



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

**IMPLEMENTACIÓN DE METODOLOGÍA DIRECT
BLOCK SCHEDULLING EN PREPARACIÓN MINA PANEL
CAVING EN CORTO PLAZO**

TESÍS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN MINERÍA
CARLOS ANTONIO TOLEDO QUIROZ

PROFESOR GUÍA:
NELSON MORALES VARELA

PROFESOR COGUÍA:
PIERRE NANCEL-PENARD

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MANUEL REYES JARA
JAVIER CORNEJO GÓNZALEZ

SANTIAGO DE CHILE
2021

Resumen

La preparación minera es un eje principal de la minería subterránea, con un enorme efecto en la disponibilidad de infraestructura para la producción y, por lo tanto, un gran impacto en el valor económico de un proyecto, seguridad y continuidad operacional de la faena.

La preparación de la mina involucra varias áreas de ingeniería, desde la planificación de la mina hasta la geomecánica, el suministro, los recursos humanos, entre muchos otros. A pesar de su relevancia, faltan herramientas de optimización para apoyar el proceso de planificación, tanto en la práctica como en la literatura. Esto le dificulta el trabajo al planificador, generando un problema en la validación de los planes, lo que puede tener un impacto importante en su cumplimiento y, por lo tanto, en el costo de oportunidad.

En este trabajo, se propone una metodología y modelo de optimización ya trabajada en minería a cielo abierto (DBS) adaptando dicha metodología para evaluar diferentes secuencias de construcción de obras mineras, simultáneamente para todos los niveles de una mina de panel caving, para un periodo máximo de resolución de dos meses a nivel horario.

La programación directa de bloques (DBS), una técnica que proviene de la planificación minera en minas a cielo abierto, pero se adapta al caso de la preparación de minas subterráneas. Con este método, se pueden analizar diferentes tipos de secuencias de construcción, precedencia entre las actividades de construcción y diferentes escenarios de rendimiento que dependen de las características de la masa rocosa.

Lo anterior se aplica en una mina, en un caso real, que en este caso es un minero que trabaja bajo la metodología de Panel Caving, en la cual se desea planificar un horizonte de 2 meses en forma horaria con todos los niveles en forma simultánea. Los resultados muestran que el plan obtenido cumple con todas las restricciones operativas y, por lo tanto, las técnicas aparecen como una metodología válida para generar planes optimizados de manera automática, por lo tanto, podrían ser utilizados por los planificadores para evaluar diferentes opciones antes de decidir el plan final. Los planes generados en el mejor de los casos no varían respecto a la línea base (Caso Propuesto) hasta un +10% (Caso Pesimista) esto se debe a una serie de factores que son explicados en esta investigación.

Abstract

Mining preparation is a main axis of underground mining, with enormous impact on the availability of infrastructure for production and, therefore, a huge impact in the economic value of a project, but also on its execution and the safety of the operation.

Mine preparation involves several areas of engineering, from mine planning to geomechanics, supply, human resources, among many others. Despite its relevance, optimization tools are lacking to support the planning process, both in practice and in the literature. This makes it difficult for the planner to work, generating a problem in the validation of the plans, which can have a significant impact on their fulfillment and, therefore, on the opportunity cost.

In this work, an optimization methodology and model already worked in open pit mining (DBS) is proposed, adapting this methodology to evaluate different sequences of construction of mining works, simultaneously for all levels of a panel caving mine, for a period maximum resolution of two months at the hourly level.

Direct Block Scheduling (DBS), a technique that comes from mine planning in open pit mines, but is adapted to the case of underground mine preparation. With this method, different types of construction sequences, precedence between construction activities, and different performance scenarios that depend on the characteristics of the rock mass can be analyzed.

The above applies to a mine, in a real case, which in this case is a miner who works under the Panel Caving methodology, in which it is desired to plan a 2-month horizon on an hourly basis with all levels simultaneously. The results show that the plan obtained complies with all operational restrictions and, therefore, the techniques appear as a valid methodology to generate optimized plans automatically, therefore, they could be used by planners to evaluate different options before decide the final plan. The plans generated in the best of cases do not vary with respect to the baseline (Proposed Case) up to + 10% (Pessimistic Case) this is due to a series of factors that are explained in this research.

Es mejor tener buenos amigos y pocos,
que a tener mucho dinero y
estar completamente solo”
(ISMAEL
ERCILLA)

Agradecimientos

En primer debo agradecer de manera muy especial a mi familia mi madre Juana la cual me enseñó que nunca debes rendirte y a mi padre Ricardo el cual me enseñó que las cosas se hacen bien o no se hacen a mi hermano Ricardo que me ayudo y escucho a la distancia También deseo expresar mi agradecimiento al director de esta tesis de magister, Dr. Nelson Morales por la dedicación y apoyo que ha brindado a este trabajo, por el respeto a mis sugerencias e ideas y por la dirección y el rigor que ha facilitado a las mismas. Gracias por la confianza ofrecida desde que llegué a esta facultad. A mi profesor coguía Pierre que fue un faro de conocimiento cuando estaba más perdido. Asimismo, agradezco a mis amigos del Departamento de minería su apoyo personal y humano, especialmente al Luis Álvarez que en los momentos donde quise tirar la esponja él estuvo conmigo para enfrentarlos juntos y a Fedilberto el cual me acompañó en muchas noches de desestreses y siempre fue un amigo leal, Fabiola Alvarado que nos juntamos a charlar en la hora del almuerzo a hablar de la nada y Oscar Naranjo amigos incondicionales Un trabajo de investigación es siempre fruto de ideas, proyectos y esfuerzos previos que corresponden a otras personas. En este caso mi más sincero agradecimiento al señor Gabriel País que fue un halo de conocimiento y datos cuando más se necesitaban y sus palabras de apoyo siempre fueron bien recibidas y apreciadas. Finalmente, gracias a todo DELPHOS LAB en donde aprendí muchas cosas más que solo el tema de tesis, desde juegos, Pokémon GO hasta diferentes metodologías matemáticas.

Pero un trabajo de investigación es también fruto del reconocimiento y del apoyo vital que nos ofrecen las personas que nos estiman, sin el cual no tendría la fuerza y energía que nos anima a crecer como personas y como profesionales.

Gracias a mis amigos de la vida Alexis Acevedo y Juan Muñoz, que siempre me han prestado un gran apoyo moral y humano, necesarios en los momentos difíciles de este trabajo y esta profesión.

Este trabajo fue parcialmente financiado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile (ANID) a través del proyecto "ANID/PIA Fondo Basal AFB180004 (Advanced Mining Technology Center) "

A todos, muchas gracias.

TABLA DE CONTENIDO

Agradecimientos	v
Índice general	¡Error! Marcador no definido.
Índice de tablas	viii
Índice de figuras	ix
Capítulo 1	1
INTRODUCCIÓN.....	1
GENERALIDADES.....	1
DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	3
OBJETIVO	6
ALCANCES	7
ESTRUCTURA DEL TRABAJO	8
Capítulo 2	10
ESTADO DEL ARTE	10
PREPARACIÓN MINA	12
MODELOS DE PROGRAMACIÓN CIELO ABIERTO.....	43
MODELOS DE PROGRAMACIÓN MINERÍA SUBTERRÁNEA	47
Capítulo 3	52
METODOLOGÍA.....	52
Capítulo 4	58
CASO DE ESTUDIO.....	58
Plan Base.....	58
Implementación DBS.....	63
Capítulo 5	64

PAPER	64
Resumen	64
Capítulo 6	66
ANALISIS DE SENSIBILIDAD	66
Desarrollo análisis de sensibilidad	66
Capítulo 7	74
CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN	74
Análisis sobre el estudio de caso	74
CONCLUSIONES	75
TRABAJOS FUTUROS Y RECOMENDACIONES DE ESTU- DIO DE LA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN.....	77
Referencias	79
Bibliografía.....	81
Abstract	1

Índice de tablas

1.1. Reporte Producción Codelco ,2017-2018.....	9
4.1. Plan de Producción Anual- Nivel de Producción y Nivel de Hundimiento.....	63
4.2. Plan de Producción Anual-Nivelde Transporte.....	64
4.3. Plan de Producción Anual-Nivel de Acarreo.....	64
4.4. Plan de Producción Anual-Subnivelde Ventilación.....	65
4.5. Plan de Producción Bimensual-Nivel de Producción y Nivel de Hundimiento	66
4.6. Plan de Producción Bimensual -Nivelde Transporte	66
4.7. Plan de Producción Bimensual -Nivelde Acarreo	67
4.8. Plan de Producción Bimensual-Subnivel de Ventilación.....	67
5.1. Tipo de Modelos.....	69
6.1. Tiempo Actividades Unitarias-Original.....	72
6.2. Tiempo Actividades Unitarias- 1 Hora de Ventilación.....	73
6.3. Tiempo Actividades Unitarias-+10 %	74
6.4. Tiempo Actividades Unitarias-+20 %	75
6.5. Tiempo Actividades Unitarias-10%.....	76
6.6. Resumen Sensibilidad entre tipode actividades	77

Índice de figuras

2.1. Nuevo Nivel El Teniente, Codelco.....	18
2.2. Sliding Window	20
2.3. Leers and Grossman.....	21
2.4. Diagrama proceso mina	22
2.5. Historia del DBS.Fuente Elaboración propia.....	26
2.6. Desarrollo Horizontal, Codelco	30
2.7. Raise Boring Machine.Fuente Herrenknecht.....	32
2.8. Blind Holer 52R Fuente.Epiroc.....	33
2.9. Blindaje de piques.Fuente www.acunaehijos.cl	34
2.10. Etapas Punto de Extracción.Elaboración Propia.....	35
2.11. Fortificación de un Punto de Extracción	36
2.12. Construcción de Muros de Confinamiento	37
2.13. Realización de perforación.....	38
2.14. Chimenea de emergencia.....	39
2.15. UCL.....	40
2.16. Hidrofracturamiento.....	40
2.17. Perforación radial	41
2.18. Socavación.....	42
2.19. Zanjas.....	43
2.20. Desquinche y fortificación de pique	44
2.21. Martillo Reductor	45
2.22. Ventilación Mina.....	46
2.23. Ferrocarril El Teniente.....	47

2.24. Buzón.....	49
2.25. Diagrama de Actividades Unitarias. Fuente: Elaboración propia.	50
2.26. Perforadora Frontal.Fuente Epiroc.....	51
2.27. Cargador de ANFO.Fuente GGH Chile	52
2.28. Sistema de ventilación túnel. Fuente mch.cl.....	53
2.29. Acuñadura.Fuente induambiente.com.....	54
2.30. LHD.Fuente Epiroc.....	54
2.31. Bolter.Fuente macleanengineering	57
2.32. Malla Electrosoldada.Fuente jks.cl	57
2.33. robot-Shotcrete.Fuente amv.cl	58
3.1. Imagen Resumen Metodología. Fuente Elaboración propia.	60
6.1. Análisis de actividades.....	71
6.2. Grafica Comparativa-Sensibilidad Ventilación.....	72
6.3. Gráfico comparativo +10 %.....	73
6.4. Tiempo Variación +20 %.....	75
6.5. Tiempo Variación -20 %	76
6.6. Variación Vertical	77

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

GENERALIDADES

La preparación minera es una disciplina que tiene la función de gestionar las actividades relacionadas con el desarrollo y construcción de infraestructura de mina subterránea, a través del cumplimiento de un programa de preparación que debe sustentar a las áreas productivas para incorporar unidades de producción necesarias para cumplir con el plan minero de producción, con una visión sistémica que considere tanto las diferentes fases de ejecución de un proyecto (ingeniería de detalle, adquisiciones, construcción y puesta en marcha), como el alcance, plazo, costo y satisfacción del cliente, permitiendo asegurar los resultados proyectados, optimizando los recursos puestos a disposición del proyecto y alcanzar los objetivos establecidos, contribuyendo a maximizar en el largo plazo el valor económico de la división y de la corporación (Camhi, 2012). Existen varios ejemplos de faenas en las cuales se trabaja por métodos de hundimiento el ejemplo más conocido es El Teniente. El cual se explota mediante panel caving, proyecta alcanzar una producción cercana a las 465.040 toneladas de cobre fino (Reporte Producción Codelco ,2017-2018).

Para realizar esta producción El Teniente posee una gran cantidad de labores verticales, horizontales, obrasciviles, etc. las cuales año a año van aumentando.

Miles de Toneladas métricas finas Anuales	Cobre		Molibdeno	
	2018	2019	2018	2019
Chuquicamata	320.7	385.3	12.1	11.4
Radomiro Tomic	332.6	266.4	0.6	0.5
Gabriela Mistral	107.2	104	-	-
Ministro Hales	195.4	151.8	-	-
Salvador	60.8	50.5	0.9	0.7
Andina	195.5	170.2	3.4	2
El Teniente	465	459.7	6.7	7.5
Codelco	1677.5	1588.2	24	22.3
Anglo American Sur	84.4	77.8	-	-
Total	1806.3	1706	24	22.3

Tabla 1. Reporte Producción Codelco,2017-2018

En este sentido la labor de preparación minera es de una importancia y sensibilidad muy relevante ya que, si esta llega a retrasarse conlleva desde un retraso en la producción hasta la paralización y pérdida de un sector productivo (ocasionado por los esfuerzos del macizo rocoso). Esto genera una oportunidad para mejorar el proceso de agendamiento para generar planes los cuales cumplan lo requerido, y con ello generar la producción deseada y no caer en pérdidas ya sean económicas o de tiempo.

En resumen, la planificación minera de la preparación minera es una parte importante de la industria en la cual se deben tener en cuenta una serie de factores como por ejemplo una gestión organizada, la comprensión técnica del diseño bajo un sistema congruente y balanceado, y las distintas variantes para un óptimo agendamiento. Todas ellas de gran relevancia para un proyecto exitoso, sin mencionar las necesidades y limitaciones temporales por cumplimiento de hitos. Con lo cual se provoca que la ejecución exitosa de un proyecto sea, en el mejor de los casos, un trabajo arduo y complejo. Frente a lo anterior, una planificación desagregada en temas de tiempo surge como alternativa para poder abordar el problema minero de una manera más sencilla y auditable.

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La preparación mina es un conjunto de actividades que conlleva gran importancia en todos los aspectos operacionales de cualquier mina subterránea. En particular, en minería de tipo caving aplicable a cuerpos de baja ley conlleva a construir más de 1.000 kilómetros de desarrollos horizontales y verticales, entre túneles de diversa dimensión, piques y chimeneas de ventilación, solo para una mina (División Chuquicamata, Codelco, Chile.), lo cual es una cantidad muy grande para solo una faena, esto en comparación a otros métodos de explotación subterráneos (autosoportados). La mayor parte del presupuesto del proyecto (más del 40 %) está destinado a este ítem, específicamente a los túneles de acceso y de transporte de mineral, que son parte de las Obras (Prontuario Codelco 2011).

Las minas actualmente han aumentado sus tasas de desarrollo de labores o preparación minera para agendar las labores comprometidos. Un ejemplo de esto es la cita del plantel ejecutivo de Codelco en el 2011.

“en los próximos cinco años, estos dos proyectos de Codelco (Nuevo Nivel El Teniente y Chuquicamata Subterránea), que son los más grandes del mundo en minería subterránea, tienen la tarea de ejecutar más de 1.200 kilómetros de túneles, entre desarrollos horizontales y verticales, de manera que se constituyen como modelos para la industria minera mundial”. (Reportaje: Construirá Codelco en los próximos 5 años”. Prensa Codelco, 2012).

Lo que nos da a entender que se necesitan generar planes de gran dificultad. Planes con gran cantidad de actividades a realizar y variables que afectan al desarrollo de dichas actividades lo que conlleva planes con un nivel de complejidad alta.

Tal preocupación se encuentra documentada ya en la literatura reiteradamente durante la última década, como, por ejemplo:

- W. Rocher, E. Rubio and N. Morales, Secuenciamiento de preparación y desarrollo minero en faenas subterráneas. (2012): Dan a conocer un modelo el cual tiene como función objetivo la maximización del valor presente neto de un conjunto de actividades, sujeto a:
 - Restricciones operacionales (capacidad, disponibilidad y rendimiento intrínseco de equipos)
 - Restricciones de precedencias físicas y operacionales.
 - Restricciones de procesamiento en cuanto a la capacidad máxima y mínima admisible para tratar mineral.
 - Restricciones de recursos disponibles en cada periodo.

La implementación final resulta en una herramienta llamada UDESS que ha sido presentada en diversas publicaciones anteriormente.

- Yashar, P., Hooman, A. N. A multi-step approach for block-cave production scheduling optimization. 2013 International Journal of Mining Science and Technology 23(5):739–750: El objetivo de este documento es desarrollar un marco de optimización práctico para la programación de la producción de operaciones de Block Caving. Para superar el problema del tamaño de los modelos de programación matemática y generar un cronograma práctico con buenos resultados y robusto, se presenta un método de varios pasos para la planificación de la producción a largo plazo del Block Caving. En donde se planifica la estrategia y secuencia de extracción de diferentes puntos de extracción dentro de una mina. Se utiliza una formulación de programación lineal de enteros mixtos (MILP) para cada paso. Se presenta la aplicación y comparación de los modelos para la programación de la producción utilizando 298 puntos de extracción en 15 períodos.

La alternativa que hoy toma la industria de realizar dicha conciliación está principalmente centrada en etapas de operación. Es por esto por lo que se busca generar e implementar metodologías usadas en otras áreas o procesos, y así generar un plan en forma horaria en operaciones subterráneas respetando las precedencias y restricciones habituales. (W. Roger, 2011)

Aun destacando el párrafo anterior aún existe una brecha importante principalmente entre lo planificado y el resultado final de la ejecución de los planes minero, ya que dichos planes están diseñados para tiempos (meses, años, decenios) los cuales se ven afectados por diferentes fuentes de incertidumbre. Las diferencias que se pueden originar producto de lo anterior se ven reflejados principalmente en:

- Ingresos
- Costos
- Reservas Mineras
- Temas logísticos y operacionales.

Dicho lo anterior, la variación de los planes presenta un impacto sobre la inversión o retribuciones futuras que se espera generar. Desafortunadamente, la realización de los planes extremadamente detallados y a un nivel de tiempo pequeño es una tarea difícil y consume mucho tiempo. En efecto, los softwares comerciales y prácticas actuales están orientadas a la construcción de secuenciamientos y planes de producción deterministas y de largo plazo, que están optimizados para un conjunto de parámetros e información dada.

Debido a la poca resolución de los planes de desarrollo de preparación minera y obras civiles en un proyecto minero, se da por entendido que aún no se ha desarrollado o aún no se utiliza una herramienta cuya metodología sea realmente útil e importante para poder aportar resolución a un plan de preparación minera. En efecto aquellos proyectos que involucran algún grado de flexibilidad futura no pueden ser evaluados correctamente con las técnicas tradicionales actuales de planificación.

En oposición al problema descrito, la metodología presentada en esta tesis permite generar una cantidad de planes muy discretizados (horario) para hacerle frente a la problemática anteriormente mencionada, al momento de la construcción del plan, y no solamente en un análisis a posteriori.

El problema que abordar es analizar la factibilidad de cambio de secuencia de planes productivos en una mina con varios sectores productivos. Como consecuencia se espera contemplar posibles cambios en los inicios y tasas de producción, todo lo anterior en un intervalo de tiempo dado en forma horario, de modo tal que se generen planes en forma horaria y los cuales posean sean modificables de manera fácil en un futuro. La metodología, como tal, presentada en esta tesis permite introducir diferentes metodologías, para generar diferentes planes de trabajo. Lo anterior se llevará a cabo en un estudio de caso con datos de un yacimiento trabajo por panel Caving el cual está ubicado en Chile. Por lo cual se busca resolver o implementar una metodología que abarque diferentes formas de planificar planes de preparación mina considerando diferentes escenarios en un corto tiempo de cómputo

OBJETIVO

Objetivo principal

Desarrollar una metodología de generación de planes de preparación minera en forma horaria, la cual integre todas las labores y parámetros permitiendo de esta forma poder establecer planes con mayor valor y más robustos mediante incorporación de flexibilidades

Objetivos secundarios

1. Definir diferentes estrategias de agendamiento para la programación de actividades de preparación minera de Panel caving en función de los objetivos de corto plazo de la preparación minera.
2. Generar varios planes con diferentes capacidades de recursos, considerando una línea base y varias alternativas de plan que sean robustos
3. Validar el modelo sobre instancias controladas aplicando la metodología a un caso real y con ello verificar la similitud de los planes y la variación de los mismos respecto al plan real.

ALCANCES

1. Se propone una metodología la cual se enfoca en la programación de actividades de preparación en Panel caving
2. Se utilizará un agendamiento en forma horaria con un alcance máximo de 2 meses.
3. Dentro de las labores que están dentro de la investigación son:
 - Labores horizontales
 - Labores Verticales
 - Civiles
 - Drenaje
 - Preacondicionamiento
 - Incorporación de bateas
4. En esta investigación se considera restricciones por disponibilidad de equipos dado por el número de equipos por operación unitaria, sin embargo, no realiza la asignación de los equipos sobre las actividades agendadas en los frentes.
5. Se utilizará un programagenerado por herramientas de agendamiento a largo plazo, para determinar el área a trabajar.
6. Se utilizarán datos de una faena de panel Caving, los cuales abarcan un tiempo de 2 meses.
7. Se aplican valores fijos para el tiempo de operación de cada equipo
8. No se generan planes desagregados, se trabajan con todos los niveles de una faena Panel Caving (Preparación, UCL, ventilación, Transporte) en conjunto.

ESTRUCTURA DEL TRABAJO

El trabajo será presentado bajo la siguiente estructura.

Resumen

Resumen de la información entregada. Un resumen es una declaración independiente, breve y poderosa que describe la investigación. Dicho resumen describe todas las variables y parámetros usados en esta investigación y da una pequeña introducción al tema central.

Introducción

La introducción es una sección inicial cuyo propósito principal es contextualizar el texto fuente o reseñado y que está expuesto a continuación, en general en forma de cuerpo o desarrollo del tema, y posteriormente conclusiones. En este caso damos una introducción la cual es una idea generalizada de la preparación de las labores de desarrollo de una mina a Panel Caving, también se explica los antecedentes de la programación de actividades de preparación mina, para generar una idea sobre el contenido del texto, antes de comenzar su lectura propiamente dicha.

Estado del Arte

El estado del arte es una compilación de resultado de otras investigaciones que sobre la preparación minera en Block Panel Caving además se estudiarán diferentes casos de optimización no solo en preparación si no también producción. Este estudio se realiza para generar una línea base y un análisis comparativo de todas las investigaciones que se han realizado en el tema.

Metodología

Se analizan y explican las etapas que se realizan para generar esta investigación desde la acumulación de información, generación de ideas, generación del modelo matemático, pruebas, etc.

Caso de Estudio

Capítulo en donde se aplican todas las metodologías expuestas en este trabajo, definiendo y explicando cómo se realizó la modelación, restricciones y resultados obtenidos y su respectivo análisis

Paper

Capitulo donde se da a conocer un resumen del paper presentado en MASSMIN 2020 titulado "An application of Direct Block Scheduling for short-term construction scheduling in panel caving" el cual esta adjuntado en forma íntegra como anexo.

Conclusiones, Discusión y recomendaciones

Capitulo el cual se discuten los resultados se comparan con otras metodologías y se genera una idea final de cómo es el funcionamiento del modelo, se generan las recomendaciones para posteriores estudios.

Capítulo 2

ESTADO DEL ARTE

Block/Panel Caving

Estos métodos de explotación corresponden a un tipo de método basado en el principio de caída gravitacional y quiebre de mineral estos métodos son conocidos como métodos de hundimiento. Esta caída se produce gracias a la realización de un corte basal lo suficientemente grande para que dicho material fluya con facilidad, posterior a esto el mineral es extraído a través de un sistema de embudos o zanjias recolectoras (Clase Métodos de Explotación, MI57E, Universidad de Chile, 2015). El vacío generado por la extracción de este material de la base es rellenado por la caída de material superior por acción de la gravedad, que sumado al proceso de fricción dado por el roce durante su descenso definen el tamaño del mineral en el punto de extracción (Vergara, 2014).

Una vez extraída el mineral fragmentado este se traslada a través de LHD (Load Haul Dumper) u otro método de transporte, hasta un pique de traspaso el que tiene como fin guiar el mineral ya sea a un nivel de transporte o a un nivel de reducción. Para el desarrollo de este método se cuenta con los siguientes niveles donde se producen distintas tareas que permiten la explotación y extracción de mineral, estos son:

- Nivel de Hundimiento: Nivel donde se realiza la socavación del mineral mediante PT (perforación y tronadura).
- Nivel de Producción: Es el nivel donde se extrae el mineral desde los puntos de extracción y transportado a los piques.
- Nivel de Ventilación: En este nivel se realiza las labores que permite el ingreso de aire fresco y la descarga del viciado desde los niveles de producción.
- Nivel de Transporte: Aquí se desarrollan las operaciones de carguío y transporte de mineral proveniente del nivel de acarreo o del nivel de producción directamente dicho nivel conecta el mineral con la planta de tratamiento.
- Nivel de Reducción Secundaria: Nivel donde se realiza la reducción de tamaño del mineral mediante martillos picadores.

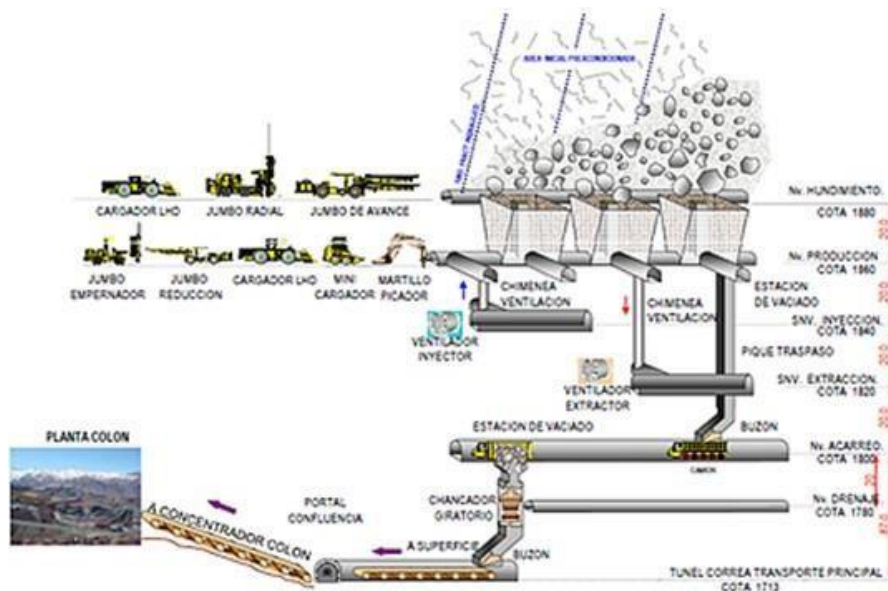


Figura 2.1: Nuevo Nivel El Teniente, Codelco

El método de explotación en el cual se basa esta tesis es el Panel Caving el cual tiene componentes y estructura similar del método predecesor el Block Caving, las cuales se basan principalmente en el tamaño del área a incorporar y la continuidad de explotación de los bloques ya que en el block caving la incorporación no es dinámica. Mientras que su versión más moderna (panel caving) la incorporación se da por bloques pequeños y de manera dinámica reduciendo así muchos problemas como la dilución, problemas de granulometría asociada a mineral primario.

PREPARACIÓN MINA

Definición

La Preparación de Minera es un área que tiene la responsabilidad de gestionar las actividades relacionadas con el desarrollo y construcción de infraestructura de mina subterránea, a través del cumplimiento del Programa de Preparación que debe sustentar las áreas a incorporar necesarias para cumplir con el Plan Minero de Producción.

Métodos Constructivos de Infraestructura para la Preparación de Minas

Preparación mina subterránea permite la incorporación de área, dejando el mineral disponible para extraerlo, en este sentido juega un papel fundamental para el inicio y el crecimiento de la operación de un sector determinado, cumplir con los proyectos de preparación minera asegura la continuidad operacional de los procesos de extracción de mineral (Music, 2007) En general la preparación, sigue una estructura

determinada la cual esta generada por el mandante y da el orden inicial a las obras del plan. Para la construcción de esta infraestructura se deben habilitar instalaciones provisorias como por ejemplo oficinas, bodegas y talleres que permitan la correcta supervisión, operación y mantención de los trabajos involucrados.

Desarrollos Horizontales

Es práctica aceptada en la industria, realizar los Desarrollos Horizontales con perforación tronadura debido a las condiciones del entorno y las ventajas que presenta respecto de otras técnicas (Tuneladora -Tunnel boring machine). El ciclo comienza con la perforación mediante equipos mecanizados (jumbos).



Figura 2.6: Desarrollo Horizontal, Codelco

Tras la tronadura y ventilación de la frente, la acañadura de las frentes se realiza manualmente desde un elevador hidráulico o con equipos acañadoras para evitar la exposición de caída de rocas a trabajadores. Luego un equipo LHD se encarga de transportar la marina hacia los puntos de descarga. Terminado esto, la fortificación de la galería se ejecuta con perno, malla y shotcrete, según el grado de estabilidad requerido.

Desarrollo Vertical

Según las ubicaciones de los desarrollos verticales y los diámetros de perforación, en una mina Panel Caving se utilizan dos sistemas, uno es la perforación Raise Borer y el otro corresponde al Sistema Blind Hole.

Raise Boring

Raise Boring constituye un sistema de construcción de labores verticales de hasta 2000 m de profundidad. Consiste principalmente en la utilización de una máquina electrohidráulica en la cual la rotación se logra a través de un motor eléctrico y el empuje del equipo se realiza a través de bombas hidráulicas que accionan cilindros hidráulicos. Se trata de un equipo de perforación que se instala por encima del terreno. Se taladra una perforación piloto, con un ángulo que puede ser de hasta 45°. Se perfora hasta llegar al túnel o caverna ya existente. Posteriormente se retira el tricono y se fija un escariador a la sarta de perforación, que amplía la perforación hacia arriba.



Figura 2.7: Raise Boring Machine. Fuente Herrenknecht

Sistema Blind Hole

El método de construcción de chimeneas Blind Hole, consiste en la utilización de una máquina electrohidráulica para las excavaciones de chimeneas en forma ascendente (Autio Kirkkomaeki, 1996) En esta metodología el equipo se instala en el nivel inferior y la operación consiste en perforar el tiro guía 60 centímetros adelantado al escariador, que va excavando a sección completa, posteriormente, en forma solidaria. El material excavado cae por gravedad al nivel de la máquina y será guiado por un colector para prevenir riesgos.



Figura 2.8: Blind Holer 52R Fuente.Epiroc

Blindaje de Piques

Esta actividad, corresponde a una obra complementaria a la perforación o construcción de piques, para esta actividad se utiliza la misma infraestructura utilizada para el desquinche del pique. Se realiza limpieza alrededor del pique con el objetivo de evitar caídas de materiales al pique.



Figura 2.9: Blindaje de piques. Fuente www.acunaehijos.cl

Obras Mineras

Las Excavaciones Mineras o también llamadas Obras Mineras, corresponden a los desarrollos horizontales y verticales que se deben realizar en todos los niveles de la faena. Esta categoría incluye la fortificación (perno, malla y shotcrete), habilitación de los sectores y la estabilización de sectores.

Obras Civiles

Las Obras Civiles son las obras que habilitan otras obras que sirven como soporte de seguridad, o almacenamientos de recursos. Algunos ejemplos de estas actividades son las carpetas de rodado y los muros de confinamiento (éste último es una fortificación definitiva de una zona en producción).

Puntos de Extracción

Existen principalmente dos tipos de construcción de puntos de extracción: marcos de acero concretados y bóvedas de hormigón armado. En ambas metodologías, la calle zanja debe estar conectada. En la primera metodología, se comienza con el desquinche en el piso para nivelar, y luego, se instala un emplantillado de

hormigón en el piso. Posteriormente, se instalan los marcos de acero que se conectan al piso con pernos y tuercas, y a las paredes de la zanja. Finalmente, se realiza el vaciado de hormigón alrededor de las armaduras (Vásquez, 2018)

Construcción de Puntos de Extracción

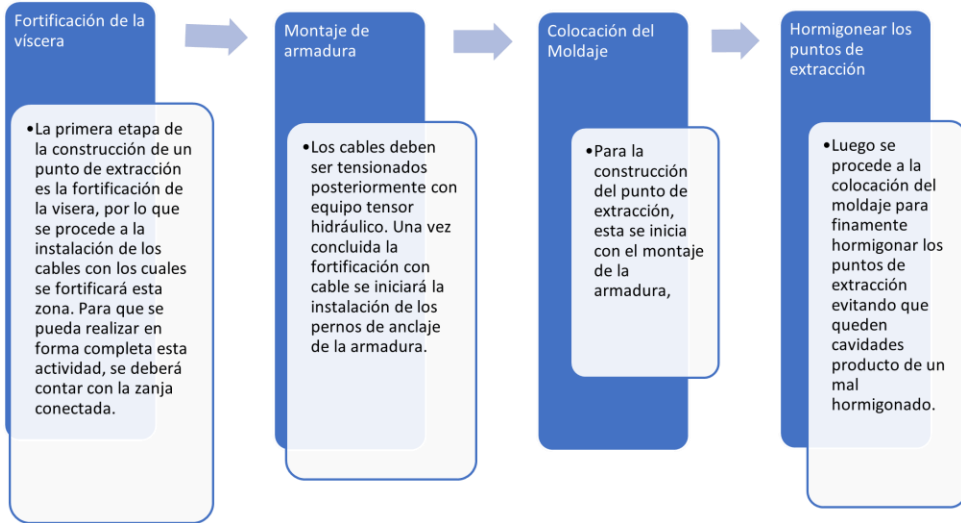


Figura 2.10: Etapas Punto de Extracción. Elaboración Propia.

Construcción de viseras de puntos de extracción

Las vísceras corresponden a roca natural compactada con cables de acero, ubicada entre el primer marco y la batea. La longitud de la visera es aproximadamente de 1 metro. En caso de que la visera se dañe, la roca impacta en el primer marco y produciendo daño por socavación, esto trae como consecuencia que las rocas caigan hasta la galería lo que daña las carpetas de rodado. La actividad de reparación de este evento es la construcción de consolas de hormigón o también llamadas “viseras falsas”, ubicadas en el primer marco. Su función es disminuir el área socavada, a modo de que el flujo de mineral se reduzca y no caiga hasta la galería.

Construcción de brocal de punto de vaciado

Se le conoce como brocal a la parte superior (al interior) del sistema de traspaso

Rotura de chiflón de punto de vaciado

Labor de sección mayor construida en un plano inclinado. Se utiliza para conducir caudales de aire limpio y evacuar la producción.



Figura 2.11: Fortificación de un Punto de Extracción

Construcción de Muros de Confinamiento

Los muros de confinamiento corresponden a los elementos de la fortificación definitiva en galerías de niveles de producción. Estos elementos estructurales, además cumplen una función de ordenamiento de las cajas logrando una geometría estricta que facilita la operación por parte del conductor de una pala. La primera actividad que se realiza en la zona donde se instalarán los muros de confinamiento es un levantamiento topográfico con la finalidad de determinar si se requieren desquinches. Realizado el levantamiento y ejecutado los desquinches si son necesarios, se continúa con la perforación para cables y para pernos de anclajes de soporte de armaduras. Para esta actividad se utiliza el mismo jumbo utilizado para la fortificación de las vísceras de los puntos de extracción. Luego se continúa con la instalación de cables y de los pernos de anclaje de soporte de armadura, para posteriormente con la instalación de la armadura misma y con el moldaje necesario en toda la extensión del muro.



Figura 2.12: Construcción de Muros de Confinamiento

Carpeta de Rodado

Las carpetas de rodado son labores las cuales habilitan el piso donde transitan diferentes equipos (LHD, Jumbos, etc.) tanto en la calle de producción como en el punto de extracción. Para la construcción, se realiza:

1. el levantamiento topográfico
2. escarpe y limpieza de piso
3. luego se instala el Hormigón de Relleno (emplantillado).
4. colocación de la Carpeta de Rodado.

Fortificación de Intersección Calle/Zanja y Pilares

La fortificación de la Intersección de la Calle y Zanja, y los pilares son obras civiles que refuerzan dichas zonas con cables de acero.

Tiros de drenaje

Perforaciones las cuales se realizan con el objetivo de reducir la cantidad de agua de una labor o sector, o para encausar el agua de los diferentes niveles

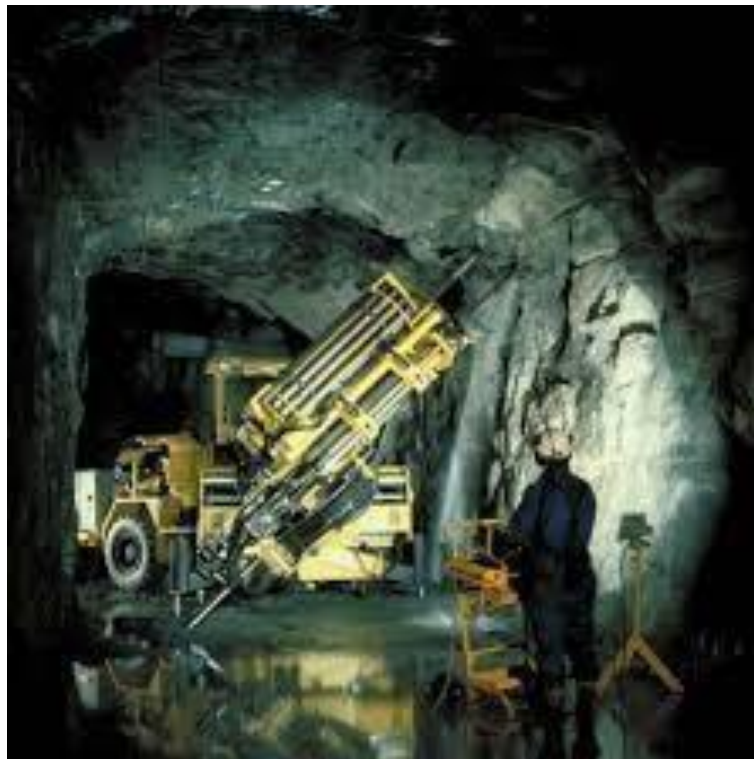


Figura 2.13: Realización de perforación

Construcción de chimeneas de emergencia

Labor vertical entre dos galerías, excavada en forma ascendente la cual se utilizan como medio de evacuación ante cualquier emergencia



Figura 2.14: Chimenea de emergencia

Perforación preacondicionamiento

Perforaciones que tienen como finalidad la intervención de un macizo rocoso para modificar su estructura antes de su explotación, degradando su calidad geotécnica, con el fin de mejorar su condición de explotación, en cuanto a: hundibilidad, fragmentación, sismicidad y condición de esfuerzos (Ferreira, 2019)

Perforación de pozos cave back y especiales

Tiros los cuales tienen como finalidad mejorar el hundimiento y socavación

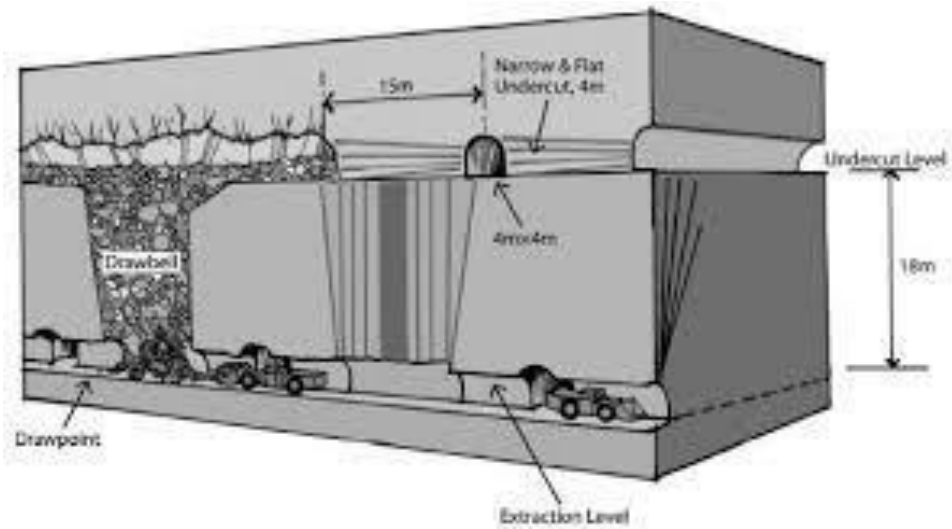


Figura 2.15: UCL

Hidrofracturamiento

Tiro el cual ante la inyección de un fluido a alta presión en vetas para ampliar fracturas existentes y crear otras nuevas.



Figura 2.16: Hidrofracturamiento

Perforación radial

Esta es una perforación de tipo radial que consiste en introducir pernos de anclaje al techo y paredes de la labor, con el objetivo de sostener galerías y evitar desplomes. La longitud y segmentación (distancia) de los pernos de anclaje dependerá de las recomendaciones geomecánicas con relación a la superficie que se trabaja. Esta tarea suele acompañarse de mallas contenedoras que van sujetadas a los mismos pernos. Para realizar este tipo de perforación se utilizan equipos boltecs con sus respectivas barras, coplas y bits.



Figura 2.17: Perforación radial

Socavación

La socavación, es la metodología utilizada para inducir el inicio del hundimiento del cuerpo mineralizado en la minería de caving la que se lleva a cabo mediante un corte basal al bloque mineralizado a explotar, lo que por efecto de la gravedad da inicio al hundimiento del bloque o panel. (Evaluación de la altura de socavación en la productividad de la minería de Block/Panel Caving

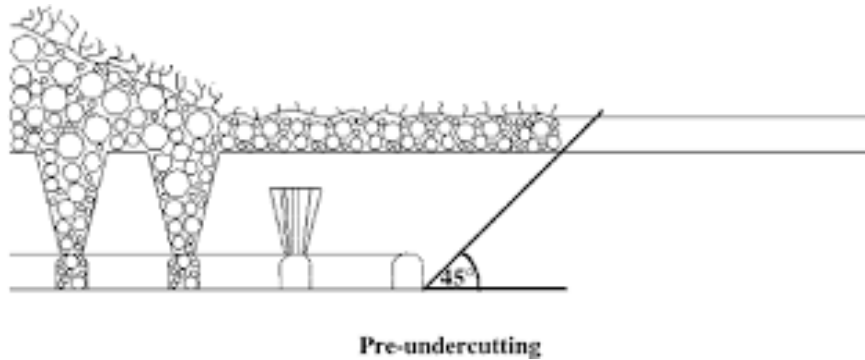


Figura 2.18: Socavación

Perforación de zanjas

Perforación de zanjas de recolección esto se realiza a través de perforación y tronadura

Voladura de zanjas

Abrir la zanja para su posterior habilitación

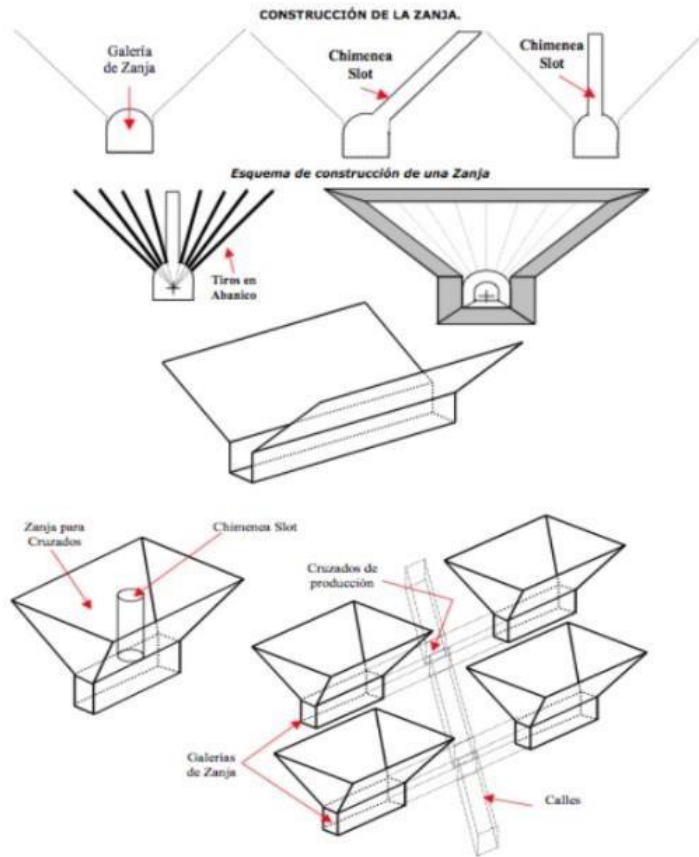


Figura 2.19: Zanjas

Desquinche y fortificación de pique

Desquinchar es trabajo realizado en forma manual mediante el empleo del martillo neumático, y que sirve para ampliar una sección o lugar y fortificar es la implementación El sistema de fortificación asegura a los equipos y a los trabajadores de la minería subterránea, evitando la caída de rocas desde el techo de las galerías o de sus cajas o costados.



Figura 2.20: Desquinche y fortificación de pique

Construcción base martillo

Habilitar el espacio físico para el posicionamiento de un martillo de reducción de granulometría

Instalación tele comando martillo

Habilitación de tele comando martillo



Figura 2.21: Martillo Reductor

Construcción de Red de agua y aire

Instalación, montaje y habilitación de cañerías ya sean de aguas o aire para la utilización del recurso

Construcción sala de Ventiladores

Habilitar el espacio físico para la colocación e instalación de ventiladores

Montaje de Ventiladores

Instalación de y montaje de ventiladores

Habilitación de Ventiladores

Hacer los cambios necesarios para que los ventiladores cumplan la función que desempeña habitualmente.



Figura 2.22: Ventilación Mina

Construcción de cunetas de drenaje

Construcción de cunetas paralelas a la pared de la galería y tienen como finalidad encausar las aguas procedentes de interior mina y con ellos transportarlas para su aprovechamiento o liberación.

Construcción y Habilitación sistemas de humidificación

Equipos los cuales le dan cualidades de humedad y temperatura al aire para que cumpla parámetros requeridos por los trabajadores.

Construcción Vía Férrea

Construcción y habilitación de la vía férrea e instalación del piso para la posterior utilización de un trolley



Figura 2.23: Ferrocarril El Teniente

Buzón

Los buzones corresponden a sistemas de carguío estacionarios que se ubican en el extremo inferior de las chimeneas. Reemplazan al sistema tradicional de carguío mediante cargadores frontales, permitiendo obtener:

1. Menor tiempo de carguío
2. Menor costos de operación
3. Menores requerimientos de ventilación y
4. Mayor seguridad en la operación

El control del flujo del material a través de una chimenea se efectúa mediante una válvula de descarga, llamada buzón. Un buzón debe cumplir dos condiciones:

- Permitir el paso del flujo sin obstáculos
- Cumplir con las condiciones de diseño
- El diseño una estrecha relación con las dimensiones de los traspasos, tamaños granulométricos y equipos de carguío y transporte.

Componentes Buzones

Los buzones están compuestos básicamente por:

1. Elementos fijos
2. Elementos móviles y
3. Unidad de fuerza y control

Esencialmente son:

Elementos fijos

- Socucho
- Tolva
- Estructura de soporte

Elementos móviles

- Cortina de cadenas

- Buzón de descarga

Unidad de fuerza y control: Instalaciones requeridas para el accionamiento de los cilindros hidráulicos y en ocasiones ventiladores auxiliares y semaforización.

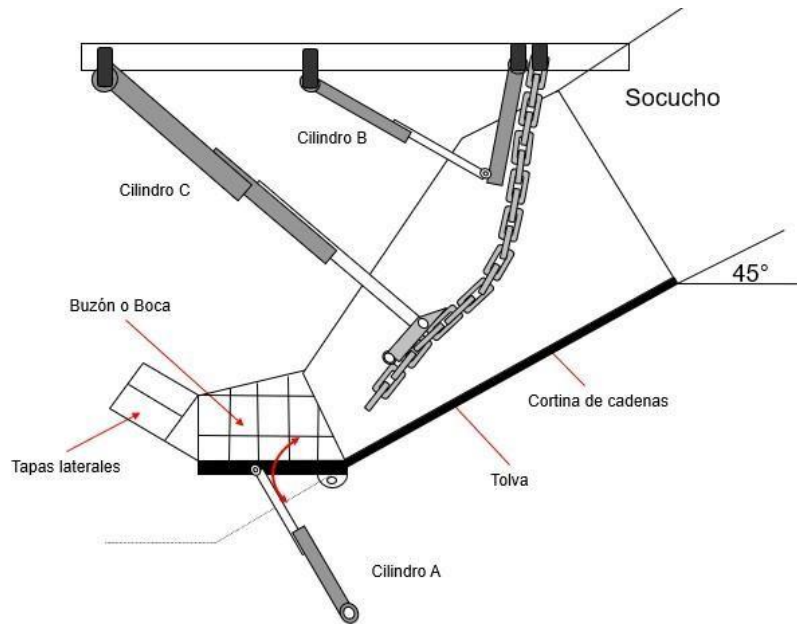


Figura 2.24: Buzón

Actividades Unitarias

Para la construcción de una galería horizontal de cualquier dimensión se requiere un conjunto de operaciones denominadas ciclo de desarrollo las cuales son inspeccionadas desde el inicio hasta el final, y dicha inspección autoriza la realización de nuevos avances.

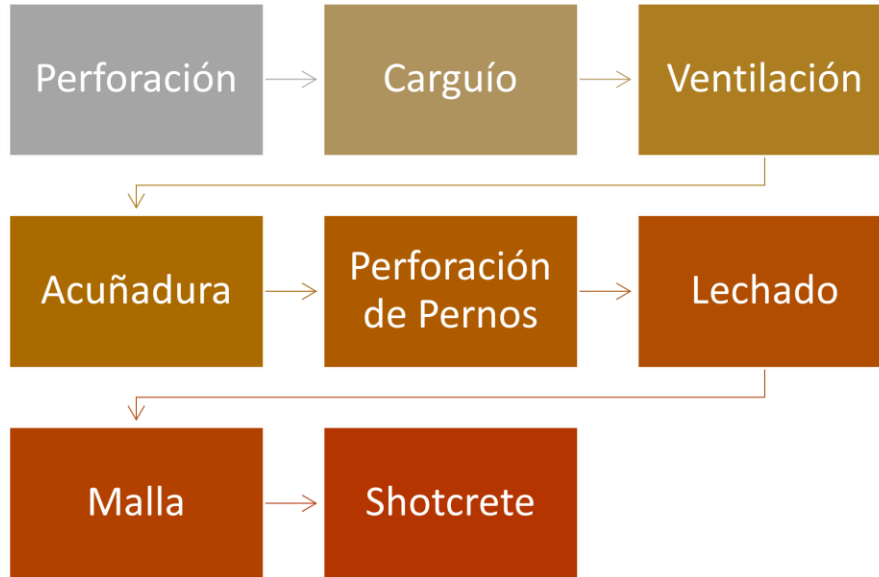


Figura 2.25: Diagrama de Actividades Unitarias. Fuente: Elaboración propia.

Perforación de frente

La operación comienza con la identificación de los sectores a trabajar en el periodo de tiempo determinado, con ellos, ingeniería diseña las mallas. Estas mallas son entregadas a topografía, quienes en terreno marcan las perforaciones. Luego comienza la operación, posicionando la perforadora en cada una de las marcas y perforando hasta completar las perforaciones entregadas por ingeniería. Los equipos utilizados son principalmente jumbos articulados, los cuales optimizan los procesos de perforación. Este tipo de máquinas corresponde a perforadoras roto-percutoras, y se basan en el impacto de una pieza de acero (pistón) a la columna de barras, la que transmite la energía al fondo del barreno, y luego por medio de un elemento final (broca o bit) se aplica a la roca. La rotación se aplica fuera del barreno. Las ventajas de estos equipos son:

1. Son utilizables en todo tipo de rocas
2. Su mantenimiento es fácil y rápida
3. Adaptable a gran cantidad de trabajos, frentes y de gran movilidad



Figura 2.26: Perforadora Frontal. Fuente Epiroc

Carguío de Explosivos

Actividad que consta en rellenar las perforaciones realizadas en el proceso anterior ya sea con explosivo a granel o ANFO, el proceso de tronadura consta de varios ítems pasando por el sistema de iniciación, el tipo de primado y el tipo de explosivo utilizado el cual varía por diferentes factores (calidad de la roca,

humedad, cantidad de tiros, etc.) En el carguío mecanizado se utiliza maquinaria (ilustración) el cual es una operación crítica y requiere personal calificado.



Figura 2.27: Cargador de ANFO. Fuente GGH Chile

Ventilación

La ventilación en una mina subterránea es el proceso mediante el cual se hace circular aire por el interior de la mina, la cual tiene como finalidad diluir y eliminar las sustancias tóxicas para generar una atmósfera limpia, segura y respirable para la gente que trabaja dentro de las labores mineras. La ventilación se realiza estableciendo un circuito para la circulación del aire a través de todas las labores. Para ello es indispensable que la mina tenga dos labores de acceso independientes. Respecto a la ventilación de labores horizontales la normativa legal chilena tiene una serie de requerimientos como:

1. Distancia entre manga de ventilación y frente de trabajo.
2. Flujo mínimo de ventilación por HP.
3. Cantidad de Trabajadores.



Figura 2.28: Sistema de ventilación túnel. Fuente mch.cl

Acuñadura

En una galería, al desarrollarse quedan al descubierto fragmentos o rocas sueltas. La acción de derribar el material que queda inestable y se denomina acuñadura. Además, existen equipos especiales de acuñadura y también jaulas especiales que se levantan y permiten al trabajador acuñar protegido. (SERNAGEOMIN., 2010)



Figura 2.29: Acuñadura. Fuente induambiente.com

Extracción de Marina

Cargar y transportar mineral fragmentado desde la frente hasta un lugar de depositación en algunos casos en un pique de traspaso en otros son galerías que no son usadas, esto es un problema, ya que el material fragmentado en algunos casos perturba el normal tránsito de la maquinaria. Con una incorrecta planificación de labores verticales (pique de traspaso, ventilación, chimeneas, etc.) este problema se ve aminorado.



Figura 2.30: LHD. Fuente Epiroc

Perforación de Pernos

Actividad que genera el espacio para la colocación de pernos de fortificación de forma segura. La perforación de pernos se realiza con equipos Bolters la longitud y tipos de pernos son variantes en los cuales destacan:

Pernos de anclaje mecánico

Un perno de anclaje mecánico consiste en una varilla de acero usualmente de 16 mm de diámetro, con longitudes variables (de 1.5 a 3.6 metros), dotado en su extremo de un anclaje mecánico de expansión que va al fondo de la perforación. Su extremo opuesto puede ser de cabeza forjada o con rosca, en donde va una placa de base que es plana o cóncava y una tuerca, para presionar la roca. Siempre y cuando la varilla no tenga cabeza forjada, se pueden usar varios tipos de placas de acuerdo con las necesidades de instalación requeridas. Este tipo de pernos es relativamente barato. Su acción de reforzamiento de la roca es inmediata después de su instalación. Las siguientes consideraciones son importantes para su utilización: Su uso es limitado a rocas moderadamente duras a duras, masivas, con bloques o estratificada, sin presencia de agua. En rocas muy duras, fracturadas y débiles no son recomendables, debido a que el anclaje podría deslizarse bajo la acción de las cargas. En rocas sometidas a altos esfuerzos tampoco es recomendable. Sólo pueden ser usados para reforzamiento temporal. Si son utilizados para reforzamiento permanente, éstos deben ser protegidos de la corrosión si hay presencia de agua y deben ser postcementados con pasta de cemento entre la varilla y la pared del taladro. Proporcionan una tensión limitada que raramente sobrepasan las 12 TM.

Pernos de varilla cementados o con resina

Consiste en una varilla de fierro o acero, con un extremo biselado, que es confinado dentro de una perforación por medio de cemento (en cartuchos o inyectados), resina (en cartuchos) o resina y cemento. El anclaje entre la varilla y la roca es proporcionado a lo largo de la longitud completa del elemento de refuerzo, por tres mecanismos: adhesión química, fricción y fijación, siendo los dos últimos mecanismos los de mayor importancia, puesto que la eficacia de estos pernos está en función de la adherencia entre el fierro y la roca proporcionada por el cementante, que a su vez cumple una función de protección contra la corrosión, aumentando la vida útil del perno. De acuerdo con esta función, en presencia de agua, particularmente en agua ácida, el agente cementante recomendado será la resina, en condiciones de ausencia de agua será el cemento. Dentro de este tipo de pernos, los de mayor utilización en el país son: la varilla de fierro corrugado, generalmente de 20 mm de diámetro y la barra helicoidal de 22 mm de diámetro, con longitudes variables (de 1.5 a 3.6 metros). La primera es ya un tipo de perno convencional en nuestro medio, la segunda es de reciente introducción en la industria minera. La barra helicoidal, tiene la forma de una rosca continua a lo largo de toda su longitud, esta característica le da múltiples ventajas comparada a la anterior. Entre otros, su mayor diámetro le confiere mayor resistencia y su rosca constante permite el reajuste de la placa contra la pared rocosa. La capacidad de anclaje de las varillas de fierro

corrugado es del orden de 12 TM, mientras que de las barras helicoidales superan las 18 TM.

Split sets

Los split sets, juntamente con los swellex, representan el más reciente desarrollo de técnicas de reforzamiento de roca, ambos trabajan por fricción (resistencia al deslizamiento) a lo largo de toda la longitud del taladro. Aunque los dos trabajan con el mismo principio, tienen diferentes mecanismos de sostenimiento, como veremos más adelante. El Split set, consiste en un tubo ranurado a lo largo de su longitud, uno de los extremos es ahusado y el otro lleva un anillo soldado para mantener la platina. Al ser introducido el perno a presión dentro de un taladro de menor diámetro, se genera una presión radial a lo largo de toda su longitud contra las paredes del taladro, cerrando parcialmente la ranura durante este proceso. La fricción en el contacto con la superficie del taladro y la superficie externa del tubo ranurado constituye el anclaje, el cual se opondrá al movimiento o separación de la roca circundante al perno, logrando así indirectamente una tensión de carga. El diámetro de los tubos ranurados varía de 35 a 46 mm, con longitudes de 1.5 a 3.6 metros. Pueden alcanzar valores de anclaje de 0.3 a 1 toneladas por metro de longitud del perno, dependiendo principalmente del diámetro de la perforación efectuada, longitud de la zona del anclaje y tipo de roca. Las siguientes consideraciones son importantes para su utilización: Los Split sets son utilizados mayormente para reforzamiento temporal, usualmente conformando sistemas combinados de refuerzo en terrenos de calidad regular a mala. En roca intensamente fracturada y débil no es recomendable su uso. Su instalación es simple, sólo se requiere una máquina jackleg o un jumbo. Proporciona acción de refuerzo inmediato después de su instalación y permite una fácil instalación de la malla. El diámetro del taladro es crucial para su eficacia, el diámetro recomendado para los split sets de 39 mm es de 35 a 38 mm, con diámetros más grandes se corre el riesgo de un anclaje deficiente y con diámetros más pequeños es muy difícil introducirlos.

Lechado de Pernos

Colocación de lechada (cementos) para generar un aseguramiento del perno. Dicha labor se realiza con un equipo de levante y en el método estudiado en esta tesis se usa el perno lechado el cual posee una serie de características:

1. Posee un tiempo de fraguado (depende del tipo de cemento que se utilice) antes del tensado del perno
2. Se debe instalar con equipo y trabajadores capacitados



Figura 2.31: Bolter. Fuente macleanengineering

Postura de Malla

Ante la presencia de sectores de alto fracturamiento superficial, el sistema de pernos se debe utilizar con malla electrosoldada de alta resistencia en los techos de las galerías para prevenir accidentes por caídas de trozos de fragmentos de rocas que no son sostenidos por los pernos de anclaje que puedan afectar al personal o a los equipos.



Figura 2.32: Malla Electrosoldada. Fuente jks.cl

Shotcrete

En caso de ser necesario para garantizar la permanencia de labores subterráneas, se debe adicionar hormigón proyectado (shotcrete) al sistema, pernos-malla. Dicha labor se realiza en gran minería por equipos llamados robotshot los cuales son equipos que debe tener un operador capacitado. Dicho hormigón posee características de secado rápido y resistencia al desgaste.



Figura 2.33: robot-Shotcrete.Fuente amv.cl

MODELOS DE PROGRAMACIÓN CIELO ABIERTO.

Lerchs and Grossman

El algoritmo de Lerchs y Grossmann se enfoca en lograr maximizar el beneficio neto en la extracción aplicada a un modelo de bloques, en conjunto con definir los límites del pit final con precisión, donde se procede a abordar el modelo de bloques por secciones transversales en 2D (Lerchs, 1965).

El algoritmo de Lerchs & Grossmann genera la máxima cantidad de fases usando como restricción únicamente la pendiente máxima. Debido a estas limitantes es necesario incorporar una segunda fase de planificación para la metodología tradicional que pueda entregar un mayor detalle tanto a las restricciones de producción como las financieras. Esta segunda etapa apunta a la incorporación de:

1. la tasa de descuento en el tiempo,
2. tasas de producción
3. capacidades al momento de generar las fases.

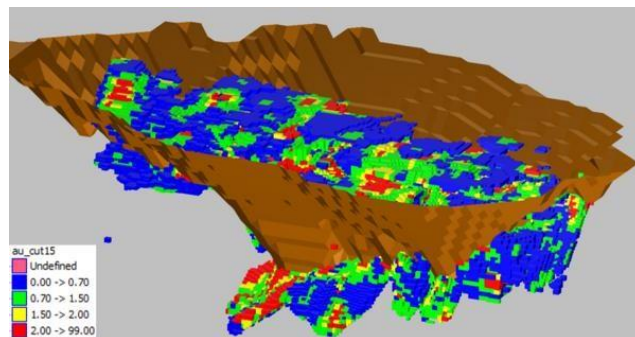


Figura 2.3: Pit Final. Fuente GeoVita

Por otro lado, se deben seleccionar un subconjunto de fases como una completa que cumpla con un ancho operacional factible, ángulo y altura máximos para el talud e incluir los accesos entre una fase y otra. También es necesario poder dar flexibilidad en las fases respecto a la posibilidad de tener una producción compartida por más de una fase para ser procesada en un periodo de tiempo. Por último, optimizar el destino de un bloque según la ley de corte y poder incorporar el blending dentro de la producción. Esta segunda etapa de planificación logra un detalle operacional táctico y estratégico en la optimización de fases.

Metodología DBS

En la industria minera a lo largo del tiempo se ha utilizado lo que vimos como metodología tradicional en donde se requiere de un paso a paso para poder generar fases en base a pits anidados, para luego ser llevadas a una operativización en diseño minero, que como se recalcó, consta con problemas en la operatividad si el yacimiento (diseño de fases). Ante esto, nace una alternativa a esta metodología llamado agendamiento directo de bloques o Direct Block Scheduling (DBS) que tiene por objetivo abordar la planificación minera sin este paso a paso ni definiciones de pushbacks, si no que va directo desde el modelo de bloques a los resultados de agendamiento donde se obtiene un periodo de tiempo determinado para extraer cada bloque, implementando en la optimización restricciones asociadas a capacidades de mina, blending, entre otros (Marinho, 2013). De esta forma, un profesional experimentado puede probar múltiples escenarios sólo modificando parámetros y adelantar otras etapas de su trabajo.

La metodología DBS abarca el problema de la asignación de bloques como un ente global asignando bloques a distintos "destinos en los cuales se asignan valor al bloque.

Dichos destinos en minería acielo abierto están normalizados como planta debeneficio, donde se asigna un valor al bloque, botadero donde se asigna un valor negativo el cual es el costo de transporte de un mineral que no cumple con los requisitos de ley planta y por último stock que es un material que no cumple con los requisitos de ley, pero generar un mayor valor que llevarlo a botadero.

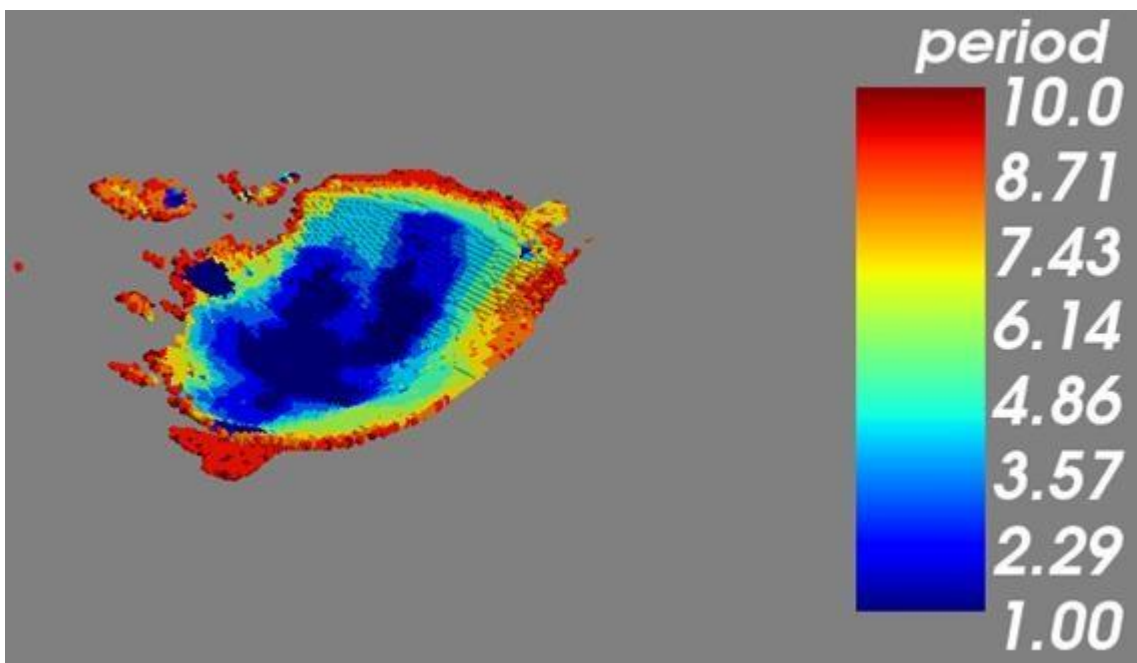


Figura 2.4: Fases DBS. Doppler. Fuente Delphoslab

Definición y diferencias DBS

La gran limitante de Lerchs y Grossman es el hecho de no incluir a priori en la planificación las restricciones mencionadas de la segunda etapa y que llevan a iterar dentro del mismo problema para lograr una solución óptima y precisa. La secuencia de etapas para una planificación tradicional puede ser resumida en:

- Obtener un modelo de bloques
- Valorizar el modelo de bloques
- Generación de pits anidados (aplicando metodología de Lerchs y Grossmann)
- Definición de fases
- Construcción del plan de producción Diseño minero (operativización de las fases definidas anteriormente)
- Suavizar el plan de producción

Dentro de ambos métodos presentados, el más usado a nivel de softwares comerciales y que se usará en este proyecto será el algoritmo propuesto por Lerchs y Grossmann.

La programación directa de bloques (DBS) es una alternativa al agendamiento convencional de mineral y obtención del pit final. Investigadores han estudiado este formulismo durante años (se creó por Johnson en 1968) y su talón de Aquiles era la poca capacidad computacional de la época lo cual en la actualidad ha sido mejorado, ya que aún quedan problemas los cuales no pueden ser resueltos de forma exacta. A lo largo de las décadas, otros autores siguieron la propuesta de Johnson e introdujeron sus algoritmos, la tecnología avanzada como bueno, pero la capacidad de resolver problemas más grandes seguía siendo un obstáculo.

DBS sigue un enfoque diferente a LG, DBS e tiene como objetivo integrar toda una serie de procesos de obtención de pit final y generación de planes de producción, integrando algunas limitaciones, como la capacidad total o de la planta. Este enfoque se basa en programación matemática y algoritmos ad-hoc para resolverlos

Tradicionalmente, esta tarea ha realizado con el conocimiento del ingeniero usando como información los diferentes pit generados por LG (Lerchs-Grossmann), considerando destinos de bloque predefinidos. Mediante el uso de programación directa de bloques (DBS), en el que se seleccionan (o no) bloques individuales para la extracción y se asignan destinos en determinados períodos de tiempo. El enfoque de DBS se caracteriza por:

1. Considerar todos los periodos de tiempo en forma simultánea dando un planteamiento más completo a la problemática
2. Generar restricciones, precedencias y aborda de manera general el problema de programación mina para maximización del VAN (Valor actual Neto)

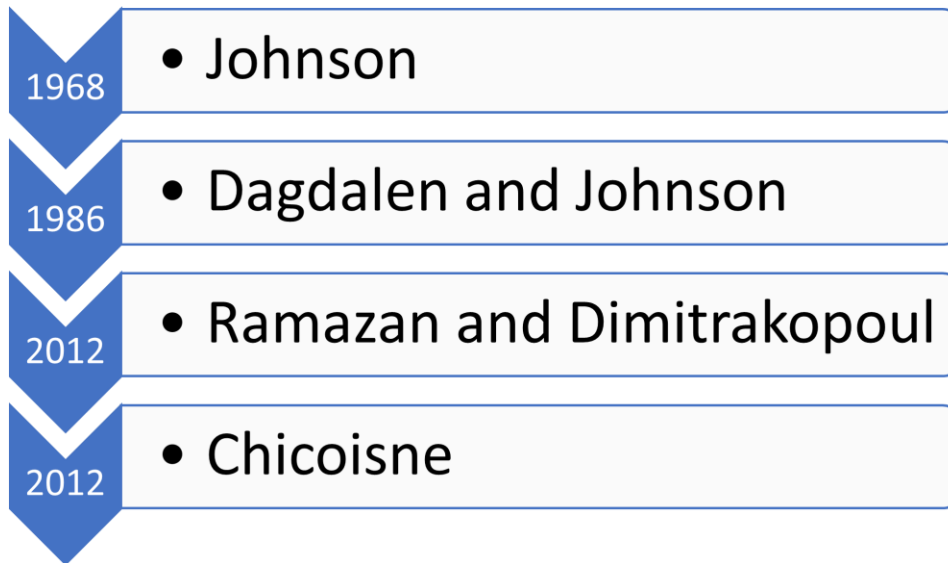


Figura 2.5: Historia del DBS. Fuente Elaboración propia.

El objetivo de DBS es definir el pit final y el agendamiento de la mina al mismo tiempo, es decir, determinar qué bloques se deben extraer, cuándo debería ocurrir y dónde deberíamos enviarlo para maximizar el VAN mientras se respetan las restricciones de producción / operativas, los ángulos de pendiente, tasa de descuento, entre otros, todo realizado directamente desde el modelo de bloque. Esto significa que los pasos de optimización del pit y programación no se obtienen por separado, sino en un proceso único y optimizado.

La programación directa de bloques no requiere predefinir sus destinos, ya que es capaz de realizar la delineación de mineral / desechos automáticamente. Esto representa que se pueden crear N diferentes destinos, dejando al algoritmo la obligación de definir los mejores destinos de bloques en función de la viabilidad de extraerlos y sus contribuciones económicas, representadas por el valor del bloque. El usuario ya no necesita asumir un cierto grado de corte basado en la experiencia previa para predefinir si un bloque es mineral o desechado. (N. Morales et al., 2015)

MODELOS DE PROGRAMACIÓN MINERÍA SUBTERRÁNEA

Dentro de los modelos de programación para labores de minería subterránea destacan:

1. Eight-Dimensional Planning – Construction of an Integrated Model for Mine Planning Involving Constructability; W Rocher, E Rubio and N Morales: Una práctica común en la industria minera es descomponer el proceso de planificación en diferentes tareas, por lo que el proceso general y los programas específicos se pueden construir fácilmente. Sin embargo, actualmente hay algunos efectos adversos, como no capturar el valor real de un proyecto al no tener en cuenta la construcción de varias galerías subterráneas e infraestructura general. Entonces la práctica común es para calcular la secuencia minera y los perfiles de ley de corte durante la vida útil de la mina sin integrar el cronograma de desarrollo como un medio para medir la capacidad de construcción de una mina determinada. diseño y secuencia. Así, la investigación resumida en este artículo muestra una novedosa e integradora forma de tratar la secuencia de una mina subterránea y el programa de producción considerando la deriva programación de desarrollo. Además, se piensa que, debido a este modelo original, todo el ejercicio de programación de la producción subterránea debe concentrarse en combinar el desarrollo y la programación de producción para calcular un programa de producción sólido y factible. Para cuantificar el efecto de la forma convencional de ver la planificación, el concepto del modelo de información de construcción (BIM), que fue postulado por Charles Eastman y se ha utilizado ampliamente desde finales de la década de 1970. BIM toma otros aspectos de un proyecto en cuenta, considerando al mismo tiempo las relaciones espaciales, cantidades y propiedades de componentes de construcción, pero especialmente algún tipo de visualización de modelo, que es la ventaja de ser incorporado. Este artículo presenta las bases de un modelo de optimización que permite definir la secuencia del desarrollo minero para que se pueda lograr el plan de producción. Para ello, el modelo considera las dimensiones del espacio, tiempo, patrón o estrategia, costo o beneficio, precedencia y recursos disponibles. Las pruebas se realizaron considerando un método de hundimiento de bloques y de rebaje abierto de subnivel. Finalmente, estas pruebas mostraron la conclusión principal, que la secuencia de producción cambia cuando la capacidad de construcción es considerada.
2. The use of mixed integer linear programming for long-term scheduling in block caving mines D. Rahal, M. Smith, G. Van Hout, and A. Von Johannides: El hundimiento es un método de minería masiva que normalmente se aplica a cuerpos minerales grandes y de baja ley debido a su bajo

costo de producción y alta capacidad. Sin embargo, avería del equipo y dibujo deficiente La gestión puede hacer que los costos de extracción excedan los de todos los demás métodos de extracción. Una manera de minimizar el efecto de las interrupciones en el ciclo de minería es utilizar Mixto Entero Lineal Programación (MILP) para programación a largo plazo. Este documento describe un programa de metas MILP que tiene el doble objetivo de minimizar desviación del perfil de dibujo ideal mientras se logra un objetivo de producción. Optimización de horarios se realiza utilizando un enfoque de vida útil en el que se optimizan todos los períodos de producción simultáneamente. El supuesto subyacente es que la mezcla de materiales a corto plazo (entre ciclos de optimización mensuales) tiene un efecto mínimo en el estado a largo plazo del panel. La optimización del programa se lleva a cabo utilizando seis tipos de restricciones generales para modelar y controlar producción. Los tipos de restricciones definen: desviación de la práctica ideal, estado del panel, flujo de material conservación, calidad de producción, capacidad de flujo de material y control de producción. Estas limitaciones definir los objetivos de producción e impulsar la producción hacia el perfil ideal manteniendo práctica minera. Aplicación del modelo utilizando datos de programación de producción para una mina de kimberlita De Beers. Está mostró cómo diferentes restricciones de control de producción regulan la producción de un individuo puntos de extracción, así como la recuperación del perfil de panel ideal mediante la implementación de un dibujo optimizado calendario

3. Rubio, E., (2006). Block cave mine infrastructure reliability applied to production planning: En el pasado, se han utilizado métodos manuales para planificar y programar la extracción de mineral de diferentes cuevas de bloques operaciones en todo el mundo. El supuesto básico de estos métodos ha sido la validez de un conjunto de heurísticas, tradicionalmente, se utiliza para planificar y programar la producción que sale de un panel activo. Actualmente, sin embargo, hay varias operaciones herramientas de investigación (utilizadas anteriormente en el sector manufacturero) que podrían usarse en la planificación de minas de cuevas de bloques. Este papel describe la aplicación de la programación matemática para formular problemas de optimización cuya solución tal vez impulsar la estrategia de producción de una mina de caverna de bloques. Algunas de estas estrategias, como la optimización del valor actual neto, Se han formulado la optimización del perfil de dibujo y la minimización de la brecha a corto plazo. La construcción de los problemas de optimización ha requerido un estudio racional de qué restricciones mineras son aplicables en cada caso. Al hacerlo, se ha encontrado que la formulación de la función objetivo, así como el conjunto de restricciones que definen el espacio factible de soluciones son fundamentales para las soluciones efectivas de planificación minera. Por el momento el lleno Se han incorporado algoritmos de escala en el paquete comercial de hundimiento de bloques PC-BC. Uno de los resultados de este La investigación ha sido la integración del costo de oportunidad en PC-BC para calcular la mejor altura de extracción en

una dinámica conducta. El segundo resultado ha sido el desarrollo de un método de extracción llamado NPV que maximiza las ganancias netas por período. Otro resultado ha sido la introducción de un nuevo método de sorteo llamado SURF, que tiene como objetivo minimizar la diferencia entre la altura real de dibujo y el objetivo representado por una superficie. Se han utilizado diferentes técnicas matemáticas para resolver los problemas de optimización como métodos iterativos directos, programación lineal, técnica de búsqueda de sección áurea y programación de enteros. Los resultados de aplicar la optimización a En este documento se presentarán y describirán diferentes operaciones en todo el mundo

4. Chanda "An application of integer programming and simulation to production planning for a stratiform ore body" (1990): Utiliza un modelo matemático el cual se aplica a producción a corto plazo aplicado a una mina de Block Caving. Dicho modelo combina simulación con programación entera mixta, con este modelo Chanda busca reducir la fluctuación de producción entre periodos. Este modelo considera restricciones geométricas (Ej. Precedencia). Este paper fue revolucionario en su época, marco la línea para el agendamiento de labores, pero la poca cantidad de parámetros generados hace que sea solo un agendamiento para una línea base.
5. Jawed "Optimal production planning in underground coal mines through goal programming: A case study from an Indian mine," (1993): Genera un modelo con la función objetivo de Chanda, pero aplicado a minas de room and pillar. Dicho modelo posee una mayor cantidad de restricciones operaciones como:
 - Requisitos de personal
 - Capacidad Mina
 - Ventilación
 - Tipo de Mineral para tratar.

Modelo el cual necesita mucha capacidad computacional, además de esto es muy difícil que un modelo en esa época agregue algún tipo de incertidumbre. Al ser una mina de room and pillar posee un nivel menos complejo de restricciones.

6. Kuchta, M, Newman, A and Topal, E, "Implementing a production schedule at LKAB's Kiruna Mine, Interfaces" (2004): Presentó un modelo de optimización para determinar un o secuencia de extracción de mineral factible que minimiza las desviaciones de las cantidades de producción planificadas. La agregación se utilizó para optimizar la planificación de la producción a largo plazo en una mina subterránea. La solución se aplicó para una mina de sublevel caving (Kiruna) con precedencias geométricas definidas en una dirección, horizontal (suficiente para la cavidad de subnivel, pero no lo suficiente para la cavidad de bloques o la parada de subnivel).
7. Rahal, D, Smith, M, Van Hout, G and Von Johannides, A "The use of mixed integer linear

programming for long-term scheduling in block caving mines” (2003) :) Utiliza un MILP (programación entera mixta) para resolver una optimización de producción por punto de extracción considera restricciones de:

- Capacidad
- Precedencia

Modelo el cual necesita una capacidad computacional muy grande, es determinista y solamente se fija en la capacidad de restricciones operativas dejando de lado muchas restricciones como recursos, RRHH, entre otras

8. Queyranne, M, Parkinson, A, McCormick, S T, Diering, T, Malkin, P and Wolsey, L. “The drawpoint scheduling approach to production planning in a block cave mine” (2008): Paper el cual da a conocer un modelo de optimización el cual tiene como función objetivo la maximización del VAN y de la producción y usa las siguientes restricciones:

- Capacidad mina
- Máximo puntos abiertos y activo

Este modelo destaca ya que se usan variables binarias en donde se decide si se extrae desde ese punto o no. El error que se le puede encontrar a este artículo es que no considera temporalidad y no genera una restricción para la producción máxima por punto.

9. Rubio, E and Diering, E “Block cave production planning using operation research tools” (2004): Resolvió otro problema de optimización, maximizando el VAN para un block caving. Se utilizaron dos slice para simular columnas en un modelo vertical discreto y se utilizó la misma función objetivo de Rahal (1990). El modelo utilizó restricciones de precedencia, definidas solo para vecinos inmediatos. La precedencia geométrica, considerando el período en el que se extrajeron los puntos de trazado predecesores, fue no analizado.

10. Sarin, S C and West-Hansen, J “The long-term mine production scheduling problem” (2005): Resolver la programación de la producción a través de Planificación de un modelo de programación lineal que maximiza el VAN y añade penalizaciones a las desviaciones de la producción y este modelo fue desarrollado para ser implementado en la minería de room and pilar y ocupa restricciones de secuencia (restricciones para vecinos inmediatos) y es el primero que utilizo la restricción de constructibilidad.

11. Yashar Pourrahimian ,Hooman Askari-Nasab Dwayne Tannant “Block Cave Production Scheduling Optimization Using Mathematical Programming”(2012): Modelo MILP el cual busca optimizar en la dirección de extracción para maximizar el van usa una serie de restricciones tanto operativas como de castigo a la mezcla y producción .Generando una dirección optima la cual máxima el VAN , dicho paper no considera una serie de variables como la incertidumbres

en ley , el tipo de avance y parámetros geomecánicos

12. j. Oyanader ,P.ROJAS ,N.Zúñiga “Metodología de análisis de constructibilidad , proyecto recurso sur Codelco ,División el teniente” (2016):Metodología la cual genera un agendamiento de labores de preparación mina , la cual considera restricciones lógicas (precedencias) y restricciones interaccionales(distancias mínimas , interacciones entre labores, zona de esfuerzos) , esto para entregar un agendamiento mejor a la metodología que se utilizaba en ese tiempo , y cubicaciones de marina obtenidas en el modelamiento .
13. Rienda Dirkx, Vassilios Kazakidis , Roussos Dimitrakopoulos “Stochastic optimisation of long-term block cave scheduling with hang-up and grade uncertainty” (2017):Generación de un MILP el cual busca agendar producción con una función objetivo de maximizar el VAN pero este modelo se diferencia de los anteriores en dos cosas : o Primero cabe destacar que a este modelo se le agrega incertidumbre operacional la cual es cuantificada con simulaciones a través de kriging simple o Segundo modelo agrega una restricción característica que es si el punto está colgado no será trabajado esta restricción le da una nueva cara y hace que el modelo no posea las mismas restricciones que los autores citados en el estado del arte de esta investigación

Capítulo 3

METODOLOGÍA

Como se indicó en el Capítulo anterior, la optimización de la preparación minera requiere un enfoque en tres áreas: estrategia, gestión e innovación. En este Capítulo se describe la metodología de trabajo utilizada para realizar un aporte en las áreas estratégicas, de gestión y de utilización de técnicas de innovación respectivamente. Para lograr los objetivos planteados en este trabajo, se realizó una serie de tareas y actividades que se indican a continuación.

1. Recopilación de información bibliográfica, tales como: características geomecánicas del Macizo Rocosó, equipos utilizados en faenas de Desarrollo y construcción, distancias entre niveles de producción y hundimiento, obras principales para la preparación minera e infraestructura necesaria para la explotación de yacimientos subterráneos, manejo de materiales, variantes del método de hundimiento, etc.
2. Elaboración de las estrategias que permitan el cumplimiento de los objetivos estableciendo los focos principales del estudio a través de un plan estratégico apuntando a una estructura organizacional asociada a la Preparación de Minas Panel Caving.
3. Estudio de tiempos, rendimientos y productividades de las distintas actividades de la preparación minera.
4. Determinación de las actividades más relevantes susceptibles a incorporar mejoras a través de pruebas industriales diseñadas para las actividades más incidentes.

Definición de Fases

De manera más específica, la revisión los antecedentes previamente descritos ordenaron el estudio y permitieron orientar el trabajo en dos aspectos fundamentales, la gestión y las operaciones. Ambos fueron

estudiados para entender cada uno de los procesos, diagnosticar y eventualmente incorporar mejoras. En este esquema se generaron cuatro fases que guiarán el desarrollo tesis y que se detallan a continuación.

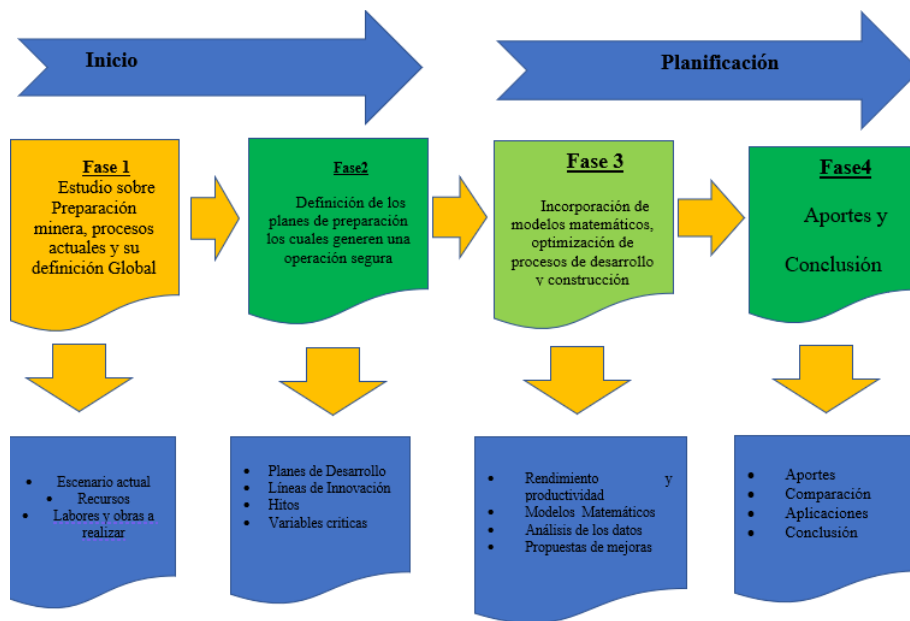


Figura 3.1: Imagen Resumen Metodología. Fuente Elaboración propia.

Fase 1: Estudio sobre Preparación minera, procesos actuales y su definición Global

Corresponde a la primera fase de la etapa estudio, en la cual se analiza el concepto y las actividades de la Preparación de Minas, su operación, estructura organizacional e importancia. De la misma manera se estudiarán los métodos de desarrollo y construcción de galerías como también diseños de obras civiles y montajes asociadas al crecimiento de una mina, de tal manera de identificar recursos, rendimientos y métodos de trabajos, describiendo el diseño y metodología de las principales obras. En esta etapa también se analizarán los aspectos de seguridad asociados a los procesos y metodologías constructivas.

Fase 2: Definición de los planes de preparación los cuales generen una operación segura

Corresponde a la segunda fase de la etapa de gestión y considera el estudio de todos los aspectos estratégicos que relacionan las actividades entre sí, ya sea geomecánica, operacionales, recursos, etc. Se establece las bases para una propuesta de un plan estratégico que involucre la gestión de esta actividad en el medio manteniendo el sentido de ésta. En esta etapa se establecerán los focos o ámbitos de desarrollo, las líneas necesarias para las mejoras y las variables involucradas. El resultado de esta fase permitió la entrega de una matriz que determina en forma práctica, las líneas de acción que sustenta la optimización de los procesos de Preparación minera.

Fase 3: Incorporación de modelos matemáticos, optimización de procesos de desarrollo y construcción

Corresponde a la primera fase de la etapa de operaciones y su foco ha sido determinar cuán factible es optimizar cada proceso, identificando las interferencias asociadas a éstos, también se revisó la metodología

de control y programación de las tareas involucradas en estos procesos proponiendo métodos de control más adecuados según los requerimientos y metodologías existentes. En esta fase se determinará, según el estudio de los procesos involucrados actualmente en la Preparación de minas, la factibilidad de incorporar innovación en los procesos a través de pruebas piloto e industriales correspondientes de actividades consideradas factibles de optimizar.

Fase 4: Aportes y Conclusión

En esta etapa se consolidará y mostrarán las eventuales mejoras en los resultados propuestos, generando recomendaciones que permitan optimizar los tiempos, productividades y rendimientos de los actuales procesos.

Análisis y Plan estratégico.

Análisis externo

El análisis externo consistirá en detectar y evaluar acontecimientos y tendencias que sucedan en el entorno del negocio de la preparación minera, con el fin de conocer la situación del entorno, y detectar oportunidades y amenazas.

Análisis Interno

El análisis interno consistirá en el estudio de los diferentes aspectos o elementos que puedan existir dentro de la organización de la Preparación Minera. Se evaluarán los recursos, estrategias, y aspectos operacionales dentro de las mismas labores mina.

Diseño, evaluación y selección de estrategias

Una vez que se han establecido los objetivos generales del plan estratégico, se procede a diseñar, evaluar y seleccionar las estrategias que permitan alcanzar, de la mejor manera posible, dichos objetivos.

Plan estratégico

El plan estratégico consistirá en la definición de los ámbitos de trabajo y las iniciativas de mejoras, basadas en las definiciones que se describen a continuación.

Definición de iniciativas

Esta etapa, básicamente apunta a definir las variables transversales que permitan estructurar las líneas de desarrollo e innovación y las variables críticas a impactar.

Diseño de Pruebas Industriales para Desarrollo Rápido

En la primera fase se trabajará con los desarrollos horizontales y su aplicación en términos de acelerar sus tiempos de ciclos a través de distintas modificaciones en su metodología de trabajo.

Conceptualización

Su conceptualización se basa en optimizar los recursos destinados al desarrollo de una galería, bajo el concepto de maximizar la utilización de la frente optimizando las operaciones unitarias y ciclo global de trabajo, empleando tecnologías de vanguardia que cautelen la seguridad.

Puntos Claves

A continuación, se describen las características claves que apuntan a la mejora en los ciclos de las distintas etapas del desarrollo horizontal.

1. Análisis y gestión de los tiempos muertos.

En minería subterránea, abastecimiento de materiales, ingreso de equipos, ingreso de personas, quemadas, aislaciones post-polvorazos, aislaciones sísmicas, comida, etc. constituyen interferencias que deben gestionarse adecuadamente planificando detalladamente cada una de estas para darle una continuidad operacional a los procesos.

2. Maximizar utilización de la frente.

Esta característica se levanta como una forma de establecer que la criticidad en el avance de un desarrollo horizontal se basa en mantener una frente despejada constantemente y por la mayor cantidad de tiempo posible, es decir cada marina de cada disparo debe ser despejada para retomar el ciclo minero lo antes posible. En este sentido cualquier cambio metodológico que apunte a lograr este objetivo es la base de cualquier optimización.

Definición de Parámetros Actuales

Actualmente los principales parámetros que se obtienen en el control del desarrollo horizontal son los siguientes, los cuales conformaran la validación de la prueba:

1. Estimación de horas efectivas
2. Desglose del ciclo actual en 10 actividades
3. Medición de tiempos de ciclo

Estos parámetros permitirán cuantificar y evaluar posteriormente de tal manera de obtener datos duros

para el análisis de los resultados.

Capítulo 4

CASO DE ESTUDIO

Plan Base

Se utilizó un plan de un año de una mina Panel caving con las siguientes características.

Actividad	Unidad	Total Rev. b (Cantidad de actividades realizadas)	Nivel
Desarrollo Horizontales	Metros	1345	NH
Desarrollo Vertical	Metros	42	NH
Fortificación de Intersecciones	Unidades	22	NH
Construcción de vaciaderos de marina	Unidades	2	NH
Construcción de chimeneas de emergencias	Unidades	1	NH
Tiros de Drenaje	Metros	950	NH
Perforación preacondicionamiento	Metros	3772	NH
Perforación de pozos cave back y especiales	Metros	150	NH
Hidrofracturamiento	Metros	40	NH
Perforación Radial	Metros	91443	NH
Socavación	Metros Cuadrados	23715	NH
Desarrollos horizontales	Metros	2064	NP
Desarrollos verticales	Metros	775	NP
Carpeta de rodado	Metros	1165	NP
Construcción de puntos de extracción	Unidades	87	NP
Construcción de viseras de puntos de extracción	Unidades	87	NP
Construcción de pisos de puntos de extracción	Metros	870	NP
Construcción de muros de confinamiento	Unidades	83	NP
Fortificación de intersecciones	Unidades	55	NP
Perforación Hidrofracturamiento	Metros	960	NP
Hidrofracturamiento	Unidades	24	NP
Tiros de drenaje	Metros	840	NP
Fortificaciones especiales	Metros	250	NP
Perforación de zanjas	Metros	27978	NP
Voladura de zanjas	Unidades	30	NP

Tabla 4.1: Plan de Producción Anual- Nivel de Producción y Nivel de Hundimiento

Actividad	Unidad	Total Rev. b (Cantidad de actividades realizadas)	Nivel
Excavación de punto de vaciado	Unidades	9	ST
Construcción de brocal de punto de vaciado	Unidades	10	ST
Rotura de chiflón de punto de vaciado	Unidades	11	ST
Desquinche y fortificación de pique	Unidades	11	ST
Blindaje de piques	Unidades	13	ST
Construcción base martillo	Unidades	13	ST
Instalación tele comando martillo	Unidades	9	ST
Desquinche y fortificación de buzón	Unidades	14	ST
Construcción de buzón	Unidades	13	ST
Montaje de buzón	Unidades	12	ST
Habilitación hidráulica de buzón	Unidades	16	ST
Tele comando buzón	Unidades	10	ST
Puesta en marcha sistema de traspaso	Unidades	11	ST

Tabla 4.2: Plan de Producción Anual-Nivel de Transporte

Actividad	Unidad	Total Rev. b (Cantidad de actividades realizadas)	Nivel
Desarrollos Horizontales	Metros	274	NA
Desarrollos Verticales	Metros	275	NA
Tiros de Drenaje	Metros	260	NA
Construcción Maquinas de Cambio	Unidades	7	NA
Construcción de Cruzamientos	Unidades	1	NA
Preparación Piso Vía Férrea	Metros	1,400	NA
Construcción Vía Férrea	Metros	1,400	NA
Construcción Red de Agua	Metros	1,400	NA
Construcción Red de Aire	Metros	1,400	NA
Construcción Trolley	Metros	1,400	NA
Fortificaciones Especiales	Metros	400	NA

Tabla 4.3: Plan de Producción Anual-Nivel de Acarreo

Actividad	Unidad	Total Rev. b (Cantidad de actividades realizadas)	Nivel
Desarrollos horizontales	Metros	243	SNV
Desarrollos verticales	Metros	600	SNV
Construcción sala de Ventiladores	Unidades	20	SNV
Montaje de Ventiladores	Unidades	23	SNV
Habilitación de Ventiladores	Unidades	28	SNV
Construcción y Habilitación OOCC especiales	Unidades	1	SNV
Construcción de cunetas de drenaje	Metros	2,026	SNV
Construcción y Habilitación SSE	Unidades	1	SNV
Construcción y Habilitación CDC	Unidades	1	SNV
Construcción y Habilitación SH	Unidades	1	SNV
Construcción y Habilitación OOCC	Unidades	1	SNV

Tabla 4.4: Plan de Producción Anual-Subnivel de Ventilación

Dicho plan es mensualizado y se generó con UDESS y así se obtuvo un plan mensualizado.

Actividad	Unidad	Total Rev. b (Cantidad de actividades realizadas)	Nivel
Desarrollo Horizontales	Metros	252	NH
Desarrollo Vertical	Metros	15	NH
Fortificación de Intersecciones	Unidades	7	NH
Construcción de vaciaderos de marina	Unidades	1	NH
Construcción de chimeneas de emergencias	Unidades	-	NH
Tiros de Drenaje	Metros	360	NH
Perforación preacondicionamiento	Metros	1304	NH
Perforación de pozos cave back y especiales	Metros	-	NH
Hidrofracturamiento	Metros	8	NH
Perforación Radial	Metros	-	NH
Socavación	Metros Cuadrados	-	NH
Desarrollos horizontales	Metros	441	NP
Desarrollos verticales	Metros	160	NP
Carpeta de rodado	Metros	222	NP
Construcción de puntos de extracción	Unidades	18	NP
Construcción de viseras de puntos de extracción	Unidades	18	NP
Construcción de pisos de puntos de extracción	Metros	180	NP
Construcción de muros de confinamiento	Unidades	16	NP
Fortificación de intersecciones	Unidades	11	NP
Perforación Hidrofracturamiento	Metros	-	NP
Hidrofracturamiento	Unidades	3	NP
Tiros de drenaje	Metros	360	NP
Fortificaciones especiales	Metros	120	NP
Perforación de zanjas	Metros	-	NP
Voladura de zanjas	Unidades	-	NP

Tabla 4.5: Plan de Producción Bimensual-Nivel de Producción y Nivel de Hundimiento

Actividad	Unidad	Total Rev. b (Cantidad de actividades realizadas)	Nivel
Excavación de punto de vaciado	Unidades	5	ST
Construcción de brocal de punto de vaciado	Unidades	3	ST
Rotura de chiflón de punto de vaciado	Unidades	5	ST
Desquinche y fortificación de pique	Unidades	3	ST
Blindaje de piques	Unidades	2	ST
Construcción base martillo	Unidades	3	ST
Instalación tele comando martillo	Unidades	4	ST
Desquinche y fortificación de buzón	Unidades	3	ST
Construcción de buzón	Unidades	3	ST
Montaje de buzón	Unidades	6	ST
Habilitación hidráulica de buzón	Unidades	4	ST
Tele comando buzón	Unidades	4	ST
Puesta en marcha sistema de traspaso	Unidades	6	ST

Tabla 4.6: Plan de Producción Bimensual -Nivel de Transporte

Actividad	Unidad	Total Rev. b (Cantidad de actividades realizadas)	Nivel
Desarrollos Horizontales	Metros	117	NA
Desarrollos Verticales	Metros	72	NA
Tiros de Drenaje	Metros	140	NA
Construcción Maquinas de Cambio	Unidades	2	NA
Construcción de Cruzamientos	Unidades	1	NA
Preparación Piso Vía Férrea	Metros	261	NA
Construcción Vía Férrea	Metros	234	NA
Construcción Red de Agua	Metros	234	NA
Construcción Red de Aire	Metros	234	NA
Construcción Trolley	Metros	270	NA
Fortificaciones Especiales	Metros	180	NA

Tabla 4.7: Plan de Producción Bimensual -Nivel de Acarreo

Actividad	Unidad	Total Rev. b (Cantidad de actividades realizadas)	Nivel
Desarrollos horizontales	Metros	108	SNV
Desarrollos verticales	Metros	108	SNV
Construcción sala de Ventiladores	Unidades	4	SNV
Montaje de Ventiladores	Unidades	5	SNV
Habilitación de Ventiladores	Unidades	5	SNV
Construcción y Habilitación OOCC especiales	Unidades	-	SNV
Construcción de cunetas de drenaje	Metros	378	SNV
Construcción y Habilitación SSE	Unidades	2	SNV
Construcción y Habilitación CDC	Unidades	1	SNV
Construcción y Habilitación SH	Unidades	1	SNV
Construcción y Habilitación OOCC	Unidades	1	SNV

Tabla 4.8: Plan de Producción Bimensual-Subnivel de Ventilación

Ya con los inputs listos (plan bimensual discretizado), se generan una serie de restricciones y precedencias , dichas restricciones están dadas por los recursos a utilizar:

- Cantidad de Recursos (Cargadores Frontales, Brigadas, Maquinaria en general, etc.)
- Horarios

Restricciones operativas

- Actividad se realiza una sola vez dentro de la totalidad de los periodos.
- Sumatorio de los recursos de la actividad en todos los periodos no puede superar a los recursos totales de la actividad
- El orden de secuencia estos dados por el orden de las labores en faena como lo muestra la imagen el orden es estricto no se puede realizar cambiar el orden de las labores.
- No se puede realizar ninguna actividad ya sea de labores horizontales como verticales conjunto a la ventilación. Dicha actividad tendrá un horario especial en el cual solo se podrá realizar la actividad de ventilación
- Existen actividades que no se pueden interrumpir como la ventilación, el carguío de explosivos y el conjunto de actividades da origen a los puntos de extracción.
- Se modela el tiempo en 12 horas por turno el cual se divide en:
 1. Tiempo efectivo: Se pueden realizar cualquier tipo de actividad. Estos tiempos son:
 - Entre la hora 1 y la hora 6
 - Entre la hora 8 y la hora 11
 2. Entrada al turno: entre la hora 0 y la 1 no se realiza ninguna actividad excepto la ventilación.
 3. Colación: Entre la hora 6 y 8 los trabajadores salen de faena a almorzar por lo cual no se realiza actividad alguna excepto ventilación del turno: entre la hora 11 y la 12 no se realiza ninguna actividad excepto la ventilación.

Implementación DBS

DBS interpreta las actividades del plan como bloque y busca el mejor VAN. Dicho VAN está relacionado con las actividades críticas y de control, dichas actividades poseen un valor muy alto comparadas con las otras:

1. Las actividades de control (las cuales poseen una serie de actividades como precedencias y un valor muy alto, dichas actividades control) se utilizan para que dicho modelo se asegure de extraer dichos bloques (precedencias) y así asegurar la realización de actividades.
2. Actividades críticas, son actividades que si o si deben realizarse para cumplir con cabalidad del plan
3. Actividad final Comprende todas las actividades del plan y dicha actividad posee un valor muy grande

Capítulo 5

PAPER

Resumen

La preparación minera es un eje principal de la minería subterránea, con un enorme impacto en la disponibilidad de infraestructura para la producción y, por lo tanto, un enorme impacto en el valor económico de un proyecto, pero también en su ejecución y la seguridad de la operación. La preparación de la mina involucra varias áreas de la operación, desde la planificación de la mina hasta la geomecánica, el suministro, los recursos humanos, entre muchos otros. A pesar de su relevancia, faltan herramientas de optimización para apoyar el proceso de planificación, tanto en la práctica como en la literatura. Esto deja al planificador con pocas oportunidades de probar la robustez de los planes, lo que puede tener un impacto importante en su cumplimiento y, por lo tanto, el costo de oportunidad. En este trabajo, se propone una metodología y modelo de optimización para evaluar diferentes secuencias de construcción de obras mineras: simultáneamente para todos los niveles de una mina de panel caving.

Tipo de Modelo	
Operación ininterrumpida	Este es un modelo pesimista, que asume que las operaciones deben programarse de tal manera que no haya posibles interrupciones (es decir, no subactividades), lo que significa que el resultado es un límite superior del tiempo total de construcción
Interrupción totalmente flexible	Este modelo supone que las actividades se pueden interrumpir tanto como sea necesario en cualquier subactividad. Esto no es completamente realista, pero proporciona un resultado optimista, que se puede utilizar como un límite inferior del tiempo total de construcción.
Operación Mixta	Este modelo tiene en cuenta que la tarea de carga explosiva no se puede interrumpir, pero permite que se interrumpan otras actividades. Como tal, es una manera más realista de Schedule las actividades
Modelo Propuesto	Esto corresponde al caso en el que todas las operaciones, excepto la carga explosiva, pueden interrumpirse y la carga explosiva se puede dividir en dos

Tabla 5.1: Tipo de Modelos

En el contexto de corto plazo (máximo 2 meses con una resolución por hora). La metodología se basa en Direct Block Scheduling, una técnica que proviene de la planificación de minas en minas a cielo

abierto, pero se adapta al caso de la preparación de minas subterráneas. Con este método, se pueden analizar diferentes tipos de secuencias de construcción, precedencias entre las actividades de construcción y diferentes escenarios de rendimiento que dependen de las características de la masa rocosa. Cuando se aplica en un caso real de la mina, los resultados muestran que el plan obtenido cumple con todas las restricciones operativas, y, por lo tanto, las técnicas aparecen como una metodología válida para generar planes optimizados de forma automática, por lo tanto, podría ser utilizado por los planificadores para evaluar diferentes opciones antes de decidir para el plan final

Capítulo 6

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Desarrollo análisis de sensibilidad

Se realiza un análisis de sensibilidad para diferentes actividades y ver como estas afectan al comportamiento en general. Se realiza un análisis de sensibilidad para todas las actividades de labores verticales de:

- Generación de un plan con una disminución de un 10% en los tiempos de ejecución de las actividades
- Generación de un plan con un aumento de un 10 % en los tiempos de ejecución de las actividades
- Generación de un plan con una disminución de un 20% en los tiempos de ejecución de las actividades
- Generar un plan en donde el tiempo de ventilación mina sea de 1 hora (disminuir 50 % el tiempo de ventilación).

Se genera un nuevo plan en donde se crea un ciclo de labores horizontales modificando el tiempo de las actividades y sus secuencias como demuestra la figura.

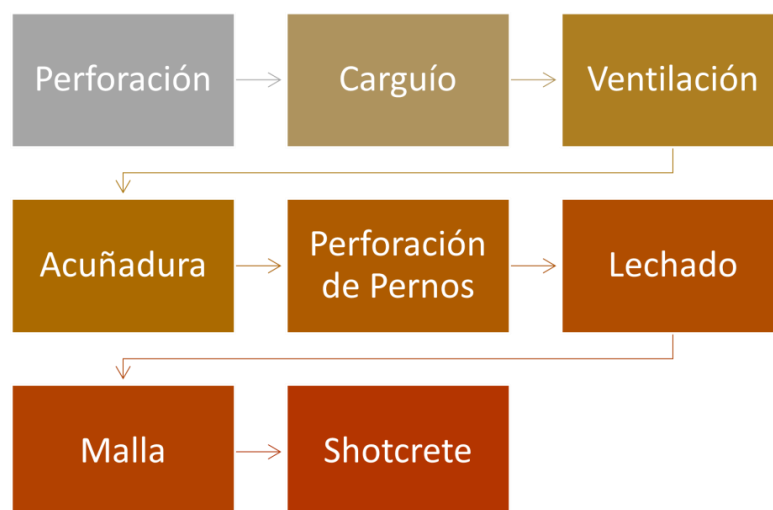


Figura 6.1: Análisis de actividades

Perforación	3 horas
Carguío	3 horas
Ventilación	2 horas
Acuñadura	2 horas
Carguío y Transporte	2 horas
Perforación de pernos	3 horas
Lechado	3 horas
Malla	3 horas
Shotcrete	3 horas
Total	24 horas

Tabla 6.1: Tiempo Actividades Unitarias-Original

Como se aprecia en la tabla se genera una ventilación de 1 hora en el horario. Esto solo afecta al tiempo de colación el cual se ve reducido de 2 horas a 1 hora. Los tiempos iniciales y finales no se ven mermados, tanto el tiempo de traslado mina (inicio -final).

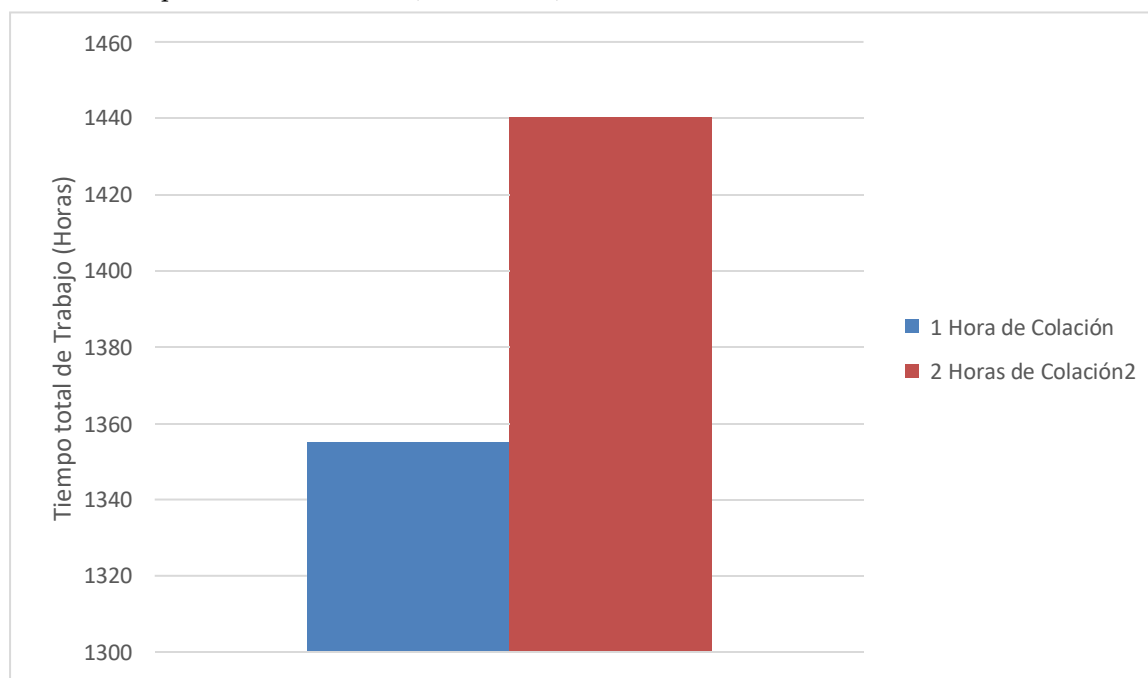


Figura 6.2: Grafica Comparativa-Sensibilidad Ventilación

El aumento del tiempo es de alrededor de un 12 % en la teoría, pero como las actividades de desarrollo horizontal están enlazadas con otras actividades (desarrollos verticales, apertura de punto, etc.), la reducción es un poco menor (6 %) esto es resultado porque estas actividades no tienen como condición la restricción de ventilación (no se detienen si se realiza la ventilación) y la variación de tiempo no les afecta. Donde se vería reflejada una variación en el total de las actividades, es si se varía el tiempo de colación desde 2 horas a 1 hora, con esto la restricción operacional de carguío de explosivos se vería mucho más relajada y conlleva a una reducción aún mayor en los tiempos totales de todas las actividades

Generación de un plan con un aumento de un 10% en los tiempos de ejecución de las actividades

Se realiza un análisis de sensibilidad de todas las actividades las cuales se realizan con la modalidad de tiempo convencional (2 horas de ventilación, y la actividad de carguío de explosivo no se puede interrumpir)

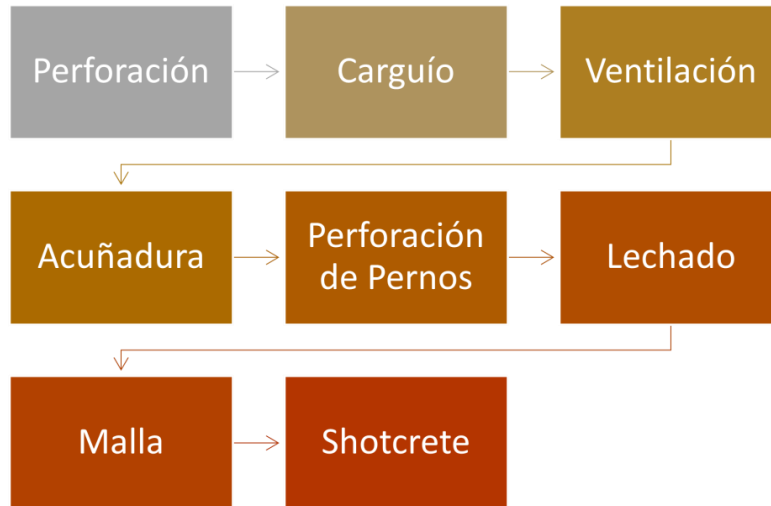


Figura 6.3: Grafico comparativo +10 %

A simple vista se ve que la variación del 10% afecta en mayor medida en las actividades cuya duración es mayor y se ve influenciado por la restricción de no poder interrumpir la actividad de ventilación

Perforación	3.3 Horas
Carguío	3.3 Horas
Ventilación	2 horas
Acuñadura	2.2 Horas
Carguío y Transporte	2.2 Horas
Perforación de pernos	3.3 Horas
Lechado	3.3 Horas
Malla	3.3 Horas
Shotcrete	3.3 Horas
Total	26.2 Horas

Tabla 6.3: Tiempo Actividades Unitarias-+10 %

Generación de un plan con una disminución de un 20 % en los tiempos de ejecución de las actividades

Se realiza un análisis de sensibilidad de todas las actividades las cuales se realizan con la modalidad de tiempo convencional (2 horas de ventilación, y la actividad de carguío de explosivo no se puede interrumpir)

Perforación	3.6 Horas
Carguío	3.6 Horas
Ventilación	2 horas
Acuñadura	2.4 Horas
Carguío y Transporte	2.4 Horas
Perforación de pernos	3.6 Horas
Lechado	3.6 Horas
Malla	3.6 Horas
Shotcrete	3.6 Horas
Total	28.4 Horas

Tabla 6.4: Tiempo Actividades Unitarias-+20 %

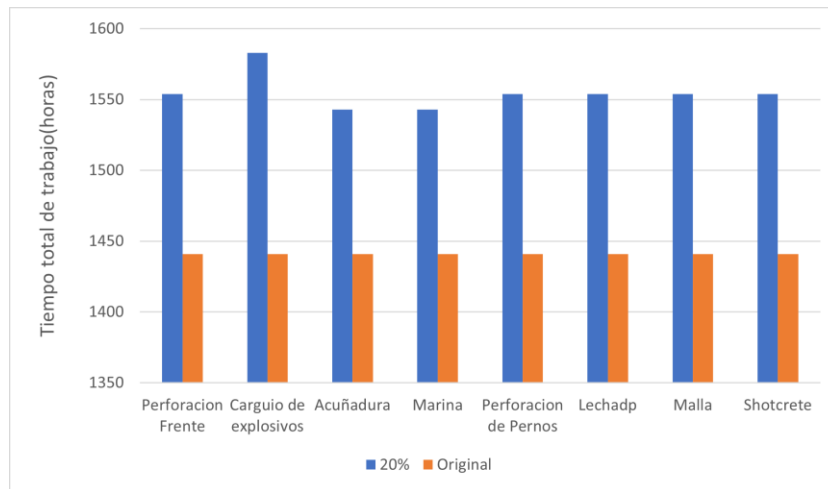


Figura 6.4: Tiempo Variación +20 %

La variación de tiempo es de alrededor de un 20 % y afecta en mayor medida en las actividades cuya duración es mayor, exactamente igual que el caso anterior. Pero si ponemos atención en la restricción de ventilación el comportamiento del tiempo de ventilación no es lineal con respecto a la duración de la totalidad de las actividades, si se aumenta el tiempo de ventilación en un porcentaje x la variación del tiempo total no será de x sino un número mayor.

Generación de un plan con una disminución de un 10 % en los tiempos de ejecución de las actividades

Se realiza un análisis de sensibilidad de todas las actividades las cuales se realizan con la modalidad de tiempo convencional (2 horas de ventilación, y la actividad de carguío de explosivos no se puede interrumpir) A continuación, en la tabla 12 podremos observar los tiempos con cuales se realizó la simulación (variación de un -10 %)

Perforación	2.7 Horas
Carguío	2.7 Horas
Ventilación	2 horas
Acuñadura	1.8 Horas
Carguío y Transporte	1.8 Horas
Perforación de pernos	2.7 Horas
Lechado	2.7 Horas
Malla	2.7 Horas
Shotcrete	2.7 Horas
Total	21.8 Horas

Tabla 6.5: Tiempo Actividades Unitarias-10 %

La variación de un -10% afecta de gran medida a las actividades en comparación con los ejemplos anteriores esto se puede deber a que dentro del periodo se realizarían mayor cantidad de subactividades

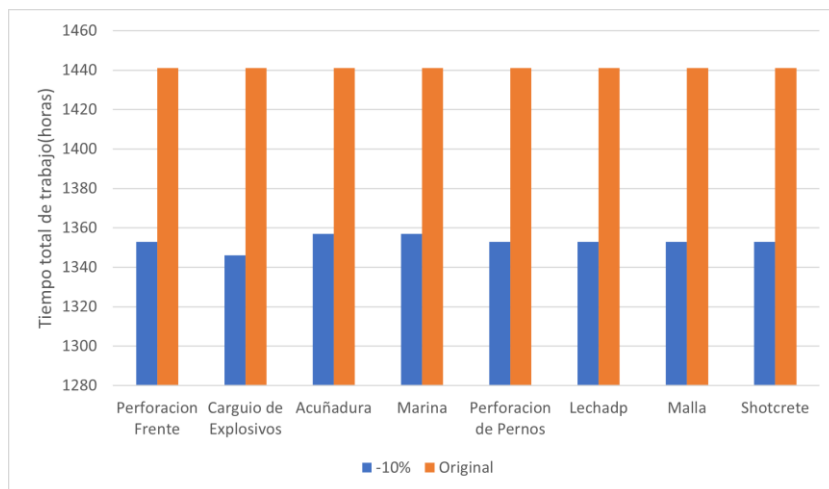


Figura 6.5: Tiempo Variación -10 %
Relación de labores Verticales con Desarrollos Horizontales

Existe una relación entre labores horizontales y verticales, ya sea por temas de seguridad, operacionales o simplemente por designia del ingeniero a cargo. Por lo cual se realiza un análisis de sensibilidad para ver cómo afecta o desplaza las labores verticales designadas por el creador del plan.

Plan	Inicio	Final
Original	1	1441
+10 %	1	1480
+20 %	1	1500
-10 %	1	1358

Tabla 6.6: Resumen Sensibilidad entre tipo de actividades

La variación se da ya que las actividades finales son los desarrollos verticales y están directamente relacionadas con las actividades de desarrollo horizontal, ya que, muchas labores verticales están precedidas de desarrollos horizontales.

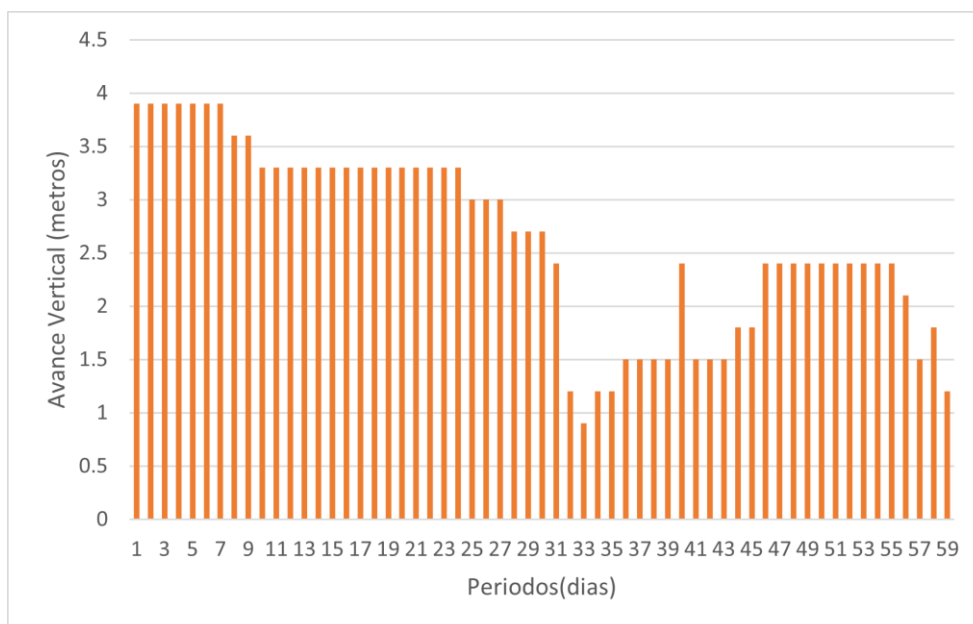


Figura 6.6: Variación Vertical

Capítulo 7

CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

Análisis sobre el estudio de caso

En base a los resultados expuestos, debe mencionarse los siguientes aspectos:

- A medida que se aumenta la velocidad de construcción (tanto de labores verticales como horizontales), es posible resolver problemas de secuenciamiento reduciendo el tiempo inutilizado y utilizándolo de mejor forma, y eventualmente acortando el tiempo de desarrollo total de la mina.
- En relación con el valor objetivo (metodología DBS), se puede observar que dicha metodología nos entrega un valor final, este valor para esta investigación no tiene un sentido, pero si se quiere crear metodologías las cuales les agregue costo, o valor de oportunidad es muy valiosa ya que te entrega una idea de cuál es el camino o ruta que te genera un valor monetario mayor, no solo de tiempo de cumplimiento.
- Además, se puede observar que la distribución del valor en el tiempo conserva la misma forma independiente del escenario propuesto, probablemente influenciada por las restricciones que imponen estar con un plan de preparación ya realizado.
- Conrelación los planes de preparación y el secuenciamiento para procesos más rápidos al original; es posible observar que la construcción fue más rápida, efectivamente adelantó el ramp-up de producción, lo cual generó una meseta en la morfología de la curva de producción más extendida y duradera en el tiempo. Pese a lo anterior, la secuencia de apertura de unidades básicas de explotación no varió, pero sí la intensidad de realización de actividades fue mayor.

- Finalmente queda demostrado en el caso de estudio que la metodología fue efectivamente capaz de analizar una faena minera de tamaño industrial y comprobar la factibilidad de un plan de producción ya diseñado. Más aún observar que ocurría al cambiar ciertos parámetros y concluir que la dependencia preparación minera y producción sigue ligada y no pueden desvincularse fácilmente.

CONCLUSIONES

Se verifica que la utilización de programación entera binaria en la construcción del modelo descrito en la presente investigación permite obtener mejoras y una idea más detallada en el proceso de planificación en la preparación minera subterránea. Con ello la integración de recursos, geometrías mineras y secuencias, proporciona una buena visión sobre el potencial cumplimiento de un programa de preparación al ofrecer un resultado de mayor robustez. Situación que es mejor, pues genera unos planes los cuales se posee un conocimiento aun mayor para evitar posibles errores en la planificación como se han demostrado en hechos ocurridos en el pasado y demostrados en los capítulos introductorios. Más aún, gracias a esto fue posible comprobar la tesis propuesta en el trabajo, en la cual se propone que, si se realizan de manera cíclica la construcción, el tiempo efectivo posee un comportamiento inverso a la duración de la finalización de las actividades (si el tiempo efectivo de trabajo es mayor, el tiempo total es menor). Si se varía el plan de secuenciamiento, dicho tiempo varia de forma aleatoria. En cuanto a la metodología utilizada se considera correcta con relación a su concepción original, dado su carácter de proposición y verificación en cada etapa antes de dar el paso siguiente. Se completó todas las fases propuestas y se logró finalizar exitosamente cada uno de los objetivos específicos mencionados en la metodología. La herramienta propuesta se funde como una guía para el planificador minero y podría ser utilizada para identificar la ruta crítica, los cuellos de botella y errores operacionales, pero dentro de la optimización de una forma dinámica en vez de una solución estática. En consecuencia, se transforma en un gran apoyo para el planificador al hacer gran cantidad de pruebas con un gasto de recursos menores a otras metodologías, encontrando la mejor solución operacional tanto para el largo como para el corto/mediano plazo ya definido. En ese sentido, las pruebas muestran que, según las características de constructibilidad, la secuencia tiene diferentes tendencias de desarrollo y generan cambios en el plan de producción de tal forma que se aminore los dilemas de reconciliación entre las distintas escalas de tiempo. Además, se ha logrado plantear la optimización de diferentes unidades de producción incorporando sus relaciones operacionales y puntos de accesos sin utilizar muchos recursos ni manipular demasiada información, como han dado a conocer otras investigaciones. Con respecto a las precedencias estas fueron extraídas del plan original, el cual se extrajo de un archivo de diseño con estas características deja libre la posibilidad de elección de caminos y por tanto un gran avance, tanto en el concepto como la forma en que fue llevado a cabo.

Por tanto, ofrece una ventaja a otras metodologías de preparación minera que no generan una dependencia entre las unidades básicas de explotación, ni se asimilan a la realidad con relación a los tiempos y si lo hacen, deben realizarlo a través de relaciones ficticias que deben ser testeadas y corroboradas. Por lo tanto,

la herramienta propuesta no sólo puede producir planes que son más discretizados en relación con tiempo

asegurando su congruencia, sino que también en la gestión de control al definir un programa de proyecto más completo y efectivamente testeado. Al poner como ejemplo de ello el caso estudio donde se observó importantes diferencias entre el plan de construcción y otro utilizando la metodología propuesta (DBS), sin importar el origen de las diferencias que llegaron a ser de un 10 %, se está seguro de que en el segundo caso se compatibilizó ambos factores y por tanto se reafirma en lógica que ofrece mayor precisión en sus resultados. Dentro de las versatilidades más importantes del trabajo realizado, es que se pudo comparar el desarrollar un mismo proyecto con diferentes técnicas constructivas, ofreciendo para el caso de estudios diferentes metodologías de utilización de tiempo en faena.

Finalmente, se recomienda la utilización de esta metodología en los grandes proyectos mineros subterráneos a fin de asegurar un mejor resultado futuro; pues sirve de prueba de análisis sobre la congruencia entre las distintas etapas y sectores de ingeniería, en la cual difícilmente una persona puede imaginar con detalle todas las partes que involucra. Si bien es de esperar que al ocurrir el proceso de operativización se generen cambios, y eventualmente un menor valor final de

proyecto, es por lo menos una cota superior factible que sin duda será a lo menos igual que la solución realizada sin guía alguna.

TRABAJOS FUTUROS Y RECOMENDACIONES DE ESTUDIO DE LA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

La implementación del modelo de optimización descrito en esta investigación implica un avance importante que permite abordar el problema de la desagregación en la planificación minera subterránea de producción con preparación y desarrollo minero. Más aún, permite realizar una evaluación y observar los cambios en relación del secuenciamiento y agendamiento de un proyecto de manera inteligente. Es, por tanto, tal como se menciona en el capítulo introductorio, que lo desarrollado en el presente escrito corresponde a una base autosuficiente para iniciar nuevos estudios en esta línea de investigación. Se dejan planteados en tanto algunos desafíos por abordar en el futuro:

Académicas

1. Resulta interesante realizar el análisis más profundo a los tiempos e insertar una serie de datos:
 - Agregar tiempo de traslado
 - Variar tiempo por calidad de roca, tamaño de galería o equipos utilizados. Una solución paralela a la planteada habría sido no agregar más restricciones, sino que aumentar el número de variables. Se estima un paso que debe ser testeado pues podría ser que, si bien alargara el tiempo de resolución, no consumiera tantos recursos computacionales y, por tanto, pudiese resolverse problemas aún más grandes.

2. Otro cambio al modelo de programación matemática propuesto sería cambiar las restricciones de actividad simultaneas por grupos, y así generar una metodología más simple, es decir, generar grupos de actividades que no se puedan hacer en simultaneo
3. Un concepto clave dentro de la minería subterránea es la estabilidad geomecánica por seguridad y asegurar producciones futuras. Dicha evaluación no fue incluida en el estudio hasta ahora. Si bien se afirmaba que existía cierta coherencia entre apertura de unidades básicas de explotación distintas, no estaba sujeto a ninguna decisión vinculada al macizo rocoso. Es importante comparar si es que la geomecánica entrega una restricción que no ha sido incorporada en el modelo (aunque sea indirectamente) y evaluar la posibilidad de realizar dicha anexión. Esto en pro de obtener planes que efectivamente sean factibles para la industria y no sólo para el computador.
4. Finalmente, con relación a la heurística de resolución implementada (por tiempos incrementales), se cree que es posible mejorar su potencial y así poder resolver de 119 problemas de mayor magnitud o en su defecto, problemas con mayor detalle. Interesante sería trabajar no sólo con dos tamaños de periodos, sino que con varios más.

Industriales

- También se hace necesario dar a conocer el desarrollo implementado hasta ahora para evaluar el interés real de la industria por estudiar estos fenómenos. Para ello es imprescindible poder realizar más pruebas de tipo industriales con consentimiento de las empresas mineras.

Capítulo 8

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

Referencias

Camhi, J. 2012. Optimización de los Procesos de Desarrollo y Construcción en Minería de Block Caving Caso Estudio Mina El Teniente Codelco Chile. Tesis para Optar al Grado de Magíster en Minería. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas

Reporte de Producción Codelco 2017-2018, Fuente

Codelco.cl Memoria y Prontuario Codelco 2011, Fuente

Codelco.cl

Construirá Codelco en los próximos 5 años". Prensa Codelco ,2012), Fuente Codelco.cl

Rocher, W., Rubio, E. and Morales, N. 2011. Eight-dimensional planning – Construction of an integrated model for mine planning involving constructability. Proceedings of 35th International Symposium on Application of Computers in the Minerals Industry (APCOM 2011). Wollongong, Australia. 393-406.

Vergara, Y. 2014. Altura de columna en Block/Panel Caving. Tesis para Optar al Grado de Ingeniera Civil en Minas. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas

Lerchs. H, I. F Grossman. "Optimum design of Open-pit Mines", Transactions of the Canadian Institute of Mining and Metallurgy, Volume LXVII, pp. 17-24, 1965.

Grado de Máster en Ingeniería de Alexandre Marinho de Almeida, "Surface Constrained Stochastic Life-of-Mine Production Scheduling", McGill University 2013.

Morales, N., Jélvez, E., Nancel, P., Marinho, A., Guimarães, O. (2015). A Comparison of Conventional and Direct Block Scheduling Methods for Open Pit Mine Production Scheduling. Apcom.

Music, A. (2007). Diagnóstico y optimización de disparos en desarrollo horizontal. Mina El Teniente. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Autio, J., Kirkkomaeki, T. (1996). Boring of full scale deposition holes using a novel dry blind boring

method (Issue 09). <https://inis.iaea.org/search/search.aspx?origq> = *RN*: 28033468

Vasquez, J. (2018). Optimización-de-planos-mineros-en-minas-explotadas-porPanel-Caving-incluyendo-actividades-de-preparación-minera

SERNAGEOMIN. (2010). Guía metodológica para sistemas de fortificación y acuñadura. Agencia Nacional de Minería, 1–13

Ferreira, Y. 2019. Estado del arte del precondicionamiento en la explotación minera subterránea Tesis para Optar al Grado de Ingeniera Civil en Minas. Santiago, Chile. Universidad Nacional Andres Bello, Facultad de Ingeniería

Morales, E., Codelco, C., Division, T. (2008). Tunneling and construction for 140 .000 tonnes per day - El Teniente mine - Codelco Chile. June.

Ortiz, C. J. (2011).

Métodos de explotación. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería En Minas, 271–338.

Bibliografía

1. Alford, C. 1995. Optimization in underground mine design. Proceedings of Twenty Fifth
2. International Symposium on Application of Computers in the Minerals Industry (APCOM 1995). Brisbane, Australia. 213-218.
3. Botha, J. and Nichol, S. 2010. Rapid underground development optimisation at Cullinan Diamond Mine using computer simulation. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy (SAIMM). 135-148.
4. Brazil, M., Lee, D., Rubinstein, J.H., Thomas, D.A., Weng, J.F. and Wormald, N.C. 2005. Optimisation in the design of underground mine access. Journal of the Australasian Institute of Mining and Metallurgy (SAIMM). Vol. 14(1). 121-124.
5. Casten, P.T., Rachmad, L., Arkadius, T., Osborne, K. and Johnson, M. 2008. Freeport Indonesia's Deep Ore Zone mine – expanding to 80,000 tonnes per day. Proceedings of Fifth International Conference Exhibition on Mass Mining (MassMin 2008). Lulea, Suecia. 265-274.
6. Chanda, E. K. C. 1990. An application of integer programming and simulation to production planning for a stratiform ore body. Journal Mining Science and Technology. Vol. 11(2). 165-172.
7. Deist, F.H., Duvel, L.F., Austin, J.D. and Small, H.D. 1972. Development application of a computer system to aid in the planning of production in mines. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy (SAIMM). 79-81.

8. Deutsch, C. 2004. The place of geostatistical simulation in resource/reserve estimation. Proceedings of International Conference on Mining Innovation (MININ 2004). Santiago, Chile. 121
9. Díaz, G. and Morales, E. 2008. Tunneling and construction for 140,000 tonnes per day – El Teniente mine – Codelco Chile. Proceedings of Fifth International Conference Exhibition on Mass Mining (MassMin 2008). Lulea, Suecia. 83-96.
10. Encina, V., Méndez, D., Caballero, C. and Osorio, H. 2010. New approach for rapid preparation of block caving mines. Journal Mining Technology. Vol. 119. 162-167.
11. Epstein, R., Gaete, S., Caro, F., Weintraub, A., Santibañez, P. and Catalan, J. 2003. Optimizing long term planning for underground copper mines. Proceedings of Fifth International Conference Cooper 2003. Santiago, Chile. 265-279
12. Epstein, E., Goic, M., Weintraub, A., Catalán, J., Santiáñez, P., Urrutia, R., Cancino, R., Gaete, S., Aguayo, A. and Caro, F. 2010. Optimizing long-term production plans in underground and open pit copper mines. [pdf]. Santiago. Available at: <<http://escholarship.org/uc/item/475353w1.pdf>>. [Accessed 15 August 2011].
13. Fava, L., Millar, D. and Maybee, B. 2011. Scenario evaluation through Mine Schedule Optimisation. Proceedings of Second International Seminar on Mine Planning (Mine Planning 2011). Antofagasta, Chile.
14. Flores, G., Karzulovic, A. and Brown, E.T. 2004. Current practices and trends in cave mining. Proceedings of Fourth International Conference Exhibition on Mass Mining (MassMin 2004). Santiago, Chile. 83-90.
15. Jawed, M. 1993. Optimal production planning in underground coal mines through goal programming: A case study from an Indian mine. Proceedings of Twenty Fourth International Symposium on Application of Computers in the Minerals Industry (APCOM 1993). Montreal, Canadá. 44-50.
16. Johnson, T.B. 1968. Optimum open pit mine production scheduling. Report of November from the Operations Research Center, Berkeley.
17. Krige, D. G. 1951. Astatistical approach to somebasic mineevaluation problems onthe Witwatersrand. Journal Chemical Metallurgical Mining Society South Africa. Vol. 52(6). 119-139.
18. Lerchs, H. and Grossmann, I. 1965. Optimum design of open-pit mines. Journal Canadian Institute of Mining and Metallurgical Bulletin. Vol. 58. 17-24. 122
19. Lightner, F., Faverty, R. and Coughlin, W.E. 1983. Borealis project: A fast-track approach to mine development. Journal Mining Engineering. 1564-1565.
20. Lizotte, Y. and Elbrond, J. 1985. Optimal layout of underground mining levels. Journal Canadian

21. Magda, R. 1994. Mathematical model for estimating the economic effectiveness of production process in coal panels and an example of its practical application. *International Journal of Production Economics*. Vol. 34(1). 47-55.
22. Nehring, M., Topal, E. and Little, J. 2010. A new mathematical programming model for production schedule optimization in underground mining operations. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy (SAIMM)*. Vol. 110. 437-445.
23. Newman, A. and Kuchta, M. 2007. Using aggregation to optimize long-term production planning at an underground mine. *European Journal of Operational Research*. Vol. 176(2). 1205-1218.
24. Newman, A., Kuchta, M. and Martinez, M. 2008. Long and short term production scheduling at LKAB's Kiruna mine. *Handbook of Operations Research in Natural Resources*. Eds. Springer. Chap. 1.
25. Newman, A., Rubio, E., Caro, R., Weintraub, A. and Eurek, K. 2010. A review of operations research in mine planning. *Journal Interfaces*. Vol. 40. 222-245.
26. O'Sullivan, D. and Newman, A. 2010. Long-term extraction and backfill in a complex underground mine. *Proceedings of Fourth International Conference on Mining Innovation (MININ 2010)*. Santiago, Chile.
27. Osanloo, M., Gholamnejad, J. and Karimi, B. 2008. Long-term open pit mine production planning: A review of models and algorithms. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. Vol. 22(1). 3-35.
28. Pesce, J. and Ovalle, A. 2004. Production capacity of a mass caving. *Proceedings of Fourth International Conference Exhibition on Mass Mining (MassMin 2004)*. Santiago, Chile. 75-78. 123
29. Rahal, D., Smith, M., Van Hout, G. and Von Johannides, A. 2003. The use of mixed integer linear programming for long term scheduling in block cave caving mines. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy (SAIMM)*. Cape Town, South Africa. 123-131.
30. Rocher, W., Rubio, E. and Morales, N. 2011. Eight-dimensional planning – Construction of an integrated model for mine planning involving constructability. *Proceedings of 35th International Symposium on Application of Computers in the Minerals Industry (APCOM 2011)*. Wollongong, Australia. 393-406.
31. Rocher, W., Smoljanovic, M., Rubio, E. and Morales, N. 2012. Optimal sequencing and scheduling for a block/panel cave mining. *Proceedings of Sixth International Conference Exhibition on Mass Mining (MassMin 2012)*. [in prep].
32. Rubio, E. and Diering, T. 2004. Block Cave production planning using operation research tools. *Proceedings of Fourth International Conference Exhibition on Mass Mining (MassMin 2004)*. Santiago,

Chile. 141-149.

33. Sarin, S. and West-Hansen, J. 2003. The long-term mine production scheduling problem. *Journal IEE Transactions*. Vol. 37(2) 109-121.
34. Serpell, A. and Alarcón, L. 2003. *Planificación y control de proyectos*. Editorial Universidad Católica de Chile. Santiago. Chile.
35. Silva, R. 2003. *Programación de actividades para un proyecto explotado por panel caving*. Tesis para optar al grado de Ingeniero Civil de Minas. Departamento de Minas. Universidad de Chile. Santiago. Chile.
36. SME, 2011. *SME mining engineering handbook*. Tercera edición. Editado por Peter Darling. Englewood, Colorado, USA.
37. Topuz, E. and Duan, C. 1989. A survey of operations research applications in the mining industry. *Journal Canadian Institute of Mining and Metallurgical Bulletin*. Vol. 82(925). 614-619.
38. Trout, L. 1995. Underground mine production scheduling using mixed integer programming. *Proceedings of Twenty Fifth International Symposium on Application of Computers in the Minerals Industry (APCOM 1995)*. 395-400.
39. Espinoza, D., Goycoolea, M., Moreno, E., and Newman, A. 2013. Minelib: a library of open pit mining problems. *Annals of Operations Research*, vol. 206, no. 1. pp. 93–114.
40. Morales, N. and Reyes, P. 2016. Increasing the value and feasibility of open pit plans by integrating the mining system into the planning process. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 116. pp. 663–672
41. Iford, C., Brazil, M., Lee, D. (2007). *Optimisation in Underground Mining*.
42. Castro, C. (2015). *Modelamiento numérico de la dilución por sobreexcavación en minería subterránea explotada por Sublevel Stopping (Magíster en Minería)*. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
43. Cepuritis, P. M. Villaescusa, E. (2006) Comprehensive back analysis techniques for assessing factors affecting open stope performance. *Rock Mechanics in Underground Construction ISRM International Symposium*.
44. Clark, L. (1998) Minimizing dilution in open stope mining with a focus on stope design and narrow vein longhole blasting. University of British Columbia.
45. Clark, L. Pakalnis, R. (1997) An empirical design approach for estimating unplanned dilution from open stope hangingwalls and footwalls. 99th Annual AGM–CIM conference, Vancouver.
46. Cochilco, Dirección de Estudios (2013). *Monitoreo de la mediana y pequeña minería chilena*. Dunne, K. Pakalnis, R. C. (1996). Dilution aspects of a sublevel retreat stope at detour lake mine. *Rock*

mechanics. Balkema, Rotterdam., 305 - 313.

47. Gómez, A. (2015). *Secuenciamento Multicriterio para Minería Subterránea Selectiva*. (Magíster en Minería). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
48. Hartman, H. (1992). *SME Mining Engineering Handbook*. Second edition, Volume 1, 643 – 645.
49. Jorquera, M. (2015). *Método de explotación Bench Fill y su aplicación en Minera Michilla*. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
50. Luxford, J. (2000). Reflections of a Mine Scheduler. *MassMin? 2000*, 119 – 126.
51. Moreno, C. (2015). *Manual de Usuario UDESS*. Delphos Mine Planning Laboratory, Universidad de Chile.
52. Ortiz, J. (2008). *Apuntes de curso Explotación de Minas*. Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad de Chile.
53. Pakalnis, R. C. Vongpaisal, S. (1993) *Mine design an empirical approach*. B. A. Archibal (Ed.) *Innovative mine design for the 21st century*. Balkema, Rotterdam.71
54. Rocher, W., Rubio, E., Morales, N. (2011). *Secuenciamiento de Preparación y Desarrollo Minero en Faenas Subterráneas*. Delphos Mine Planning Laboratory, Universidad de Chile. 62° Convención Anual Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, Calama, Chile.
55. Scoble, M. J. Moss, A. (1994) *Dilution in underground bulk mining: Implications for production management*. Geological Society, London, *Special Publications*, 79(1), 95-108.
56. Trout, P. (1995). *Underground Mine Production Scheduling Using Mixed Integer Programming*. APCOM XXV 1995 Conference, 395 - 400.
57. Villaescusa, E. (2003). *Global Extraction Sequences in Sublevel Stopping*. MPES 2003 Conference, Kalgoorlie, Australia.
58. Yarmuch, J., Ortiz, J. (2011) *A Novel Approach to Estimate the Gap Between the Middle and Short-term Plans*. 35th Apcom Symposium / Wollongong, New South Wales.
59. Boland, N., Dumitrescu, I., Froyland, G., and Gleixner, A., 2009. "LP-based disaggregation approaches to solving the open pit mining production scheduling problem with block processing selectivity." *Computers and Operations Research*, Vol. 36, No. 4, pp. 1064–1089.
60. Caccetta, L., Giannini, L.M. and Kelsey, P. (1998), *Application of Optimization Techniques in Open Pit Mining*, *Proceedings of the Fourth International Conference on Optimization Techniques and Applications (ICOTA'98)* (L. Caccetta et al. Editors.), Vol. 1, pp. 414–422. (Curtin University of Technology: Perth, Australia).
61. Gershon, M. (1983), *Mine Scheduling Optimization with Mixed Integer Programming*, *Mining*

Engineering 35, 351–354.

62. Gershon, M. (1987), Heuristic Approaches for Mine Planning and Production Scheduling, *Int. Journal of Mining and Geological Engineering* 5, 1–13.
63. Leite A. and R. Dimitrakopoulos (2002), Stochastic optimisation model for open pit mine planning: application and risk analysis at copper deposit. p. 1-13.
64. Morales C. and Rubio E. (2010), "Development of a mathematical programming model to support the planning of short-term mining", *Proc. of the 34th Intern. Symp. on Application of Computers and Operations research in the Mineral Industry (APCOM)*, Vancouver, Canada.

Apéndice A

ANEXOS

Anexo1

An application of Direct Block Scheduling for short-term construction scheduling in panel caving

C Toledo Delphos mine planning lab/ AMTC / DIMIN, UNIVERSIDAD DE CHILE, CHILE

N Morales Delphos mine planning lab/ AMTC / DIMIN, UNIVERSIDAD DE CHILE, CHILE

Abstract

Mine preparation is an important aspect of underground mining with an enormous impact on the availability of infrastructure for production and, therefore, on the economic value of a project, its execution, and the safety of the operation. Mine preparation involves several areas of operation from mine planning to geomechanics, supply, Human Resources, among many others. Despite the relevance of mine planning, optimization tools to support this process are lacking, both in practice and in the literature. This leaves the planner with few opportunities to test the robustness of construction plans, which may impact their fulfillment and, therefore, the whole project. In this work, an optimization methodology is proposed to evaluate different sequences of mine construction occurring simultaneously at different levels of a panel caving mine in the context of a short-term plan (2 months) on an hourly basis. The methodology relies on Direct Block Scheduling, a technique that comes from mine planning in open pit mines, which is adapted here to the case of underground mine preparation. Using this method, different types of construction sequences, precedence among building activities, and different performance scenarios that depend on the characteristics of the rock mass can be analyzed. When applied to a real mine case, the results show that the plan obtained complies with all the operational constraints and, therefore, appears as a valid methodology to generate optimized plans in an automatic way and could be used by planners to evaluate different options before deciding on the best final plan.

1 Introduction

Mine development is the union of all activities necessary for constant and safe exploitation of a specific sector or mine. The development plan impacts the execution of a whole project because the availability of the production area depends on its successful execution. Historically, efforts to develop computational tools have focused on assisting the process of production scheduling and, as a result, mathematical models and optimization software to support this process, particularly in open pit mining, are widely available. In the case of panel caving, for example, there are well established software solutions to aid the determination of the optimal floor, economic envelope, and the long-term plan.

Conversely for production scheduling, construction planners do not have sophisticated models or algorithms to achieve optimal plans or test their robustness. Indeed, the process of planning mine development is more dependent on the expertise of the planner rather than on the use of optimization tools. Typically the software used is to evaluate the plans conceived by the planners, but not to assist them in elaborating the best one.

The situation above is particularly true in the case of medium and short-term planning for underground mines. In fact, the methodology used varies from site to site, or expert to expert, and currently there is no common methodology that covers all the variables and criteria required for an optimal construction plan. Instead, sophisticated spreadsheets for the scheduling of construction activities are the most common tools for the task.

The currently used approach does allow planners to find feasible solutions but leaves no space for optimization, let alone for testing the robustness of their plans or determining the long-term impact of short-term decisions.

From the point of view of mathematical programming, mining-development planning can be seen as a schedule of activities, where these activities are related through a series of restrictions that can be operational or geotechnical. They can include milestones or deadlines and require some resources for their execution, which can be shared or specialized. For example, (Kuchta et al., 2004) used mixed integer programming to schedule operations at the Kiruna Mine, specifically, which production blocks to mine and when to minimize deviations from planned monthly production quantities and comply with operational constraints. Another example is in “Block Cave Production Scheduling Optimization Using Mathematical Programming” (Y. Pourrahimian, H. Askari-Nasab and D. (2012), which presents a Mixed-integer linear programming (MILP) model that seeks to optimize extraction to maximize the net present value (NPV) using operational restrictions and penalties for mixing ores of different qualities. However, the maximum NPV does not consider such variables as uncertainties in grade, type of advancement, or geomechanic parameters. Finally, Nancel-Penard et al. (2020) developed an optimization model and a resolution algorithm for long-term scheduling in a panel caving mine. For a more detailed review of optimization techniques for mine planning, please refer to Cullenbine, C., Wood, R.K. & Newman, A.(2011).

The approaches mentioned above use models that address a specific case study or at least the specific mining method being considered and, therefore, when utilizing mathematical programming, require the development of specific resolution algorithms to find good solutions. These solutions may not be applicable in a short-term context, where the number of activities and the variables on which they depend imply long periods of calculation time to be solved.

In this paper, we utilize a different approach, which consists of adapting an approach utilized for open pit mining, namely Direct Block Scheduling (DBS). In this framework, focused on production scheduling, the mathematical model decides the optimum period of extraction and destination (process or waste) for the blocks of an open pit mine, subject to precedence constraints which model the slope angles and resource constraints, such as production or mining capacity. The motivation to use DBS comes from the fact that it has been widely studied in the literature and there are efficient algorithms even when a large number of activities and variables need to be managed. See for example Espinoza, D., Goycoolea, M., Moreno, E., and Newman, A (2013); Lambert ,A. Brickey, A. Newman, K.Eurek. (2014) or Enrique Jélvez, Nelson Morales, Pierre Nancel-Penard, Juan Peypouquet & Patricio Reyes (2016) regarding DBS. Therefore, the approach in this work is to model construction activities as blocks and to use the computational machinery already in place through DBS to find optimal solutions.

It is worth noting that DBS has already been used in underground mining. For example, Brickey (2015) uses DBS to maximize the time-off ounces of gold extracted and determines the optimal or almost optimal sequence of development-related activities, extraction and filling of an underground mine. Constraints include physical precedence and resource capabilities. Research uses data from an existing underground mine; however, the formulation of the model has the ability to serve other underground mines in a similar way with structured data and provides the ability to customize constraints. In recent years the DBS methodology has been implemented in underground mining with different variants, but none of these have applied it to short-term (or very short-term) planning or with new restrictions.

2 Methodology And Mathematical model.

The proposed methodology takes the long-term mine development plan as an input for a mathematical optimization model that will generate an optimized version of this plan in the short-term. The base plan consists of activities such as horizontal and vertical developments, construction and installation of infrastructure, which are related to each other through precedents and are subject to operational constraints.

As mentioned before, we will model the construction activities as blocks (for direct block scheduling). This requires a proper discretization of the different activities, their precedences, and the resources they may require for execution.

2.1 Model considerations

For short-term planning, the model is subject to the following variables:

$x \in X$ Activity blocks

$t \in T$ time periods defining the time horizon

$r \in R$ production and processing resources

Bb blocks above b that must be extracted directly before b

V_{xt} net present value of block b if extracted in period t (\$)

R_{xt} consumption of resource r associated with the extraction of block b

RT_t amount of resource r available in time period t

Rm_t minimum level of resource r to be consumed in time period t

D activity precedence number

W time index (running from 1 to the time horizon)

$$MAX: VALOR = \sum_{t=1}^T TD \sum_{x \in X} B_{xt} V_{xt}$$

- $TD =$ Discount rate is given by the following formula

$$TD = \frac{1}{(1+r)^a}$$

$$a = \sum_{s \leq t} K_s \text{ where } K_s \text{ is the duration in shifts of the total number of activities carried out}$$

$r =$ rate of return

1) $B_{xt} = \{1, \text{ If activity } i \text{ is carried out in period } t, 0, \text{ in another case}$

2) $B_{xt} \leq B_{xt'} \forall x \in X, t \in T$

3) $B_{xt} \leq \sum_t B_{xt'} \forall x \in X, t \in T$

4) $B_{x,t-1} \leq B_{xt} \forall x \in X, t > 1$

5) $\sum_{x \in X} R_{xr} (B_{xt} - B_{xt-1}) \leq RT_t \forall r \in R, t \in T, x \in X$

6) $\sum_{x \in X} R_{xr} (B_{xt} - B_{xt-1}) \geq Rm_t \forall r \in R, t \in T, x \in X$

7) $B_{x,t,D-1} \leq B_{j,t-\Delta,D-1} \forall x \in X, \forall w = \Delta + 1, \Delta 2, \dots, T, \forall x \in X$

$$B_{x,\Delta,D-1} = 0$$

2.1.1 Long-term plan

The base plan or long-term plan is a monthly plan with a 1-year horizon. This plan delivers volumes, meters and units of the work considered to be carried out on a monthly basis (horizontal, vertical, civil etc.) in an annual period. It includes the growth patterns for each sector and the monthly requirements for incorporating more area. It also indicates the most important activities that should be performed within the selected periods or to achieve the milestones. From this plan, two periods are extracted, which will be used as a base plan (horizontal developments, vertical developments, final infrastructure (roadways, etc), precedence, restrictions, etc. carried out in this period) and will be compared to the results of the proposed model.

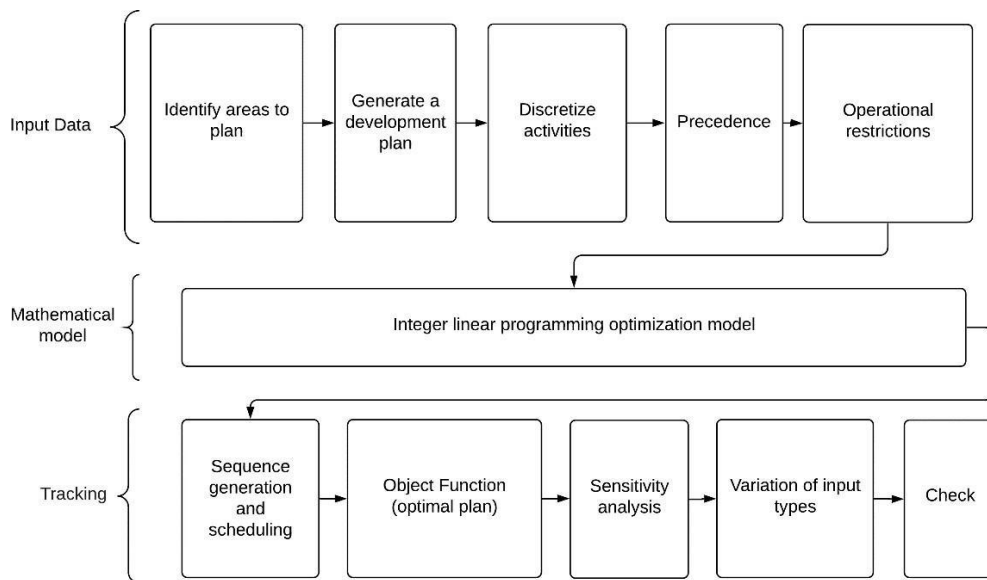


Figure 1 Preparation of input data, utilization of mathematical model and reporting of solutions

Figure 1 presents some of the concepts described above, illustrating how the data has to be prepared and how the data interact with the mathematical model.

2.1.2 Drilling and blasting operational cycle

For modelling using direct block scheduling, mine unit operations are subdivided into several activities, which are presented in Figure 2.

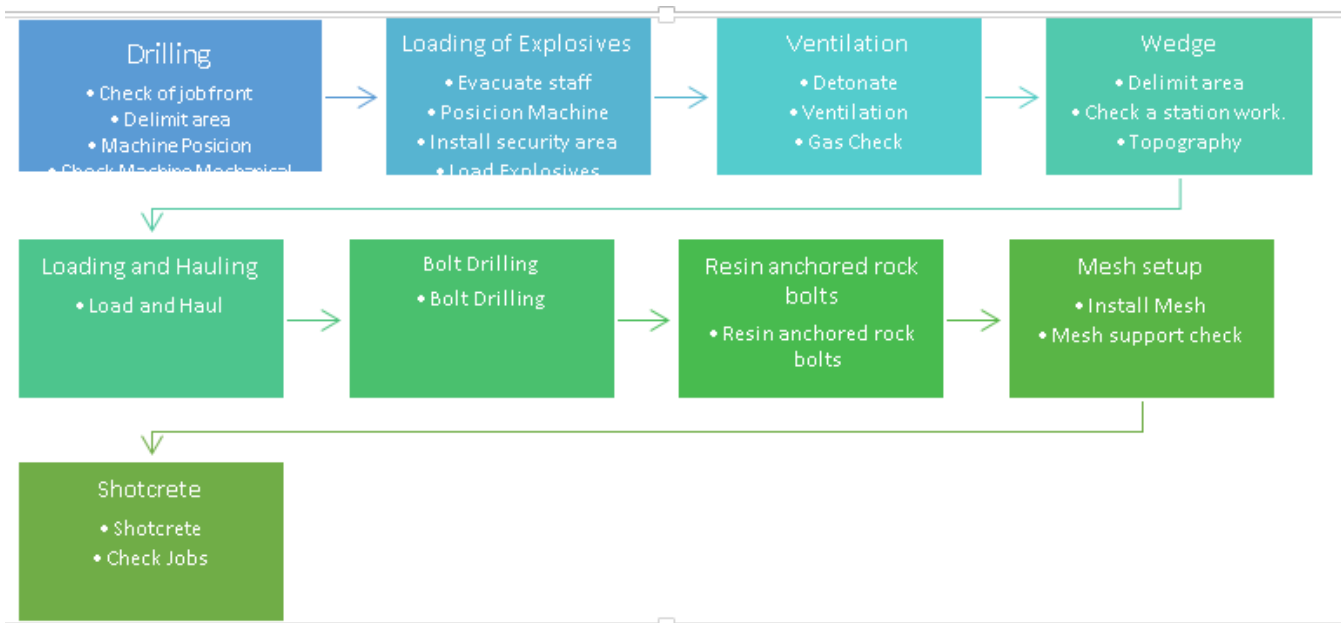


Figure 2 Decomposition of horizontal construction unitary operations into activities

A relevant case is that of the operation of “Loading of Explosives”, which contains the following subactivities: zone isolation, machinery positioning, installation of safety perimeter, explosive loading, and connection of explosives. Because of safety regulations, this operation cannot be interrupted at any point, and therefore, we consider two potential ways of modelling this operation:

The operation is considered as a unique whole, consisting of all the subactivities.

The operation is split into two parts: (1) zone isolation, machinery positioning, installation of safety perimeter, and (2) explosive loading and connection of explosives.

2.1.3 Effective Time

The job time is divided into several parts from the beginning and including the effective working time until the end (Figure 3).

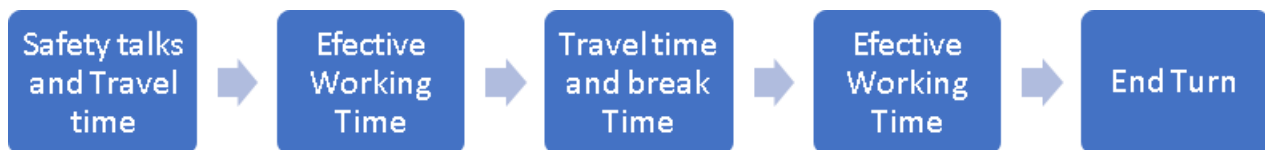


Figure 3 Nominal shift time.

- Safety talks and Travel time: This consists of the time that workers participate in the safety talk and then move to the mine. In this period, only the ventilation activities of horizontal tasks can be carried out.
- Effective Working Time: This is the time workers are on the front performing preparation activities (except ventilation).

- Travel time and break Time: During this time, workers go to lunch/break and return. During this period, only ventilation activities of horizontal tasks can be carried out.
- End Turn: This is the time that workers end their shifts. In this period, only ventilation activities of horizontal tasks can be carried out.

2.2. Modelling construction activities using Direct Block Scheduling

We consider four different ways of modelling the activities using DBS: uninterrupted operation, fully flexible interruption, mixed operation, and improved mixed operation. The latter is the model proposed here.

Table 1 Summary: Different strategies tested vs. model-strategy proposed

Model	Description
Uninterrupted Operation	This is a pessimistic model, which assumes that operations have to be scheduled in such a way that there are no possible interruptions (i.e. no subactivities), which means that the result is an upper bound of the total construction time.
Fully-Flexible Interruption	This model assumes that activities can be interrupted as much as required in any subactivity. This is not completely realistic, but provides an optimistic result, which can be used as a lower bound of the total construction time.
Mixed Operation	This model takes into account that the explosive loading task cannot be interrupted but allows other activities to be interrupted. As such, it is a more realistic way to schedule the activities.
Improved Mixed Operation(model proposed)	This corresponds to the case where all operations, except the explosive loading can be interrupted, and the explosive loading can be split into two (See Section 2.1.2)

3 Case study

The methodology was applied using the mining development plan of a mining operation, which is carried out through the Panel Caving method and is located in Chile. The five typical levels of an operation of its size are considered, which include (1) undercut, (2) production (3) ventilation, (4) loading level, (5) ore crossing systems.

To implement the base plan in the mathematical model, about 110,000 activities were defined, and 4 cases were analyzed according to the models described in Table 1.

Table 2 Summary of cases in terms of activities and constraints

		Activities	Precedences	Constraints
	Reference Plan	600	700	200
Short-Term Model	Uninterrupted Operation	111,000	250,000	253,750
	Fully-Flexible Interruption	111,000	250,000	240,000
	Mixed Operation	111,000	250,000	241,925
	Improved Mixed Operation	111,000	250,000	241,375

3.1 The base plan

A long-term plan was separated into two-month horizons for the purposes of this case study. This plan provided guidelines for all activities necessary to discretize more effectively over a realistic time period. It also indicated when some of the main milestones had to be developed. The details of the activities to be carried out on a monthly basis are shown below.

Table 3

Number of days	60 days
Horizontal Development	306 meters
Vertical Development	294 meters
Hydraulic Fragmentation	8 units
Walls	12 units

3.2 Model parameters

Table 4 Activity horizontal development

Activity	Time(hours)
Drill	3 hours
Load Explosives	3 hours
Ventilation	2 hours
Wedge	2 hours
Load and Haul	2 hours
Bolt Drilling	3 hours
Resin anchored rock bolts	3 hours
Mesh	3 hours
Shotcrete	3 hours
TOTAL	24 Hours

Table 5 Vertical development

Activity	Raiser Borer	Blind Hole
Fixed activities		
Concrete base construction	17 hours	1 week
Forged concrete base	1 week	
Assembly team	3 days	
Disassembly team	1 week	1 week
RB Concrete base retreat	1 week	1 week
Variable activities		
Pilot shot drilling	13 inches	11 m/day
Ream		Ream 1.5 meters 5 m/day
		Ream 2 meters 3 m/day

4 Model comparisons

Each model above was compared with the proposed Improved Mixed Operation. Each model has its limitations, which were explained and defined in section 2.2.

4.1 Uninterrupted operation

The work scheduling time for the construction of the horizontal developments of the undercutting level was more (1600 vs 1441) than the model proposed (Improved mixed operation), but the final computation time is less; this occurred because of less restriction and precedence.

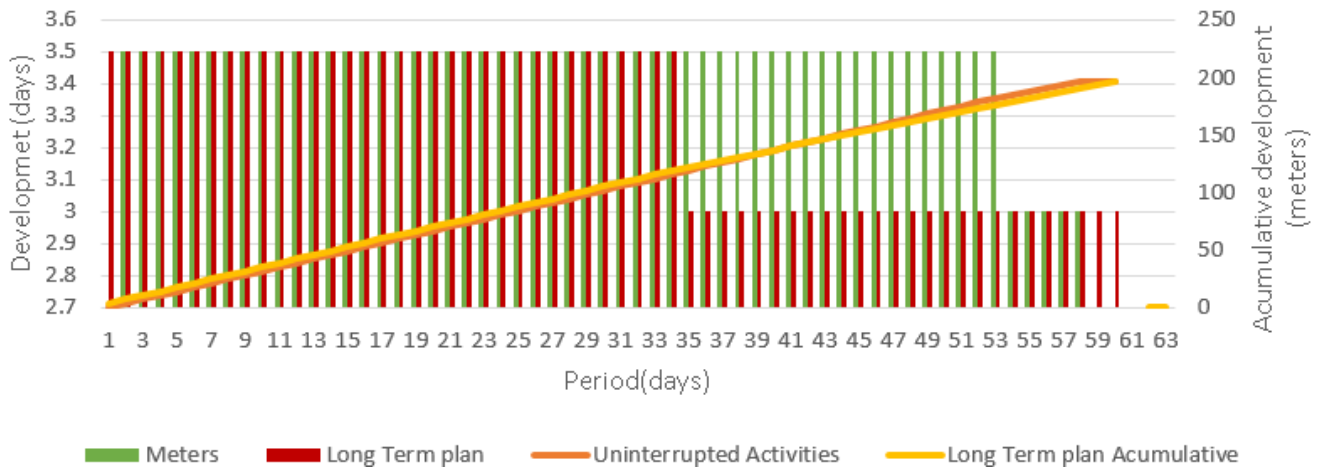


Figure 5 Uninterrupted operation undercut development

4.2 Flexible operation

It is observed that the construction time of horizontal developments is less than any other alternative. The generation of plans without any operational restriction (any activity can be interrupted) allows for plans with a very short time; this is unrealistic since there are activities which must be completed and thus require some restriction.

The time variation is around 5% compared to the proposed model. This is mainly due to the interruption of activities such as face drilling and loading of explosives.

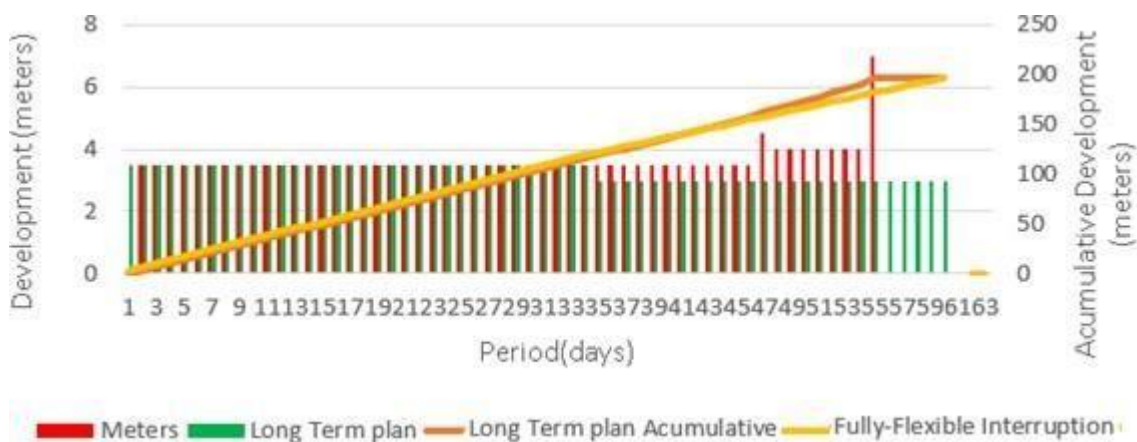


Figure 6 Flexible operation undercut development

4.3 Mixed operation

The generation of plans with certain restrictions generates plans that are closer to reality with a variation of + 3% compared to the proposed model.

The more Restrictions we enter into the system, the more computation time is required, and the time scheduling tends to increase.

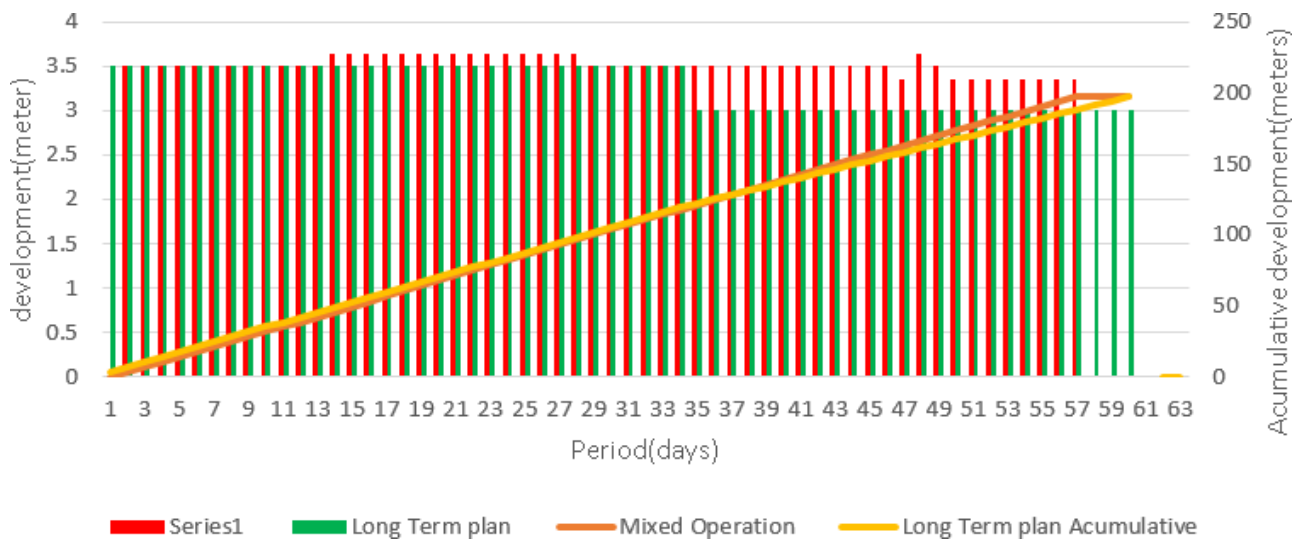


Figure 7 Mixed operation undercut development

4.4 Improved mixed model

The proposed model generates a plan which is realistic with almost zero time variation, and allows us to maintain critical activities without interruption.

It is observed in the graph that the behavior is very similar to the base plan; it only varies in its final part.

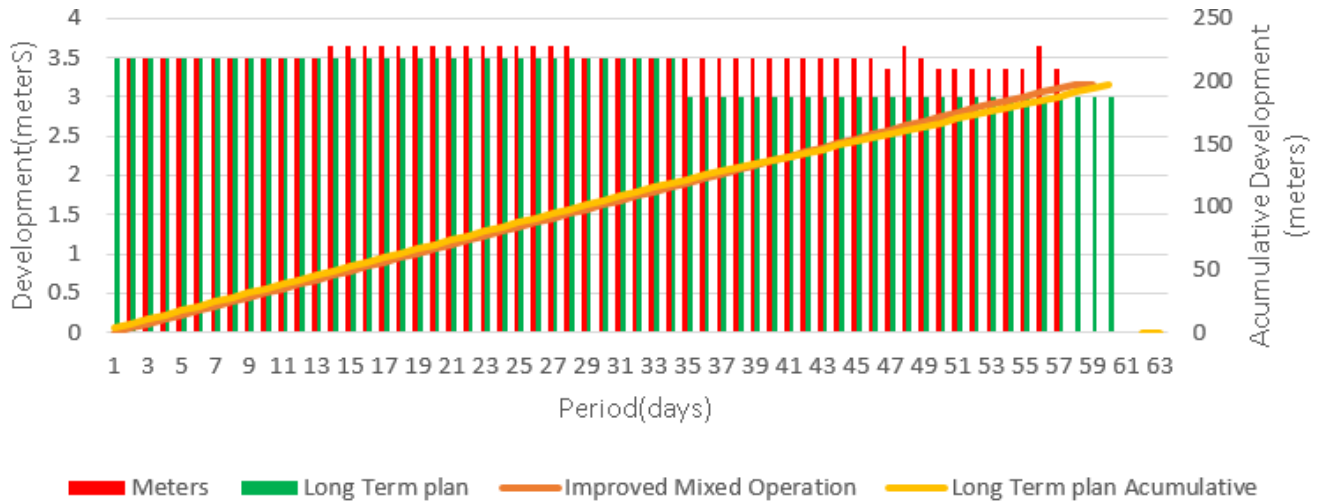


Figure 8 Improved mixed operation undercut development

5 Analysis and discussion

Comparison table different models

Table 6 Time

Model	Construction time (hours)
Mixed operation	1,500
Uninterrupted activities	1,600
Improved mixed Operation	1,441
Fully-Flexible interruption	1,400

Table 7 Model comparison

Model	Construction time (hours)	Delta (%)
Base Case	1440	
Uninterrupted activities	1,600	+10%
Fully-Flexible interruption	1,400	-4%
Mixed operation	1,500	+3%
Improved mixed operation(proposed model)	1,441	0%

Figure 10

Table 8 Final Results

Milestone	Deadline (Long-Term Plan)	Fulfillment
Horizontal developments	✓	✓
Vertical developments	✓	✓
Walls	✓	✓
Railways	✓	✓
Intersection fortification	✓	✓
Extraction points	✓	✓
Ventilation Developments	✓	✓

The model scheduled all activities associated with the program for the 2-month period, which corresponds to the program's time horizon.

The horizontal development plan is developed with the same operational sequence that gives us a long-term plan but in a discretized way. It also delivers the activities that must be carried out on each work front for the different levels (Undercut, production, transport and ventilation levels). However, by incorporating historical data on the performance of the development plan, the availability of resources by level, and the prioritization of higher impact jobs, such as mineral passing systems, the DBS technique provided a more efficient and effective plan.

6 Conclusions

In this paper we address the problem of short-term scheduling of construction activities in an underground mine operating using the panel caving method. To address the problem, we adopt the Direct Block Scheduling (DBS) technique, which is a methodology used for open pit mine production scheduling, but which allows efficient computation for large-scale activities subject to precedence constraints and resource availability.

The proposed methodology allows the automation of the mine development planning process, generating equivalent solutions that are operationally correct and that meet the defined times. The mathematical optimization model generates redistributed plans compared to the original plan, respecting operational precedents, and distributing the largest number of activities per period.

We apply the methodology in a real case study (base plan), considering different ways of utilizing DBS for modeling the problem and generate several plans accordingly, considering two theoretical cases (optimistic and pessimistic) as well as two practical ones.

The two practical plans scheduled all activities within the maximum period set for 2 months, however, while these two schedules meet the long-term construction targets, they show a slower progress with deviations between 0% and 10% (depending on the case). However, given the level of detail of the activities, these plans are potentially more reliable in their duration than the long-term one.

Another advantage of the proposed methodology is the speed of generating plans, which allows time to be gained for analyzing possible scenarios or doing sensitivity analyses, recalculating plans during execution, obtaining higher resolution solutions on a scale of weeks or days, and considering variability in the execution times of the activities. These last two options are being explored for use in the case study operation. Finally, the methodology shows relevant flexibility in terms of modelling, meaning that different operational modes could be abstracted and optimized using the same framework.

The results suggest the approach proposed here can improve mine development programming in terms of time and efficiency. In addition, the model provides the ability and flexibility to test various development scenarios, a capability that does not currently exist due to the way experts create programs.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Advanced Mining Technology Center and CONICYT/PIA Project AFB180004 for supporting this work.

References

- Brickey, A., 2015, Underground Production Scheduling Optimization with Ventilation Constraints. Ph.D. diss., Colorado School of Mines
Brickey,
- Enrique Jélvez, Nelson Morales, Pierre Nancel-Penard, Juan Peypouquet & Patricio Reyes (2016). Aggregation heuristic for the open-pit block scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, Volume 249, N° 3, pp. 1169-1177.
- Yashar Pourrahimian ,Hooman Askari-Nasab Dwayne Tannant “Block Cave Production Scheduling Optimization Using Mathematical Programming”(2012)
- Kuchta, Newman, and Topal: Implementing a Production Schedule at LKAB’s Kiruna Mine 134 *Interfaces* 34(2), pp. 124–134, ©2004 INFORMS
- Espinoza, D., Goycoolea, M., Moreno, E., and Newman, A. (2013). Minelib: a library of open pit mining problems. *Annals of Operations Research*, 206(1), 93–114
- W.Lambert,A. Brickey, A. Newman, K.Eurek : OPBS Tutorial 130 *Interfaces* 44(2), pp. 127–142, © 2014 INFORMS
- A.Newman ,E.Rubio,R.Caro,A.Weintraub,K.Eurek: A Review of Operations Research in Mine Planning *Interfaces* 40(3), pp. 222–245, © 2010 INFORMS
- Pierre Nancel-Penard , Nelson Morales, Valentina Rojas and Tomás González(2020); A heuristic approach for scheduling activities with ‘OR’- precedence constraints at an underground mine; *INTERNATIONAL JOURNAL OF MINING, RECLAMATION AND ENVIRONMENT*.
- Block Cave Production Scheduling Optimization Using Mathematical Programming” (Y. Pourrahimian, H. Askari-Nasab and D. (2012);*International Journal of Mining and Mineral Engineering*
- Cullenbine, C., Wood, R.K. & Newman, A. A sliding time window heuristic for open pit mine block sequencing. *Optim Lett* 5, 365–377 (2011)

Anexo2

Modelo Matemático

Minelink

MineLink es una librería de estructura de datos para planificación minera, problemas de agendamiento y algoritmos para resolverlos. El objetivo de MineLink es ayudar el desarrollo en el área de algoritmos para planificación minera al proveer un conjunto de herramientas y problemas bien definidos sobre los cuales trabajar. El objetivo de la librería es, en primer lugar, la facilidad de uso. Objetivos secundarios son: flexibilidad, capacidad de expansión y eficiencia.

MineLink está desarrollado en C++, pero también hay disponibles wrappers en Python de forma de que sea posible interactuar y expandir la librería en forma simple para experimentar. MineLink ha sido desarrollado gracias al financiamiento del Advanced Mining Technology Center (AMTC) y está en constante desarrollo.

Estructuras de Datos

MineLink provee varias estructuras de datos y herramientas para trabajar con ellas. Una de las estructuras más importantes es BlockModel, la cual permite almacenar (en memoria, archivos de texto o bases de

datos) un conjunto de bloques con un número arbitrario de atributos numéricos. Otro ejemplo relevante es la estructura Precedencia que permite modelar ángulos de talud y otras restricciones de diseño.

Problemas de Agendamiento o Modelos

En términos de problemas de agendamiento, MineLink actualmente implementa dos ejemplos principales:

1. `FinalPitInstance`: Esta clase abstrae el problema de determinar el pit final, es decir, determinar el conjunto de bloques que respeta cierta restricción de talud y cuya suma de una valorización económica sea la máxima.
2. `SchedulingInstance`: Esta clase abstrae una formulación muy general del agendamiento de bloques, con múltiples destinos por bloque y un número arbitrario de restricciones de precedencia, capacidad y mezcla (entre otras)

Dentro de dichas herramientas destaca, la clase `SlidingTimeWindowHeuristic` implementa uno de los métodos aproximativos más eficientes de la librería. Con la cual optimiza el tiempo de computo

Anexo3

Sliding Window

La heurística de resolución Sliding Window es propuesta por Cullenbine et al. 2011, muestra un algoritmo que aborda el problema de optimización definiendo tres periodos de tiempo en los cuales se les da a las variables distintas cualidades. En primer lugar, tenemos T1 o los periodos de tiempo temprano, que define variables fijas. Luego esta T2 en donde se encuentran los periodos de tiempos del centro respecto a un horizonte temporal y según lo definido en T1, que vendría siendo un submodelo con variables binarias. Finalmente, se define T3 como los periodos de tiempo más tardíos respecto al resto, en donde las variables son parte de un submodelo relajado.

La forma en que funciona este algoritmo según se expone en Rimélé et al. 2018, es a través de una secuencia de programaciones enteras mixtas que van realizando diferentes iteraciones, donde en cada una de estas iteraciones se van relajando variables binarias y una vez resuelta se fijan estas variables para la siguiente iteración, donde la “ventana” se va moviendo a través de los siguientes periodos sucesivamente. Una forma gráfica de entender esto se muestra en la siguiente imagen.

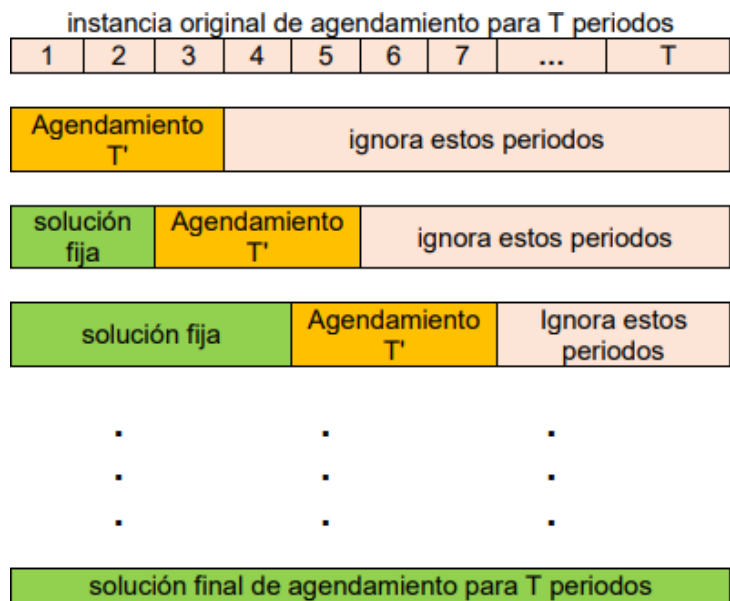


Figura 2.2: Sliding Window