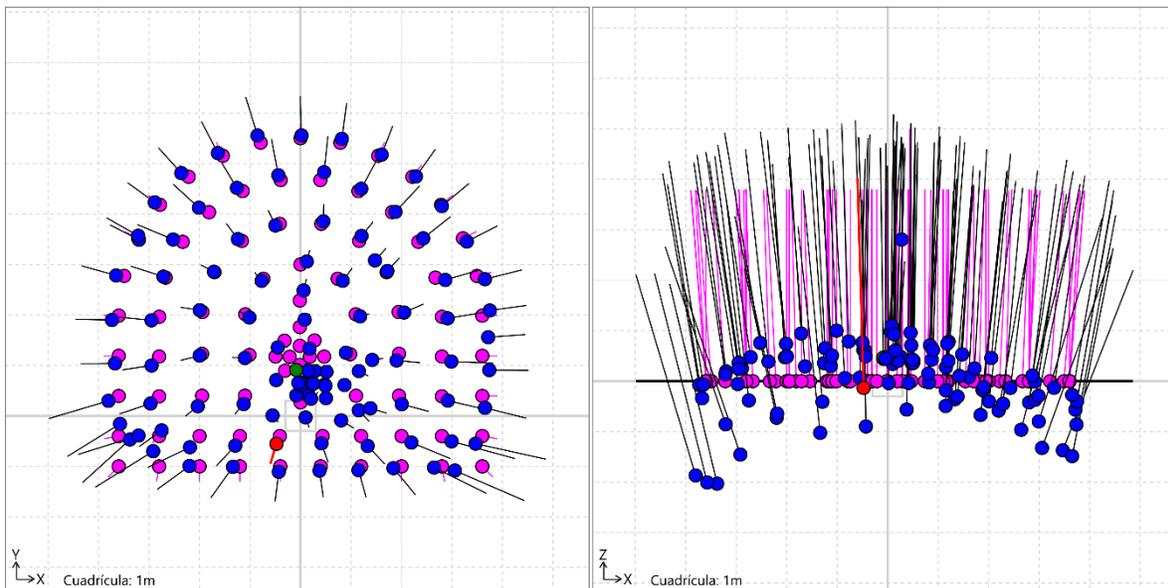


Figura 2-15 Reporte de perforación con RCS 5.

El reporte también entrega otros datos útiles como el tiempo de perforación, número de tiros perforados, metros totales perforados y velocidad media de perforación, todo esto separado por brazo.

## 2.4 Sobre y sub excavación

Uno de los principales problemas en el desarrollo de túneles y galerías mediante perforación y tronadura es la sobre y sub excavación, que comprende la excavación del túnel por sobre o por debajo las dimensiones de diseño planificadas. Debido a la naturaleza del método utilizado, es inevitable obtener desviaciones respecto al diseño planificado.

### 2.4.1 Factores que la influncian

En base a la información analizada, los factores contribuyentes a la generación de sobre y/o sub excavación se pueden separar en las siguientes categorías:

- Condiciones Geológicas: presencia de fallas y características del macizo rocoso.
- Precisión de la perforación: desviación de los tiros de contorno y auxiliares de contorno.
- Parámetros de carga de explosivos: distribución de la carga de explosivos.
- Diseño del diagrama de disparo: el espaciamiento, diámetro y ángulo de divergencia de las perforaciones de contorno.

De estos factores, los únicos que el equipo puede abordar son la precisión de la perforación y el cuidado del ángulo de divergencia.

### 2.4.2 Efectos de la sobre excavación

La sobre excavación genera diversas ineficiencias, que afectan directamente el rendimiento y los costos de la operación, como:

- Mayor tiempo de acuñadura, exponiendo al operador a desprendimiento y caída de rocas.
- Mayor daño al contorno del túnel, afectando la integridad de este.
- Mayor tiempo total del ciclo, debido a los impactos negativos en el resto de las actividades.

- Mayor volumen de marinas a extraer, aumentando la duración y los costos de esta actividad.
- Mayores requerimientos de fortificación, para mantener el túnel seguro y de las dimensiones planificadas se utiliza un mayor volumen de shotcrete, produciendo ineficiencias de tiempo y costos.

### 2.4.3 Efectos de la sub excavación

La sub excavación también causa problemas, principalmente por el hecho de que el diseño de las galerías se hace en base a los equipos que se trasladarán por ella, y si hay una sub excavación por sobre lo permitido, se requerirá realizar una tronadura adicional.

Por otra parte, si la sub excavación está ubicada en el piso, se generarán irregularidades en la calle, lo que causa que los equipos que transiten por ella tengan problemas para desplazarse a mayores velocidades, dañando las suspensiones y los chasis.

## 2.5 Eficiencia de disparo

La eficiencia de disparo viene dada por la Ecuación 2-1, donde el avance del disparo es la distancia en metros que se logró tronar, medida en el centro del túnel por topografía, y el largo perforado promedio corresponde al promedio de los largos reales de los tiros perforados por el equipo.

*Ecuación 2-1 Eficiencia de disparo.*

$$Eficiencia\ de\ disparo\ [\%] = \frac{Avance\ del\ disparo\ [m]}{Largo\ perforado\ promedio\ [m]} * 100\%$$

Es importante destacar que, del largo total de las barras de perforación, hay aproximadamente entre 30 y 35 cm del total que no son perforados, ya que corresponden al acople con el cual se conecta la barra a la perforadora y al tope de goma que va en el extremo de la viga, que se utiliza para tener un buen apoyo entre la viga y la roca.

## 2.6 Equipos de perforación frontal para pequeñas galerías

En la minería subterránea se encuentran diversos tamaños de galerías. Desde túneles de acceso o transporte a superficie, de dimensiones del orden de 8x8m o más, hasta pequeñas galerías por las cuales se accede al mineral, de dimensiones incluso menores a 4x4m, por las cuales transitan equipos de carguío y transporte de bajo perfil y jumbos. Para el desarrollo de estas últimas, se utilizan jumbos compactos, los cuales deben tener dimensiones menores a los 3 metros de alto y radios de giro pequeños que les permitan desplazarse sin problemas en las galerías.

Los equipos que realizan la perforación para desarrollos horizontales en las minas estudiadas son los Boomer 282, S2 C, S1 D y M2 C. A continuación, se muestran las características principales de cada equipo. Además, se muestra el DD422i de Sandvik, que es el único otro jumbo que ofrece una tecnología de control computarizado similar a la fecha.

### 2.6.1 Jumbo Boomer 282, Epiroc

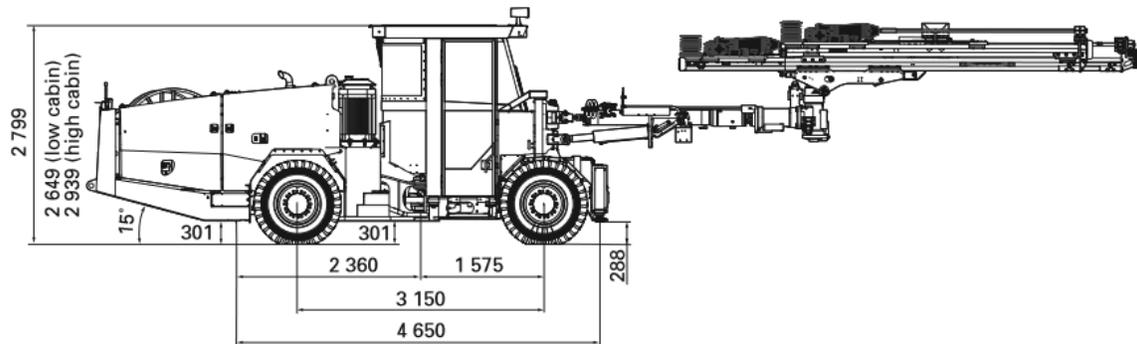
Equipo compacto, para túneles y galerías pequeñas y medianas. Utiliza un sistema hidráulico convencional, con dos brazos que le dan una cobertura de hasta 45m<sup>2</sup>. Sus características principales se muestran en Anexos 8.2.



*Figura 2-16 Jumbo Boomer 282, Epiroc.*

## 2.6.2 Jumbo Boomer S2 C, Epiroc

Jumbo electrohidráulico compacto que incorpora el sistema de control computarizado de la perforación. Este equipo utiliza el RCS 5 e incorpora la opción de realizar ciertas labores de manera automatizada. Sus principales características y mejoras que ofrece frente al Boomer 282 se muestran en Anexos 8.2.



*Figura 2-17 Jumbo Boomer S2. Epiroc.*

## 2.6.3 Jumbo Boomer S1 D, Epiroc

El Boomer S1 D es un equipo hidráulico compacto de un brazo. Este equipo comparte las especificaciones y características de un Boomer S2 C, pero con la diferencia de que utiliza un sistema convencional de perforación (DCS).



*Figura 2-18 Jumbo Boomer S1 D, Epiroc.*

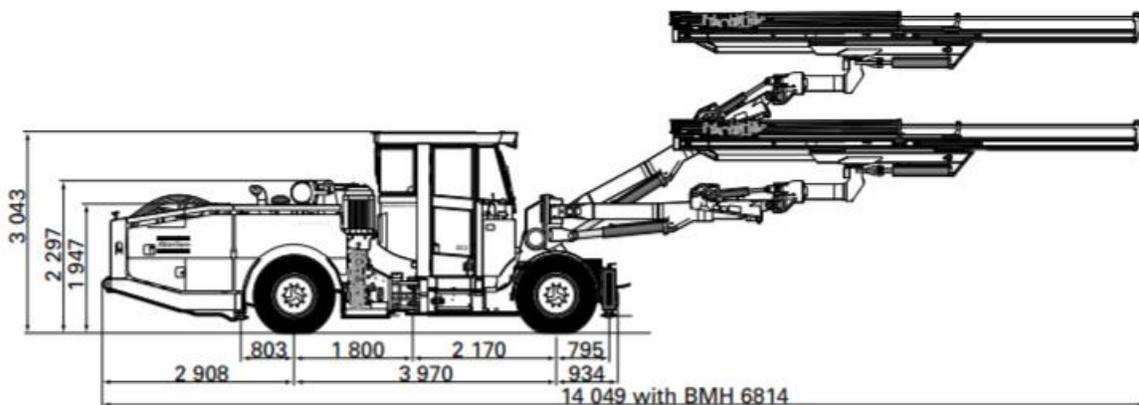
## 2.6.4 Jumbo DD422i Sandvik

El Jumbo DD422i de Sandvik es un equipo de perforación compacto para galerías pequeñas y medianas, que incorpora la tecnología de control computarizado de la perforación y un sistema de automatización por niveles. Las características principales del Jumbo se muestran en Anexos 8.2.



*Figura 2-19 Jumbo DD422i. Sandvik.*

## 2.6.5 Boomer M2C Epiroc



*Figura 2-20 Boomer M2.*

El Boomer M2C es un equipo muy similar al S2C, pero de mayor envergadura para trabajar en galerías medianas de hasta 65 m<sup>2</sup>. También incluye el sistema RCS 5 y opciones ABC.

## **CAPÍTULO 3: MARCO METODOLÓGICO**

---

### **3.1 Estudio de las características de los sistemas**

Se realizó una comparación en detalle entre ambas tecnologías detectando las mejoras que entrega el RCS frente al DCS. Además, se estudiaron las diferencias en torno a la operación, las tareas y actividades que debe realizar el operador en un equipo y en el otro, descritas anteriormente en la sección 2.3.

### **3.2 Levantamiento de datos**

Se analizó la situación actual de la mina El Teniente, específicamente del área de perforación y tronadura para desarrollos horizontales del Proyecto Nuevo Nivel Mina. Se estudió la flota y el estado de los equipos que realizan estas labores para detectar factores que podrían afectar los resultados.

En El Teniente, se tomaron datos durante los meses de agosto y septiembre, donde se midió:

- La calidad de la perforación y tronadura; analizando perfiles topográficos, donde se estudia la sobre y sub excavación y la presencia de callos o irregularidades en las paredes.
- El avance por disparo.

Por otra parte, se analizó la operación, para detectar oportunidades de mejora y ver las ventajas y desventajas de una tecnología frente a la otra.

Además, se realizó un levantamiento de datos en la mina Cabildo del Grupo Minero Las Cenizas para estudiar la operación con jumbos convencionales y analizar los niveles de sobre excavación y eficiencia obtenidos.

### **3.3 Análisis técnico-económico de los datos**

Con los datos obtenidos durante la estadía en la mina El Teniente, se procede a realizar un análisis técnico-económico. Revisando los casos en que las condiciones externas afecten demasiado a los resultados, para obtener una comparación lo más estandarizada posible.

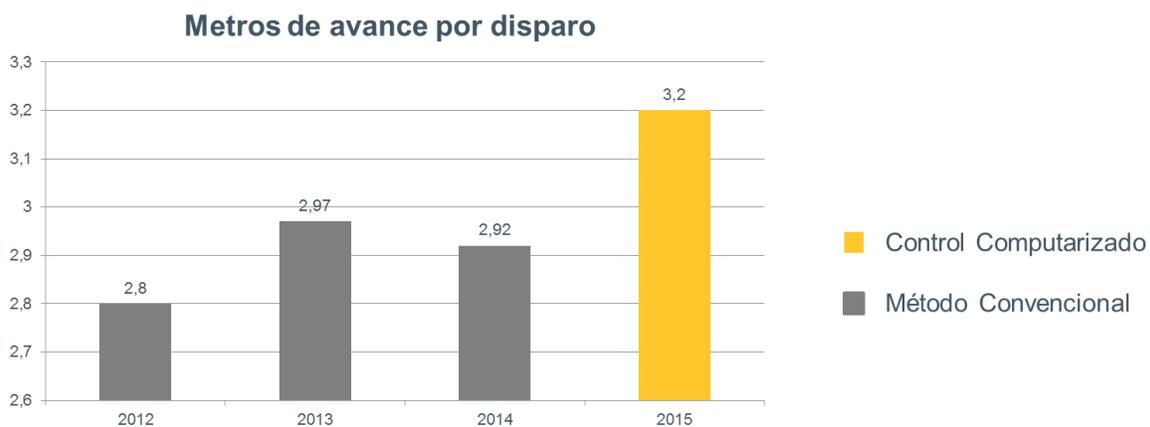
- Se compara la calidad de los productos, comparando lo planificado con lo obtenido en la práctica. Esto comprende la eficiencia de disparos, la sobre excavación, la sub excavación, la presencia de callos y las irregularidades en el fondo.
- Estas mejoras se traducen en menores costos. Por lo tanto, se complementará el estudio con la incorporación de un análisis económico, comparando los costos de operación de ambos casos.

## CAPÍTULO 4: CASOS DE ESTUDIO

### 4.1 Caso de estudio: KGHM Polonia [1]

En Polonia, en KGHM, una de las minas subterráneas más grandes del mundo, se realizó un estudio donde se evaluó la implementación de una tecnología de control computarizado similar a la de Epiroc. En esta mina, se implementó el control computarizado en los equipos Face Master 1.7L de Mine Master. Este sistema comprende el control del ángulo y dirección de la perforación.

Los resultados obtenidos fueron bastante positivos, al utilizar barras de 3,7 metros se logró un avance por disparo promedio de 3,2 metros, aumentando el promedio de eficiencia de disparo de un 85% a 94%, causado netamente por una mayor precisión de la perforación, sin haber cambiado ningún otro parámetro, como el tipo de explosivo o diseño del diagrama.



*Figura 4-1 Metros de avance por disparo promedio anual, KGHM Polonia.*

También lograron mejoras respecto a la sobre excavación, reduciéndola de un 20% a 12%.

## 4.2 Caso de estudio: Boliden Garpenberg [2] [4]

En Suecia, en la mina Boliden, operada por Garpenberg, se realizó uno de los primeros estudios de la implementación del Control Computarizado en un Boomer 352 S. Se incorporaron instrumentos para medir profundidad y dirección del tiro en el equipo, que utiliza un sistema convencional (DCS).

Se logró reducir la sobre excavación de un 20 a un 10% y aumentar los metros de avance de 3,5 a 3,9 con las mismas condiciones anteriores (barras de la misma longitud, mismo diagrama y mismo explosivo). Esto generó además ahorros en acuñadura, extracción de marinas y fortificación valorados en \$200 EU por metro.



*Figura 4-2 Túnel desarrollado con DCS convencional y túnel desarrollado con instrumentos similares a los del control computarizado.*

### 4.3 Caso de estudio: Autopista Nor-Oriente, Dukraft [3]

Dukraft es una empresa chilena que arrienda equipos a empresas contratistas. La empresa cuenta con varios jumbos de avance, como el M2 D que es convencional, y otros con tecnología de control computarizado como el L2 C y XL3 C.

La empresa, con sus equipos computarizados, ha desarrollado importantes túneles para la Autopista Nor-Oriente como el Manquehue II de 1.698m y Montegordo de 1.130m y, además, han realizado estudios para comparar la tecnología con la perforación convencional, en los mismos túneles y bajo las mismas condiciones. En secciones teóricas de 69,3 m<sup>2</sup> obtuvieron un promedio de excavación de 75 m<sup>2</sup>, lo que se traduce en un 8% de sobre excavación, en rocas Andesita y Pórfidos.

En Montegordo se perforó durante 6 meses con Boomer L2C (ABC Regular), perforando 141.433 metros incluyendo perforación para empernado (15%). En Manquehue II en 7 meses con Boomer XL3C (ABC Regular) se perforaron 234.104 metros incluyendo 15% de empernado.

El estudio realizado por Dukraft, en base a los datos de un mes de perforación por equipo, mostró que comparando los equipos RCS con los DCS se podían observar las siguientes ventajas:

*Tabla 4-1 Estudio comparativo entre RCS y DCS, Dukraft.*

	<b>RCS</b>	<b>DCS</b>
<b>Equipo utilizado</b>	L2C / XL3C	M2D
<b>Capacidad por brazo</b> [metros perforados por hora de percusión]	125	90
<b>Capacidad por brazo</b> [metros perforados por hora efectiva]	75	50
<b>Utilización efectiva bombas hidráulicas</b> [porcentaje del tiempo de perforación]	75	50
<b>Avance por disparo</b> [%]	94	90

Se puede ver que los resultados obtenidos utilizando ABC Regular son bastante favorables para la operación, llegando al 40% y 50% de aumento en la

capacidad de perforación por brazo, en metros perforados por hora de percusión y metros por hora efectiva respectivamente, principalmente debido al menor tiempo de posicionamiento de los brazos.

Al considerar la cantidad de barrenos que comprende una frente de estas dimensiones, el impacto en los rendimientos totales es muy grande, esto fue lo que finalmente llevó a la empresa a comprar solo equipos que tuvieran incorporada la tecnología. Por otra parte, también se obtiene un mayor avance por disparo principalmente causado por la precisión de las perforaciones. En la Figura 4-3, se puede ver como operaron ambos equipos durante el desarrollo del túnel Montegordo. A la izquierda, se está preparando la frente para que el jumbo convencional M2 D perfore, donde todos los tiros deben ser marcados. A la derecha, se puede ver como un jumbo computarizado no requiere de la marcación completa de la frente, ya que con el eje y la gradiente el equipo puede realizar la labor. Por otra parte, se puede ver que a la derecha hay un mejor control del contorno del túnel.



Frente marcada y poco control del contorno



Sin marcación y mínima sobre excavación

*Figura 4-3 Túnel Montegordo de la autopista Nor Oriente, desarrollado por Dukraft.*

## Capítulo 5: RESULTADOS

### 5.1 Mina Cabildo, Las Cenizas

En la mina Cabildo del Grupo Minero Las Cenizas, se pudo estudiar la operación de equipos convencionales Boomer 282 y S1D, obteniendo parámetros como sobre y sub excavación y eficiencia de disparos. El explosivo utilizado en esta mina es ANFO.

#### 5.1.1 Sobre y sub excavación

Se midió la sobre y sub excavación en la mina Cabildo, midiendo las dimensiones de galerías en 44 puntos. Las galerías medidas se diseñaron con un diagrama de 4,8m x 4,8m de 68 tiros. Se obtuvo lo siguiente:

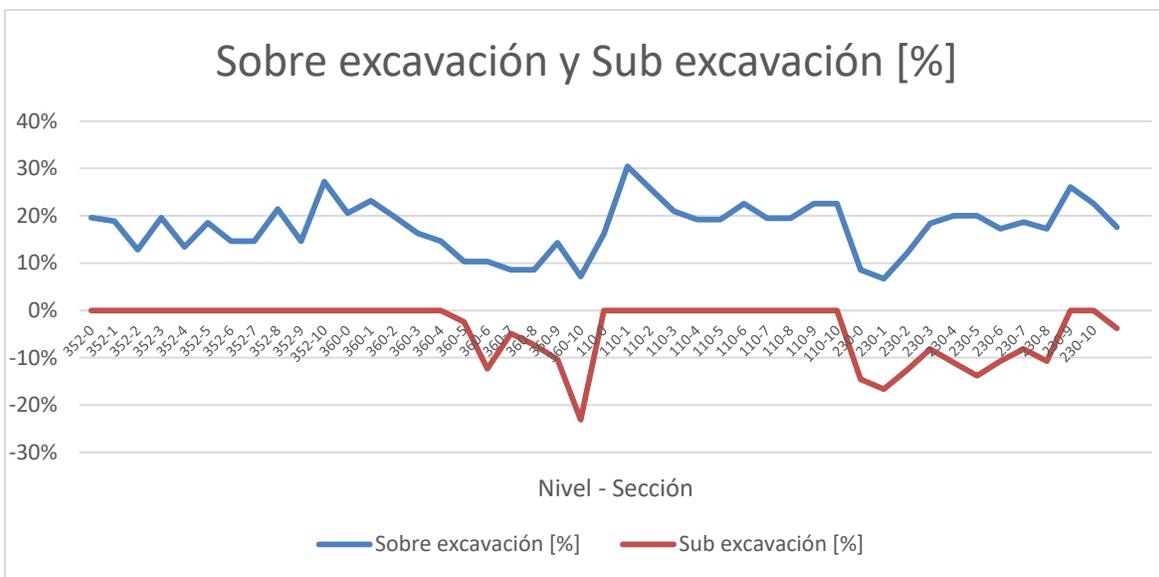


Figura 5-1 Sobre excavación y Sub excavación en mina Cabildo.

Como se puede ver en la Tabla 5-1, se obtuvo un promedio de sobre excavación de 18%, llegando en ocasiones al 30%. Respecto a la sub excavación, el promedio fue de 4%, con un máximo de 23% de sub excavación, sección en la cual el alto de la galería era menor a los 4 metros.

Tabla 5-1 Estadísticas descriptivas de la sobre excavación medida en Cabildo.

<b>Cabildo: Sobre excavación</b>	
<b>Media</b>	18%
<b>Desviación Estándar</b>	6%
<b>Mínimo</b>	7%
<b>Máximo</b>	30%
<b>Datos</b>	44

Tabla 5-2 Estadísticas descriptivas de la sub excavación medida en Cabildo.

<b>Cabildo: Sub excavación</b>	
<b>Media</b>	4%
<b>Desviación Estándar</b>	6%
<b>Mínimo</b>	0%
<b>Máximo</b>	23%
<b>Datos</b>	44

### 5.1.2 Eficiencia de disparos

Durante el levantamiento de datos realizado en la mina Cabildo, se pudo medir el avance por disparo de 12 perforaciones realizadas con equipos convencionales. El avance promedio fue de 3.25 metros, lo que se traduce en un 82% de eficiencia, ya que las perforaciones fueron realizadas con barras de 4.3m (14 pies), las cuales permiten un largo máximo de perforación de 3.95 metros. En la Tabla 5-3 se pueden ver las estadísticas descriptivas de los datos obtenidos.

Tabla 5-3 Estadísticas descriptivas de la eficiencia de disparos en mina Cabildo.

<b>Eficiencia mina Cabildo</b>	
<b>Media</b>	82%
<b>Desviación Estándar</b>	6%
<b>Mínimo</b>	73%
<b>Máximo</b>	91%
<b>Datos</b>	12

## 5.2 Proyecto Nuevo Nivel Mina, El Teniente, Codelco

El Proyecto Nuevo Nivel Mina de El Teniente es un ambicioso proyecto que requiere de miles de metros de perforaciones horizontales al año. Las galerías estudiadas fueron diseñadas con dimensiones de 4.4x4.7m, 5.0x5.0m, 5.5x5.6m, y 5.7x5.7m, con 74, 76, 82 y 90 tiros respectivamente. En los sectores estudiados, se encontraron distintos tipos de roca, siendo el más frecuentes el CMET (Complejo Máfico El Teniente); roca que comprende aproximadamente el 90% de la mineralización de la mina. Comprende diabasas, gabros y andesitas. También se encontró en algunas ocasiones brechas braden e ígneas y pórfidos. En la sección de Anexos 8.3 se muestran mapas geológicos del nivel de ventilación y el de transporte intermedio.

En la Figura 5-2 se muestra un reporte de perforación obtenido con RCS 5 y Underground Manager. En este reporte se pueden observar en rosado los tiros del diagrama de disparo con sus direcciones respectivas en líneas rosadas. Por otra parte, se muestran en azul las perforaciones realizadas por el operador, con sus direcciones mostradas como líneas negras.

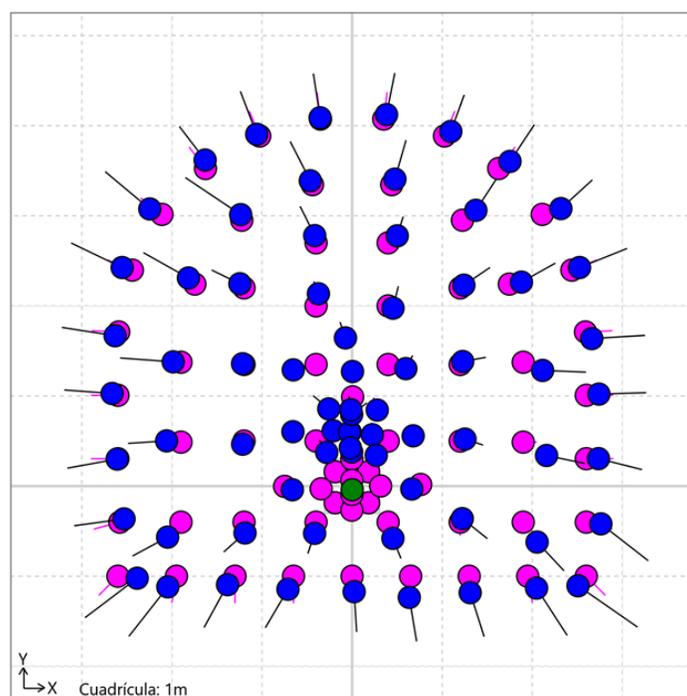


Figura 5-2 Reporte de perforación obtenido con RCS 5, para diagrama de 5.0x5.0m.

## 5.2.1 Flota de equipos de perforación frontal

La mayor parte de la flota de equipos de la empresa contratista cuenta con ABC Regular, lo que llamamos control computarizado de la perforación. Para fines de este estudio, se realiza la comparación entre los disparos realizados por un equipo con ABC Regular que pudo utilizar la tecnología de control computarizado y equipos con ABC Regular que no pudieron utilizarla debido a algún problema mecánico como la falta o falla de un sensor o calibración o equipos con ABC Básico. El explosivo utilizado para la tronadura de avances horizontales en el proyecto es ANFO. En algunas ocasiones se realizaron pruebas con emulsión obteniendo mejores resultados; sin embargo, la empresa contratista Salfa Montajes aún se encuentra en proceso para implementar el nuevo explosivo.

*Tabla 5-4 Flota de equipos de perforación frontal de Salfa Montajes para PNNM.*

Equipo	Modelo	Perforadoras	Nivel de tecnología RCS 5
167	S2C	MD20	ABC Regular
169	S2C	COP 1838 HD+	ABC Regular
174	S2C	COP 1838 HD+	ABC Regular
177	S2C	COP 1838 HD+	ABC Pure
173	M2C	COP 1838 HD+	ABC Regular

## 5.2.2 Control del contorno de las galerías

Se midió la sobre y sub excavación de las galerías del PNNM, donde la empresa contratista se encuentra realizando desarrollos horizontales en los niveles chancador, subnivel de ventilación, nivel de transporte intermedio y nivel de hundimiento. Durante los meses de agosto y septiembre se tomaron 96 datos de perfiles topográficos medidos con estación completa por el área de topografía de la empresa contratista. Con los registros de perforación se logró determinar cuáles de estos perfiles corresponden a secciones donde perforó un equipo utilizando el control computarizado o un equipo que no utilizó la tecnología. Los resultados se muestran en la Tabla 5-5.

Tabla 5-5 Estadísticas descriptivas de la sobre excavación en galerías del PNNM.

<b>Sobre excavación</b>	<b>Todos los datos</b>	<b>Control Computarizado</b>	<b>Convencional</b>
<b>Media</b>	16,1%	11,1%	21,5%
<b>Desviación Estándar</b>	7,8%	4,6%	6,9%
<b>Mínimo</b>	3,0%	3,0%	3,8%
<b>Máximo</b>	33,6%	25,0%	33,6%
<b>Datos</b>	96	50	46

Se obtiene un promedio de sobre excavación de 16,1% para todos los equipos, 11,1% para equipos que utilizaron la tecnología y 21,5% para los que no. Además, se puede ver que el máximo de sobre excavación es 8% mayor cuando no se utilizó la tecnología.

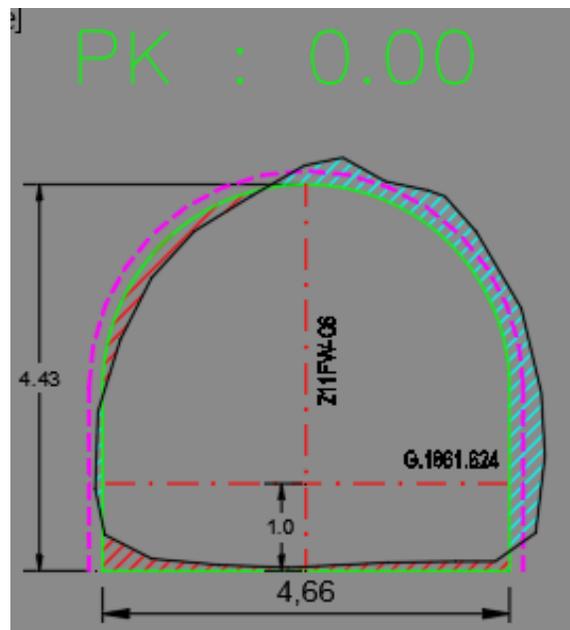
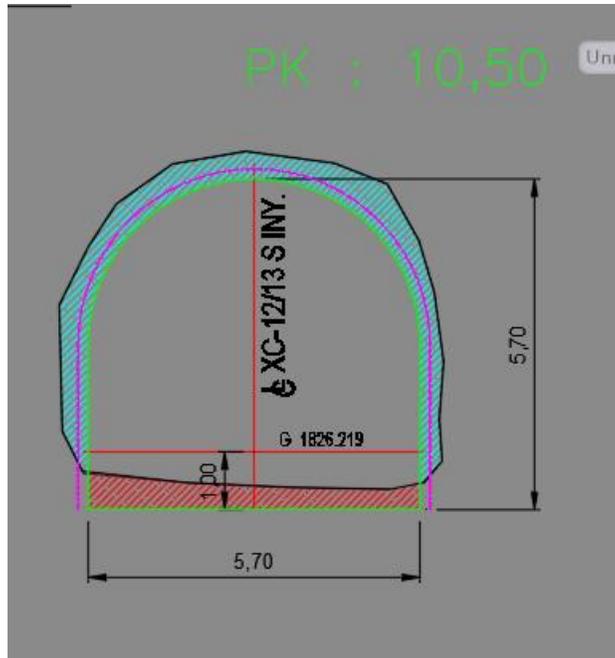


Figura 5-3 Perfil topográfico de la zanja 11 del nivel de producción, equipo con control computarizado.



*Figura 5-4 Perfil topográfico de la una galería del sub nivel de ventilación, equipo convencional.*

En la Figura 5-3 se muestra un perfil topográfico de una sección desarrollada con un equipo que utilizó la tecnología de control computarizado, con una sobre excavación de 10.3%, cercana al promedio utilizando de los equipos con control computarizado. A modo de comparación, en la Figura 5-4 se muestra un perfil topográfico de una sección desarrollada por un equipo M2C que no utilizó la tecnología por problemas de calibración, con una sobre excavación de 22%, cercana al promedio de los equipos convencionales.

En las Figuras Figura 5-5, Figura 5-6 y Figura 5-7 se muestran los histogramas obtenidos al procesar los datos de sobre excavación para la totalidad de las secciones analizadas y separadas entre equipos con control computarizado y convencionales.

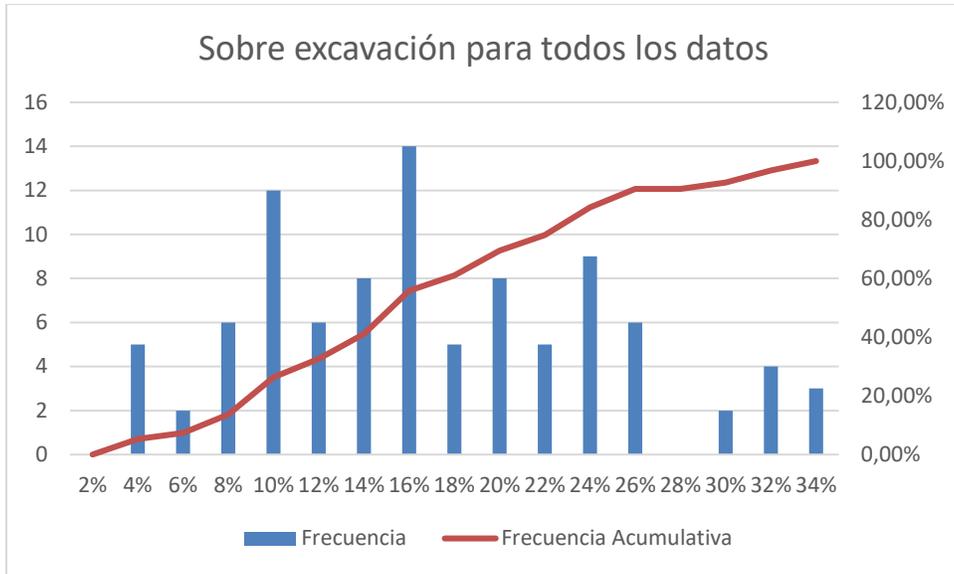


Figura 5-5 Histograma: Sobre excavación para todos los datos

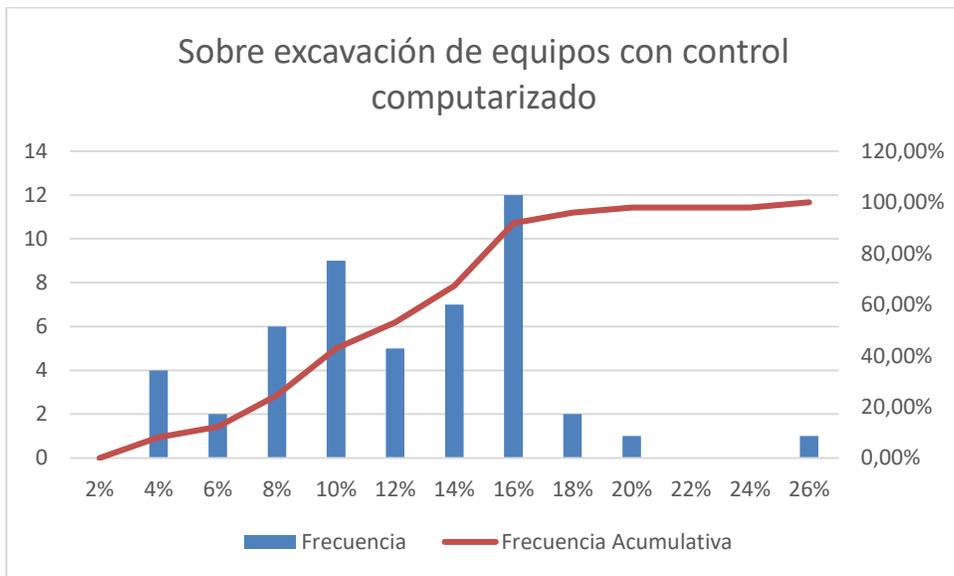


Figura 5-6 Histograma: Sobre excavación de equipos con control computarizado.

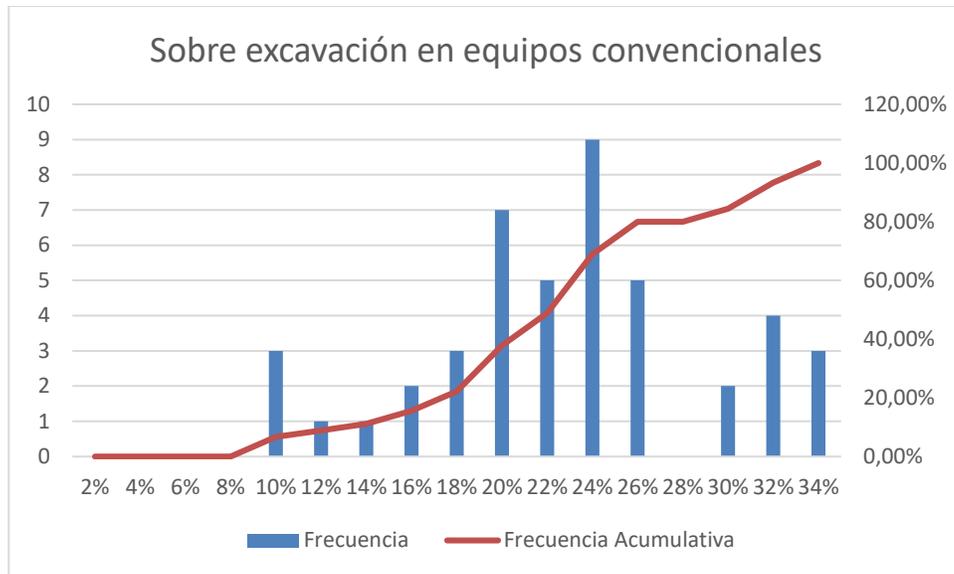


Figura 5-7 Histograma: Sobre excavación de equipos convencionales.

También se midió la sub excavación, obteniendo un 5% de sub excavación promedio para todos los datos y promedios similares para equipos con control computarizado y convencionales. Esta sub excavación se encuentra en el piso en la mayoría de los casos.

Tabla 5-6 Estadísticas descriptivas de la sub excavación en galerías del PNNM.

Sub excavación	Todos los datos	Control Computarizado	Convencional
Media	5,0%	5,2%	4,8%
Desviación Estándar	4,0%	4,3%	3,8%
Mínimo	0,0%	0,0%	0,0%
Máximo	18,9%	18,9%	14,7%
Datos	96	50	46

### 5.2.3 Eficiencia de disparo

Durante el levantamiento se obtuvieron 205 datos de avance por disparo en metros, con lo que se obtuvieron las eficiencias de disparo. Estos datos están separados en equipos que perforaron con control computarizado y equipos que operaron de manera convencional.

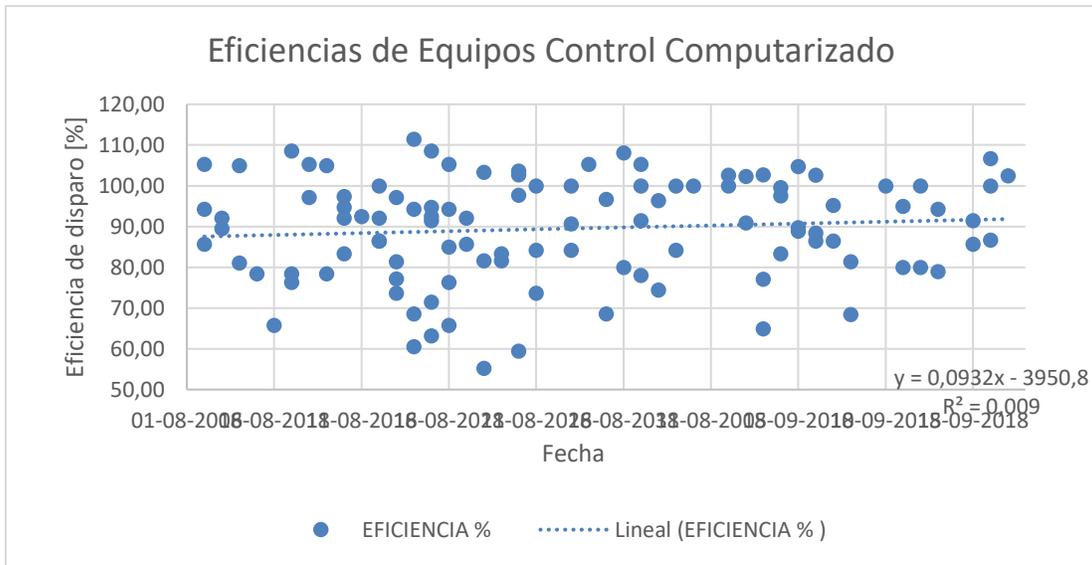


Figura 5-8 Eficiencias de disparo obtenidas con equipos con control computarizado.

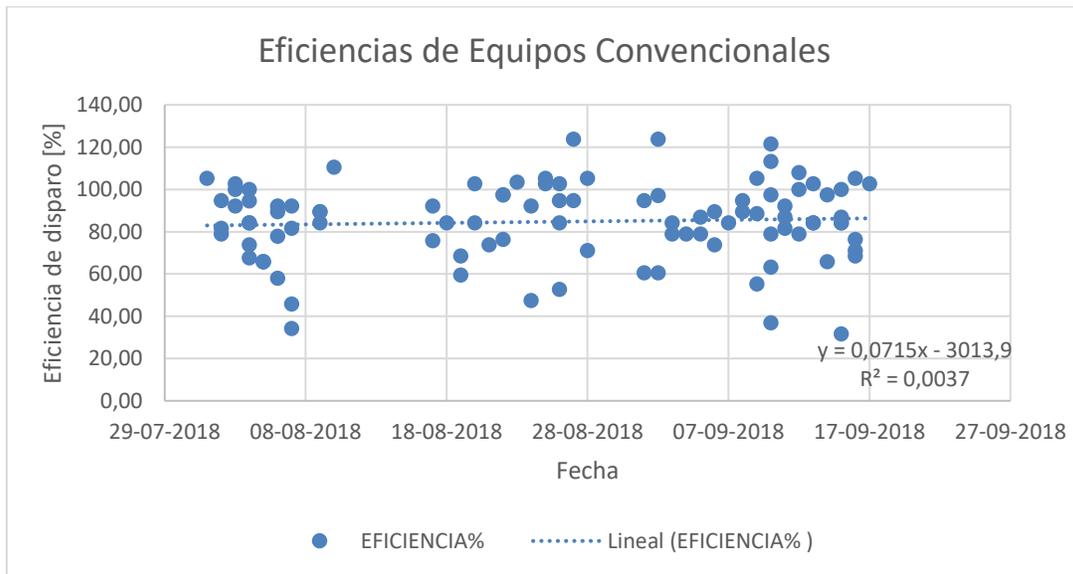


Figura 5-9 Eficiencia de disparos obtenidas con equipos que operaron de manera convencional.

En la Figura 5-8 se muestran las eficiencias de disparo para equipos que utilizaron el control computarizado, se puede ver que durante agosto y septiembre se ve una leve tendencia al aumento. Por otra parte, en la Figura 5-9 se muestran los datos obtenidos para equipos que no lo utilizaron.

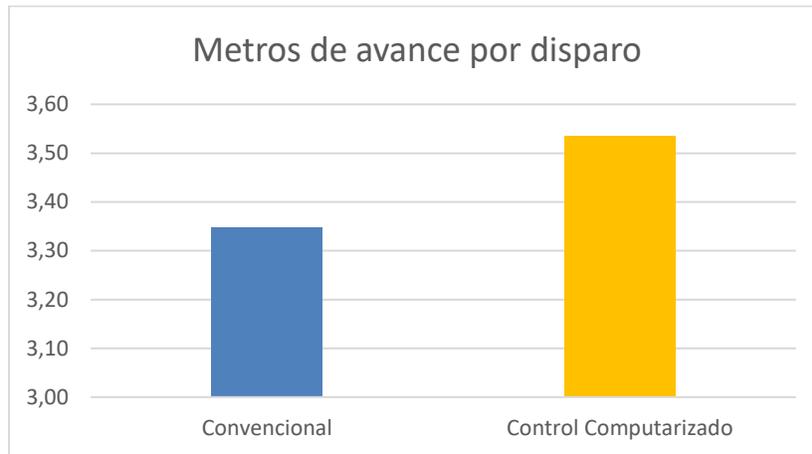


Figura 5-10 Metros de avance por disparo, perforación convencional vs computarizada.

Se obtiene un promedio de avance de 3,35 metros por disparo en equipos operados de forma convencional y de 3,54 metros por disparo en equipos con control computarizado. Viendo las estadísticas descriptivas presentes en la Tabla 5-7, se puede ver que en promedio se logra un 87,3% de eficiencia, subiendo a un 89,5% para con equipos que usan el control computarizado, frente a un 84,7% en equipos convencionales.

Tabla 5-7 Estadísticas descriptivas de la eficiencia de disparos en los avances del PNNM.

<b>Eficiencia [%]</b>	<b>Todos los datos</b>	<b>Control Computarizado</b>	<b>Convencional</b>
<b>Media</b>	87,3	89,5	84,7
<b>Desviación Estándar</b>	15,8	12,6	18,4
<b>Mínimo</b>	31,6	55,3	31,6
<b>Máximo</b>	123,7	111,4	123,7
<b>Datos</b>	205	108	97

## **CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

---

### **6.1 Control del contorno del túnel**

Como se mostró anteriormente, la sobre y sub excavación dependen de la calidad de la roca, del diseño del diagrama de disparos, de la distribución y tipo de explosivo utilizado y de la dirección y ángulo de divergencia de los tiros de contorno. En el levantamiento de datos realizado en la mina El Teniente, se logró determinar la importancia de este último factor, ya que se pudo comparar bajo las mismas condiciones, la operación de un equipo con la tecnología de control computarizado, que ayuda al operador a tener un buen control del ángulo de divergencia y de la dirección de los tiros de contorno, con la operación de un equipo convencional. El hecho de que se compare bajo las mismas condiciones es clave para evitar que los otros factores influyan sobre los resultados. Por otra parte, en Las Cenizas, a pesar de que solo se usaron equipos convencionales, se pudo ver que este mismo factor también tiene una gran influencia en los resultados obtenidos.

#### **6.1.1 Mina Cabildo, Grupo Minero Las Cenizas**

En la mina Cabildo se encontraron altos niveles de sobre excavación, lo que tiene un gran impacto en los costos de la operación. En la Figura 6-1 se puede ver una galería del nivel 230 de la mina Cabildo, las dimensiones medidas en esta sección fueron de 6 metros de alto y 4,4 de ancho, para una sección diseñada de 4,8m x 4,8m, lo que corresponde a una sobre excavación de un 20% y una sub excavación de un 11%. Esta imagen es útil ya que se pueden ver en el contorno del túnel las medias cañas obtenidas por una tronadura bien ejecutada y una roca competente, condición que se mantiene en la mayoría de las galerías de la mina subterránea. Esto implica que el factor más influyente en la sobre y sub excavación, es el ángulo de divergencia y dirección de los tiros de contorno, y como en este caso se utilizaron equipos convencionales, vemos que esto depende de la precisión de la marcación de los tiros y la perforación.



*Figura 6-1 Galería sobre excavada en mina Cabildo, (230-4).*

## 6.1.2 Proyecto Nuevo Nivel Mina

Los resultados obtenidos en el PNNM respecto a la sobre excavación hablan por sí solos, ya que se logra bajar de 21,5% a 11,1% solamente por el hecho de utilizar la tecnología de control computarizado, debido a que el resto de las condiciones se mantienen iguales. Al analizar los histogramas mostrados en las Figuras Figura 5-5Figura 5-6Figura 5-7, se puede ver que el 95% de los perfiles obtenidos usando el control computarizado están por debajo de un 18% de sobre excavación, mientras que en el caso de los convencionales, solo un 22% de los perfiles están bajo este porcentaje, esto dice que hay un mejor control del contorno y de la variabilidad de los resultados obtenidos al utilizar la tecnología. Por otra parte, se puede ver que un 15% de los perfiles de equipos convencionales están entre el 30 y el 34% de sobre excavación, mientras que al utilizar el control computarizado no se llegó a niveles superiores al 25%.

A modo de ejemplo, en la Figura 6-2, se muestran 4 perfiles topográficos tomados cada 5 metros, correspondientes a una galería del nivel de transporte intermedio. Al revisar los registros, se pudo confirmar que las primeras dos secciones corresponden al jumbo S2C 177, que no tiene el sistema de control computarizado instalado, mientras que las dos siguientes corresponden a galerías desarrolladas con el jumbo M2C 173 utilizando control computarizado. Esto muestra cómo la operación de un equipo con esta tecnología entrega mejores resultados que uno convencional, bajo los mismos parámetros y condiciones. A la vez, confirma el impacto que tiene la precisión de la perforación y el correcto direccionamiento de los tiros de contorno en la sobre excavación.

Respecto a la sub excavación, no hay una gran variación entre ambos casos, incluso obteniendo un promedio mayor en los equipos con control computarizado. Al analizar los datos, se puede ver que la sub excavación generalmente se genera en el piso de las galerías. Una causa de que los equipos convencionales produzcan menor sobre excavación es que a la hora de realizar los tiros de zapatera, cuando el operador visualiza que la frente está sub excavada, tiende a darles una mayor inclinación a los tiros cuando opera un equipo convencional que cuando utiliza el

sistema de control computarizado, ya que este sistema recomienda en pantalla utilizar un ángulo de convergencia más conservador.

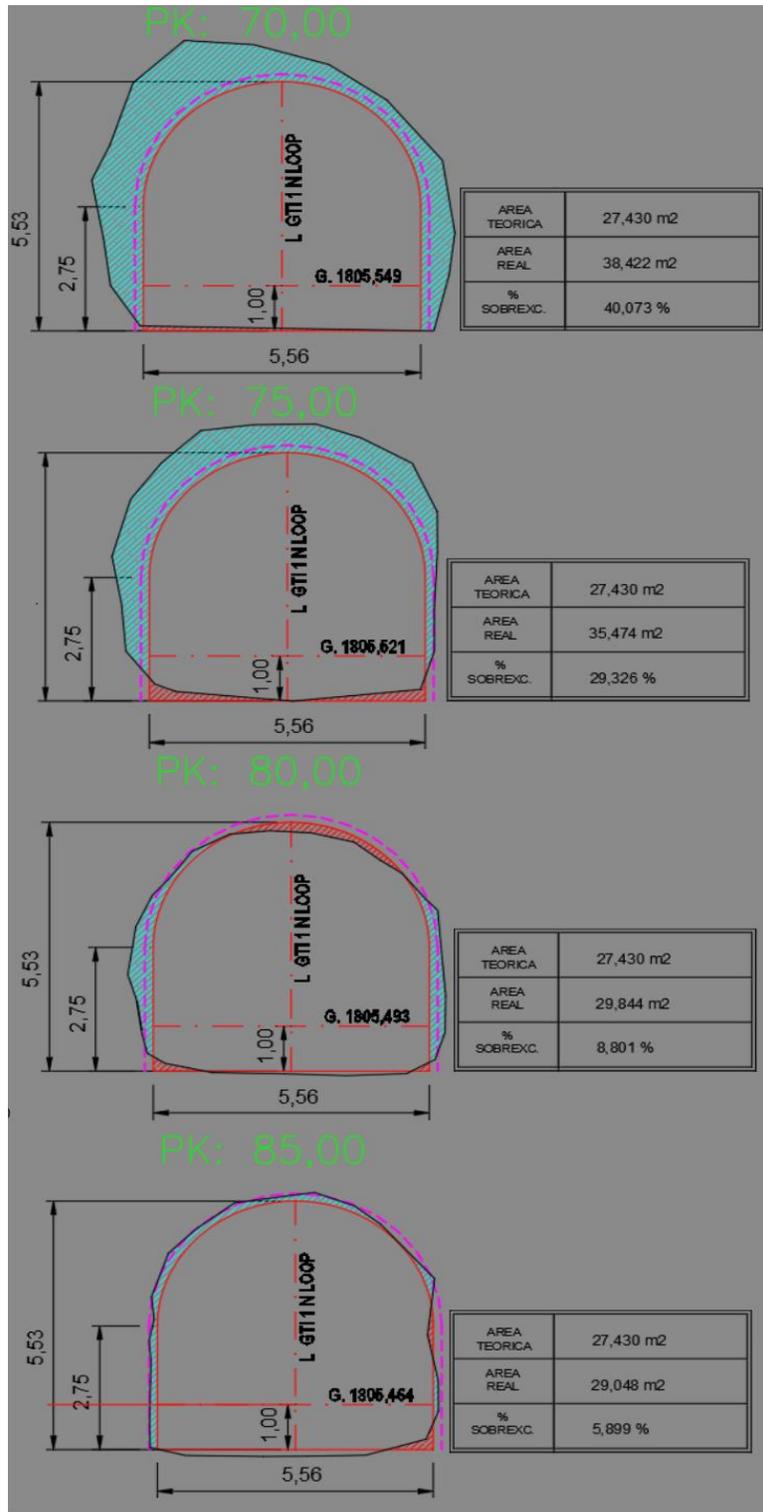


Figura 6-2 Perfiles topográficos de una galería del nivel de transporte intermedio del PNNM.

## 6.2 Eficiencia de disparo

En los siguientes histogramas se puede apreciar la diferencia entre ambos casos. Se puede ver que los equipos con control computarizado obtienen mejores resultados, quemando más del 90% de lo perforado en la mitad de los disparos, mientras que los otros logran esta condición en aproximadamente el 40% de los casos.

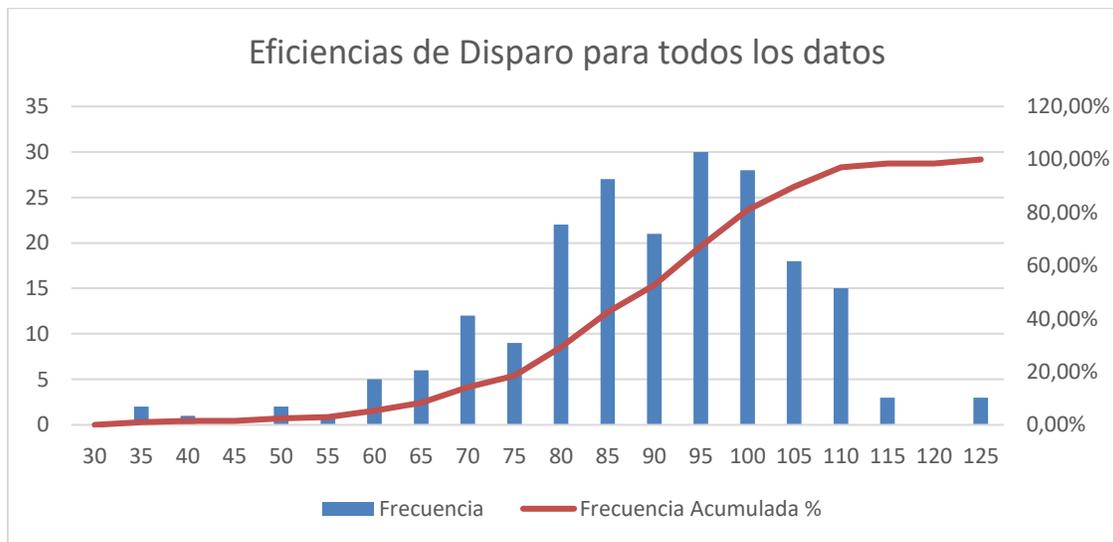


Figura 6-3 Histograma de eficiencias de disparo para todos los datos obtenidos en PNNM.

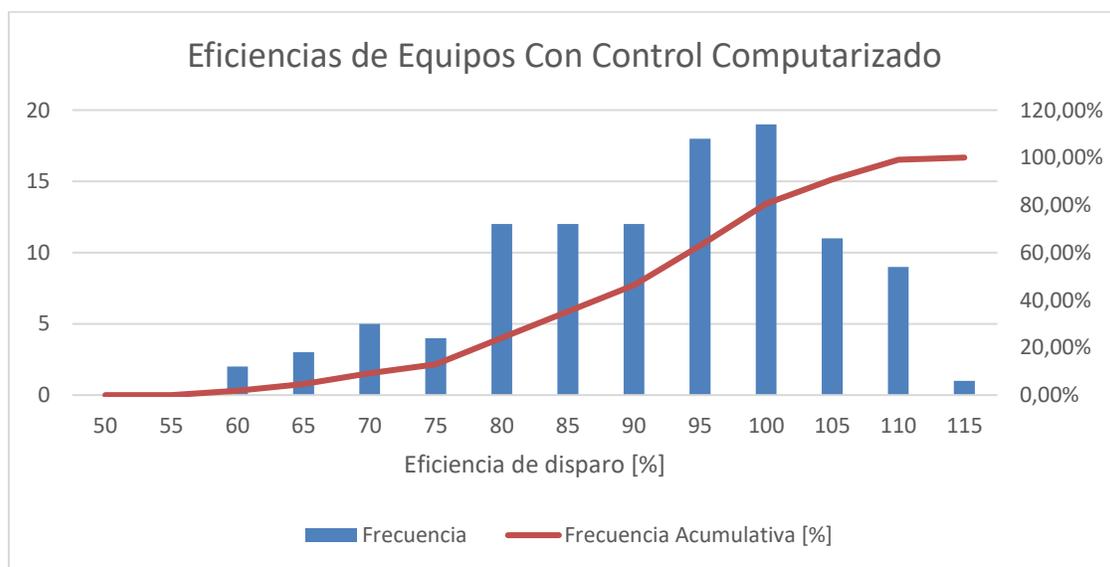


Figura 6-4 Histograma de eficiencias de disparo obtenidas con equipos con control computarizado en PNNM.

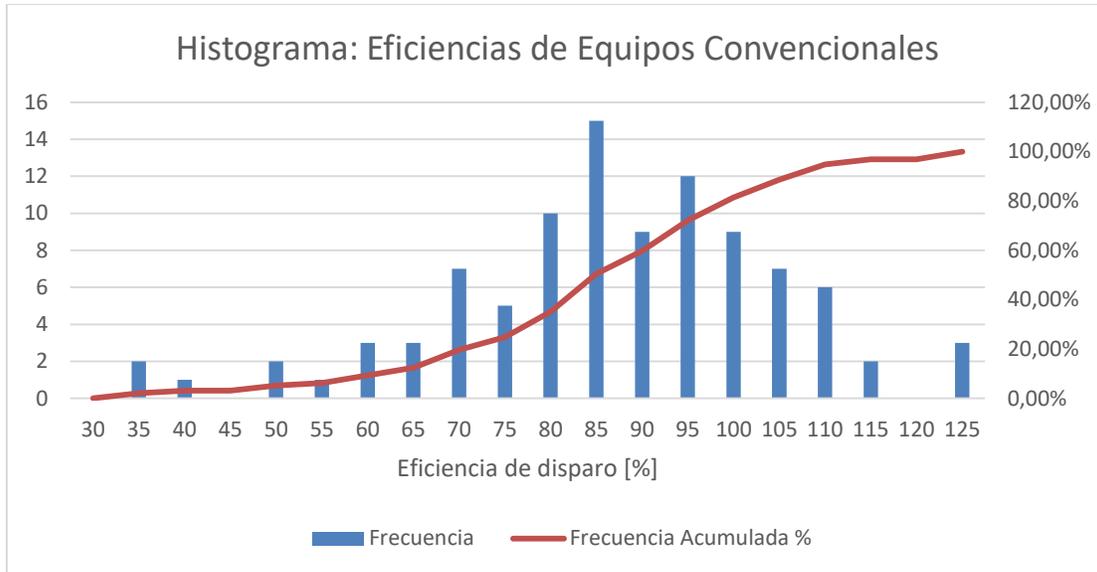


Figura 6-5 Histograma de eficiencias de disparo obtenidas con equipos convencionales.

Un 5% más de eficiencia de disparo se traduce en 19 cm más de avance por ciclo de perforación y tronadura, lo que valoriza todo el resto de las actividades, ya que se está logrando más con los mismos parámetros de entrada.

Tabla 6-1 Cálculo del impacto de la eficiencia de disparo en los costos y avances.

Tipo de perforación	Convencional	Control Computarizado
<b>Eficiencia de disparo promedio [%]</b>	84,7	89,5
<b>Avance [m]</b>	3,35	3,54
<b>Avance por mes [m]</b>	569,1	601,0
<b>Avance por año [m]</b>	6.829,1	7.212,0

Considerando un caso como el de PNNM, donde se realizan 170 ciclos de perforación y tronadura por mes, una flota de equipos con control computarizado desarrollaría 32 metros de avances más que una flota de equipos convencionales. Al llevarlo a un año de operación, esto se traduce en 383 metros.

### **6.3 Análisis Económico: Perforación Convencional vs Control Computarizado**

A continuación, se muestra un análisis económico donde se compara la operación de un equipo con control computarizado (Boomer S2 C) con la de uno convencional (Boomer 282), usando como datos los resultados obtenidos en este estudio. Se evalúa el impacto en los costos afectados por la implementación de la tecnología, como los costos de perforación, explosivos, aceros, mantención, mano de obra, depreciación y extracción de marinas. El costo de fortificación se mantiene fijo para ambos casos, ya que la fortificación se realiza de manera estandarizada, a pesar de que el uso de la tecnología podría reducir los requerimientos de fortificación al tener una menor área de túnel y un menor daño al macizo rocoso. Por otra parte, tampoco se consideró que un equipo con la tecnología no requiere de la marcación total del frente, lo que reduce el tiempo del ciclo en unos 30 minutos.

En PNNM se realizan en promedio 586 metros de desarrollo al mes con una flota mixta (equipos convencionales y computarizados), lo que al año da un promedio de aproximadamente 7,000 metros o 1,400 metros por equipo. En este caso, se realiza una evaluación económica del desarrollo de 1,400 metros de túnel de sección 4.5x5.5m, para evaluar la operación de ambos equipos en el plazo de un año.

En la Tabla 6-2 se detallan los parámetros de ambos equipos. Al ver estos parámetros, se puede ver que la única variación se genera en la retracción de acero y posicionamiento entre tiros, ya que se utiliza la misma perforadora en ambos casos, la COP 1838HD+, con barras de 14 pies.

Tabla 6-2 Equipos utilizados en la evaluación, Boomer 282 convencional y Boomer S2 computarizado, con sus especificaciones.

<b>Parámetros de perforación</b>	<b>Boomer 282 COP 1838HD+ DCS 14 ft</b>	<b>Boomer S2 C COP 1838HD+ ABC Regular 14 ft</b>
<b>Número total de tiros</b>	60	60
<b>Tiros escariadores</b>	3	3
<b>Diámetro de perforación [mm]</b>	45	45
<b>Largo de perforación [m]</b>	3,95	3,95
<b>Número de brazos</b>	2	2
<b>Velocidad de penetración [m/min]</b>	2,00	2,00
<b>Velocidad de penetración para tiros escariadores [m/min]</b>	1,00	1,00
<b>Retracción del acero + posicionamiento entre tiros [min/tiro]</b>	0,45	0,30

En la Tabla 6-3 se muestra como varía la duración del proyecto al tener distintos tiempos de ciclo y avance por disparo. El caso computarizado en PNNM mostró tener un mayor avance por disparo, y se calcula que los efectos de la menor sobre excavación reducen el tiempo del resto de las actividades en aproximadamente 30 minutos por ciclo, además de reducir el tiempo de perforación en un 8%. Estas mejoras hacen que los 1.400 metros de túnel se completen 33 días antes al usar un equipo con la tecnología, lo que a una empresa contratista le significa tener que pagar 1 mes menos de personal y mantención de la faena o la posibilidad de perforar más metros por equipo al año, aumentando las utilidades. Por otra parte, si hablamos de una empresa minera, esto significa poder comenzar la producción 1 mes antes, adelantando los ingresos al proyecto.

Tabla 6-3 Duración del proyecto en base al tiempo de ciclo y avance por disparo promedio.

	Convencional	Computarizado
Avance por disparo promedio [m]	3,35	3,54
Disponibilidad %	80%	80%
Utilización %	75%	75%
Utilización efectiva [h/d]	14,4	14,4
Utilización efectiva %	60%	60%
Tiempo del ciclo basado en la perforación [h]	3,1	2,9
Tiempo de ciclo basado en el resto de las actividades [h]	18,5	18,0
Tiempo de ciclo estimado [h]	21,6	20,9
Ciclos para desarrollar los 1.400 metros de túnel	419	396
Tiempo estimado de proyecto [d]	378	345
Diferencia [d]		33

En la Tabla 6-4 se muestran los ahorros en aceros causados por el menor número de ciclos de perforación, mientras que en la Tabla 6-5 se muestran los ahorros en perforación, causados por que se requieren menos horas de percusión para completar el proyecto.

Tabla 6-4 Ahorros en aceros de perforación (barras y bits).

Insumos de perforación, aceros	Convencional	Computarizado
Metros perforados [m]	109.223	103.237
Costo de aceros por metro perforado [\$USD/metro perforado]	5	5
Costo total de aceros [\$USD]	546.167	516.186
Ahorros potenciales en aceros [\$USD]	-	29.981

Tabla 6-5 Ahorros en perforación.

Costos de perforación	Convencional	Computarizado
Horas de percusión requeridas [h]	952	899
Costo de perforación [\$USD/h percusión]	150	150
Costo total de perforación [\$USD]	142.748	134.912
Ahorros potenciales en perforación [\$USD]		7.836

En la Tabla 6-6 se pueden ver los ahorros en explosivos causados por el menor número de ciclos. El hecho de tener que realizar 23 ciclos menos de perforación y tronadura implica un ahorro de \$42.251 USD. En este caso no se considera la utilización del software Underground Manager para optimizar la tronadura, lo que permite reducir el número de tiros y con esto los costos.

*Tabla 6-6 Ahorros en explosivos, por menor número de ciclos.*

<b>Ahorros en explosivos</b>	<b>Convencional</b>	<b>Computarizado</b>
<b>Ciclos totales de P y T</b>	<b>419</b>	<b>396</b>
<b>Variación</b>	<b>-</b>	<b>23</b>
<b>Tiros por frente</b>	60	60
<b>Diámetro de perforación [mm]</b>	45	45
<b>Sección del tiro no cargada [m]</b>	0,3	0,3
<b>Densidad del explosivo [kg/m<sup>3</sup>]</b>	750	750
<b>Precio por tonelada de ANFO [\$USD]</b>	2.816	2.816
<b>Precio por timer [\$USD]</b>	2,1	2,1
<b>Precio por detonador [\$USD]</b>	5,6	5,6
<b>Precio por cuerda del detonador [\$USD/m]</b>	2,5	2,5
<b>Costo estimado de explosivos por frente [\$USD]</b>	1.330	1.330
<b>Costo estimado de timer por frente [\$USD]</b>	123	123
<b>Costo estimado de detonadores por frente [\$USD]</b>	339	339
<b>Costo estimado de cuerda del detonador por frente [\$USD]</b>	45	45
<b>Costo total de tronadura por frente [\$USD]</b>	1.837	1.837
<b>Costo total de explosivos [\$USD]</b>	<b>769.705</b>	<b>727.454</b>
<b>Ahorro potencial en explosivos [\$USD]</b>	<b>-</b>	<b>42.251</b>

Se considera la extracción de marinas con equipos LHD de 10 toneladas, con un costo estimado de operación de \$200 USD/h. El tiempo de ciclo considerado es de 6 minutos para una distancia de transporte de 200 metros, lo que da un total de 60 toneladas por hora, o \$9 USD/m<sup>3</sup> de marinas. En la Tabla 6-7 se muestra en detalle el ahorro causado por el menor volumen de roca por extraer en el caso computarizado, por la menor sobre excavación.

Tabla 6-7 Ahorro en marinas, por menor sobre excavación.

Ahorros en marinas	Convencional	Computarizado
Porcentaje de sobre excavación	21,5%	11,1%
Nueva área sección [m <sup>2</sup> ]	27,6	25,2
Volumen de roca total por extraer [m <sup>3</sup> ]	38.590	35.258
Diferencia [m <sup>3</sup> ]	-	3.333
Costo estimado de marinas total [\$USD]	362.750	331.424
Ahorros potenciales en marinas por menor sobre excavación [\$USD]	-	31.326

En la Tabla 6-8 se muestra la comparación entre los costos de mantención y repuestos de ambos equipos. Para el caso del jumbo computarizado, este costo es aproximadamente un 5% mayor, ya que el equipo tiene más componentes que el convencional y estos son más sofisticados y a la vez requiere de un personal de mantenimiento especializado de mayor costo. Sin embargo, es importante notar que a pesar de que el costo por hora de operación es más alto, el costo por metro de túnel es menor que el del convencional, debido a la variación en los metros de avance por hora de perforación. El equipo computarizado tiene que trabajar menos horas y perforar menos metros que el convencional, por lo que el equipo y la perforadora sufren menos desgastes y daños.

Tabla 6-8 Costos de mantención.

Mantención del jumbo	Convencional	Computarizado
Costo de mantención y repuestos [\$USD/h]	600	630
Avance por hora de perforación [m/h]	1,52	1,77
Costo de mantención y repuestos [\$USD/m]	394	359
Costo estimado de mantención [\$USD]	551.642	498.305
Ahorros potenciales en mantención [\$USD]		53.337

El operador capacitado para operar un jumbo computarizado es más especializado y recibe una mayor asignación en la empresa contratista, sin embargo, al calcular los costos totales de mano de obra para realizar los 1.400 metros, en la Tabla 6-9 vemos que el costo es menor debido a que el equipo termina antes el proyecto.

Tabla 6-9 Costo de mano de obra.

<b>Mano de obra</b>	<b>Convencional</b>	<b>Computarizado</b>
<b>Costo operador [\$USD/h]</b>	20	22
<b>Costo asistente [\$USD/h]</b>	15	15
<b>Costo mantenedor [\$USD/h]</b>	5	5
<b>Costo total por día [\$USD/d]</b>	960	1008
<b>Costo total mano de obra [\$USD]</b>	362.880	347.760

El operador requiere de una capacitación antes de operar un jumbo computarizado, sin importar su nivel de conocimiento de la operación convencional, ya que como se mostró anteriormente, el equipo tiene una interfaz nueva distinta a la de los equipos convencionales. El proveedor (Epiroc) incluye esta capacitación en el costo de adquisición del equipo mediante una puesta en marcha, donde personal de asistencia técnica brinda soporte técnico al cliente por un periodo determinado.

También se considera el costo de depreciación del equipo, mostrado en la Tabla 6-10, donde se puede ver que este costo es mayor en el caso del equipo computarizado, debido al mayor costo del equipo y a que tienen una vida útil similar en horas. Vale la pena destacar que al ser más eficiente que el convencional, el costo de depreciación por metro de túnel de un equipo computarizado es solo un 7% mayor, a pesar de que el equipo es un 24% más caro.

Tabla 6-10 Costos de depreciación del equipo.

	<b>Convencional</b>	<b>Computarizado</b>
<b>Valor equipo [\$USD]</b>	660.000	820.000
<b>Vida útil [h]</b>	5.000	5.000
<b>Costo de depreciación [\$USD/h]</b>	132	164
<b>Avance por disparo promedio [m]</b>	3,35	3,54
<b>Tiempo de perforación [h]</b>	2,2	2,0
<b>Avance por hora de perforación [m/h]</b>	1,52	1,77
<b>Vida útil [m]</b>	7.614	8.850
<b>Costo de depreciación [\$USD/m]</b>	86,7	92,7
<b>Costo total de depreciación [\$USD]</b>	121.361	129.718

Los últimos dos costos considerados en este análisis son el de fortificación y el de gestión y servicios, estimados en \$700 y \$300 USD por metro respectivamente, para ambos casos. En la Tabla 6-11 se muestran los costos del proyecto separados por actividad para ambos casos, mientras que en la Tabla 6-12 se resumen los ahorros potenciales por actividad.

*Tabla 6-11 Costos por actividad del proyecto. Valores en \$USD.*

<b>Costos del proyecto, en \$USD</b>	<b>Convencional</b>	<b>Computarizado</b>
<b>Perforación (perforadora e insumos)</b>	688.915	651.098
<b>Explosivos</b>	769.705	727.454
<b>Extracción de marinas</b>	362.750	331.424
<b>Fortificación</b>	980.000	980.000
<b>Mantenimiento</b>	551.642	498.305
<b>Mano de obra</b>	362.880	347.760
<b>Depreciación</b>	121.316	129.712
<b>Otras actividades</b>	420.000	420.000
<b>Costo total</b>	4.257.253	4.062.030
<b>Costo por metro</b>	<b>3.041</b>	<b>2.918</b>

*Tabla 6-12 Ahorros potenciales por actividad, de un equipo con control computarizado sobre uno convencional. Valores en \$USD.*

<b>Ahorro potencial por actividad, en \$USD</b>	
<b>Perforación (perforadora e insumos)</b>	37.816
<b>Explosivos</b>	42.251
<b>Extracción de marinas</b>	31.326
<b>Mantenimiento</b>	53.337
<b>Mano de obra</b>	15.120
<b>Depreciación</b>	-8.356
<b>Ahorro potencial total</b>	<b>171.494</b>
<b>Ahorro potencial por metro</b>	<b>122</b>

Las mejoras ofrecidas por la tecnología hacen que el costo de operación sea un 4% menor que el de un equipo convencional, ofreciendo a la vez una mayor velocidad de avance.

El costo de un equipo Boomer S2 C con ABC Regular es de \$160.000 USD más que el de un Boomer 282. Si consideramos una tasa de interés de un 8% anual, al mes 10 de operación ya se paga la inversión inicial por el menor costo

operacional. Por lo tanto, considerando que estos equipos tienen una vida útil promedio de 5.000 horas (5 años aproximadamente), la implementación de la tecnología es muy favorable económicamente.

Para evaluar los dos beneficios de la tecnología (mayor eficiencia y menores costos) en conjunto, se analiza la operación de ambos equipos en el periodo de un año. Como se mostró anteriormente, en un año un jumbo computarizado puede lograr más metros que uno convencional, lo que implica que una empresa contratista puede generar un mayor margen operacional, ya que generalmente el pago se hace por metro de túnel, valor que en caso de PNNM está cerca de los \$4.000 USD. En la Tabla 6-13, se puede ver que el margen operacional que genera un jumbo computarizado es mayor que el de uno convencional.

*Tabla 6-13 Análisis económico de la operación de los jumbos por un año.*

	<b>Convencional</b>	<b>Computarizado</b>
<b>Equipo</b>	Boomer 282	Boomer S2C
<b>Tiempo de ciclo [h]</b>	21,6	20,9
<b>Avance por disparo [m]</b>	3,35	3,54
<b>Ciclos por mes</b>	33	34
<b>Metros de túnel por mes [m]</b>	111,6	122
<b>Costo de operación por mes [\$USD]</b>	339.264	356.130
<b>Ingresos por mes [\$USD]</b>	446.254	488.183
<b>Margen operacional por mes [\$USD]</b>	106.989	132.054
<b>Diferencia [\$USD]</b>		25.064
<b>Utilidades por año [\$USD]</b>	1.283.872	1.584.643
<b>Diferencia [\$USD]</b>		300.771

Finalmente, hay que destacar que hay un gran potencial al implementar la tecnología, tanto para una empresa contratista como para una minera. Sin considerar los gastos generales de una empresa, el VPN de la operación de un jumbo convencional por un año con estos costos, considerando la compra del equipo y una tasa de descuento del 8%, nos da un valor de \$568.098 USD, mientras que la operación de un jumbo computarizado nos da un valor de \$695.837 USD, valor 22% mayor.

## 6.4 Emparejamiento de frente

Otro beneficio importante que entrega el uso del control computarizado es el emparejamiento de frentes. Debido a que el equipo cuenta con sensores de longitud de perforación, de posicionamiento y de dirección de los brazos, el equipo puede realizar el emparejamiento de una frente que tiene callos o irregularidades. Al comenzar la perforación por la irregularidad, el equipo define un plano que limita la profundidad máxima de cada perforación.

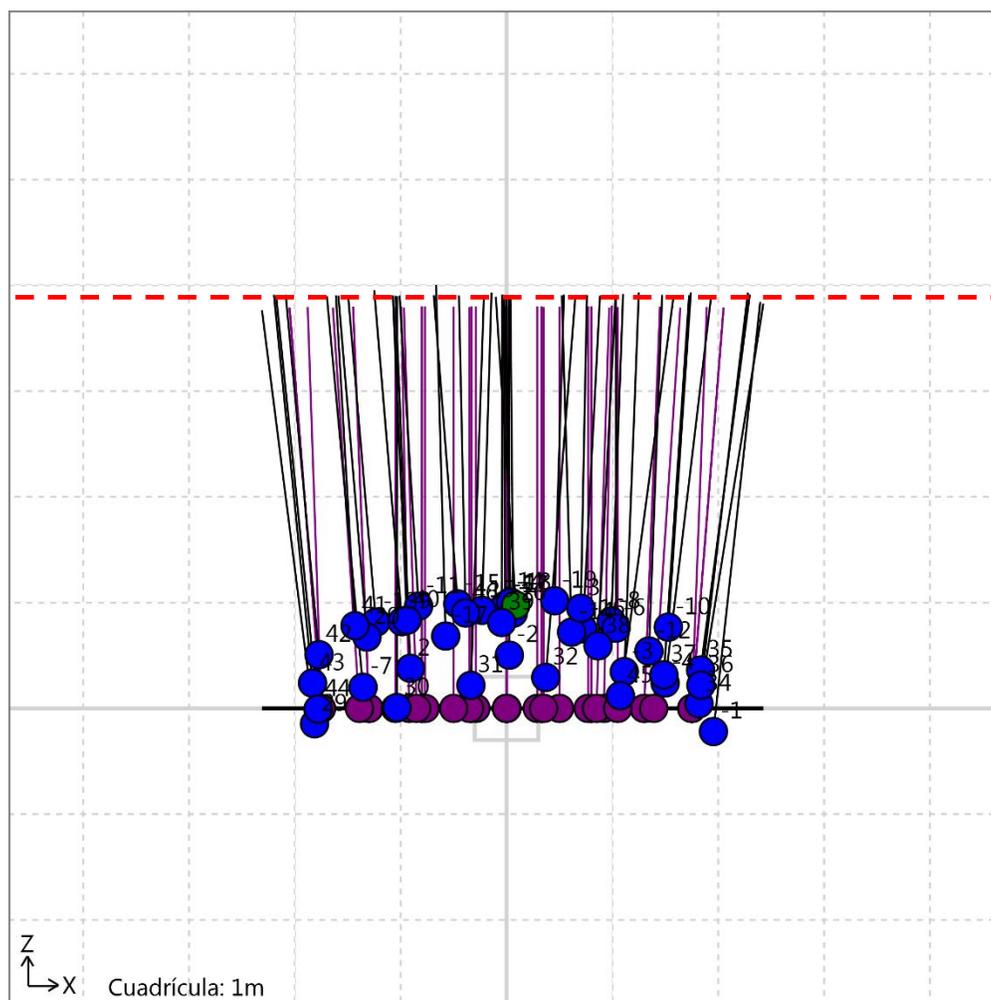


Figura 6-6 Emparejamiento de frente con control computarizado.

En la Figura 6-6 se muestra una imagen que entrega el registro de perforación del RCS 5 a través del Underground Manager. En esta imagen se

aprecia una vista en planta de todos los tiros perforados, sus direcciones y profundidades. Los círculos azules muestran dónde comenzó cada perforación y la línea negra muestra su dirección, esto permite ver que los primeros tiros fueron los de contorno y estos empezaron aproximadamente 1 metro antes que los del resto del diagrama, esto definió un plano (marcado por la línea punteada roja) que el resto de las perforaciones respetó a la hora de definir la profundidad máxima de perforación. Esto permite obtener un frente parejo para la próxima perforación y es una de las características de la tecnología que hacen que tenga una mayor eficiencia de disparo que la perforación convencional.

## 6.5 Operación

Con el objetivo de detectar oportunidades de mejora, se analizó la operación minera de perforación y tronadura en el PNNM, en lo referente a la perforación. Se detectaron los siguientes problemas operacionales frecuentes:

- Equipos en muy mal estado en general, flexibles muy gastados, fugas de aceite, centralizadores gastados, falta de sensores, etc.
- Centralizadores muy gastados, deberían tener un diámetro de 2mm más que el de las barras, sin embargo, lo más común era ver cabezales con una holgura de 40mm. Topes de goma casi inexistentes, mucho tiempo sin haberlos cambiado en casi todos los equipos. Esto dificulta el empuje de la perforación y hace que la dirección de esta no sea precisa y que se desvíen los tiros.



*Figura 6-7 Tope de goma en malas condiciones.*

- Sensores en mal estado y equipos descalibrados. Esto causaba que en ocasiones los equipos con ABC Regular no pudieran ocupar la tecnología.
- Piolas de sensores de longitud perdidas y sin repuestos en el taller. Los sensores de longitud funcionan con piolas metálicas delgadas similares a las que utilizan las bicicletas. En varias ocasiones, los equipos se encuentran sin estas piolas,

lo que hace que no puedan funcionar los sensores de longitud y no se pueda utilizar la herramienta de emparejamiento de frente. Hay que destacar que estas piolas cuestan menos de \$1 USD por metro.

- No existe la cultura de mantención preventiva, las mantenciones se realizan únicamente en caso de que un equipo presente una falla y quede fuera de servicio, y se limita a solucionar el problema puntual, lo que causa que los equipos tengan una muy baja disponibilidad.
- Operadores limitados a usar 1 bit por frente, lo que hace que el rendimiento de la perforación baje, ya que al utilizar bits desgastados la velocidad de perforación disminuye. Esto además afecta la vida útil de los aceros de perforación.
- En algunos casos, se encontraron frentes en mal estado y con marina, lo que hace más difícil la operación al jumbero, sobre todo en la perforación de zapateras. El operador tiene que solicitar que vengan a limpiar la frente o tomar una pala y hacer el trabajo el mismo.
- Gran rotación de personal: debido a las duras condiciones de trabajo en el PNNM, con turnos 10x5 y salarios similares a los del resto de la industria minera para los operadores y mantenedores, a la semana ingresan entre 10 y 30 nuevos trabajadores a la empresa contratista. Esto hace que por necesidad contraten mano de obra poco calificada, que en ocasiones no tiene experiencia en minería. Por otra parte, si se le realiza una capacitación para operar/mantener un equipo a un grupo de 20 operadores/mantenedores, al pasar el tiempo se va reduciendo la cantidad de operadores capacitados y se va perdiendo el valor del curso.
- Mala planificación por parte de los jefes de turno y de terreno, en ocasiones llegaban dos jumbos a la misma frente y uno tenía que trasladarse de nuevo. Hay que considerar que los tiempos de traslado de jumbo son largos debido a que por el largo del equipo no es fácil realizar los giros.

## CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES

---

En base a los datos obtenidos de equipos convencionales en las minas Cabildo y El Teniente y de equipos con control computarizado en El Teniente, se obtienen las siguientes conclusiones:

La implementación del control computarizado en los jumbos de avance en el PNNM entregó resultados favorables a la operación; los equipos con la tecnología lograron un avance promedio por disparo de 89,5% frente a un 84,7% en el caso de los convencionales, lo que en base al análisis económico realizado, al reducir el número de ciclos de perforación y tronadura requeridos para desarrollar un largo de túnel determinado, reduce los costos de perforación y aceros en un 5,5%, los de explosivos en un 5,5%, los de mantención en un 14% y los de mano de obra en un 4,2%. Por otra parte, estos equipos lograron una sobre excavación promedio de 11,1% frente a un 21,5% en el caso de los convencionales, lo que reduce los costos de extracción de marinas en un 8,6%. Esto hace que el costo total por metro de túnel sea un 4,6% menor, generando en 10 meses ahorros suficientes para pagar la inversión inicial requerida para la implementación.

Además, se aumenta la velocidad de avance en un 9,6%, lo que puede tener un gran impacto en el flujo de caja de los proyectos de desarrollos horizontales en la minería, ya que al utilizar una flota de equipos con control computarizado se podrían terminar antes los desarrollos, ahorrándole a una empresa contratista los costos de mantener al personal y a la mina por más tiempo o entregándole la oportunidad de generar un mayor margen operacional al tener la posibilidad de realizar más metros en un tiempo determinado. Para una empresa minera esto también es favorable ya que le permite comenzar antes la producción y adelantar los ingresos en el flujo de caja.

En este estudio no se consideró el impacto que genera la sobre excavación en la fortificación, debido a que en PNNM se utiliza una fortificación estandarizada para cada zona geológica, sin considerar el menor daño en el entorno del macizo rocoso por la mayor precisión de la perforación. Tampoco se pudieron evaluar los

beneficios de la tecnología en la marcación de la frente y optimización de la tronadura. Por otra parte, los equipos se encontraban en malas condiciones y en ocasiones la planificación de la perforación y tronadura no fue óptima. Esto sugiere que, en óptimas condiciones, las mejoras podrían ser aún mayores.

Es importante notar que se pudo comparar la operación de jumbos convencionales con la de jumbos computarizados en el mismo tipo de roca, utilizando el mismo explosivo y perforando en base a los mismos diagramas y secciones de túnel. Esto minimiza la influencia de los otros factores en la sobre excavación y permite atribuir las mejoras directamente a la mayor precisión de perforación entregada por el control computarizado.

## CAPÍTULO 8: ANEXOS

### 8.1 Diseño de diagramas de disparo [9]

#### 8.1.1 Diseño de rainura Large-Hole-Cut

La metodología de diseño de la geometría y cargas de este tipo de rainura se basa en fórmulas empíricas obtenidas a partir de investigaciones y experiencias realizadas en Suecia por Langefors, actualizadas en 1982 por Holmberg y simplificadas por Oloffsson en 1990.

Para obtener un diseño adecuado que permita obtener el máximo de avance (m/disparo) es necesario considerar:

- Diámetro del tiro vacío (DTH)
- Burden (B)
- Concentración de carga (q)

Sea "a" la distancia entre el tiro vacío y el primero en detonar del resto de los tiros cargados. Se tendrán entonces escenarios diferentes para distintos diámetros del tiro vacío, como se puede visualizar en el Gráfico 8-1 :

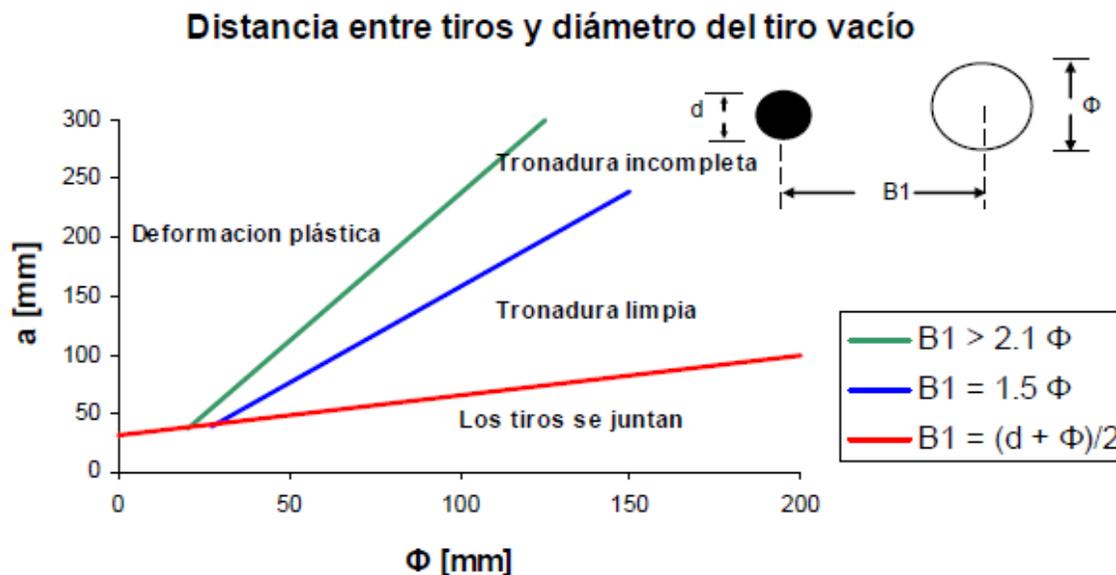


Gráfico 8-1, Distancia entre tiros y diámetro del tiro vacío.

### Para $B_1 > 2.1 \Phi$

Sólo se producirá una deformación plástica de la roca, sin resultados en cuanto a su fragmentación, afectando el avance del disparo.

### Para $2.1 \Phi > B_1 > 1.5 \Phi$

Se producirá una rotura incompleta, lo que afectará el resultado final de la tronadura.

### Para $1.5 \Phi > B_1 > (d + \Phi) / 2$

Se producirá una rotura completa de la roca, con la salvedad que en el límite cuando “ $B_1$ ” tienda a “ $(d + \Phi) / 2$ ”, los tiros se juntarán provocando una tronadura deficiente, con malos resultados en el rendimiento final.

Se definirá como óptima posición, para lograr una tronadura limpia o completa, con buen resultado de avance y con el menor riesgo que los tiros se junten, cuando  $B_1 = 1.5\phi$  [mm]

En el Gráfico 8-2, se observa el avance porcentual con respecto a la profundidad de los tiros, para diferentes diámetros del tiro vacío.

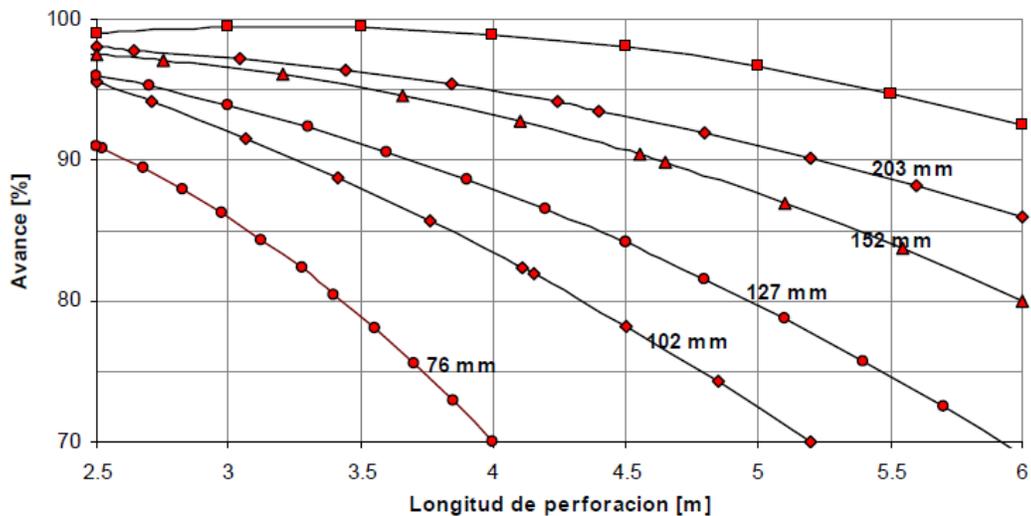


Gráfico 8-2 Avance por disparo para diferentes diámetros de tiros vacíos.

Mientras mayor sea este diámetro, mayor es el avance del disparo para una longitud de perforación dada.

En algunos casos se podrá disponer de más de un tiro vacío como cara libre, por lo que es necesario calcular un diámetro ficticio del tiro vacío según la relación empírica:

$$D = \emptyset\sqrt{n}$$

*Ecuación 8-1 Relación para cambiar tiro escariador por un mayor número de tiros de menor diámetro*

Donde,

D = Diámetro ficticio [mm]

$\emptyset$  = Diámetro de un tiro vacío [mm]

n = Número de tiros vacíos

Para el diseño del primer cuadrante o sección se usará la razón  $B_1 = 1.5\emptyset$  [mm] y el diámetro del tiro vacío (si es que es solo uno) o el diámetro ficticio (si son más de uno).

Para determinar las dimensiones de lado del primer cuadrante se considera la siguiente ecuación:

$$W_1 = B_1\sqrt{2}$$

*Ecuación 8-2 Dimensiones del primer cuadrante.*

Es importante cuantificar la concentración de carga con que van a ser cargados los tiros del primer cuadrante, ya que una concentración baja puede provocar que no se fragmente la roca.

En el Gráfico 8-3 se muestra la concentración de carga mínima y la distancia máxima del tiro vacío al primer tiro cargado (“B<sub>1</sub>”) en función del diámetro del tiro vacío. Se puede observar que un aumento en la relación de la Ecuación 8-2 causa un aumento en la concentración de carga.

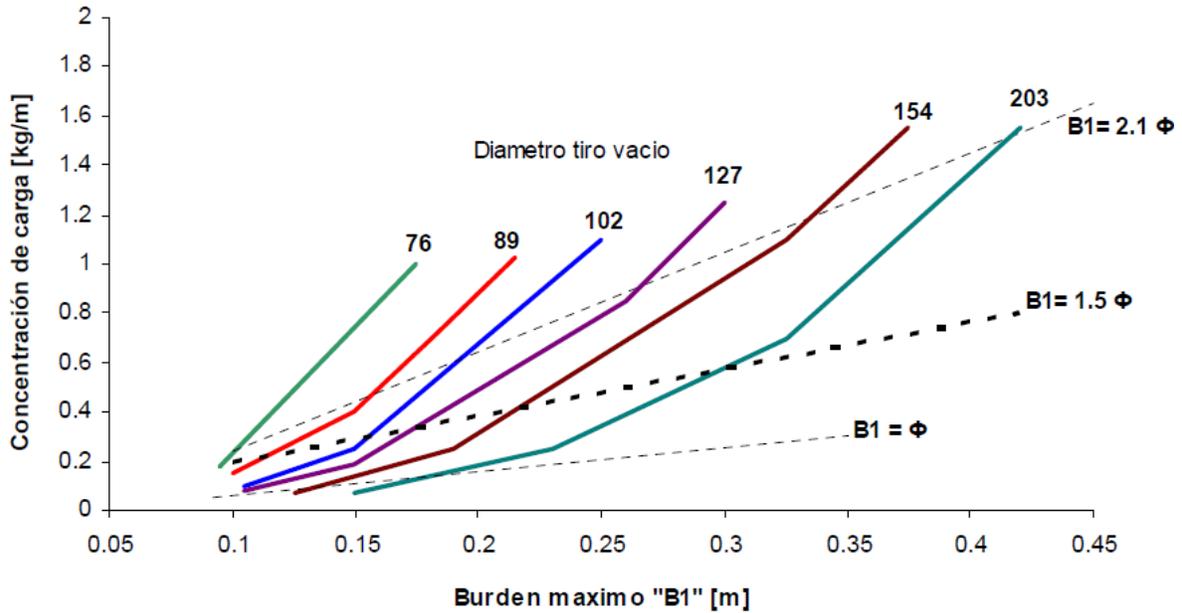


Gráfico 8-3, Concentración de carga y máxima distancia entre tiros.

El diseño de los siguientes cuadrantes es similar al primero, con la diferencia de que la rotura seguirá un arreglo rectangular y no circular como en el caso del primero.

Una vez estimada la dimensión del lado del primer cuadrante, se puede calcular el burden del segundo cuadrante ("B<sub>2</sub>") según la relación empírica:

Ecuación 8-3 Cálculo del burden del segundo cuadrante.

$$B = \alpha * W$$

Donde,

B = Burden [m]

W = Lado del cuadrado [m]

a = constante que toma valores entre [0.5; 1.5]

En el Gráfico 8-4, se ilustra la concentración de carga mínima y el burden máximo para diferentes anchos de abertura (W).

Es importante recalcar que el número de cuadrados de la rainura estará limitado al hecho de que el burden del último cuadrante no puede exceder el burden de los tiros de descarga para una concentración de carga dada.

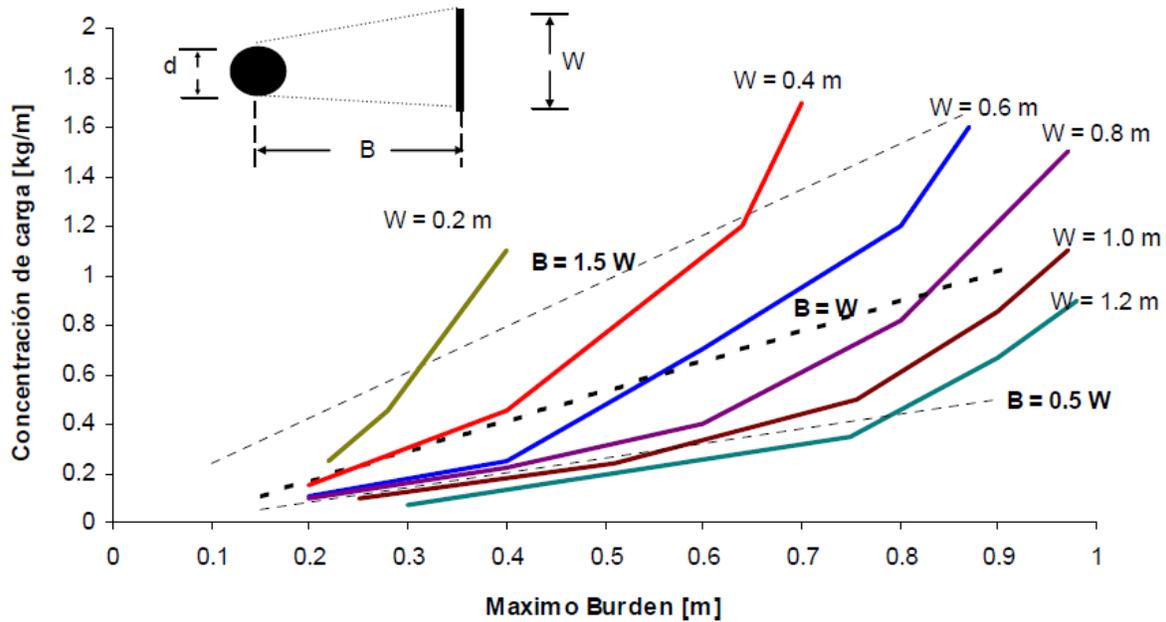


Gráfico 8-4, Concentración de carga mínima y el máximo burden.

### 8.1.2 Diseño del resto del diagrama

Para calcular la ubicación y el carguío del resto de los tiros del diagrama se puede usar la Tabla 8-1, previo el cálculo del burden “B” y la concentración lineal de carga en el fondo “ $q_f$ ” para el explosivo y diámetro utilizado. Las ecuaciones que se emplean son:

Ecuación 8-4 Concentración lineal de carga en el fondo.

$$q_f = 7.85 * 10^{-4} * d_c^2 * \rho$$

Ecuación 8-5 Burden en función de la concentración lineal de carga en el fondo.

$$B = 0.88 * q_f^{0.35}$$

Donde,

$d_c$  = Diámetro del cartucho del explosivo [mm]

$\rho$  = Densidad del explosivo [gr/cm<sup>3</sup>]

Una vez se determina el burden (B), la longitud de los tiros (L) y la concentración lineal de carga ( $q_f$ ), se puede encontrar una buena aproximación inicial de la geometría del diagrama de disparos y la carga de explosivo.

Tabla 8-1 Cálculo de geometría del diagrama de disparo.

Tiros	Burden	Espaciamiento	Longitud carga de fondo	Concentración de carga		Taco
				Fondo	Columna	
<b>Unidad</b>	m	m	m	kg/m	kg/m	m
<b>Piso</b>	1.0 x B	1.1 x B	1/3 x L	qf	1.0 x qf	0.2 x B
<b>Contorno o cajas</b>	0.9 x B	1.1 x B	1/6 x L	qf	0.4 x qf	0.5 x B
<b>Coronas</b>	0.9 x B	1.1 x B	1/6 x L	qf	0.3 x qf	0.5 x B
<b>Descarga superior</b>	1.0 x B	1.1 x B	1/3 x L	qf	0.5 x qf	0.5 x B
<b>Descarga inferior</b>	1.0 x B	1.2 x B	1/3 x L	qf	0.5 x qf	0.5 x B

La tabla anterior solamente debe considerarse como un diseño básico (primera aproximación). Ya que, en la práctica el diagrama se diseña considerando los siguientes factores, siendo unos más relevantes que otros dependiendo de las condiciones de la operación:

- a. Dimensiones del túnel.
- b. Geometría del túnel.
- c. Diámetro de las perforaciones.
- d. Requisitos en torno a calidad.
- e. Condiciones geológicas y mecánica de rocas.
- f. Tipo de explosivo.
- g. Presencia de agua.
- h. Restricciones de vibración.
- i. Equipamiento de perforación.

Comúnmente, los tiros de contorno se diseñan con un ángulo que asegure que la perforación terminará 30cm más abierta que el punto inicial, lo que corresponde a un ángulo de aproximadamente 4° para un largo de perforación de 4 metros. Por otra parte, los tiros auxiliares de contorno se diseñan con un ángulo igual a la mitad del de los de contorno, para que no se genere una zona con menor carga de explosivos al final de la perforación.

## 8.2 Especificaciones técnicas de los equipos

Tabla 8-2 Características del Boomer 282.

<b>Modelo</b>	<b>Boomer 282</b>
Aplicaciones	Perforadora de doble brazo para desarrollos horizontales
Perforadoras	2 x COP 1638HD+ / 2 x COP 1838HD+
Sist. Perforación	Direct Control System (DCS)
Brazos	2 x BUT28
Vigas	2 x BMH 2000-series (largo máximo de barras 4.3m)
Chasis	DC 15
Motor:	Deutz D914 L04 4-cilindros 55kW (Tier 3 / Stage III) Deutz BF4L 914 4-cilindros 72kW (Tier 2 / Stage II)
Área de cobertura	Ancho 8.7m x Alto 6.3m, máx 45m <sup>2</sup>

Tabla 8-3 Características del Boomer S2 C.

<b>Modelo</b>	<b>Boomer S2 C</b>
Aplicaciones	Perforadora compacta de doble brazo para desarrollos horizontales
Perforadoras	COP MD20 (20kW), COP 1638HD+, COP 1838HD+, COP 2238HD+
Sist. Perforación	RCS 5 – Rig Control System
Brazos	2 x BUT29 HD, 2 x BUT S
Vigas	2 x BMH 2000-series, 2 x BMH 6000-series (largo máximo de barras 4.9m)
Chasis	S
Motor:	Deutz TCD 3.6 3A, 90 kW at 2 300 rpm, 2 000 ppm sulphur, (Stage 3A /Tier 3) Deutz TCD 3.6 90 kW at 2 300 rpm, 15 ppm sulphur (Stage 4/Tier 4 Final)
Área de cobertura	Ancho 9.4m x Alto 6.3m, máx 56m <sup>2</sup>
Dimensiones	Ancho 2.0m, Alto 2.8m y largo 12.2m

Tabla 8-4 Mejoras ofrecidas por el Boomer S2 frente a su antecesor 282.

<b>Tipo</b>	<b>Mejora</b>
Perforadoras	Puede utilizar las nuevas perforadoras COP MD20 más rápidas y robustas, con menores costos operacionales y más horas entre mantenciones
Sistema de Perforación	Introduce el RCS 5 con la tecnología de control computarizado y opciones de automatización. Permite usar tiros más largos con mayor precisión y registrar datos relevantes
Brazos	Brazos BUT 29 o BUT S son más robustos que los BUT 28 y se mueven más rápido
Vigas	Puede utilizar vigas más largas (BMH Serie 6000), que permiten barras de hasta 4.9m
Chasis	Nuevo chasis S de diseño simple. Mismo chasis que equipos de fortificación y producción (mejoras en mantención)
Área de cobertura	Mayor cobertura, 11m <sup>2</sup> más
Motor	Utiliza motores de mayor potencia y con mejoras asociadas a emisiones de contaminantes
Cabina	Nueva cabina con seguridad mejora ROPS/FOPS

Tabla 8-5 Características principales DD422i Sandvik.

<b>Modelo</b>	<b>Jumbo DD422i Sandvik</b>
Aplicaciones	Perforadora compacta de doble brazo para desarrollos horizontales
Perforadoras	RD525 (25kW)
Sist. Perforación	SICA (Sandvik Intelligent Control Architecture)
Brazos	2 x SB60
Vigas	2 x TFi 500 series
Motor:	Cummins QSB 4.5 119kW Tier 3
Área de cobertura	Ancho 9.5m x Alto 6.6m, máx 54m <sup>2</sup>
Dimensiones	Ancho 2.3m, Alto 3.2m y largo 13.9m

### 8.3 Litología de El Teniente

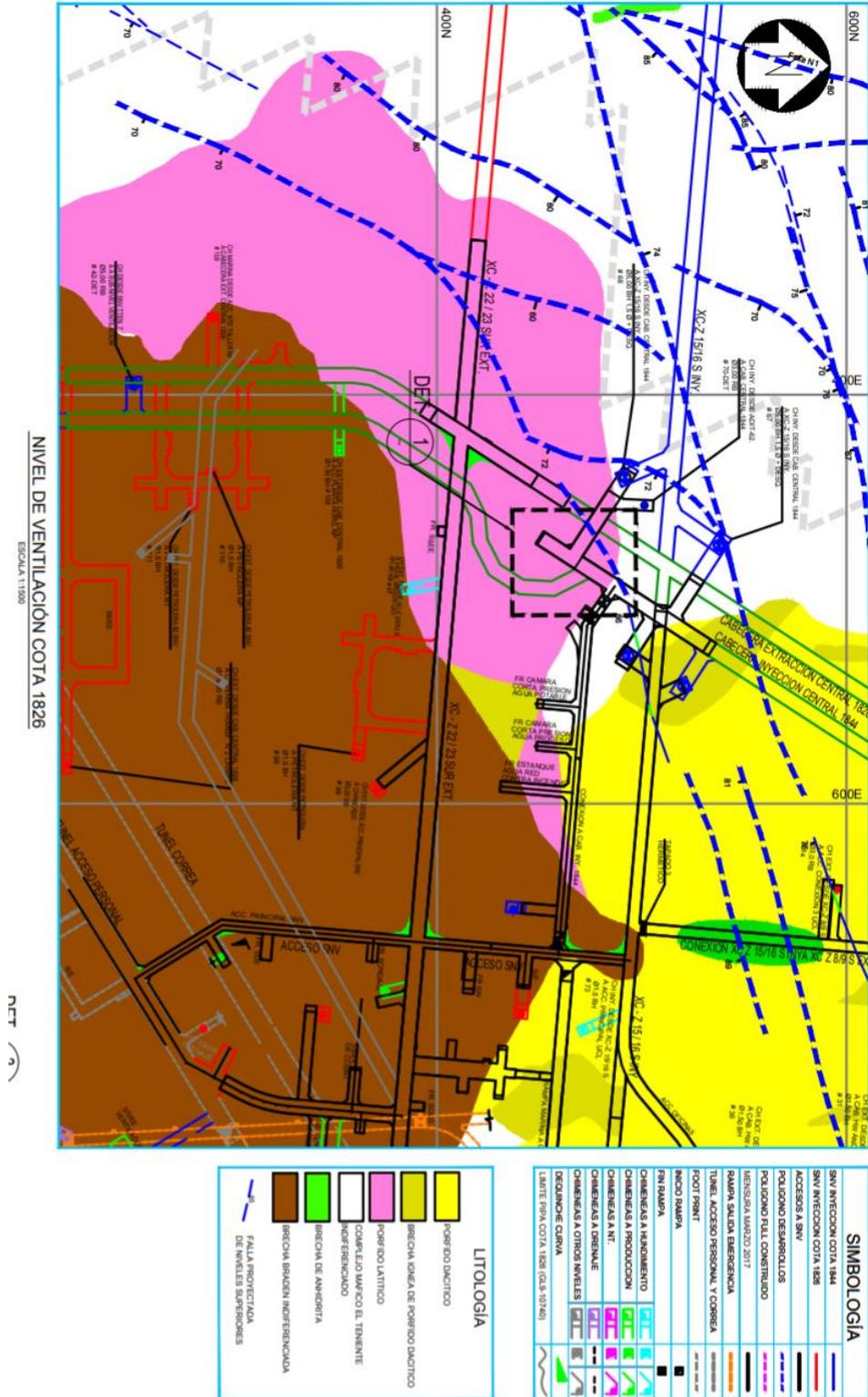


Figura 8-1 Mapa geológico del nivel de ventilación del PNNM. Se pueden ver los distintos tipos de roca para cada zona y cada túnel.



## BIBLIOGRAFÍA

---

[1] GEOLAND, MINE MASTER: «Una nueva dirección de desarrollo en el proyecto, mina inteligente KGHM». Abril 2015.

[2] ZABLOCKI, A.: «Optimizando Desarrollo de Túneles y Galerías». Enero 2014.

[3] ZABLOCKI, A.: «Application of new technologies for underground drilling». Marzo 2017.

[4] FRAGBLAST: «The 8th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting». Mayo 2006.

[5] INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA: «Manual de Perforación y Voladura de Rocas». Marzo 1995.

[6] VILLALOBOS, J. M.: «Clase de Perforación de Túneles». Abril 2012.

[7] MUSIC, A.: «Diagnóstico y Optimización de Disparos en Desarrollo Horizontal, Mina El Teniente». Mayo 2007.

[8] CHACON, J. «Curso: Cátedra Perforación y Tronadura». Universidad de Chile

[9] LANGEFORS & KIHLSSTRÖM. «The Modern Techniques of Rock Blasting» Julio 1978.

[10] ROSENTHAL M, MORLOCK G. «Blasting Guidance Manual». Enero 1987.

[11] YAMANA GOLD: «Análisis Costos Desarrollo Labores Mineras en Yamana». Septiembre 2008.

[12] SERNAGEOMIN: «Geología Proyecto Nuevo Nivel Mina, División El Teniente, Codelco-Chile». Agosto 2006.