



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

PREPARACION MINERA CON EQUIPOS AUTONOMOS Y SEMIAUTONOMOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

ANTONIO NADIM RABAJILLE SIRAYAN

PROFESOR GUIA:

JUAN CRISTOBAL VIDELA WEBB

MIEMBROS DE LA COMISION:

WINSTON ROCHER ANDA

HANS GÖPFERT HIELBIG

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por CODELCO DIVISION EL TENIENTE

SANTIAGO DE CHILE

2017

Resumen

Actualmente, en División el Teniente (DET), la preparación minera se realiza de forma manual o mediante equipos que requieren que el operador se encuentre en la frente de trabajo. Sin embargo, en el mercado existen equipos y tecnologías que permiten realizar esta actividad de forma remota, retirando así al trabajador de la exposición a los riesgos inherentes de la minería subterránea.

En este trabajo se efectuó una simulación de la constructibilidad de un sector de mina Esmeralda con tecnologías tele asistida o remota para la preparación minera de desarrollos horizontales, aplicables en DET. Las tecnologías y equipos utilizados en esta simulación fueron la automatización de Jumbos perforadores y sistemas para la administración y control minero con enfoque en la preparación minera y cargadores de explosivos.

Se generaron 11 casos en relación al grado de automatización de las actividades y su impacto en el rendimiento de los avances, donde se comparan con un caso base (caso 1) el cual se construyó con datos proporcionados de valores actuales de duración y exposición en cada actividad del ciclo de desarrollo horizontal en DET. De los once casos generados, los primeros dos casos son posibles optimizaciones del proceso actual. Los restantes nueve casos son escenarios donde el tiempo de ciclo aumenta o disminuye al utilizar nuevas tecnologías.

La siguiente tabla presenta el resumen de resultados mostrando la exposición diaria promedio, el rendimiento de avance mensual para 3 frentes y el VAN de cada caso (inversión de 1,5 MUS\$, resultante de efectuar la simulación de la constructibilidad del sector).

Tabla resumen 1: Casos y resultados del estudio para los distintos casos propuestos para la simulación.

Casos		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Exposición diaria	HH	2555	2538	2514	390	386	536	536	518	518	508	512	121
Rendimiento	m/mes	166	217	269	217	161	314	235	188	141	166	125	161
VAN	MUS\$	81,11	81,04	81,05	80,76	81,06	80,49	80,65	80,83	81,16	80,98	81,32	81,2

De los resultados presentados en la tabla, se puede apreciar que en materia de exposición, los valores de los casos donde se utilizan tecnologías autónomas son aproximadamente un 20% del valor actual de la División. Los rendimientos en los casos donde se planteó un aumento de tiempo de ciclo, pero con un largo de avance de 4 metros, son similar al avance actual en la División. Se puede apreciar que a este nivel de inversión el VAN de los casos tecnológicos es igual o superior que en los casos basados en DET. Los casos con mejor VAN son los tecnológicos donde se aumentó el tiempo de ciclo con respecto al caso base.

Como conclusión, se recomienda el uso de tecnologías autónomas para la preparación minera dado los datos desarrollados en este estudio, donde estas mejoraron los indicadores en comparación con los casos basados en el escenario actual DET. Se propone continuar con el estudio de las tecnologías autónomas recopilando mejor información de los rendimientos para refinar el estudio.

Agradecimientos

Quisiera agradecer primero que todo a CODELCO División el Teniente por la oportunidad de permitirme realizar la memoria con ellos. Dentro de esta, agradecer por todo el apoyo y enseñanzas a la Superintendencia de Innovación y Desarrollo, principalmente a Juan Cristóbal Videla y Pedro González. Además, agradecer el apoyo brindado por Cristian, Daniela e Ismael. Dentro de la universidad, el apoyo de los profesores fue muy importante al igual que mis compañeros de carrera como Juan, Yerko M., Yerko Y., Pepe, Sewa, Seba, Carlos, Kiwi, David y Giovanni. Como último agradecimiento, pero no por eso el menos importante, a mis padres, hermanos y mi polola que me aguantaron durante todo el periodo de la realización de este trabajo.

Tabla de contenido

1.	Introducción.....	1
1.1.	Mina El Teniente	1
1.1.1.	Antecedentes Históricos	1
1.1.2.	Generalidades	2
1.1.3.	Características del yacimiento.....	3
1.1.4.	Nuevos Proyectos.....	4
1.1.5.	Sistema de Explotación en Minería Subterránea DET.....	5
1.2.	Objetivos	6
1.2.1.	Generales	7
1.2.2.	Específicos	7
1.3.	Alcances.....	7
1.4.	Motivación	7
2.	Revisión Bibliográfica	9
2.1.	Preparación minera DET.....	9
2.1.1.	Desarrollos Horizontales Caso DET	9
2.1.2.	Desarrollos Verticales Caso DET	11
2.1.3.	Construcciones DET	15
2.2.	Nuevas Tecnologías.....	17
2.2.1.	Jumbo de instalación de pernos y mallas mecanizado.....	17
2.2.2.	Sistema administración y control minero	18
3.	Metodología	20
3.1.	Caso Estudio.....	20
3.1.1.	Antecedentes Generales del Proyecto ExEsFw	21
3.1.2.	Diseño Minero.....	21
3.1.3.	Nivel de Hundimiento.....	22
3.1.4.	Nivel de Producción.....	23
3.1.5.	Sub-nivel de Ventilación	24
3.1.6.	Manejo de Materiales	25
3.1.7.	Obras de Preparación.....	26
4.	Desarrollo y Análisis de Resultados	27
4.1.	Descripción del estudio	27
4.2.	Escenarios	27
4.2.1.	Base DET	28

4.2.2.	Factible Autónomo.....	29
4.2.3.	Optimista	30
4.2.4.	Positivo	31
4.2.5.	Negativo	32
4.2.6.	Pesimista	33
4.2.7.	Full Autónomo.....	34
4.2.8.	Resumen Escenarios.....	35
4.3.	Evaluación Económica.....	36
4.4.	Resultados y Análisis de Resultados	39
4.4.1.	Constructibilidad del sector.....	39
4.4.2.	Costos de construcción	41
4.5.	Resultado final	42
5.	Conclusiones.....	44
6.	Bibliografía	46
7.	Anexos	47
7.1.	Calculo de VAN para los distintos casos.....	47

Índice de tablas

Tabla 1: Cota de los niveles de mina Esmeralda y mina Esmeralda Extensión Fw.	22
Tabla 2: Obras estimadas del proyecto.	26
Tabla 3: Escenario Base DET.	28
Tabla 4: Escenario Factible Autónomo.	29
Tabla 5: Escenario Optimista.	30
Tabla 6: Escenario Positivo.	31
Tabla 7: Escenario Negativo.	32
Tabla 8: Escenario Pesimista.	33
Tabla 9: Escenario Full Autónomo.	34
Tabla 10: Resumen de los casos.	35
Tabla 11: Tabla de costos por metro desglosado por actividad DET.	37
Tabla 12: Costos de avance a utilizar en casos tecnológicos.	38
Tabla 13: Costos que se utilizaran en la evaluación económica de los distintos casos.	38
Tabla 14: Resultados por caso.	39
Tabla 15: VAN de los casos, variando la inversión en casos tecnológicos.	42
Tabla 16: Resultados para cada caso.	42

Índice de figuras

Figura 1: Producción de cobre de las distintas divisiones de Codelco.	2
Figura 2: Vista aérea de Mina El Teniente	3
Figura 3: Nuevo Nivel Mina	5
Figura 4: Raise Borer	13
Figura 5: Blind hole	14
Figura 6: Fortificación de visera	15
Figura 7: Túnel blindado.....	16
Figura 8: Equipo jumbo instalador de pernos y malla.....	18
Figura 9: Sistema PITRAM.....	19
Figura 10: Sectores de Mina El Teniente	20
Figura 11: Sistema de hundimiento convencional	21
Figura 12: Nivel de hundimiento del sector	23
Figura 13: Nivel de producción del sector	23
Figura 14: Subniveles de ventilación del sector	25
Figura 15: Disposición general del sector	25
Figura 16: Rendimiento vs exposición.....	40
Figura 17: Rendimiento vs exposición, casos tecnológicos.	41

Capítulo 1

1. Introducción

1.1. Mina El Teniente

1.1.1. Antecedentes Históricos

Se tiene conocimiento de este yacimiento desde la época de la Colonia y era conocido con el nombre de “La Fortuna”. Su primer dueño fue el capitán de la Conquista, Andrés de Torquemada, que recibió las tierras por su desempeño en la lucha contra los indígenas y posteriormente legó la propiedad a la Orden de los Jesuitas. Por esa razón, el extenso terreno se conoció como la Hacienda de la Compañía. La Quintrala y el Conde de la Conquista, Mateo de Toro y Zambrano aparecen también en la historia de El Teniente. Catalina de Los Ríos traspasó sus tierras en Codegua a los Jesuitas, en pago de deudas, y éstos las anexaron a la Hacienda de la Compañía. Cuando la orden religiosa fue expulsada de España y de las colonias en América, la Hacienda se subastó y fue adquirida por Mateo de Toro y Zambrano.

Existen dos supuestos del porque su nombre “El Teniente”. El primero y más antiguo (1760) sería porque su descubridor habría sido un oficial del ejército español, un fugitivo quien la divisó mientras se escondía, y el segundo, por el teniente del Ejército Libertador Juan de Dios Correa, quien heredó la propiedad a la muerte de su suegro, el Conde de la Conquista, Mateo de Toro y Zambrano.

Quien explotó por primera vez este yacimiento fue Juan de Dios Correa y Saa, quien al cabo de algunos años la abandonó junto con sus socios, después de que una inundación provocara daños irreparables para la tecnología existente en la época.

Una carta enviada por el ingeniero en minas italiano Marcos Chiapponi a su colega estadounidense William Braden, gesta el primer gran negocio minero para explotar este yacimiento de cobre en Chile. Braden viaja entonces a Chile para evaluar personalmente el negocio. Entusiasmado con el proyecto preparó todo para la gran hazaña con su sociedad Braden Copper Company. Un decreto del Ministerio de Hacienda del 29 de abril de 1905 autoriza así a la empresa norteamericana para iniciar las operaciones industriales de El Teniente, marcando el nacimiento de la Gran Minería del Cobre en Chile

En 1945 (19 de junio) ocurre un incendio, que se llamó “tragedia del humo” en la mina subterránea, muriendo 355 trabajadores. De ahí en adelante, El Teniente se transforma en un referente en materia de seguridad.

En 1976 se crea la Corporación Nacional del Cobre de Chile (CODELCO) y el mineral El Teniente pasa a depender de esta corporación estatal junto con las otras faenas de la minería chilena.

1.1.2. Generalidades

La División Mina El Teniente (DET) se encuentra ubicada en la comuna de Machalí, a 54 kilómetros de Rancagua, capital de la Región del Libertador Bernardo O'Higgins, en plena Cordillera de los Andes. Se encuentra entre los 2.200 y 3.200 msnm y su acceso es por la Carretera del Cobre (23 kms) construida especialmente en la década del 60.

Es la mina subterránea de cobre más grande del mundo, cuenta con más de tres mil kilómetros de galerías subterráneas, y entre sus unidades productivas destacan los yacimientos Diablo Regimiento Fase IV, Esmeralda, Dacita, Reservas Norte, Pipa Norte, Sur Andes Pipa, Pilar Norte y Teniente 4 Sur. También tiene una operación en superficie, el Rajo Sur, ubicado entre 2.730 y 3.240 metros sobre el nivel del mar, que entró en funcionamiento a fines de 2012.

El Teniente ha tenido un crecimiento permanente y se ha convertido en un líder mundial en minería subterránea, destacando por su modernidad y el uso de tecnología de punta en sus operaciones.

Las principales operaciones del complejo industrial de la División son la mina, el concentrador (Colón) y la fundición (Caletones).

Durante 2015, El Teniente alcanzó una producción récord de 471 mil toneladas de cobre fino superando la marca de 455 mil registrada en 2014. Este es comercializado a través de lingotes refinados a fuego (RAF) y ánodos de cobre que se generan en la Fundición de Caletones. Además como subproducto se obtiene molibdeno (7.326 tm año 2015), ácido sulfúrico, plata y oro.

En 2014 la DET entregó al Estado de Chile 1.191 millones de dólares, y entre 2007 y 2014 esta cantidad correspondió a US\$12.000 millones.

PRODUCCIÓN DE COBRE CODELCO AÑO 2016

DIVISIÓN	Ciudad	Región	Año inicio operaciones	Producción Cu [tmf]
ANDINA	Los Andes	Valparaíso	1970	193.341
CHUQUICAMATA	Calama	Antofagasta	1915	302.010
EL TENIENTE	Machalí	Lib. B.O'higgins	1905	475.339
GABRIELA MISTRAL	Sierra Gorda	Antofagasta	2008	121.712
MINISTRO HALES	Calama	Antofagasta	2010	237.020
RADOMIRO TOMIC	Calama	Antofagasta	1997	318.255
SALVADOR	Diego de Almagro	Atacama	1959	59.769

Figura 1: Producción de cobre de las distintas divisiones de Codelco.

1.1.3. Características del yacimiento

El yacimiento El Teniente es un megadepósito tipo pórfido cuprífero con leyes económicas de cobre y molibdeno. Este posee reservas de mineral estimadas en más de 18.000 millones de toneladas con una ley promedio de 0,57% de CuT, lo que garantiza la explotación de la mina por más de 100 años con los actuales niveles de explotación. Este yacimiento tiene una especial particularidad, la cual es que el mineral está emplazado alrededor de un cuerpo geológico de forma cónica (A este cuerpo se le llama Pipa) el cual no posee valor económico. Sobre este cuerpo se construyeron las obras de infraestructura principal de la mina, tales como los barrios cívicos, talleres, salas de chancado interior mina, oficinas y casinos.

La División posee reservas y recursos minerales por más de 4.000 MT de mineral con ley de cobre igual a 0,84% CuT, (2011). Esto equivale a más de 35 MT de cobre fino de producción estipulado hasta el año 2087. Este gigantesco depósito cuprífero, hace de El Teniente, uno de los yacimientos de cobre con mayor proyección y vida a nivel mundial

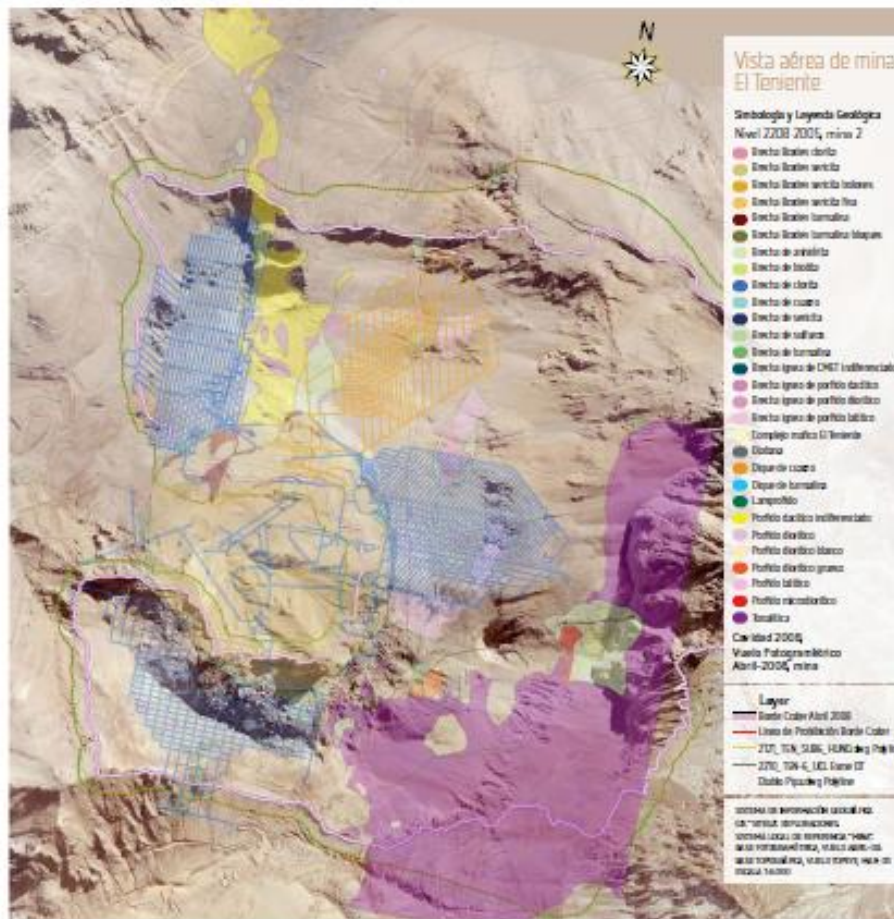


Figura 2: Vista aérea de Mina El Teniente

1.1.4. Nuevos Proyectos

CODELCO lleva adelante un programa de inversiones que, a pesar de reducir su inversión, por las nuevas condiciones del mercado y el precio del cobre con una tendencia a la baja, tiene por objeto transformar las grandes reservas de sus yacimientos en excedentes para el Estado de Chile y beneficios para sus ciudadanos.

Lo anterior se ve reflejado en distintos proyectos que se mencionan a continuación:

-Proyecto Chuquicamata subterránea (en ejecución): Autorizada en 2014. Transforma la mina a cielo abierto más grande del mundo en una moderna operación subterránea, extendiendo al menos en 40 años su vida productiva.

-Proyecto Nuevo Sistema de Traspaso Andina (en ejecución): Autorizada 2013. Reemplazará el actual sistema de chancado primario y transporte de mineral para mantener el nivel actual de procesamiento.

-Proyecto Desarrollo Futuro Andina (prefactibilidad): Busca una nueva alternativa de desarrollo aprovechando los mayores recursos minerales. Este proyecto fue reformulado convirtiéndolo en uno mucho más sustentable y con mayores estándares medioambientales, pero de menor costo y magnitud.

-Proyecto Rajo Inca (en pre factibilidad): Extender su vida útil y darle continuidad operacional mediante la explotación a rajo abierto de los recursos remanentes del yacimiento principal Indio Muerto, explotado hasta ahora mediante *Panel Caving*.

-Proyecto Explotación de Sulfuros Radomiro Tomic (formulación de ingeniería de detalles): Permiso ambiental aprobado. Permitirá extraer y procesar reservas de minerales sulfurados, estimados en 2.800 millones de ton., con una ley de Cu de 0,5%. Además es el primer proyecto que considera abastecerse de agua de mar desalada para su operación.

-Proyecto Nueva Nivel Mina El Teniente (reformulación): Autorizada 2011. Profundiza la explotación del yacimiento El Teniente sumando reservas que ascienden a 2.020 millones de toneladas, con una ley media de 0,86% de Cu y 0,022% de Mo, asegurando su explotación durante 50 años más. Significa ampliar la mina en un sector más profundo (cota 1880), 300 m debajo de los actuales niveles de explotación. Además se intentará automatizar las etapas y/u operarlas a distancia desde el valle. Se espera ofrecer una solución técnicamente factible y económicamente viable (Figura 3).

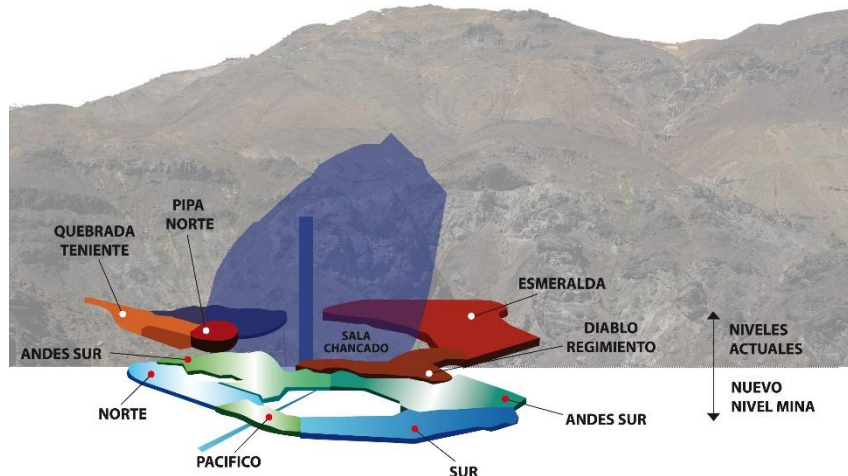


Figura 3: Nuevo Nivel Mina

1.1.5. Sistema de Explotación en Minería Subterránea DET

El método de explotación que se emplea en mina El Teniente es el de Panel Caving. Cada sector productivo consta de tres niveles que cumplen distintas funciones en la extracción del mineral. El nivel superior se le conoce como nivel de hundimiento, el cual tiene por objetivo generar una fragmentación primaria del mineral para que este sea extraído a través del nivel de producción. El mineral es cargado por equipos en puntos de extracción y llevado a piques de mineral los cuales transfieren la roca al nivel de transporte que es donde el mineral es retirado de la mina para luego ser procesado.

En División el Teniente, el proceso minero consta de tres etapas, las cuales son:

- Preparación
- Explotación o Producción
- Procesamiento

La preparación está íntimamente conectada con los métodos de explotación y define la infraestructura de la mina. La primera, es decir, la preparación minera en DET se puede desglosar en las siguientes cuatro actividades:

- Desarrollos Horizontales
- Desarrollos Verticales
- Construcciones
- Perforación y tronadura de producción.

Cada una de estas actividades tiene un conjunto de sub actividades que serán descritas en las secciones a continuación, dándole especial énfasis al desarrollo horizontal, que es lo que se busca optimizar en esta tesis, simulando varios escenarios desde el caso base hacia equipos teleoperados y equipos autónomos o semi autónomos.

El Teniente utiliza métodos subterráneos de explotación, a través de la tecnología de pre acondicionamiento, basado en intervenir el macizo rocoso antes del proceso de hundimiento, con el objeto de reducir el riesgo sísmico y el tamaño de la roca en los puntos de extracción, provocando que el proceso sea más rápido, seguro y económicamente rentable.

El método de explotación utilizado en DET, parte con el hundimiento gravitacional o Panel Caving, cuyas principales características son la extracción mecanizada a través de equipos Load Haul Dump (LHD), también conocidos como scoops y los cuales operan en un sector productivo compuesto por calles y zanjas (galerías donde el mineral cae desde el nivel de hundimiento y donde este es extraído). Este método se encuentra en operación desde la década del ochenta y consiste en socavar mediante explosiones la base de columnas de mineral hundiendo los paneles, y así el mineral se fractura y se rompe por sí solo debido a las tensiones internas y efectos de la gravedad. Por consiguiente, se requiere de un mínimo de perforación y tronadura en la explotación del mineral. El sistema se puso en práctica al iniciarse la explotación en roca primaria, siendo ésta de mayor dureza, menor cantidad de fracturas y la que constituye la mayoría del mineral en el yacimiento.

El mineral es recogido por los equipos LHD, que lo trasladan a los puntos de vaciado (o piques) donde los martillos reducen el tamaño de las rocas. Éstas son transportadas posteriormente al ferrocarril TTE 8 que las lleva hacia la superficie.

En la etapa de procesamiento del mineral, este debe ser concentrado, donde se reduce de tamaño mediante el uso de chancadores y molinos, para convertirlo en un material fino que se mezcla con agua y reactivos químicos y forma una pulpa que entra en la etapa de flotación. En ella se produce una espuma a la que se adhieren las partículas de cobre y molibdeno, separándose del resto del material estéril.

Por último, en la fundición, el concentrado pasa a una planta que le extrae la humedad y, a través de un sistema de transporte neumático, llega a los Convertidores Teniente para el proceso de fusión. El producto principal de estos convertidores es un metal blanco, que contiene 75% de cobre. Posteriormente este metal blanco es vaciado en los convertidores Peirce Smith, reactor cilíndrico de 4,5 m de diámetro por 11 m de largo, aproximadamente, donde se procesan separadamente el eje proveniente del horno de reverbero y el metal blanco proveniente del convertidor Teniente, en un proceso cerrado, es decir, una misma carga es tratada y llevada hasta el final, sin recarga de material. De este proceso se obtiene el cobre blíster con una pureza de 96% el que, posteriormente mediante la pirorrefinación o refinación a fuego se elimina el porcentaje de oxígeno presente, llegando a concentraciones de 99,7 % de cobre y el producto se denomina cobre RAF (refinado a fuego).

1.2. Objetivos

Este trabajo de título está enmarcado en el Plan de Minería Profunda (PMP), enfocado principalmente en la seguridad y constructibilidad minera, realizando un estudio de preparación minera con equipos autónomos o semiautónomos en estado en el mercado de desarrollo o de prueba industrial utilizando el proyecto piloto Extensión Esmeralda Fw

(ExtEsm.) como caso de estudio, y corresponde al desarrollo de una memoria como trabajo final para la obtención del título de Ingeniero Civil de Minas otorgado por la Universidad de Chile.

1.2.1. Generales

Definir el aporte de valor al negocio en materias de seguridad, rendimientos y costos de tecnologías en la etapa de preparación minera con foco en el Programa de Minería Profunda de Codelco División el Teniente.

1.2.2. Específicos

- Estudiar el estado actual de las tecnologías utilizadas en la preparación minera en Mina el Teniente, generando un caso base.
- Realizar un benchmark de la industria en tecnologías autónomas o semiautónomas aplicables a la preparación minera.
- Identificar de estas tecnologías, cuáles pueden ser aplicables a DET en el marco del PMP.
- A partir del benchmark generar los casos.
- Comparar en materia de rendimiento y seguridad las tecnologías autónomas o semiautónomas aplicables al PMP, con lo utilizado en la actualidad por la División.

1.3. Alcances

El alcance de este trabajo es valorizar en materia de seguridad y rendimiento, tecnologías que estén disponibles en el mercado o en etapas de prueba industrial autónomas o semiautónomas para preparación minera utilizando como caso de estudio la prueba piloto Extensión Esmeralda Fw, con especial enfoque en los desarrollos horizontales y elementos de fortificación.

Este estudio es un estudio conceptual con respecto a la materia de las tecnologías autónomas.

1.4. Motivación

Actualmente, la preparación minera en DET es una operación que demanda una gran cantidad de obras, por lo que el personal en las frentes de desarrollo está expuesto a los riesgos inherentes presentes en una mina subterránea, tales como estallido de roca, colapso de galerías, caída de planchones o bombeo (liberación súbita del mineral en estado de barro que sale en forma incontrolada).

Las minas al "envejecer" necesitan encontrar nuevos sectores productivos, los cuales generalmente se encuentran en niveles más profundos del yacimiento, donde las

condiciones del macizo rocoso aumentan el riesgo de operar en ese nivel. Bajo este escenario, es de suma importancia resguardar la seguridad de las personas que trabajan en la mina. El desarrollo de nuevas tecnologías ha logrado extraer el personal expuesto en los sectores productivos de la mina, a través de LHD semiautónomos, camiones autónomos o ferrocarriles que operan tele-comandados. Estos equipos son una realidad y hoy están en operación en diversas minas subterráneas en el mundo. Sin embargo, en materia de preparación minera, estas tecnologías aun no son implementadas y las obras se realizan de forma manual o mecanizada, lo cual expone al operador del equipo a riesgos.

La motivación de este trabajo es presentar alternativas para los desarrollos de la preparación minera con equipos que permitan dar la mayor seguridad posible al personal de la DET y así cumplir la meta de accidentabilidad nula en la mina.

Capítulo 2

2. Revisión Bibliográfica

2.1. Preparación minera DET

La preparación minera en DET se puede desglosar en las siguientes tres actividades: desarrollos horizontales, desarrollos verticales y construcciones. Cada actividad tiene un conjunto de sub actividades y estas serán descritas en las secciones a continuación.

2.1.1. Desarrollos Horizontales Caso DET

En minería subterránea, la preparación minera es una actividad crítica en el ciclo, ya que construyen las calles de accesos y los sectores productivos. En DET dado la forma del yacimiento y de la mina ya en producción, los accesos a nuevos sectores productivos se realizan mediante desarrollos horizontales, así como también la construcción de calles y zanjas las cuales son las unidades básicas del sistema de explotación que se utiliza en Teniente, por lo que optimizar su construcción en términos económicos, de seguridad y tiempo de construcción es esencial.

El avance en los desarrollos horizontales se realiza mediante el método de perforación y tronadura. Este proceso se puede describir en la siguiente secuencia: Jumbos de avance realizan perforaciones horizontales, las cuales son cargadas con explosivos. Una vez tronado los tiros, se ventila el sector, se retira la marina generada se fortifica el sector y se realiza todo de nuevo.

En DET, los desarrollos horizontales son realizados mediante perforación y tronadura y se describen como sigue:

Perforación de frente: Consiste en hacer una serie de perforaciones (llamados tiros) en la frente de avance, los cuales dan la forma de la galería. Es la primera operación dentro del ciclo de operación de una mina. Se marca la frente de manera de indicar al equipo donde debe realizar la perforación. La perforación es realizada por un Jumbo de dos brazos.

Carguío de explosivo: El carguío de la frente se realiza a través de cargadores de explosivos de 50 kg de capacidad, que cargan los tiros mediante mangueras manipuladas por hombres. El explosivo utilizado en Teniente es el ANFO que viene del inglés Ammonium Nitrate - Fuel Oil y es un explosivo muy usado por las empresas mineras y de demolición por ser muy seguro, barato y sus componentes se adquieren con mucha facilidad. Es una mezcla de nitrato de amonio y un combustible derivado del petróleo, desde gasolinas a aceite de motor. Los explosivos son llevados por camiones.

Tronadura: La tronadura (*blasting*) es la liberación de energía producto de una reacción química con explosivos. Su objetivo es maximizar la energía liberada por el explosivo y

así fragmentar el macizo rocoso y, a la vez minimizar los efectos que pudiesen ocurrir hacia otras partes y de esta manera producir el menor daño posible. Es así como se aísla el sector y a través de detonadores remotos se realiza la tronadura de los tiros cargados. Chile es un país minero donde se prueban muchas nuevas tecnologías, sin embargo, en la actividad de tronadura, no hay mucha investigación.

Ventilación de frente: La adecuada ventilación es un proceso de vital importancia para asegurar una atmósfera respirable y segura. Es necesario ventilar por al menos 30 minutos para disipar los gases producidos en la tronadura. Sin sistemas de ventilación, es imposible tener minería subterránea. Los principales problemas que enfrentan las empresas en esta materia se refieren al volumen de aire requerido. “Una mina como El Teniente necesita alrededor de ocho millones de pies cúbicos de aire por minuto”, según Ernesto Arancibia en Minería Chilena 30/05/2016. Además hay que considerar la distancia entre la superficie y los puntos de demanda. Para esto existen ventiladores auxiliares que extraen los gases producidos en la tronadura y otros que ingresan aire hacia el interior.

Revisión de frente: Personal revisa acuciosamente el estado de la frente, observando el estado de ésta y detectando la posibilidad de tiros quedados. Con la tronadura se crean espacios en los cuales las caras libres quedan sometidas a fuerzas sin oposición y convergen hacia el espacio vacío, provocando grietas y generando rocas sueltas o zonas débiles que posteriormente se soltarán. La caída de planchones puede ocasionar daños serios a los trabajadores, a las instalaciones materiales y a los equipos.

Acuñadura: Es la técnica que permite botar oportunamente las rocas sueltas, evitando así que caigan imprevistamente y provoquen daños y lesiones. La acuñadura debe estar siempre presente en el desarrollo de una excavación en roca, cualesquiera sean las características de la roca y de la excavación y debe realizarse las veces que sea necesario. La acuñadura se realiza a través de un elevador hidráulico con jaula protectora, donde el operador es alzado hacia las cuñas visibles donde éste desprende las rocas sueltas con el uso de una perforadora manual.

Regado de frente: Un operador riega la frente para eliminar el material fino que no fue removido por el sistema de ventilación y disipar las concentraciones de gases que puedan quedar.

Retiro de marina: Una vez detonada la frente se retira el material quebrado utilizando un cargador o pala LHD tipo Scoop, de capacidad para retirar 10 toneladas. Este proceso consta en cargar el balde y transporte a un pique de traspaso o de acopio de marina. Uno de los inconvenientes es la generación de gases por la emisión del motor diésel, lo que obliga a mover cantidades de aire importante, como fue mencionado anteriormente.

Fotogrametría en 3D: Esta tecnología permite el desarrollo de proyectos en lugares de riesgo para las personas y las instalaciones. Se toman fotos geo-referenciadas de la frente antes de la fortificación, para obtener información de la geología del sector, así como también para un posterior análisis de sobre o sub excavación en las galerías. Diagnostica el estado de la infraestructura, permitiendo reparaciones y rehabilitación de estructuras expuestas a altas exigencias de cargas.

El sistema de fortificación asegura todo el proceso anterior y tiene como objetivo evitar derrumbes, proteger a los trabajadores y equipos y evitar deformaciones de la caja. Los principales elementos usados son las mallas, pernos y shotcrete.

Perforación para instalación de elementos de fortificación: Con el mismo Jumbo utilizado en la perforación de la frente, según planos entregados por el área de geomecánica DET, se realizan las perforaciones para la instalación de pernos de seguridad.

Instalación de pernos split set, pernos de seguridad y lechada: Se instalan los elementos de fortificación según estándar DET.

Instalación de malla y planchuela-tuerca: Con la plataforma utilizada para la acuñadura, se instalan las mallas separada de la caja de la frente por medio de separadores. La malla usada es trenzada o de bizcocho. Estas se fijan a la galería por medio de pernos y tacos de sujeción del tipo Hilti.

Shotcrete: El hormigón proyectado o shotcrete es un material transportado a través de una manguera y lanzado neumáticamente, con un equipo robotizado con compresor a alta velocidad, contra la superficie de la caja de la galería. La fuerza con que el hormigón es disparado, hace que la mezcla se compacte y se sostenga a sí misma, sin escurrir, incluso en aplicaciones verticales y sobre la cabeza. Se ha demostrado que al ligar las rocas entre sí, la estabilidad se recupera, logrando que la roca se autosoporte.

El avance lineal por ciclo de desarrollo horizontal es en promedio 3 metros y toma 19,8 horas. Todas las actividades en el ciclo se realizan de forma manual o mecánica, esto conlleva a que las horas totales que pasa el personal expuesto en un ciclo son de 46,2 horas.

2.1.2. Desarrollos Verticales Caso DET

División El Teniente para la construcción de los desarrollos verticales, dependiendo cual sea su uso, considera la utilización de dos tecnologías, que consisten en perforar una serie de tiros o chimeneas de gran diámetro (2 a 7 m de diámetro) estas son las llamadas Raise Borer y Blind Hole.

Raise Borer: Se usa en minería subterránea para realizar chimeneas entre dos niveles de la mina o entre la superficie y un nivel más abajo. Este método se aplica con gran éxito en chimeneas de traspaso de mineral, chimeneas de ventilación, chimeneas de cara libre y chimeneas de servicio y acceso. Es capaz de realizar perforaciones verticales y horizontales sub-inclinados con absoluta seguridad.

Su principal característica es que no usa explosivos, lo que la convierte en la manera más segura de perforar un tiro o chimenea.

Se instala el equipo en el nivel superior, desde donde se perfora un tiro hacia el nivel inferior. Una vez hecho este tiro, se conecta un cabezal escariador y, por medio de la rotación de éste, va excavando hacia arriba la sección completa del pique.

Existen en el mercado maquinarias con distintas potencias (150 HP a 500 HP); cual se use, dependerá del diámetro final de escariado que se quiera lograr y la longitud del pique o chimenea.

Las ventajas de usar esta tecnología son:

- Seguridad: sin explosivos, es el método con menor probabilidad de producir un colapso en la mina y además todo el comando de excavación se realiza a través de un panel de control fuera de la línea de caída de material.

- Aumento en la productividad: la chimenea se realiza más rápido y con un mínimo de interferencias en los otros lugares de trabajo ya que la mina no debe evacuarse, por lo que los rendimientos no tienen comparación con otros métodos de excavación de chimeneas.

- Mínima alteración de la roca: se disminuye el sacudimiento de las rocas aledañas y permite la perfección de los diámetros buscados

- Gran autonomía: se pueden excavar chimeneas de grandes longitudes.

Ahora, sí la roca es de mala calidad, es necesario cementar el tiro piloto y perforar nuevamente el tramo, dándole estabilidad. Por todo esto es de suma importancia hacer un estudio acabado del área a trabajar.

Normalmente junto al equipo será necesario tener dos piscinas de unos 15 m³ cada una para almacenamiento y recirculación de agua utilizada en el barrido del detritus.

Entre los mayores riesgos que se pueden mencionar es la rotura de la columna en alguna de las etapas con la consiguiente caída de las barras o escariador al nivel inferior.

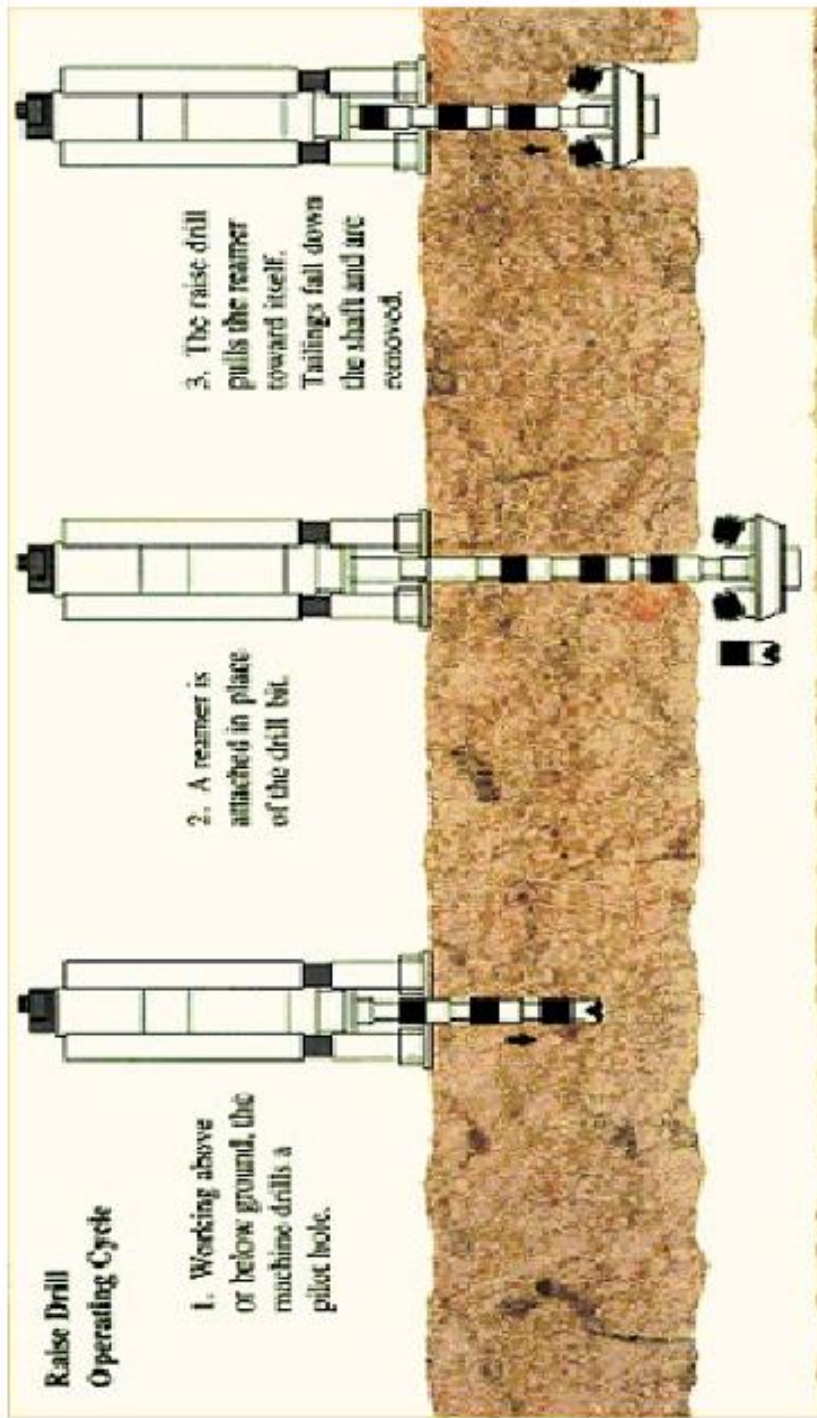


Figura 4: Raise Borer

Blind Hole: A diferencia del Raise Borer, esta máquina se utiliza para realizar chimeneas verticales desde abajo hacia arriba, por lo que no existe la necesidad de tener construido el nivel superior. Se usa, generalmente cuando el espacio es reducido y no permite el uso de la Raise Borer.

El método consiste en la perforación de un tiro piloto ascendente 60 cm adelantado al escariador el que mediante rotación, rompe la roca excavando a sección completa. El material excavado cae por gravedad al nivel de la máquina y es guiado por un colector para prevenir riesgos. Los diámetros de perforación que permite esta tecnología en Chile, son de 0,7 y 1,5 metros. Para alcanzar la altura de excavación se adicionan en el cuerpo de la máquina, a nivel de piso barras especiales, estabilizadas, que permiten ir avanzando en altura. Su autonomía es de hasta 100 metros de altura. Como equipo en DET se utiliza un Robbins 52-R de Atlas Copco que tiene sistemas hidráulicos de bombas de alta presión y un motor eléctrico de 250 HP.

Esta tecnología ha funcionado con singular éxito en la DET de Codelco disminuyendo notoriamente los riesgos de excavación de chimeneas ascendentes, por caída y explosión de rocas. Los rendimientos netos alcanzados con este equipo son de 7,3 m por día.

Las ventajas del método consisten en que es altamente seguro para el personal de operaciones; todo el manejo de la excavación se realiza a través de un panel de control fuera de la línea de caída de la roca, no hay riesgos por uso de explosivos, no hay contaminación por gases de explosivos y se obtiene una excelente calidad de terminación de las chimeneas, se obtienen paredes lisas.

Blind Hole

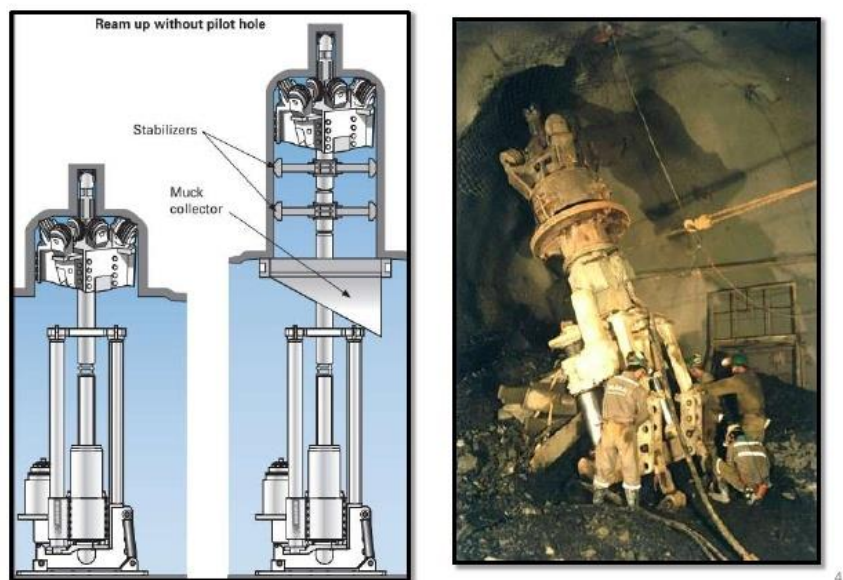


Figura 5: Blind hole

2.1.3. Construcciones DET

Las construcciones en DET se consideran en la etapa de preparación y consideran las siguientes actividades: construcción de los puntos de extracción, blindaje de piques, carpetas de rodado y muros de confinamiento. Todas estas estructuras son fortificaciones especiales que se utilizan en las galerías para así agregar una mayor seguridad en el sector.

Puntos de Extracción: La construcción de un punto de extracción comienza con la fortificación de la visera de la galería. Esto se logra con la instalación de cables que se anclan en un extremo fijo, y se tensan desde el otro extremo, por medio de un equipo tensor hidráulico. Para la instalación de los cables de la visera, se usa un equipo manipulador telescópico equipado con una plataforma, además de una lechadora de accionamiento eléctrico. Con esto realizado se instalan los pernos de anclaje para la armadura del punto. Para la instalación de la armadura se utiliza un carro de moldaje.

Se monta la armadura (andamio tipo Layher) y luego se procede a la colocación del moldaje, para luego hormigonar el punto de extracción evitando que queden cavidades. La bomba que se utiliza para impulsar el hormigón es eléctrica.



Figura 6: Fortificación de visera

Blindaje de Piques: Los piques son túneles o perforaciones verticales o con una leve inclinación. Tienen la función de ventilación o transporte de personal, mineral o equipos. El transporte se realiza mediante ascensores sujetos por poleas. En la gran minería pueden alcanzar profundidades de hasta 1000 m.

El blindaje de piques es una actividad que corresponde al reforzamiento de las construcciones mencionadas. Consiste en la colocación de anillos de acero en el contorno del pique, que van anclados a la roca. El objetivo principal de estos es mantener estables estas construcciones y así asegurar que sean más permanentes.

Con el pique ya construido, para poder blindar éste, primero se debe desquinchar la construcción. El proceso consiste en eliminar las rocas que estén con posibilidad de desprenderse de la pared del pique.

El blindaje son anillos metálicos, preparados en la zona adyacente al pique, en el nivel superior. Los anillos los cuales son bajados por operadores a través de huinches, tecele tipo Terford y cuerdas para colocarlos en la postura dentro del pique que corresponde. Luego, un operador desciende hasta la posición donde se encuentra el cilindro mencionado, se protege de material que pueda caer sobre él mediante un tapado, y ubica el anillo en la posición definitiva. Con eso realizado, el operador procede a bloquear el anillo.

Cuando dos líneas de anillos han sido montadas, se procede a la faena de hormigonado del pique. Este se realiza teniendo especial consideración en evitar la disgregación del hormigón.



Figura 7: Túnel blindado

Carpetas de Rodado: Las carpetas de rodado son fundamentales en la operación de equipos en minería subterránea. Influyen básicamente en el deterioro de neumáticos, choques de los equipos con las murallas, comodidad del operador, etc.

Para la construcción de las carpetas de rodado, se realiza un levantamiento topográfico, escarpe y limpieza de piso (soplado y lavado). Luego viene la colocación del hormigón de relleno (emplantillado) a una cota determinada.

Luego del relleno se pone el hormigón de la carpeta respetando las pendientes del proyecto. El hormigón a emplear es de 700 kgf/cm² (tipo H-70 Mpa), colocándose en tramos de 3 metros. Por último, se compacta este hormigón con vibradores de inmersión y pasado el periodo de fragüe, unas 24 horas, se realizará un corte longitudinal (junta de contracción) para evitar la fisuras en las carpetas.

Muros de Confinamiento: Los muros de confinamiento, corresponden a los elementos de la fortificación definitiva en galerías de niveles de producción. Son extremadamente importantes, pues al excavar el cerro, se producen fuerzas de presión hacia el interior que pueden provocar colapsos de la caja. Estos elementos estructurales, además cumplen una función de ordenamiento de las cajas lo que facilita la operación por parte del conductor de una pala o scoop.

Como se mencionó anteriormente, en cada etapa hay que realizar desquinches y esta no es la excepción. Esta actividad se refuerza con un levantamiento topográfico.

Realizado el levantamiento y ejecutado los desquinches, si son necesarios, se continúa con la colocación de cables, pernos de anclajes, perforando con el mismo Jumbo utilizado para la fortificación de las viseras de los puntos de extracción. Estos cables y pernos de anclaje son el soporte de la armadura. Se instala la armadura y se continúa con el moldaje necesario en toda la extensión del muro.

El hormigón debe ser instalado con una bomba de hormigón. Para el vibrado de hormigón se utilizan vibradores de inmersión eléctricos.

2.2. Nuevas Tecnologías

2.2.1. Jumbo de instalación de pernos y mallas mecanizado

Estos Jumbos cuentan con dos brazos, el primero realiza las perforaciones para una posterior colocación de pernos de fortificación y el segundo brazo articulado puede colocar mallas de protección. La secuencia de operación del equipo es la siguiente: uno de los brazos mecanizados va extendiendo la malla tipo bizcocho (Roll Mesh). Al estar la malla en posición, actúa el segundo brazo que perfora, emperna y deja la malla sujeta, logrando la fortificación.

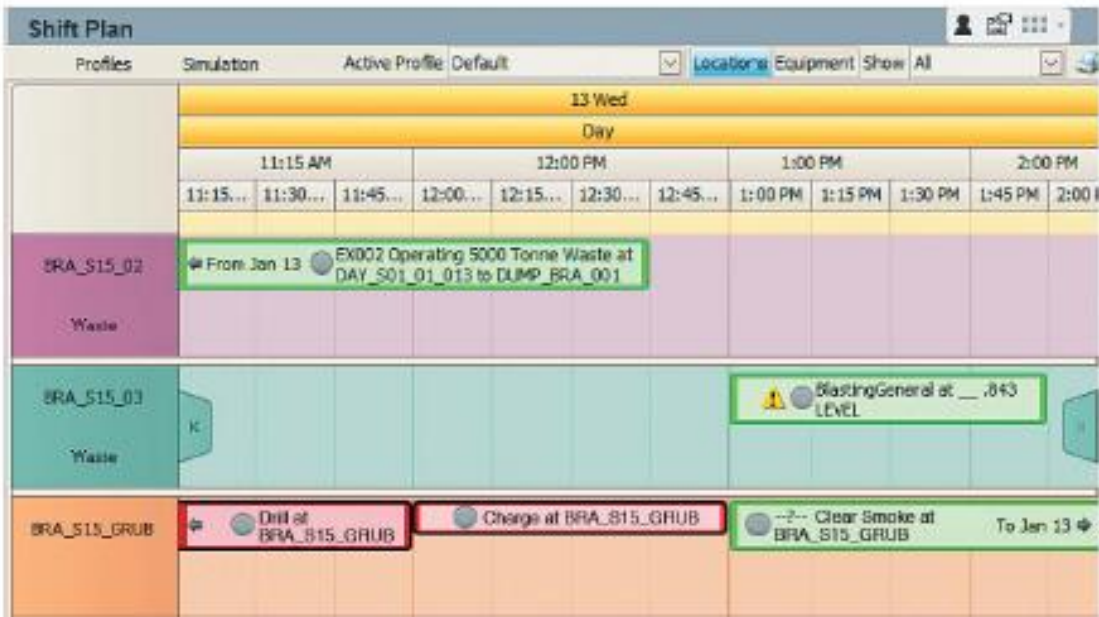
Un ejemplo de este tipo de equipos es Boltec de Atlas Copco el cual puede ser automatizado mediante el sistema RCS (Rig Control System).



Figura 8: Equipo jumbo instalador de pernos y malla

2.2.2. Sistema administración y control minero

Es un sistema para la administración y control minero, subterráneo o de superficie, que logra una respuesta efectiva a los cambios en la disponibilidad de recursos y a problemas de seguridad. Con sus alternativas 3D permite a los operadores localizar y mostrar de forma inmediata el estado del personal y equipos en una o varias zonas de la mina, o con la alternativa mobile que es instalado en computadores que trabajan sobre Microsoft Windows, a bordo de los camiones, integrado al hardware de detección de proximidad ya instalado en la mina. Los operadores pueden visualizar advertencias que identifican la identidad y número de vehículos y personal situado en una zona de proximidad definida.



Pitram's short-interval control components plan and track shift activities

Figura 9: Sistema PITRAM

Capítulo 3

3. Metodología

La metodología utilizada en este trabajo se describe como sigue:

- Se recopiló información a través de informes y bibliografía acerca de los equipos que se utilizan en DET en la preparación minera, con el fin de obtener los rendimientos y número de personas que operan dichos equipos.
- Obtención de información a través de catálogos de equipos y estudios de otras operaciones con características similares, para obtener rendimientos y personas en operación en equipos autónomos o semiautónomos.
- En base a la información recopilada en los puntos anteriores, se determina qué tecnologías son aplicables al caso de estudio proyecto Extensión Esmeralda Fw.
- En el software Mine2-4D se hace un estudio de constructibilidad del caso estudio para las dos tecnologías.
- Se comparan los resultados y se generan las conclusiones.

3.1. Caso Estudio

El caso estudio corresponde a una prueba piloto comprendida en el Plan de Minería Profunda DET. Este proyecto Extensión Esmeralda Fw, es un sector emplazado en el extremo Este (patilla o del inglés "footwall", Fw) de mina Esmeralda, inmediatamente al Fw del actual bloque 2 de explotación (figura 10). Este proyecto se gesta ante la necesidad de probar el diseño minero propuesto por el Proyecto Nuevo Nivel Mina (PNNM) y de testear además tecnologías que se encuentren en una etapa de desarrollo nivel industrial.

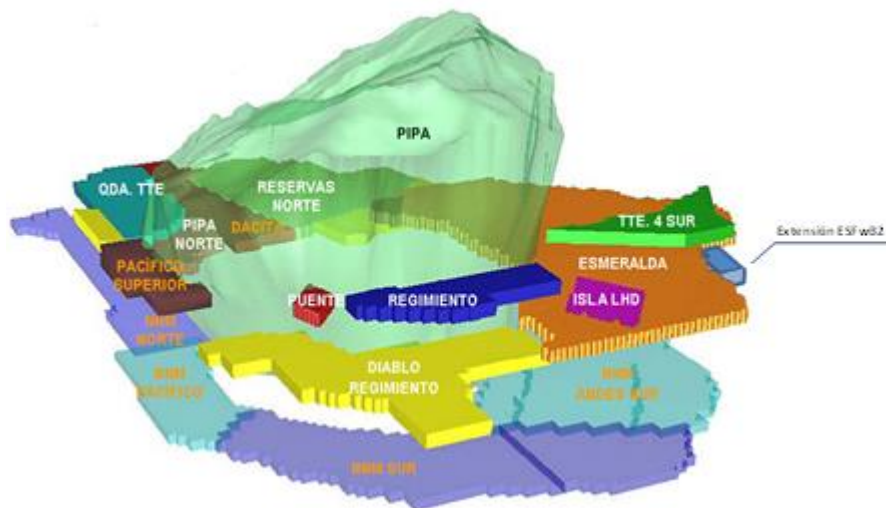


Figura 10: Sectores de Mina El Teniente

3.1.1. Antecedentes Generales del Proyecto ExEsFw

El proyecto se encontraría emplazado al Fw del bloque 2 en producción de mina Esmeralda. El sector incorpora un área de 21.120 m² que contiene reservas de 8,3 millones de toneladas (Mton.) con una ley promedio de cobre total de 0,69%. En régimen, se espera que la productividad de la mina sea de 4.000 tpd., con una vida útil de 8 años. Los desarrollos de la mina se inician en el año 2015 y su producción comenzaría 2 años después.

La prueba piloto tiene un objetivo bi-funcional, esto es que por un lado debe ser capaz de responder a compromisos productivos según PND (Proyecto Minero) y además servir de sector piloto para generar pruebas industriales que permitan el aprendizaje necesario con miras a la operación del PNNM. (Proyecto Tecnológico). En esta línea, las pruebas a realizar en el proyecto son:

- Probar el diseño minero definido para el PNNM: Método de explotación (Panel caving convencional con pre-acondicionamiento intensivo); Malla de extracción tipo Teniente (17 m. x 22 m.) y una altura de Crown Pillar de 25 m.
- Mecanización/Teleoperación de Equipos de Preparación Minera: Con foco en la instalación de malla y pernos de fortificación.
- Pre-acondicionamiento Intensivo (PAI): Optimización del fracturamiento hidráulico y fragmentación inducida por explosivos.
- Sistemas de Soporte y Métodos Constructivos: Elementos con características de alta demanda de esfuerzos/dinámica.

Dado los plazos programados para el proyecto (desarrollos comenzaron el 2015), para la prueba se consideran tecnologías que se encuentren en etapa de prueba industrial o probadas en la industria.

3.1.2. Diseño Minero

El proyecto Extensión Esmeralda Fw, contempla para su explotación, y a modo de prueba industrial con foco en aspectos operacionales y tecnológicos con miras a su implementación en el Proyecto Nuevo Nivel Mina (PNNM), el uso de la variante Panel Caving Convencional, con un Crown Pillar de 25 metros y preacondicionamiento intensivo (PAI) en los niveles de hundimiento y producción. El diseño considera una malla tipo Teniente 17 m. x 22 m., con calles orientadas de este a oeste (figura 11).

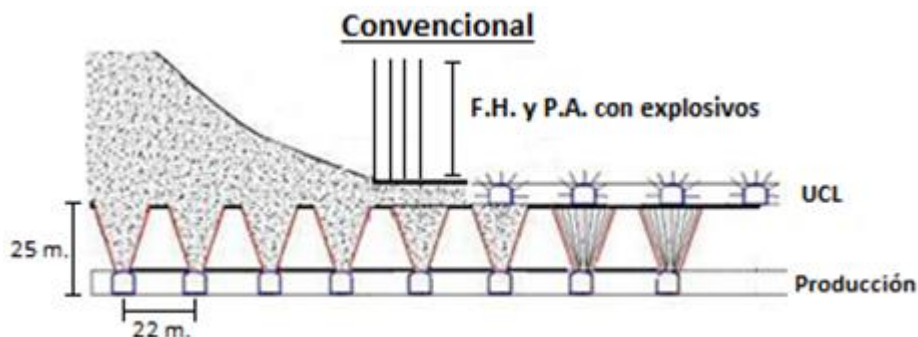


Figura 11: Sistema de hundimiento convencional

Considera el desarrollo de 3 niveles, hundimiento, producción y ventilación (cotas en tabla 1). No considera la construcción de un nivel de transporte, ya que aprovecha el acarreo del ferrocarril de mina Esmeralda.

Tabla 1: Cota de los niveles de mina Esmeralda y mina Esmeralda Extensión Fw.

Nivel	Esmeralda	Extensión Fw.
Hundimiento	2211	2218
Producción	2193	2193
Transporte	2163	2163
Inyección	2160	2160
Extracción	2146	2146

3.1.3. Nivel de Hundimiento

El nivel de Hundimiento (UCL) se encuentra ubicado en la cota 2.218. Este considera cinco calles orientadas en dirección este-oeste. Las calles están separadas 34 metros entre ejes y con una disposición en planta inmediatamente sobre las calles de producción (Figura 12). La diferencia de cotas entre piso a piso con el nivel de Producción es de 25 m. Las calles tienen sección libre 4,1 x 4,0 m, que permiten la utilización de equipos Jumbo para perforación en 4" y fortificación mecanizada con estándar perno-malla-shotcrete (P+M+S).

El layout considera dos cruzados, espaciados por 90 metros. En el lado Hw, el cruzado será utilizado como slot inicial de socavación, para conectar la cavidad del proyecto con la existente del bloque 2 de Esmeralda. El otro cruzado se utiliza como ingreso a las calles y para ventilación del nivel.

El acceso al nivel es a través de rampa desde el nivel de producción de Esmeralda. Se aprovecha la rampa de Esmeralda que conecta el nivel de producción (a través de la C-63) con el hundimiento (C-59).

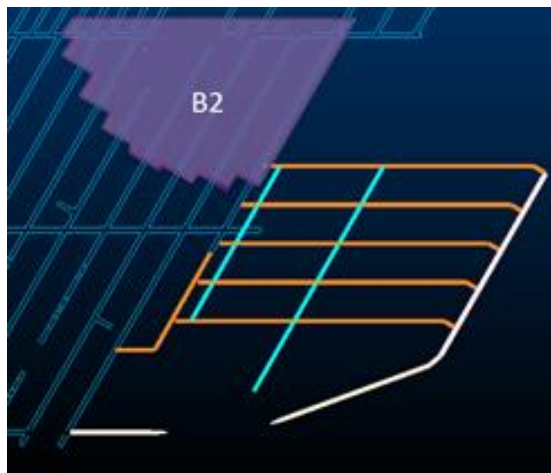


Figura 12: Nivel de hundimiento del sector

3.1.4. Nivel de Producción

El nivel de producción del proyecto se encuentra ubicado 25 m. bajo el nivel de hundimiento (UCL), a la misma cota que el nivel de producción de Esmeralda (cota 2.193) y considera el desarrollo de cinco calles, orientadas de este-oeste, las cuales se encuentran inmediatamente debajo de las calles del nivel de hundimiento. (Figura 13)

El acceso al nivel es a través de una extensión de la Z48 de Esmeralda al sector Fw de la mina.

La malla de extracción del proyecto se define tipo Teniente de 17 m x 22 m y se caracteriza por orientar las zanjas en un ángulo de 60° al este respecto de la línea de centro de las respectivas calles, configuración que facilita la operación de carguío del equipo LHD.

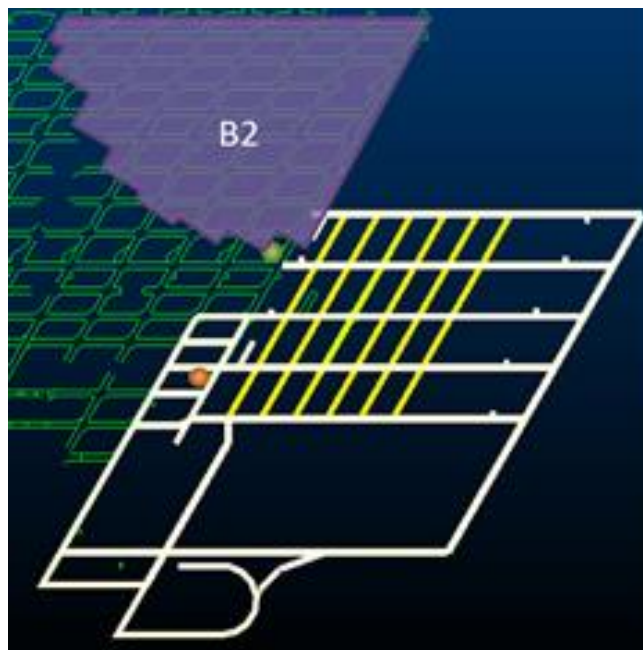


Figura 13: Nivel de producción del sector

El sistema de ventilación considera el ciclo de inyección desde el XC 31 AS y extracción desde el XC 36 AS de extracción del SNV de Esmeralda para cada una de las calles de producción.

Como acceso principal de equipos y personas se contempla un acceso por el Fw del proyecto, a través de la extensión de la Z48 del nivel de producción de Esmeralda. También como acceso al sector, se considera la extensión al norte de la C63 que conecta al proyecto con la línea de zanjas Hw del proyecto. Las secciones libres de los accesos son de 4,8 x 4,5 m que permiten fortificar con equipos mecanizados (P+M+S).

Las calles de producción tienen sección libre 4,8 x 4,5 m, fortificadas con P+M+S y muros de confinamiento. Están orientadas en dirección este-oeste. La separación entre ellas es de 34 m. entre ejes.

Las zanjas están orientadas en la misma dirección que las calles del nivel de producción de Esmeralda, separadas a 22 m entre sí, con una sección libre de 4,4 x 4,3 m, fortificadas con P+M+S.

El desarrollo de las bateas permitirá comunicar el nivel de producción con el nivel de hundimiento. Estas se construyen por medio de barrenadura radial en 4" de diámetro y el desarrollo mecanizado de una chimenea de cara libre (Blind Hole) de 15 m de largo cada una y con 1,50 m de diámetro; su incorporación está contemplada realizarla en dos fases.

Los puntos de extracción del proyecto, al igual que las zanjas, están dispuestos formando un ángulo de 60° con la calle para permitir el ingreso de los equipos LHD a las respectivas galerías de zanja. Los puntos de extracción totales del proyecto suman 56 (8 puntos anexados ESB2+48 puntos ESFwB2).

3.1.5. Sub-nivel de Ventilación

El proyecto hará uso del sub-nivel de ventilación de mina Esmeralda (sub-nivel de inyección cota 2.160 y sub-nivel de extracción cota 2146), aprovechando la infraestructura del sector. Para la inyección de aire del proyecto se utilizan los XC-31AS y XC-41AS. Para la extracción de aire del proyecto se utilizan los XC-29AS y XC-36AS.

El layout del proyecto está emplazado en el sector donde el XC-31AS de inyección se intersecta con el XC-28AS correspondiente a la línea férrea FFCC Ten6 ES (nivel de acarreo tiene una diferencia en altura con el SNV inyección de 3 m.), por lo cual es necesario construir desde el cruzado, extensiones de las galerías hacia el norte y el sur como se muestra en la Figura 14.

La sección de las galerías para el proyecto son del mismo tamaño que las de Esmeralda, 6,0 x 6,0 m.

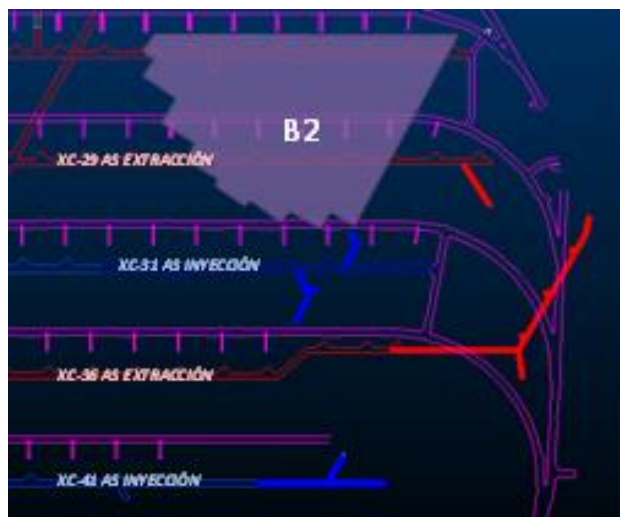


Figura 14: Subniveles de ventilación del sector

3.1.6. Manejo de Materiales

El manejo de materiales consistirá básicamente en el carguío del mineral desde los puntos de extracción, a través de equipos LHD y su posterior transporte y descarga en los piques de traspaso del nivel de producción de Esmeralda B2. Los equipos produciendo en las C-1F, C-2F y C-3F vaciarán el mineral en el 61OP-28AS y para las C-4F y C-5F en el 61OP- 33AS. Z40 a Z43 descargarán en el 61OP- 33AS.

Desde aquí, el mineral es transportado por el sistema de FFCC del nivel de acarreo de Esmeralda a los OP 22, 23 y 24 que descargan el mineral al sistema de transporte principal (FFCC Tte 8).

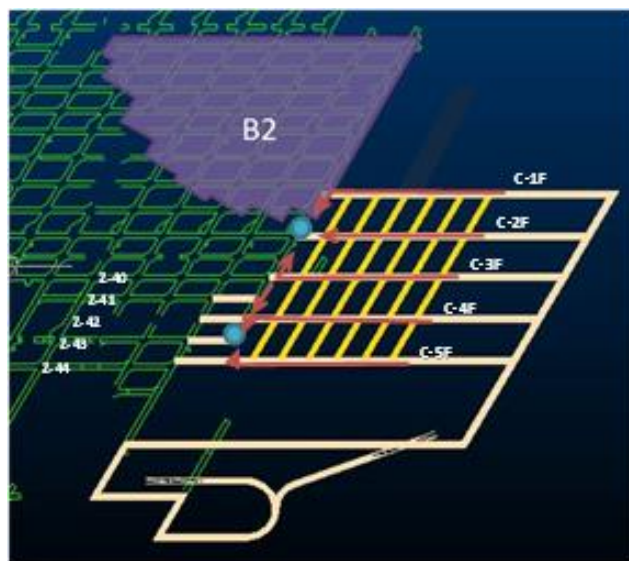


Figura 15: Disposición general del sector

3.1.7. Obras de Preparación

Las obras que considera el proyecto quedan descritas en la Tabla 2. Se puede desprender de esta que el proyecto no considera desarrollos en el nivel de acarreo, ya que utiliza la infraestructura ya existente de mina Esmeralda. El grueso de las obras se concentra en los desarrollos horizontales del nivel de hundimiento y del nivel de producción.

Tabla 2: Obras estimadas del proyecto.

Desarrollo/Nivel		Hundimiento	Producción	SNV-Ext	SNV-Iny	Acarreo	Total
Desarrollo Horizontal	m	1848	3236	333	229	-	5646
Desarrollo Vertical	m	-	-	235	99	-	334
Carpeta de Rodado	m	-	2026	-	-	-	2026
Puntos de Extracción	uni	-	48	-	-	-	48
Muros	uni	-	48	-	-	-	48

Capítulo 4

4. Desarrollo y Análisis de Resultados

4.1. Descripción del estudio

En base al ciclo de desarrollos horizontales DET, se crearon escenarios los cuales tratan de replicar el avance horizontal con nuevas tecnologías. Esto se realiza aumentando o disminuyendo los tiempos de duración de las actividades involucradas en los desarrollos. Luego, estos datos se introducen a un software que permite simular la constructibilidad del proyecto Extensión Esmeralda Fw, donde se obtendrán los rendimientos mensuales y exposición del personal. Esto y en función del costo que tengan las nuevas tecnologías permitirán evaluar si generan un beneficio a la DET.

4.2. Escenarios

Los escenarios planteados a continuación se hicieron en función al caso base DET¹, donde se modificaron los tiempos de duración y exposición de las distintas actividades involucradas en el proceso. En todos los escenarios, se consideró que el retiro de marinas se mantenía igual, ya que a la fecha no es posible realizar automatizaciones en esta actividad.

¹ Estudio personal expuesto preparación minera, Codelco División el Teniente.

4.2.1. Base DET

Este escenario es el caso base del estudio, el cual corresponde al estado actual de la preparación horizontal en la División. Estos datos son entregados por la Gerencia de Obras Mina (GOBM), el cual lista cada actividad realizada en un ciclo de desarrollo horizontal y para cada una se obtiene la duración y la cantidad de personas requeridas para realizar dicha actividad. Con estos valores se puede calcular el tiempo de ciclo para este escenario y las horas de trabajo expuesta de los trabajadores en el frente de desarrollo. La Tabla 3 representa como se trabaja actualmente en la División y este caso será la base de evaluación para el trabajo realizado.

Tabla 3: Escenario Base DET.

ACTIVIDAD	Caso base DET	
	Duración (min.)	Integrantes (personas)
Marcar Frente	15	2
Perforar	120	2
Cargar	75	4
Quemar y Ventilar	75	2
Chequeo de Frente	10	1
Regado de Frente	30	1
Limpieza Marina	180	1
Foto	30	2
Acuñar	30	3
Perforar fortificación	90	2
Split set	30	2
Colocar perno y lechado	220	3
Colocar malla y planchuela-tuerca	90	3
Hilteo	130	3
Shotcretear	60	2
Total	1185	33
	Duración (hrs./ciclo)	HH expuestas
Total	19,8	46,2

4.2.2. Factible Autónomo

A través de benchmark de otras faenas y con datos conseguidos en la Superintendencia de Innovación (SIN), se generó un escenario con tecnologías disponibles hoy en el mercado para el desarrollo horizontal de galerías. Para cada actividad en un ciclo de trabajo se presentan los datos de duración de actividad y número de personas expuestas en la frente.

El marcado de la frente se hace a través del equipo de perforación, donde la malla de perforación es cargada al equipo y este posiciona los brazos dirigida a través de láser y en función de la malla cargada. Un jumbo que puede realizar esta tarea es un Boomer de Atlas Copco, que viene con el sistema de RCS, el cual permite además automatizar y tele-operar esta tarea.

Para todas las actividades de fortificación se consideró el uso de jumbo de instalación de mallas y pernos, tal como una Boltec de Atlas Copco.

Tabla 4: Escenario Factible Autónomo.

ACTIVIDAD	Factible Autónomo	
	Duración (min.)	Integrantes (personas)
Marcar Frente	0	0
Perforar	144	0.5
Cargar	60	2
Quemar y Ventilar	38	2
Chequeo de Frente	5	1
Regado de Frente	15	1
Limpieza Marina	180	1
Foto	15	0
Acuñar	36	1
Perforar fortificación	117	0
Split set	39	0
Colocar perno y lechado	286	0
Colocar malla y planchuela-tuerca	117	0
Hilteo	169	0
Shotcretear	54	0
Total	1275	8
	Duración (hrs./ciclo)	HH expuestas
Total	21,2	7,2

En la perforación de la galería se considera 0,5 personas trabajando en la actividad. Esto se debe a que el equipo es posicionado por un operador.

4.2.3. Optimista

Este escenario considera que el uso de nuevas tecnologías en los desarrollos horizontales disminuye el tiempo de ciclo, por lo que disminuye la duración de algunas actividades en comparación con el caso base. Además estas tecnologías son autónomas, por lo que el personal es retirado de la frente de avance, reduciendo la exposición de estos a los peligros asociados a dicha actividad. Dada la dificultad de automatizar la actividad de limpieza de marina, este dato no varía con respecto al caso base.

Tabla 5: Escenario Optimista.

ACTIVIDAD	Optimista	
	Duración (min.)	Integrantes (personas)
Marcar Frente	0	0
Perforar	90	0
Cargar	56	2
Quemar y Ventilar	38	2
Chequeo de Frente	5	1
Regado de Frente	15	1
Limpieza Marina	180	1
Foto	15	0
Acuñar	23	1
Perforar fortificación	68	0
Split set	23	0
Colocar perno y lechado	165	0
Colocar malla y planchuela-tuerca	68	0
Hilteo	98	0
Shotcretear	45	0
Total	886	8
	Duración (hrs./ciclo)	HH expuestas
Total	14,8	6,8

4.2.4. Positivo

Al igual que el escenario anterior, se considera que el uso de nuevas tecnologías disminuye la duración de las actividades en el ciclo de desarrollo, pero en un mayor porcentaje. El escenario propuesto se describe como sigue:

Tabla 6: Escenario Positivo.

ACTIVIDAD	Positivo	
	Duración (min.)	Integrantes (personas)
Marcar Frente	0	0
Perforar	60	0
Cargar	38	2
Quemar y Ventilar	38	2
Chequeo de Frente	5	1
Regado de Frente	15	1
Limpieza Marina	180	1
Foto	15	0
Acuñar	15	1
Perforar fortificación	45	0
Split set	15	0
Colocar perno y lechado	110	0
Colocar malla y planchuela-tuerca	45	0
Hilteo	65	0
Shotcretear	30	0
Total	675	8
	Duración (hrs./ciclo)	HH expuestas
Total	11,3	6,1

4.2.5. Negativo

Este escenario considera que la inclusión de nuevas tecnologías en el ciclo de desarrollos horizontales aumenta la duración de las actividades involucradas. Estas tecnologías son de carácter autónomo, por lo que el personal es retirado de la frente de avance. El retiro de marinas se realiza de la misma forma que en el caso base dada la dificultad de automatizar esta actividad.

Tabla 7: Escenario Negativo.

ACTIVIDAD	Negativo	
	Duración (min.)	Integrantes (personas)
Marcar Frente	0	0
Perforar	156	0
Cargar	98	2
Quemar y Ventilar	98	2
Chequeo de Frente	13	1
Regado de Frente	39	1
Limpieza Marina	180	1
Foto	39	0
Acuñar	39	1
Perforar fortificación	117	0
Split set	39	0
Colocar perno y lechado	286	0
Colocar malla y planchuela-tuerca	117	0
Hilteo	169	0
Shotcretear	78	0
Total	1467	8
	Duración (hrs./ciclo)	HH expuestas
Total	24,5	11

4.2.6. Pesimista

Este escenario, al igual que el anterior, considera que la inclusión de nuevas tecnologías aumenta la duración de las actividades involucradas en el ciclo de desarrollo horizontal, sin embargo, este escenario considera un castigo mayor a dicha duración. Las nuevas tecnologías permiten retirar al personal de la frente.

Tabla 8: Escenario Pesimista.

ACTIVIDAD	Negativo	
	Duración (min.)	Integrantes (personas)
Marcar Frente	0	0
Perforar	180	0
Cargar	113	2
Quemar y Ventilar	113	2
Chequeo de Frente	15	1
Regado de Frente	45	1
Limpieza Marina	180	1
Foto	45	0
Acuñar	45	1
Perforar fortificación	135	0
Split set	45	0
Colocar perno y lechado	330	0
Colocar malla y planchuela-tuerca	135	0
Hilteo	195	0
Shotcretear	90	0
Total	1665	8
	Duración (hrs./ciclo)	HH expuestas
Total	27,8	12,3

4.2.7. Full Autónomo

En este escenario, el tiempo de ciclo es el mismo que el caso base DET, sin embargo, los equipos funcionan autónomos, sin la necesidad de tener personal expuesto en la operación, exceptuando el retiro de marinas, ya que aún no existe la tecnología para realizar esta actividad de manera completamente autónoma.

Tabla 9: Escenario Full Autónomo.

ACTIVIDAD	Full Autónomo	
	Duración (min.)	Integrantes (personas)
Marcar Frente	15	0
Perforar	120	0
Cargar	75	0
Quemar y Ventilar	75	0
Chequeo de Frente	10	0
Regado de Frente	30	0
Limpieza Marina	180	1
Foto	30	0
Acuñar	30	0
Perforar fortificación	90	0
Split set	30	0
Colocar perno y lechado	220	0
Colocar malla y planchuela-tuerca	90	0
Hilteo	130	0
Shotcretear	60	0
Total	1185	1
	Duración (hrs./ciclo)	HH expuestas
Total	19,8	3

4.2.8. Resumen Escenarios

En función de estos 7 escenarios, se generaron 12 casos de construcción de la mina, los cuales serán descritos en la Tabla 10.

Tabla 10: Resumen de los casos.

	Casos	Avance m	Ciclo hr./ciclo	Horas efectivas hr./día	Horas Mes hr./mes	Ciclos Mes ciclo/mes	Avance Jumbo m/mes	Exposición hr/ciclo
DET línea base	1	3	20	20	609	31	92	46.2
DET + gestión	2	3	15	20	609	41	122	35.1
Industria línea base	3	4	16	20	609	38	152	37.4
Tecnología Optimizado	4	4	21	21	639	30	120	7.2
	5	3	21	21	639	30	90	7.2
Tecnología Positivo	6	4	15	21	639	43	173	6.8
	7	3	15	21	639	43	130	6.8
Tecnología Negativo	8	4	24	21	639	26	105	11.0
	9	3	24	21	639	26	78	11.0
Tecnología Pesimista	10	4	28	21	639	23	92	12.3
	11	3	28	21	639	23	69	12.3
Full autónomo	12	4	30	22	670	22	89	3

Los casos se describen como sigue:

- El caso 1 es el caso base DET.
- El caso 2 es el caso base DET optimizado, donde el tiempo de ciclo se redujo a 15 horas. Esto es posible mediante procesos “lean”, donde a través de gestión y optimización de procesos es posible disminuir el tiempo de duración de un ciclo.
- El caso 3 es el estándar de la industria.
- Los casos 4 y 5 corresponden al escenario optimizado (tiempo de las actividades disminuye con el uso de nuevas tecnologías), donde en el primero se trabajó con un largo de perforación de 4 metros, y en el segundo un largo de perforación de 3 metros.
- Los casos 6 y 7 corresponden al escenario positivo (tiempos de las actividades disminuyen en un mayor porcentaje que el optimizado al utilizar tecnologías autónomas o semi autónomas), donde se usaron los valores para el largo de perforación de 4 y 3 metros respectivamente.
- Los casos 8 y 9 corresponden al escenario negativo (aumenta la duración de las actividades por el ingreso de tecnologías autónomas), con avances de 4 y 3 metros respectivamente.
- Los casos 10 y 11 corresponden al escenario pesimista (igual que caso negativo, solo que el aumento del tiempo es mayor), con avance de 4 y 3 metros respectivamente.
- El caso 12 corresponde al escenario full autónomo, con largo de avance de 4 metros.

Cabe destacar, que todos los casos tecnológicos (del 4 al 11) se consideraron con horas efectivas por días de 21 horas. La autonomía habilita una mayor utilización del equipo al no tener la necesidad de tener que trasladar el personal donde se encuentra el equipo. Esto se sustenta en el hecho que a la fecha, las horas efectivas por día en Teniente son de 20 horas. Esto se debe a que entre cambio de turno (tres turnos de ocho horas cada uno) se pierden dos horas de trabajo entre el traslado del personal a la frente de trabajo, postura en la frente y retiro del personal, además de la hora de almuerzo considerada en la operación.

A partir de los escenarios, para cada caso es necesario encontrar el avance en metros por mes. Para esto se utiliza el largo de perforación, con la duración de un ciclo de perforación y las horas efectivas de trabajo día. Además se le debe indicar la cantidad de cuadrillas que se utilizarán como recursos para la construcción del sector. Este input se le entrega al software Mine2-4D. Con esto, en el programa se realiza para cada caso, variando el avance mensual la constructibilidad, donde previamente se ajustó la simulación para ajustarse al plan desarrollado en informe de factibilidad del proyecto, siguiendo las secuencias de construcción y prioridades en el desarrollo de ciertas actividades que permitan cumplir con el plan.

4.3. Evaluación Económica

Un indicador que ayuda en la comparación de los distintos casos es el económico. Para esto, es necesario calcular el costo de operación e inversión de los métodos y compararlos con el caso base de El Teniente. Al igual que cuando se generaron los escenarios en función de la práctica actual de la División, para los costos se usará una idea similar.

Los costos de los desarrollos horizontales se estiman en función de las dimensiones de las galerías a construir. Esto determina la cantidad de metros que se tiene que perforar en pozos, la cantidad de explosivos, la marina que se tiene que retirar y además cuánta es la fortificación que se tiene que utilizar por avance. Otro factor que afecta el costo de avance de una galería en desarrollo es la sobre-excavación que se produce por dicho avance. Esta sobre-excavación se produce por el desvío de los tiros, un mal marcado del frente o una incorrecta cantidad de explosivos puesta en las perforaciones. Lo ideal, y sobre el cual se hace el cálculo de costos, es que esta sobre-excavación sea de 0%. Sin embargo esto no ocurre y normalmente en Teniente, las galerías tienen un porcentaje de sobre excavación de 30%.

La Tabla 11 muestra el desglose de los costos por actividad en los desarrollos horizontales sin sobre-excavación y con un porcentaje de sobre-excavación de 30%. El costo de avance de 1 metro es de 2.500 US\$ y 3.100 US\$ para el avance sin sobre excavación y con una sobre-excavación de 30% respectivamente. Se puede apreciar que la aplicación de shotcrete en la galería, la remoción de marinas y el costo de los pernos son las que conllevan un mayor costo en la operación.

Tabla 11: Tabla de costos por metro desglosado por actividad DET.²

	Porcentaje	Costo 0% de sobre- excavación	Costo 30% de sobre- excavación
	%	US\$/m	US\$/m
Marinas	16	400	496
Perforación	8	200	248
Mano de obra	8	200	248
Aceros de perforación	3	75	93
Malla	7	175	217
Pernos	13	325	403
Shotcrete	40	1.000	1.240
Explosivos	4	100	124
Detonadores	1	25	31
Total	100	2.500	3.100

De la Tabla 11, para evaluar el costo del caso base DET en la sección de escenarios se utilizará la columna derecha, la cual considera que la galería tiene un 30% de sobre excavación. Del trabajo de donde estos datos se basan indican que el costo de avance por metro aumenta en forma lineal con el aumento en la sobre-excavación. Es correcto asumir que el uso de nuevas tecnologías que automaticen alguna de las actividades en el ciclo de avance de los desarrollos horizontales, disminuyan la sobre-excavación que se genera por falla humana. Sin embargo, estudios indican que la sobre-excavación generada no es de 0% sino que se encuentra alrededor de 15%. Teniendo esto en cuenta, para estimar el costo de avance de los casos tecnológicos aquí propuestos se utilizará como base de los datos los costos DET para un avance que genere un 15% de sobre excavación. Esto será expresado en la Tabla 12.

² Propuesta de valor de tecnología avanzada para túneles CODELCO GOBM/SDI-ORICA.

Tabla 12: Costos de avance a utilizar en casos tecnológicos.

	Caso base DET	Casos Tecnológicos
	Costo 15% de sobre- excavación US\$/m	Costo 15% de sobre- excavación US\$/m
Marinas	448	448
Perforación	224	246
Mano de obra	224	291
Aceros de perforación	84	84
Malla	196	216
Pernos	364	400
Shotcrete	1.120	1232
Explosivos	112	116
Detonadores	28	29
Total	2.800	3.062

El costo de retirar las marinas no varía, ya que utiliza el mismo método actual. También se mantiene el costo de los aceros de perforación, ya que se utilizan los mismos que en la perforación convencional. Los costos de perforación, pernos de fortificación, malla y shotcrete aumentan un 10%, dado que se asume un aumento en el costo de operación por ser tecnologías nuevas. El costo de los explosivos aumenta un 4% y el de los detonadores un 5% (producto de utilizar emulsión en vez de ANFO). Con esto, el costo de avance por metro con el uso de tecnologías es de US\$ 3.062.³

Dado que se tiene como resultado de la simulación realizada en Mine 2-4D las horas hombre necesarias para la construcción del sector en estudio, de las Tabla 11 y Tabla 12 se reemplazará el valor de mano de obra, por un valor fijo que se pondere por las horas hombre necesarias para desarrollar cada caso. Con esto, el costo de avance por metro, sin incluir el costo de mano de obra, para los casos en función del caso base DET y casos tecnológicos queda expresado en la siguiente tabla. Además, de esta se puede apreciar el costo por horas hombre que se utilizará para todos los casos en estudio.

Tabla 13: Costos que se utilizaran en la evaluación económica de los distintos casos.

	Unidades	Costo
Caso Base	US\$/m	2.852
Caso Tecnológico	US\$/m	2.771
Horas Hombre	US\$/HH	16,1

Con estos valores, se puede hacer una evaluación de los valores actualizados de los costos para cada caso, de manera de tener otra métrica comparativa. Del caso 1 al 3 se utilizará el costo por metro de US\$ 2.852 y para el resto de los casos (tecnológicos) el

³ Estos datos son obtenidos del estudio Propuesta de valor de tecnología avanzada para túneles CODELCO GOBM/SDI-ORICA.

valor de avanzar un metro será de US\$ 2.711. Se considerará además que el delta de inversión de los casos tecnológicos con respecto a los casos base DET es un factor que dependerá del esfuerzo que requiera la implementación de esta tecnología en el tiempo. Vale decir, en el tiempo presente de este informe, el kit de automatización tiene un costo de US\$ 500.000. Sin embargo, este valor disminuye en el tiempo, ya que una mayor inclusión de estas tecnologías en otras minas, además de un acostumbramiento a la tecnología permite la disminución del precio de estos.

Se consideran los ingresos por año calculados en el informe de prefactibilidad del proyecto como los ingresos para cada uno de los casos analizados.⁴

4.4. Resultados y Análisis de Resultados

4.4.1. Constructibilidad del sector

En esta sección se presentarán los resultados de la constructibilidad del sector para cada caso con 3 frentes de avance, vale decir 3 cuadrillas de trabajo.

Para cada ejercicio, el comienzo de la construcción del sector empezó en enero de 2015. Como resultados para todos los casos se captura las horas expuestas promedio del personal, el avance promedio por mes y la duración en meses de los trabajos. La Tabla 14 presenta los resultados para la constructibilidad del sector para los casos.

Tabla 14: Resultados por caso.

	HH expuestas hrs.	Rendimiento m/mes	Duración Meses
Caso 1	2.555	166	34
Caso 2	2.538	217	26
Caso 3	2.514	269	21
Caso 4	390	217	26
Caso 5	386	161	35
Caso 6	536	314	18
Caso 7	536	235	24
Caso 8	518	188	30
Caso 9	518	141	40
Caso 10	508	166	34
Caso 11	512	125	45
Caso 12	121	161	35

Se puede apreciar de los resultados obtenidos, que en los casos basados en las tecnologías actuales usadas en la División, las HH expuestas por el personal en el

⁴ Calculo de costos en el capítulo de Anexos

desarrollo del proyecto son similares, a diferencia de los casos tecnológicos donde se observa una disminución en las horas expuestas del personal en todos los casos.

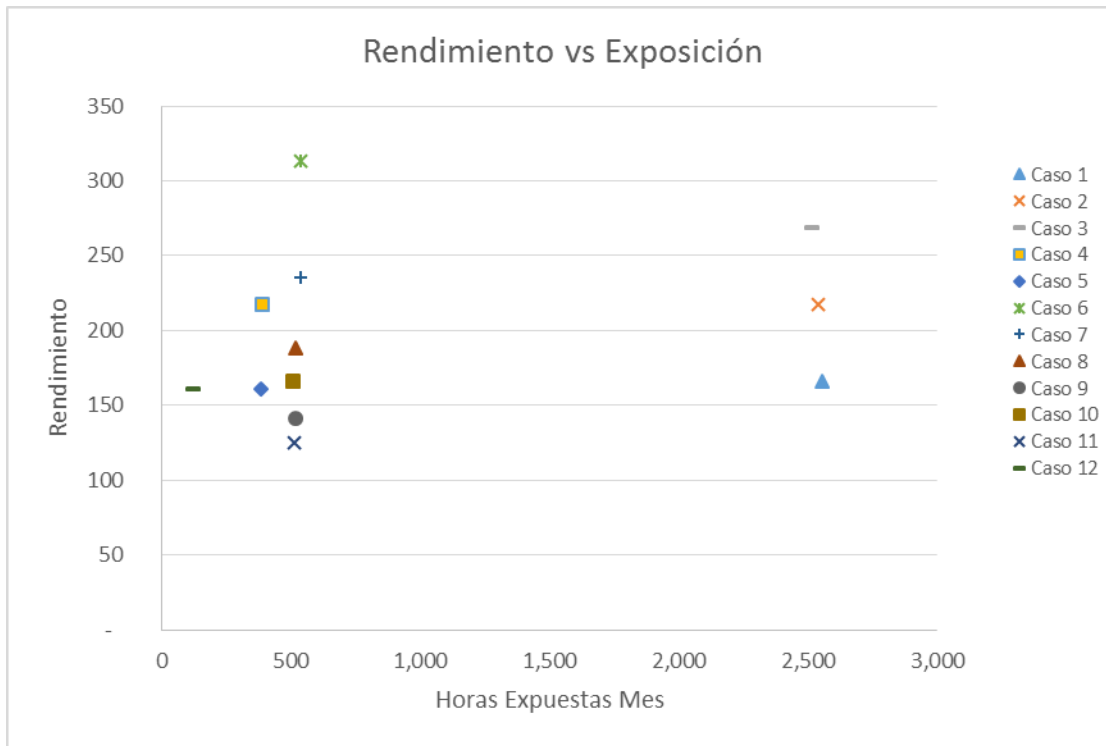


Figura 16: Rendimiento vs exposición.

La Figura 16 representa la Tabla 14 gráficamente, donde se puede apreciar con mayor claridad lo expuesto en el párrafo anterior, esto es que la reducción en horas expuestas por mes en el personal de desarrollos horizontal con la inclusión de tecnologías autónomas o tele-comandadas. Los tres primeros casos, en que sus tiempos de ciclo se encuentran basados en el caso base DET se pueden apreciar que se encuentran con mayores tiempos de exposición de personas.

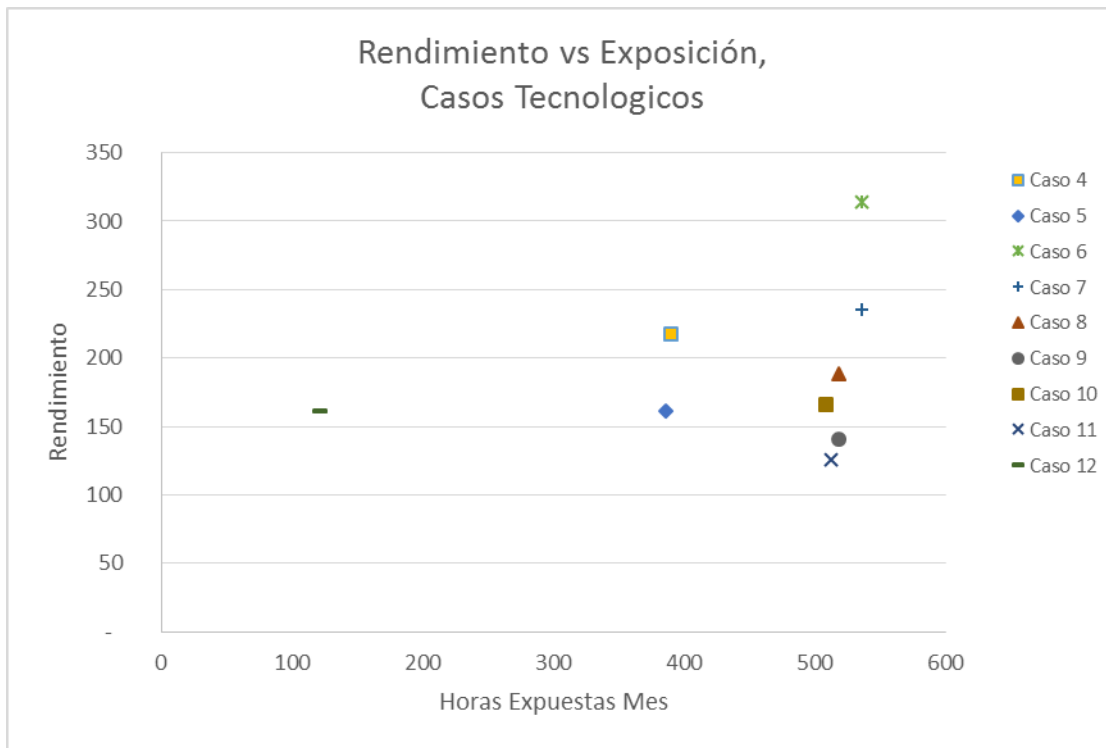


Figura 17: Rendimiento vs exposición, casos tecnológicos.

Con el fin de realizar un mejor análisis de los resultados obtenidos, se generó la Figura 17, la cual representa el rendimiento versus las horas expuestas del personal en el mes, excluyendo los tres primeros casos: el caso base DET, el caso base DET optimizado y el caso base de la industria. Se puede apreciar que la diferencia en horas expuestas por el personal en 6 de los 9 casos mostrados en la figura, se encuentran en un valor cercano a 520 horas. Este valor se mantiene tanto en casos donde el rendimiento se disminuye con la inclusión de tecnologías, como en los que mejora con equipos autónomos. El caso optimizado (4 y 5) si bien tiene peor rendimiento que el positivo (6 y 7), tiene una menor exposición del personal en el desarrollo del sector.

4.4.2. Costos de construcción

Como se explicó en la sección 4.3, una de las herramientas de comparación que se utilizarán es la de los costos caso a caso. Esto se hará con los valores presentados en la Tabla 13 representa un resumen de lo explicado en la sección de evaluación económica.

Con estos valores, y dada la constructibilidad del sector, generada en el software Mine2-4D, se puede evaluar el costo mes a mes por metro avanzado para cada caso propuesto. Con estos costos y los ingresos, se calcula el Valor Actualizado Neto (VAN) para cada caso el cual servirá como indicador para evaluarlos entre sí, variando la inversión inicial en los casos tecnológicos.

Tabla 15: VAN de los casos, variando la inversión en casos tecnológicos.

Inversión (MUS\$)		VAN variando la inversión (MUS\$)						
		0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
1	DET línea base	81,11	81,11	81,11	81,11	81,11	81,11	81,11
2	DET + gestión	81,04	81,04	81,04	81,04	81,04	81,04	81,04
3	Industria línea base	81,05	81,05	81,05	81,05	81,05	81,05	81,05
4	Tecnología Optimizado	82,26	81,76	81,26	80,76	80,26	79,76	79,26
5		82,56	82,06	81,56	81,06	80,56	80,06	79,56
6	Tecnología Positivo	81,99	81,49	80,99	80,49	79,99	79,49	78,99
7		82,15	81,65	81,15	80,65	80,15	79,65	79,15
8	Tecnología Negativo	82,33	81,83	81,33	80,83	80,33	79,83	79,33
9		82,66	82,16	81,66	81,16	80,66	80,16	79,66
10	Tecnología Pesimista	82,48	81,98	81,48	80,98	80,48	79,98	79,48
11		82,82	82,32	81,82	81,32	80,82	80,32	79,82
12	Full autónomo	82,70	82,20	81,70	81,20	80,70	80,20	79,70

Se puede apreciar en la Tabla 15 que los casos que se utiliza nuevas tecnologías, el VAN es menor que en los casos basados en los datos DET. Esto se debe al aumento en el costo de operación debido al ingreso de tecnologías que requieren un personal más calificado y además existe una curva de aprendizaje en el uso de estas.

4.5. Resultado final

Con los resultados obtenidos en las subsecciones anteriores en este trabajo se pueden generar los datos mostrados en la Tabla 16.

Tabla 16: Resultados para cada caso.

		Avance m/ciclo	HH expuestas hrs.	Rendimiento m/mes	VAN MUS\$
1	DET línea base	3	2.555	166	81,11
2	DET + gestión	3	2.538	217	81,04
3	Industria línea base	4	2.514	269	81,05
4	Tecnología Optimizado	4	390	217	80,76
5		3	386	161	81,06
6	Tecnología Positivo	4	536	314	80,49
7		3	536	235	80,65
8	Tecnología Negativo	4	518	188	80,83
9		3	518	141	81,16
10	Tecnología Pesimista	4	508	166	80,98
11		3	512	125	81,32
12	Full autónomo	4	121	161	81,20

En la tabla se resaltaron con colores en las columnas de HH expuestas, rendimiento y VAN con un delta de inversión de 1,5 MUS\$, los tres mejores resultados en los distintos casos. En la primera, HH expuestas, los casos con nuevas tecnologías, en comparación a los basados en la práctica actual de Teniente, obtuvieron mejores resultados, vale decir, una menor exposición de horas del personal en la frente de trabajo. De estos, los tres mejores casos son el Full autónomo, y ambos escenarios de Tecnología optimizada. En la columna de rendimiento, se puede apreciar que el caso de Industria línea base y ambos escenarios Tecnología positiva son los que presentaron los mejores rendimientos. En cuanto a VAN, los casos tecnológicos donde el rendimiento de los equipos con respecto al caso DET disminuyen y el caso full autónomo, son los que presentan los mejores resultados. De la Tabla 15, se aprecia que 1,5 MUS\$ es el promedio de los valores presentados para la inversión. Se eligió para presentar como resultado del estudio, ya que es un valor que se ajusta a la realidad, donde hoy, el esfuerzo de aplicar estas tecnologías a DET es alto, lo que se traduce es una fuerte inversión, sin embargo, al cabo de un par de años estas inversiones tenderían a bajar dado que el conocimiento y una mayor confiabilidad que los proveedores pueden ofrecer con este servicio disminuirían el valor de la inversión inicial que se requiere para un proyecto como el que se está estudiando en este trabajo.

Con lo expuesto en el párrafo anterior, es importante analizar el escenario completo, y qué se puede concluir con respecto al aporte de valor del uso de tecnologías autónomas. Este análisis se realizará descartando casos en base a los criterios expuestos en los primeros capítulos de este trabajo.

En la Figura 16 se puede apreciar que los tres primeros casos presentan una exposición de personal considerablemente mayor que en los nueve casos siguientes. En consecuencia, se pueden descartar éstos en la decisión de cuál es el caso que presenta una mejor alternativa para realizar la constructibilidad del sector, ya que el objetivo es mejorar la seguridad de los trabajadores en la preparación minera. Si bien el caso Full autónomo presenta la menor exposición de personal en la frente, su rendimiento no está a la par con los otros escenarios que integran nuevas tecnologías, por lo que también puede ser descartado de la elección. Con esto en mente, se puede concluir que el ingreso de tecnologías autónomas en la preparación minera del sector estudiado mejoran los indicadores propuestos en este trabajo, incluso en los escenarios negativos, donde se aumentaron la duración de las actividades en el ciclo. Es correcto llegar a esta conclusión dado que los casos presentan una menor exposición de personal en la construcción del sector, un rendimiento sobre el caso base (cuando el largo de avance es de 4 metros, incluso en los escenarios donde se aumentó el tiempo de ciclo) y VAN superior.

Capítulo 5

5. Conclusiones

En el estudio preliminar realizado, se aprecia que al aplicar tecnologías autónomas en los desarrollos horizontales, aun cuando se obtenga un menor VAN en algunos casos, el tiempo de exposición disminuye y en los casos que el avance es de 4 metros por ciclo, el rendimiento se mantiene igual al caso base, o aumenta. Esto indicaría que al integrar tecnologías autónomas se genera un beneficio al desarrollo de una mina y que afinando los parámetros presentados en este informe, tales como: costos, tiempos de ciclo y exposición, se puede obtener una solución mejorada con respecto a la conveniencia del uso de nuevas tecnologías para desarrollos horizontales.

Al comparar los distintos escenarios planteados, se observa que el caso que presenta, en el global de los parámetros, el mejor resultado es el caso 4 (Tecnología optimizado con avance de 4 metros), pues tiene el menor tiempo de exposición del personal mensual, el tercer mejor rendimiento de avance por mes y además su VAN no difiere en más de un 1% con el caso tecnológico que presenta el mayor valor (81,32 MUS\$, caso 11). Resultado previsible pues es lo esperado que ocurra al integrar nuevas tecnologías, donde se obtienen mejoras en los rendimientos de los procesos, a un mayor costo no exagerado (vale decir, mejoras de 30% en el tiempo de ciclo de las distintas actividades).

Se puede concluir que el ingreso de nuevas tecnologías a la preparación minera disminuye el VAN debido al aumento de la inversión y al incremento de los costos de operación. Sin embargo, al aplicarlas, los rendimientos de avance por mes aumentan y la exposición del personal disminuye, por lo que de este estudio se puede concluir que se recomienda el uso de tecnologías que remuevan al personal de la frente de trabajo en materias de preparación minera.

También se puede concluir, que a pesar de que no se cuenta con la información completa acerca de las nuevas tecnologías (rendimientos, posibles problemas, inversión) que se pueden integrar en el PMP, estas disminuyen la exposición del personal en las frentes de trabajo en la preparación minera de desarrollos horizontales, bajando así el riesgo a los accidentes, uno de los objetivos principales de la minería en Chile.

Considerando todo lo anterior, se propone continuar con un estudio más elaborado con respecto a la integración de tecnologías que automatizan la preparación minera con enfoque en los desarrollos horizontales. Esto implica recopilar más información acerca de los rendimientos de los equipos, afinar el detalle de los costos de operación de estos, además de incorporar la variable inversión requerida para proyectos de esta envergadura.

Se recomienda realizar un estudio que evalúe el impacto de la disminución de la exposición del personal, con el ingreso de tecnologías autónomas, en el VAN del proyecto, de manera más acabada, con información recopilada en terreno de valores de rendimientos de equipo reales, así como también exposición del personal. Esto dado que el costo de la mano de obra puede aumentar, por la necesidad de un personal más

calificado, pero a la vez, la cantidad de personas requeridas para realizar el mismo trabajo disminuye considerablemente con respecto al caso de tecnologías manuales o mecanizadas. Este parámetro, puede influir de manera directa al VAN, con la posibilidad de que este valor mejore, haciendo el proyecto más atractivo.

Capítulo 6

6. Bibliografía

1. Camhi Andrade, J. (2012). *Optimización de los procesos de desarrollo y construcción en minería de block caving*. Título para optar al grado de magister en minería. Universidad de Chile.
2. Valdés Ponce, R. (2009). *Análisis con y sin forzamiento del crecimiento del sector oeste de mina Esmeralda*. Memoria para optar al título de ingeniero civil de minas. Universidad de Chile.
3. García Sandoval, G. (2010). *Optimización del sistema de minado empleando raise boring para reducir los costos en el tajeo 270 de la zona Jimena - CiA minera Raura SA*. Memoria para optar al título de ingeniero de minas. Universidad Nacional de Piura.
4. Codelco División El Teniente, (2015). *Ingeniería Factibilidad Proyecto Extensión Esmeralda Fw Bloque 2*.
5. Codelco División El Teniente, (2015). *Personal expuesto preparación minera CODELCO GOBM/SDI*.
6. Codelco División El Teniente, (2016). *Propuesta de valor de tecnología avanzada para túneles CODELCO GOBM/SDI-ORICA*.

Capítulo 7

7. Anexos

7.1. Calculo de VAN para los distintos casos

			Inversión	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	VAN
Caso 1	Metros	m		2205	2211	1230	0							
	Horas Hombre	hr		33930	34020	18926								
	Costos Preparación	MUS\$	0	6,83	6,85	3,81	0,00							
	Costos Operación	MUS\$	0	1,57	1,52	3,42	10,82	17,84	17,83	17,78	17,78	13,34	-	
	Ingresos	MUS\$	0	-	-	6,93	27,11	44,35	44,03	50,30	51,71	38,25	-	
	Flujo	MUS\$	0,0	-8,4	-8,4	-0,3	16,3	26,5	26,2	32,5	33,9	24,9	0,0	81,1
Caso 2	Metros	m		2923	2587	136	0							
	Horas Hombre	hr		34158	30241	1584								
	Costos Preparación	MUS\$		8,89	7,87	0,41	0,00							
	Costos Operación	MUS\$	0	1,57	1,52	3,42	10,82	17,84	17,83	17,78	17,78	13,34	-	
	Ingresos	MUS\$	0	-	-	6,93	27,11	44,35	44,03	50,30	51,71	38,25	-	
	Flujo	MUS\$	0	-10,5	-9,4	3,1	16,3	26,5	26,2	32,5	33,9	24,9	0,0	81,0
Caso 3	Metros	m		3641	2004	0	0							
	Horas Hombre	hr		34049	18737	0								
	Costos Preparación	MUS\$	0	10,93	6,02	-	0,00							
	Costos Operación	MUS\$	0	1,57	1,52	3,42	10,82	17,84	17,83	17,78	17,78	13,34	-	
	Ingresos	MUS\$	0	-	-	6,93	27,11	44,35	44,03	50,30	51,71	38,25	-	
	Flujo	MUS\$	0,0	-12,5	-7,5	3,5	16,3	26,5	26,2	32,5	33,9	24,9	0,0	81,1
Caso 4	Metros	m		2872	2591	182	0							
	Horas Hombre	hr		5158	4653	327								
	Costos Preparación	MUS\$	3	8,04	7,26	0,51	0,00							
	Costos Operación	MUS\$	0	1,57	1,52	3,42	10,82	17,84	17,83	17,78	17,78	13,34	-	
	Ingresos	MUS\$	0	-	-	6,93	27,11	44,35	44,03	50,30	51,71	38,25	-	
	Flujo	MUS\$	-3,0	-9,6	-8,8	3,0	16,3	26,5	26,2	32,5	33,9	24,9	0,0	79,3
Caso 5	Metros	m		2157	2163	1326	0							
	Horas Hombre	hr		5164	5178	3175								
	Costos Preparación	MUS\$	3	6,06	6,08	3,73	0,00							
	Costos Operación	MUS\$	0	1,57	1,52	3,42	10,82	17,84	17,83	17,78	17,78	13,34	-	
	Ingresos	MUS\$	0	-	-	6,93	27,11	44,35	44,03	50,30	51,71	38,25	-	
	Flujo	MUS\$	-3,0	-7,6	-7,6	-0,2	16,3	26,5	26,2	32,5	33,9	24,9	0,0	79,6
Caso 6	Metros	m		4145	1500	0	0							
	Horas Hombre	hr		7081	2563	0								
	Costos Preparación	MUS\$	3	11,60	4,20	-	0,00							
	Costos Operación	MUS\$	0	1,57	1,52	3,42	10,82	17,84	17,83	17,78	17,78	13,34	-	
	Ingresos	MUS\$	0	-	-	6,93	27,11	44,35	44,03	50,30	51,71	38,25	-	
	Flujo	MUS\$	-3,0	-13,2	-5,7	3,5	16,3	26,5	26,2	32,5	33,9	24,9	0,0	79,0
Caso 7	Metros	m		3114	2531	0	0							
	Horas Hombre	hr		7094	5765	0								
	Costos Preparación	MUS\$	3	8,75	7,11	-	0,00							
	Costos Operación	MUS\$	0	1,57	1,52	3,42	10,82	17,84	17,83	17,78	17,78	13,34	-	

	Ingresos	MUS\$	0	-	-	6,93	27,11	44,35	44,03	50,30	51,71	38,25	-	
	Flujo	MUS\$	-3,0	-10,3	-8,6	3,5	16,3	26,5	26,2	32,5	33,9	24,9	0,0	79,1
Caso 8	Metros	m		2517	2509	619	0							
	Horas Hombre	hr		6931	6911	1706								
	Costos Preparación	MUS\$	3	7,09	7,07	1,74	0,00							
	Costos Operación	MUS\$	0	1,57	1,52	3,42	10,82	17,84	17,83	17,78	17,78	13,34	-	
	Ingresos	MUS\$	0	-	-	6,93	27,11	44,35	44,03	50,30	51,71	38,25	-	
	Flujo	MUS\$	-3,0	-8,7	-8,6	1,8	16,3	26,5	26,2	32,5	33,9	24,9	0,0	79,3
Caso 9	Metros	m		1869	1874	1640	262							
	Horas Hombre	hr		6864	6882	6022	964							
	Costos Preparación	MUS\$	3	5,29	5,30	4,64	0,74							
	Costos Operación	MUS\$	0	1,57	1,52	3,42	10,82	17,84	17,83	17,78	17,78	13,34	-	
	Ingresos	MUS\$	0	-	-	6,93	27,11	44,35	44,03	50,30	51,71	38,25	-	
	Flujo	MUS\$	-3,0	-6,9	-6,8	-1,1	15,6	26,5	26,2	32,5	33,9	24,9	0,0	79,7
Caso 10	Metros	m		2205	2211	1230	0							
	Horas Hombre	hr		6752	6770	3766								
	Costos Preparación	MUS\$	3	6,22	6,24	3,47	0,00							
	Costos Operación	MUS\$	0	1,57	1,52	3,42	10,82	17,84	17,83	17,78	17,78	13,34	-	
	Ingresos	MUS\$	0	-	-	6,93	27,11	44,35	44,03	50,30	51,71	38,25	-	
	Flujo	MUS\$	-3,0	-7,8	-7,8	0,0	16,3	26,5	26,2	32,5	33,9	24,9	0,0	79,5
Caso 11	Metros	m		1653	1658	1655	679							
	Horas Hombre	hr		6751	6768	6757	2776							
	Costos Preparación	MUS\$	3	4,69	4,70	4,70	1,93							
	Costos Operación	MUS\$	0	1,57	1,52	3,42	10,82	17,84	17,83	17,78	17,78	13,34	-	
	Ingresos	MUS\$	0	-	-	6,93	27,11	44,35	44,03	50,30	51,71	38,25	-	
	Flujo	MUS\$	-3,0	-6,3	-6,2	-1,2	14,4	26,5	26,2	32,5	33,9	24,9	0,0	79,8
Caso 12	Metros	m		2133	2138	1374	0							
	Horas Hombre	hr		1600	1604	1031								
	Costos Preparación	MUS\$	3	5,94	5,95	3,83	0,00							
	Costos Operación	MUS\$	0	1,57	1,52	3,42	10,82	17,84	17,83	17,78	17,78	13,34	-	
	Ingresos	MUS\$	0	-	-	6,93	27,11	44,35	44,03	50,30	51,71	38,25	-	
	Flujo	MUS\$	-3,0	-7,5	-7,5	-0,3	16,3	26,5	26,2	32,5	33,9	24,9	0,0	79,7