



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

SISTEMA DE DESPACHO PARA CARGADORES FRONTALES DE BAJO PERFIL EN  
MINERÍA SUBTERRÁNEA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

CRISTOFER DANIEL HERNANDEZ LARENAS

PROFESOR GUÍA:  
JAVIER RUIZ DEL SOLAR SAN MARTÍN

PROFESOR CO-GUÍA:  
MAURICIO MASCARÓ MUÑOZ

COMISIÓN:  
NELSON MORALES VARELA

SANTIAGO DE CHILE  
2021

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO  
POR: CRISTOFER DANIEL HERNANDEZ LARENAS  
FECHA: 2021  
PROF. GUÍA: JAVIER RUIZ DEL SOLAR SAN MARTÍN

## SISTEMA DE DESPACHO PARA CARGADORES FRONTALES DE BAJO PERFIL EN MINERÍA SUBTERRÁNEA

Dentro de la minería, unas de las operaciones más importantes de la mina son las de extracción del material y el transporte del mismo, ya que esto define la producción total que ésta podría tener. Estas operaciones tienen asociadas distintas interferencias operacionales, que en el caso de los LHDs, equipos autónomos encargados de la extracción y el transporte del material, pueden provenir de fallas, mantenciones, interferencias entre los distintos equipos, entre otras. En función de ello, se hace muy relevante tener sistemas capacitados para optimizar las operaciones de los equipos, con el fin de maximizar la producción y evitar las interferencias que se producen, específicamente entre los distintos equipos que trabajan en la mina.

La forma escogida para reducir estas interferencias y de esta forma maximizar la producción total de la mina, es con la creación de un sistema de despacho capaz de optimizar las decisiones que toman los distintos LHDs, con respecto al orden en el que se debe extraer material desde cada punto de extracción y donde debe depositar este material extraído. Además el sistema también cuenta con una función capaz de realizar una extracción del material más uniforme dentro la mina. En este trabajo se utilizó el software DSim con el objetivo de realizar simulaciones realistas para poder así evaluar la utilidad del sistema de despacho, comprobando principalmente si es capaz de maximizar la cantidad de material extraído en la mina.

Se realizaron dos casos de estudio para probar las diversas características que contiene el sistema de despacho, ambos casos presentan un *layout* del tipo Teniente. El primer caso de estudio cuenta con un plan de producción diario de 35.000 [ton]. El segundo caso de estudio es un derivado del primero, al cual se le extrajo una sección y se le realizaron algunas modificaciones, esta operación tiene un plan de producción de 17.000 [ton]. En ambos casos el horizonte de simulación será de solo un día. Las principales métricas a evaluar son la producción total de la mina, el factor operacional que mide las interferencias que se producen y finalmente la uniformidad de la extracción.

Los principales resultados apuntan a un correcto funcionamiento del sistema en distintos casos de estudio, en el primero debido al *layout* no se presentan interferencias entre los distintos LHDs, sin embargo, se obtuvo un aumento en la producción total de entre 1,66 % y 2,98 %. Además se evidencia una mejora en la uniformidad de la extracción del material de entre 1,47 % y 2,57 %. En cambio en el segundo caso, en donde el *layout* si permite interferencias entre los distintos LHDs, se presenta una mejora más notoria del 7,10 % en la producción total de la mina, una disminución de 45 minutos de interferencia y una mejora del 6,70 % en la uniformidad de la extracción. De esta manera, queda en evidencia que el sistema de despacho permite una mejora en la producción total de la mina, en las interferencias producidas y en la uniformidad de la extracción de material.



# Agradecimientos

En primer lugar agradezco a mis padres, Elba y Eladio, por el apoyo incondicional y siempre estar a mi lado en todas las decisiones importantes en mi vida, a mis hermanos por siempre darme energía y compañía. Mis tíos, Pamela y Luis por acogerme en su casa y siempre darme todo lo que necesitaba.

A Javier Ruiz del Solar, profesor guía por darme la oportunidad y ayudarme en el momento que lo necesitara.

A Mauricio Mascaró, por todo el apoyo entregado en la realización de este trabajo.

A José Espinoza que siempre me facilitó su ayuda además de su trabajo.

A Consuelo Moreno, Nelson Morales y la gente de DELPHOS, que me apoyaron con el software además de siempre estar ahí para responder a mis dudas.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Definición del problema . . . . .	2
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.2.1. Objetivos generales . . . . .	2
1.2.2. Objetivos específicos . . . . .	3
1.3. Estructura de la memoria . . . . .	3
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>4</b>
2.1. Método de extracción . . . . .	4
2.2. Layout . . . . .	6
2.3. LHD . . . . .	7
2.3.1. Disponibilidad, utilización y rendimiento del LHD . . . . .	7
2.4. Planificación minera . . . . .	8
2.4.1. Planificación de corto plazo . . . . .	9
2.4.2. Velocidad de extracción . . . . .	9
2.5. Modelado de sistemas . . . . .	9
2.5.1. Calibración de constantes de diseño . . . . .	10
2.6. Simulación de eventos discretos . . . . .	11
2.7. Estado del arte . . . . .	12
<b>3. Metodología</b>	<b>14</b>
3.1. Supuestos . . . . .	15
3.2. Sistema de despacho . . . . .	15
3.2.1. Modelo de optimización intra calle . . . . .	17
3.2.2. Modelo de optimización de las interacciones entre los LHDs . . . . .	20
3.3. Simulación . . . . .	25
3.3.1. Simulador . . . . .	26
3.3.2. Variabilidad de Réplicas . . . . .	26
3.3.3. Métricas de evaluación . . . . .	27
<b>4. Casos de estudio</b>	<b>28</b>
4.1. Parámetros de diseño LHD . . . . .	28
4.1.1. Modelos de interferencias operacionales . . . . .	28
4.2. Caso de estudio 0 . . . . .	30
4.3. Caso de estudio 1 . . . . .	30
4.4. Caso de estudio 2 . . . . .	32

<b>5. Resultados</b>	<b>35</b>
5.1. Caso de estudio 0 . . . . .	35
5.2. Caso de estudio 1 . . . . .	36
5.2.1. Caso base . . . . .	36
5.2.2. Caso confinamiento moderado . . . . .	39
5.3. Caso de estudio 2 . . . . .	43
5.3.1. Variabilidad de réplicas . . . . .	43
5.3.2. Calibración de constantes $\alpha$ , $\beta$ y $\gamma$ de la función objetivo . . . . .	44
5.3.3. Comparación entre el caso base y el caso base con el sistema de despacho	45
<b>6. Análisis de Resultados</b>	<b>47</b>
6.1. Caso de estudio 0 . . . . .	47
6.2. Caso de estudio 1 . . . . .	47
6.2.1. Caso base . . . . .	48
6.2.2. Caso confinamiento moderado . . . . .	48
6.3. Caso de estudio 2 . . . . .	50
<b>7. Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>52</b>
7.1. Conclusiones . . . . .	52
7.2. Recomendaciones para trabajo futuro . . . . .	53
<b>Bibliografía</b>	<b>54</b>

# Índice de Tablas

4.1. Parámetros equipos LHD autónomos. . . . .	28
4.2. Parámetros de la distribución uniforme que modela el tiempo de mantención de los LHDs. . . . .	29
4.3. Parámetros de la distribución triangular que modela el tiempo de carga de combustible de los LHDs. . . . .	29
4.4. Parámetros de la distribución weibull que modela el tiempo entre fallas de los LHDs. . . . .	29
4.5. Parámetros de la distribución weibull que modela el tiempo de reparación de fallas de los LHDs. . . . .	30
5.1. Material extraído y tiempo de ejecución para cada modelo intra calle en caso de estudio 0 con 4 puntos de extracción. . . . .	35
5.2. Material extraído y tiempo de ejecución para cada modelo intra calle en caso de estudio 0 con 6 puntos de extracción. . . . .	36
5.3. Análisis de sensibilidad al igualar a 0 una de las constantes $\alpha$ o $\gamma$ . . . . .	37
5.4. Calibración constantes $\alpha$ y $\gamma$ caso de estudio 1 base. . . . .	38
5.5. Resultados obtenidos en el caso 1 base sin el sistema de despacho. . . . .	38
5.6. Indicadores para el caso base y el caso base con el sistema de despacho del caso de estudio 1. . . . .	39
5.7. Análisis de sensibilidad al igualar a 0 una de las constantes $\alpha$ o $\gamma$ . . . . .	41
5.8. Calibración constantes $\alpha$ y $\gamma$ caso de estudio 1 con confinamiento moderado. . . . .	41
5.9. Resultados obtenidos en el caso 1 con confinamiento moderado sin el sistema de despacho. . . . .	42
5.10. Indicadores para el caso con confinamiento moderado y el caso con confinamiento moderado y el sistema de despacho del caso de estudio 1. . . . .	43
5.11. Análisis de sensibilidad al igualar a 0 dos de las constantes $\alpha$ , $\beta$ o $\gamma$ . . . . .	44
5.12. Calibración constante $\beta$ caso de estudio 2. . . . .	45
5.13. Resultados obtenidos en el caso 2 sin el sistema de despacho. . . . .	45
5.14. Indicadores para el caso 2 y el caso 2 con el sistema de despacho. . . . .	46

# Índice de Ilustraciones

1.1.	Aporte y participación de la minería en los ingresos fiscales nacionales [1]. . .	1
1.2.	Empleo directo e indirecto generado a partir de la minería y participación en el empleo del país [1]. . . . .	2
2.1.	Método de excavación Block Caving [2]. . . . .	5
2.2.	Layout mina excavada mediante block caving [2]. . . . .	6
2.3.	LHD [2]. . . . .	7
2.4.	División de tiempos del LHD dependiendo su funcionamiento. . . . .	8
2.5.	Ejemplo de límites de material a extraer por punto de extracción [3]. . . . .	9
2.6.	Calibración mediante búsqueda aleatoria [4]. . . . .	11
2.7.	Problema simplificado de estudio similar [5]. . . . .	13
3.1.	Metodología . . . . .	14
3.2.	Layout de ejemplo en donde se señalan las rutas compartidas y que generarán interferencias entre los LHDS dentro de la mina. . . . .	21
4.1.	Caso 0 en el cual se tiene una sola calle, un LHD, un punto de vaciado al final de la calle y 4 o 6 puntos de extracción. . . . .	30
4.2.	Material a extraer por cada calle en el caso de estudio 1. . . . .	31
4.3.	Layout caso de estudio 2. . . . .	33
4.4.	Material a extraer por cada calle en el caso de estudio 2. . . . .	34
5.1.	Variabilidad de réplicas para el caso de estudio 1 en su caso base y su case base más el sistema de despacho. . . . .	36
5.2.	Diferencia porcentual de réplicas para el caso de estudio 1 en su caso base y su case base más el sistema de despacho. . . . .	37
5.3.	Comparación para el caso 1 entre el plan de producción por calle, el tonelaje extraído por calle en el caso base y el tonelaje extraído en el caso base más el sistema de despacho. . . . .	39
5.4.	Variabilidad de réplicas para el caso de estudio 1 con confinamiento moderado y con confinamiento moderado y el sistema de despacho. . . . .	40
5.5.	Diferencia porcentual de réplicas para el caso de estudio 1 con confinamiento moderado y con confinamiento moderado y el sistema de despacho. . . . .	40
5.6.	Comparación para el caso 1 entre el plan de producción por calle, el tonelaje extraído por calle en el caso con confinamiento moderado y el tonelaje extraído en el caso con confinamiento moderado más el sistema de despacho. . . . .	42



5.7. Variabilidad de réplica para el caso de estudio 2 y el caso de estudio 2 más el sistema de despacho. . . . .	43
5.8. Diferencia porcentual de réplicas para el caso de estudio 2 y el caso de estudio 2 más el sistema de despacho. . . . .	44
5.9. Comparación entre el plan de producción por calle, el tonelaje extraído por calle en el caso 2 y el tonelaje extraído en el caso 2 más el sistema de despacho. . . . .	46

# Capítulo 1

## Introducción

La minería es una de las principales actividades económicas a nivel mundial, más aun en Chile, en donde el principal ingreso económico del país proviene de este sector económico. Como se ve en la Figura 1.1, la minería aporta cerca del 7% de los ingresos fiscales del país, lo que lo convierte en el sector económico que más aporta a la economía del país.

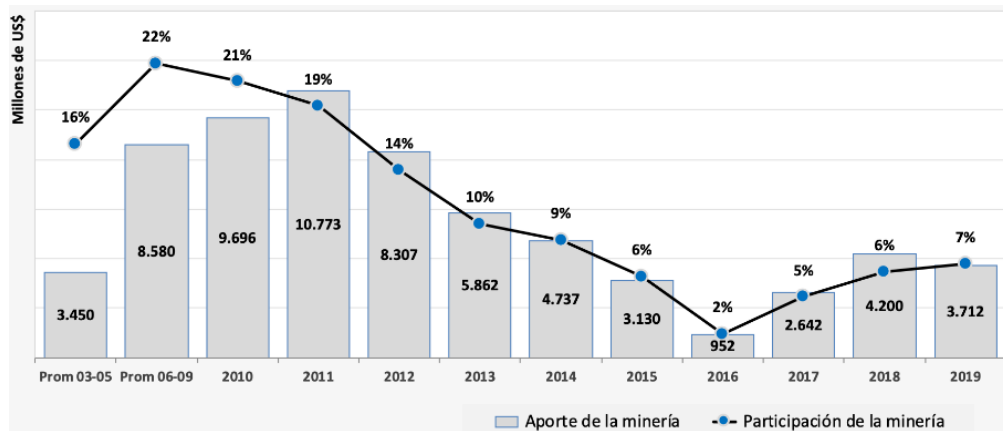


Figura 1.1: Aporte y participación de la minería en los ingresos fiscales nacionales [1].

Debido a que la minería representa el mayor sector económico del país, también se generan muchos empleos para poder llevar a cabo con todo lo relacionado al sector. En la Figura 1.2, se puede ver la cantidad de empleos que genera el sector minero, ya sea directa o indirectamente, el cual representa cerca del 10% de los empleos del país.

Como se puede ver, la minería en Chile es un sector muy importante en la economía chilena, es por esto que a menudo se buscan nuevas tecnologías, ya sea para mejorar los índices de producción o mejorar las seguridad dentro de la mina y, de esta forma, hacerla un entorno más amigable para todos los trabajadores [6]. Es por esto que en el presente trabajo se busca mejorar la utilización de los vehículos autónomos dentro de la mina, para de esta forma incentivar a la utilización de éstos, tanto para mejorar la producción dentro de la mina, como aumentar la seguridad de las personas evitando que hayan trabajadores en zonas potencialmente peligrosas.

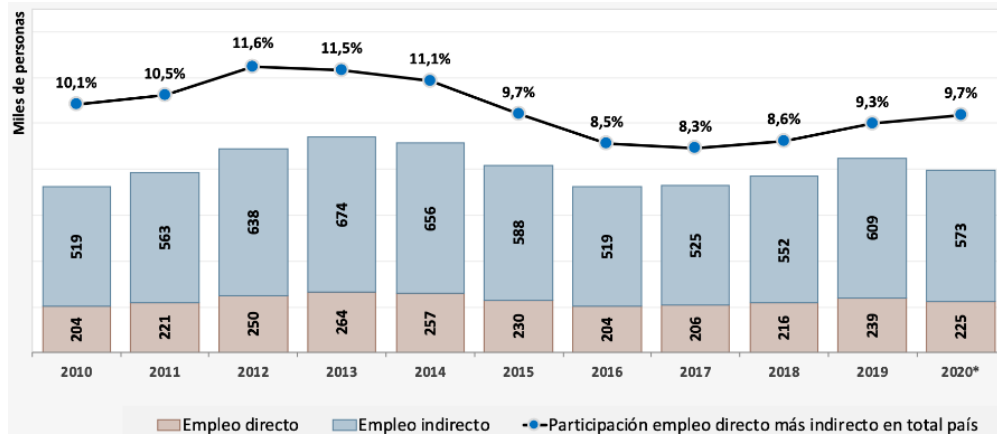


Figura 1.2: Empleo directo e indirecto generado a partir de la minería y participación en el empleo del país [1].

## 1.1. Definición del problema

Esta memoria se enmarca en la minería subterránea, específicamente en las minas El Teniente Nuevo Nivel Mina y Chuquicamata Subterránea, las cuales presentan métodos de extracción de material muy similares entre sí, “panel caving” y “block caving” respectivamente. En ambas minas se proyecta el uso de vehículos semi-autónomos capaces de realizar la extracción del material, el traslado de éste y el posterior depósito en los puntos de vaciado. La planificación o despacho de estos equipos es parte del proceso de automatización, ya que en la actualidad, en operaciones manuales, la planificación es realizada por un humano.

El problema a resolver surge de la falta de un sistema de despacho capaz de optimizar el funcionamiento de los equipos semi-autónomos, además de cumplir con las restricciones geomecánicas de cada mina. Este sistema de despacho, debe ser capaz de asignar a cada equipo una determinada tarea, minimizando las interrupciones que esta tarea produce con el resto de los equipos. El sistema también debe contemplar las restricciones geomecánicas de la mina, principalmente estará enfocado en la uniformidad de la extracción del material de cada punto de extracción.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivos generales

El objetivo general de esta memoria, es conceptualizar y validar computacionalmente un sistema de despacho capaz de coordinar la operación de múltiples vehículos semi-autónomos, optimizando el funcionamiento de éstos. El sistema de despacho debe ser capaz de coordinar cualquier tipo de vehículo semi-autónomo que se utilice para la extracción, transporte y depósito del material, sin embargo, estos vehículos deben ser semi-autónomos o autónomos, debido a la poca variabilidad que presentan estos equipos.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

El principal objetivo específico de la tesis consiste en proponer un modelo que sea capaz de maximizar la extracción de material de la mina. También es importante que este modelo respete las restricciones geomecánicas de la mina, siendo capaz de realizar una extracción uniforme del material desde los puntos de extracción.

## **1.3. Estructura de la memoria**

Esta memoria se compone de la siguiente manera, en el Capítulo 1 se presenta la introducción, en donde se indican el problema a resolver además de los objetivos del estudio. En el Capítulo 2 se detalla el marco teórico, en donde se describen todos los conceptos necesarios para entender de mejor forma el problema presentado, además de realizar un análisis sobre el estado del arte del problema, en el cual se presentan problemas similares y de que forma se han resuelto. En el Capítulo 3 se indica la metodología que se utilizará para resolver el problema. En el Capítulo 4, se presentan los distintos casos de estudio que se trabajarán a lo largo de la memoria, en donde se describe en detalle cada uno de ellos. En el Capítulo 5 se observan los resultados obtenidos para cada uno de los casos de estudio. En el Capítulo 6 se realiza el análisis de los resultados obtenidos previamente. Finalmente, en el Capítulo 7 se presentan las conclusiones que se obtuvieron a lo largo de la memoria y del análisis realizado a los resultados, para finalizar con algunas recomendaciones para algún trabajo a futuro.

# Capítulo 2

## Marco Teórico

A continuación se presenta el marco teórico, el cual cuenta con los conceptos necesarios para entender a cabalidad el problema a resolver, en específico el tipo de minas a las cuales esta dirigido, características geotécnicas, los vehículos semi-autónomos que serán utilizados, conceptos sobre programación matemática y simulación de eventos discretos, entre otros.

### 2.1. Método de extracción

Como se mencionó en la introducción, esta memoria está orientada al despacho de material en minas subterráneas. Existen diversos métodos de explotación utilizados para la extracción de materiales, sin embargo en este caso específico, en las minas El Teniente nuevo nivel mina y Chuquicamata subterránea, se utilizan métodos por hundimiento para la extracción del material, por ende, resulta importante estudiar estos tipos de métodos utilizados para la extracción de material.

Los métodos de extracción por hundimiento consisten en perforar desde abajo un bloque de material y hacer que éste se fracture producto de su propio peso. El material fracturado cae en unas zanjas llamadas puntos de extracción o “drawpoints” en las cuales se acumula el material para luego ser extraído. Este método permite un gran volumen de producción después que la mina ha sido construida, lo cual toma entre 5-10 años dependiendo del tamaño de ésta. En estos métodos es común la utilización de vehículos LHD (load-haul-dump) los cuales como su nombre lo indica, están capacitados para extraer el material desde los puntos de extracción, trasladarlo a través de la mina y depositarlo en los puntos de vaciado [2].

Existen diversos métodos de extracción por hundimiento, específicamente en la mina el Teniente se utiliza el método “panel caving” mientras que en la mina Chuquicamata el método “block caving” [7]. Estos métodos son muy semejantes, esto debido a que panel caving es un derivado de block caving, solo se diferencian en su secuencia de preparación-hundimiento-producción, es decir, en el tiempo necesario para comenzar la producción. En block caving se realiza de forma secuencial de forma que un bloque comienza a ser operado una vez esté completamente desarrollado y hundido, mientras que, en panel caving estos tres procesos se desarrollan de forma paralela.

En este método de extracción del material, la mina se divide principalmente en 5 niveles [2]:

- **Nivel de Hundimiento:** en este nivel se produce la fractura del material para generar la caída de éste.
- **Nivel de Producción:** aquí se encuentran las calles de producción, en las cuales se ubican los puntos de extracción que es donde se acumula el material. También se encuentran los puntos de vaciado destinados para el depósito del material, estos puntos de vaciado pueden encontrarse tanto dentro como fuera de las calles de producción.
- **Nivel de Ventilación:** este nivel provee de ventilación a los demás niveles, de esta forma se controlan las emisiones y el calor dentro de cada nivel.
- **Nivel de Reducción:** se reduce el tamaño de las rocas depositadas en los puntos de vaciado para que éstas puedan ser trasladadas en el siguiente nivel.
- **Nivel de Acarreo:** finalmente se traslada el material depositado mediante correas o trenes para su posterior procesamiento.

Los LHDs mencionados anteriormente trabajan en el nivel de producción, extrayendo el material, posteriormente transportándolo, para finalmente depositarlo en los puntos de vaciado y repetir el proceso.

En la Figura 2.1, se puede observar una sección de una mina excavada con el método block caving, en donde se pueden ver los distintos niveles mencionados anteriormente, tanto el bloque de material fracturado, como los puntos de extracción en los cuales cae el material para luego ser extraído. También se pueden apreciar las calles o túneles por los cuales los LHDs se desplazan entre cada punto de extracción y los puntos de vaciado, en el cual los vehículos depositan el material obtenido [2].

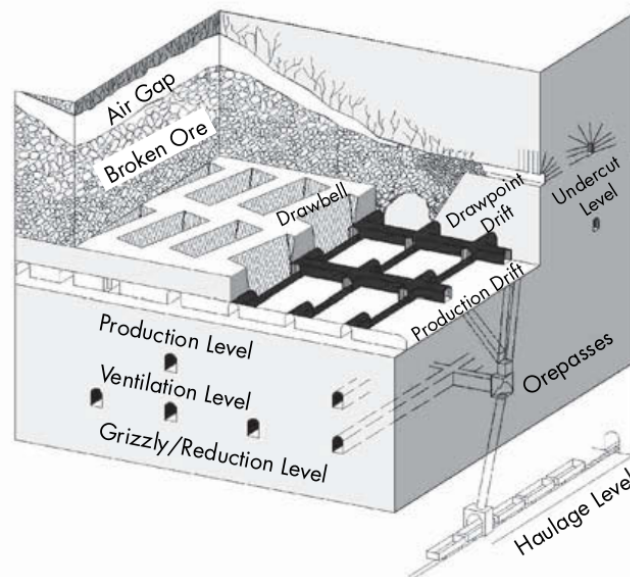


Figura 2.1: Método de excavación Block Caving [2].

## 2.2. Layout

El layout o mapa de la mina, es imprescindible para cualquier operación dentro de ésta, más aún para la utilización de vehículos autónomos, ya que, estos deben saber su posición en la mina en cada momento, para así saber que movimiento deben realizar. El mapa de cada mina está directamente relacionado con el método de extracción que se esté utilizando. En este caso, en la Figura 2.2 se puede ver un layout genérico del nivel de producción de este tipo de minas [2].

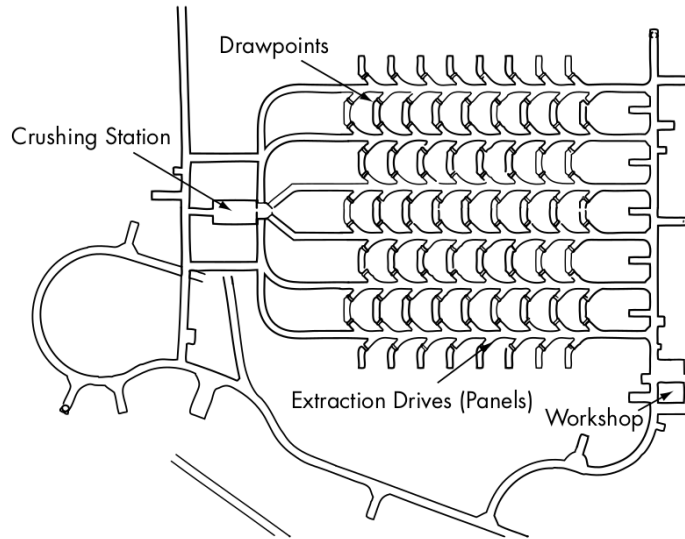


Figura 2.2: Layout mina excavada mediante block caving [2].

En la figura anterior se pueden ver los elementos principales del nivel de producción, como lo son los puntos de extracción, el punto de descarga (“crushing station”), el taller de mantenimiento o de espera (“workshop”) y las calles por las cuales se desplazan los vehículos desde los puntos de extracción hacia el punto de descarga. Es importante mencionar que este layout presenta una restricción con respecto a la cantidad de vehículos que pueden recorrer la misma calle al mismo tiempo, ya que, estas son calles bidireccionales pero de una sola vía. Por lo tanto, al momento de coordinar los LHDs se debe tener en cuenta esta restricción.

El plano es una herramienta muy relevante para generar el modelo de optimización y coordinación, ya que, además de poder conocer la posición exacta de los LHDs dentro de la mina, también se conoce la posición de todos los puntos de extracción y de vaciado ubicados en el nivel de producción. La importancia de esta información es que con ella se puede saber la distancia exacta entre cada punto de extracción y los puntos de vaciado, y junto a las velocidades promedio del LHD cargado y descargado, se puede saber el tiempo que toma ir desde un punto a otro.

Es importante mencionar que cada calle cuenta con puntos de extracción por ambos lados de ésta, y que solo se puede extraer material desde un punto de extracción en una dirección determinada, por lo tanto, si se quiere extraer material del otro de la calle se debe invertir el LHD, lo cual toma un tiempo determinado.

## 2.3. LHD

Las minas excavadas por el método block caving cuentan con un tipo de vehículo especial para realizar las tareas de extracción, traslado y descarga del material dentro del nivel de extracción, estos vehículos son los llamados LHD. En la Figura 2.3 se puede ver una representación de como se ve un LHD.



Figura 2.3: LHD [2].

Es importante mencionar que en las minas El Teniente y Chuquicamata se cuenta con este tipo de vehículo semiautónomo, es decir, es capaz de realizar algunas acciones por su propia cuenta, mientras que para otras necesita la ayuda de un operario. El sistema “SNAS” [8], permite al LHD realizar las tareas de navegación autónoma y carguío autónomo, la primera consiste en que el equipo es capaz de desplazarse desde un punto a otro de forma autónoma y la segunda permite al LHD realizar el proceso de carga de material de forma autónoma. El sistema sigue el paradigma de robótica colaborativa, es decir, si se encuentra frente a una situación que no sabe resolver, solicita la ayuda de un operario.

El LHD cuenta con varios parámetros conocidos y los cuales son importantes para generar el sistema de despacho propuesto. Entre los parámetros más relevantes a tener en cuenta son los tiempos de ejecución de cada tarea que realiza, como lo es cargar y descargar el material. Otros parámetros importantes son las velocidades promedio del LHD cuando este se encuentra cargado y descargado, lo cual sumado a la información entregada por el mapa, entrega el tiempo que se demora el LHD entre cada punto de la mina. Hay que tener en cuenta que la velocidad promedio del LHD autónoma debe ser más baja que si fuera conducido manualmente por un operario, sin embargo, esta tiene una menor variabilidad, ya sea, con respecto al mismo LHD o con respecto a los demás LHDs [2].

### 2.3.1. Disponibilidad, utilización y rendimiento del LHD

Los conceptos de disponibilidad, utilización, rendimiento del LHD, entre otros son indicadores que muestran el funcionamiento del LHD dentro de la mina, a continuación se encuentra una descripción de cada uno de ellos [9]:

- **Tiempo nominal:** es el tiempo total del periodo a evaluar.
- **Tiempo disponible:** tiempo en el que el equipo se encuentra en condiciones óptimas para realizar su trabajo.
- **Tiempo de mantenimiento y reparación:** tiempo en el cual el equipo no puede realizar sus funciones normales debido a una falla o una mantención programada. Este tiempo



generalmente abarca desde el momento en que el operador notifica la falla o comienza el traslado hacia el taller de mantenimiento, hasta cuando el equipo se encuentra nuevamente disponible para realizar su trabajo en el taller.

- **Tiempo en stand by o reserva:** tiempo en el que el equipo se encuentra disponible para trabajar pero no se le ha asignado ninguna tarea a realizar.
- **Tiempo operativo:** tiempo en el que el equipo se encuentra asignado a alguna tarea dentro de la mina.
- **Tiempo de interferencias:** tiempos en los cuales se producen interferencias a la tarea asignada al equipo, debido por ejemplo a reducciones secundarias, interferencias entre equipos, petroleo, pérdidas de comunicación, etc.
- **Tiempo en ciclo:** también llamado tiempo efectivo o utilización, este tiempo se refiere solo al tiempo en el que el equipo se encuentra realizando su tarea asignada. Es con este tiempo que se calcula el rendimiento o productividad del equipo, el cual es igual a

$$\frac{\text{material extraído [ton]}}{\text{tiempo efectivo [hora]}}$$

En la Figura 2.4 se muestra la división de tiempos de un LHD mencionada anteriormente, dentro de los cuales los más importantes o interesantes de evaluar son el tiempo operativo, además de el tiempo de ciclo y de interferencias.



Figura 2.4: División de tiempos del LHD dependiendo su funcionamiento.

## 2.4. Planificación minera

El plan minero define de que forma y cuando se extraerán los recursos de la mina, además de los recursos a utilizar y la envolvente económica, por lo tanto, este representa el plan de negocios de la compañía. Dentro del plan minero, existen distintos horizontes de planificación, los cuales manejan distintos valores de incertidumbre dentro del proceso minero, estos horizontes son los siguientes [10]:

- **Planificación de largo plazo:** Se dimensiona el tamaño del yacimiento, en base a esto se define la envolvente económica, el método de explotación y el ritmo de la extracción, además se realiza una estimación respecto a la vida de la mina.
- **Planificación de mediano plazo:** Se evalúa el presupuesto necesario para la operación de la mina, se realiza generalmente de forma anual.
- **Planificación de corto plazo:** Se definen los equipos y la logística para cumplir con las metas definidas en los horizontes anteriores. Estas pueden ser de forma mensual, semanales y hasta diarias.

En esta memoria, el sistema de despacho coordinará la operación de los LHDs en tiempo real, por lo tanto el sistema estará directamente relacionado con la planificación de corto plazo, específicamente la planificación diaria del material a extraer de cada punto de extracción.

### 2.4.1. Planificación de corto plazo

En el ámbito de la planificación de corto plazo, se define la programación diaria de extracción o carta de tiraje (cartir) como la cantidad de material que se debe extraer de cada punto de extracción durante un día [3]. En la Figura 2.5 se puede apreciar un ejemplo de como se obtiene la cantidad de material a extraer para un punto de extracción, en donde, a partir de la topología de la mina, las reservas de mineral, estado de los puntos de extracción, datos históricos sobre la extracción de material y a las leyes de muestras de puntos de extracción, se tiene un rango máximo y mínimo de material que se puede extraer.



Figura 2.5: Ejemplo de límites de material a extraer por punto de extracción [3].

### 2.4.2. Velocidad de extracción

Relacionado con lo anterior, se tiene la velocidad máxima de extracción de material para cada punto, la cual se define como la cantidad de toneladas que se puede extraer por metro cuadrado al día y se mide en “ton/ $m^2$ -día” [10].

La velocidad de extracción depende de la altura de la columna del punto de extracción, en donde si el punto se encuentra en quiebre o en el inicio de su vida, la velocidad de extracción será entre 0.15 y 0.25 [ton/ $m^2$ -día], mientras que si se encuentra en la etapa de fin de quiebre las velocidades serán entre 0.25 y 0.7 [ton/ $m^2$ -día]. Finalmente, cuando el punto de extracción se encuentra en estado de régimen o liberado, la velocidad de extracción estará entre los 0.7 y 1 [ton/ $m^2$ -día].

## 2.5. Modelado de sistemas

El modelado de sistemas consiste básicamente en obtener un modelo matemático que describa el comportamiento de un sistema o proceso. Se busca establecer una serie de relaciones

matemáticas entre las condiciones límites y las variables propias del proceso. Debido a la alta complejidad de los procesos reales, los modelos matemáticos siempre son una representación idealizada de dicho proceso, que solo representa con exactitud algunas de las características del proceso real. Para poder modelar el sistema o proceso es necesario seguir los siguientes pasos [11]:

- Formulación del problema y establecimiento de los objetivos y criterio.
- Inspección preliminar con el fin de descomponer el sistema en subsistemas.
- Determinar las relaciones entre los subsistemas.
- Analizar las variables y relaciones para obtener un conjunto capaz de simplificar el problema.
- Establecimiento de un modelo matemático de las relaciones en función de las variables y parámetros del problema.
- Evaluación de la representación que hace el modelo matemático del proceso real.
- Aplicación del modelo y comprensión de los resultados.

En base a las etapas mencionadas anteriormente, es posible obtener un modelo matemático de un proceso real, el cual se simula con el objetivo de comprobar que el modelo presenta las características del proceso real, lo cual se verá en la sección (2.6).

Existen distintos tipos de modelado matemático, sin embargo en este caso solo se abordará el caso de la programación lineal (LP). Este tipo de modelado matemático consiste principalmente en que la función objetivo a maximizar o minimizar es una función lineal, por ejemplo se tiene la siguiente función [12]:

$$\max cx \tag{2.1}$$

$$\text{s.a. } Ax \leq b \tag{2.2}$$

en donde  $x$  es la variable de decisión, que puede ser de cualquier tipo, ya sea entera, real, binaria, etc. y puede ser de cualquier dimensión,  $c$  es un vector constante,  $A$  es una matriz constante y  $b$  es un valor constante. En este caso la ecuación (2.1) corresponde a la función objetivo del modelo y la ecuación (2.2) representa a las restricciones del modelo con respecto a la variable de decisión  $x$ .

Existen otras variables del modelo LP, como la programación lineal entera (ILP) en la cual las variables de decisión son del tipo entero o programación lineal entera mixta (MILP) la cual cuenta con variables del tipo enteras y no enteras. Sin embargo, la base de estos tipos de modelado matemático es la misma y es la mostrada anteriormente.

### 2.5.1. Calibración de constantes de diseño

Dentro de los modelos de optimización, existen algunas constantes que ayudan a modelar el proceso, estas constantes no tienen un valor fijo y éste dependerá de los resultados esperados. Sin embargo, para calibrar estas constantes y así obtener los mejores resultados de optimización, existen diversas técnicas, las más típicas y sencillas son la búsqueda manual, búsqueda por grilla y la búsqueda aleatoria. En este caso específico se utilizará la búsqueda aleatoria. En [4], se pueden ver diversos métodos utilizados principalmente en el ajuste

de hiper parámetros en modelos de aprendizaje automático. Para el caso específico de la búsqueda aleatoria, se establece una cuadrícula de valores para cada parámetro y se seleccionan combinaciones al azar de estos como se puede ver en la Figura 2.6 para el caso de dos parámetros.

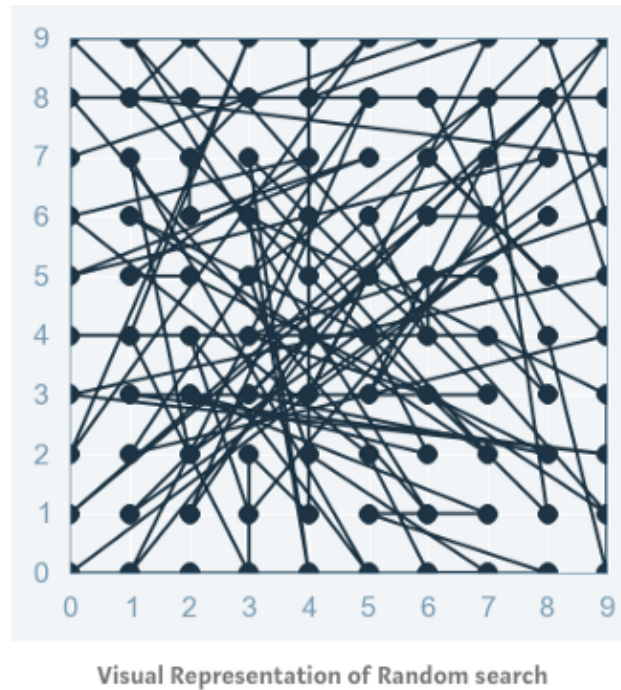


Figura 2.6: Calibración mediante búsqueda aleatoria [4].

Si bien, este método no comprueba todas las posibilidades de parámetros, a menudo encuentra un buen resultado y en un tiempo mucho menor al método de la grilla, en el cual se prueban todas las combinaciones de parámetros.

## 2.6. Simulación de eventos discretos

Se define como simulación a la imitación de un proceso o sistema del mundo real. La simulación genera una historia artificial del proceso a evaluar, en base a esto se obtienen inferencias sobre el posible funcionamiento del sistema real. La simulación se utiliza para la resolución de distintos problemas del mundo real, en donde principalmente se usa para describir y analizar el comportamiento de un sistema y de esta forma, evaluar su funcionamiento ante distintos casos de estudio [13].

En torno a la simulación se pueden definir los siguientes conceptos:

- **Modelo:** es la representación de un sistema real. Este modelo debe ser lo suficientemente complejo, para poder realizar un buen análisis, pero no tan demasiado complejo.
- **Evento:** es una situación que cambia el estado del sistema.
- **Variables de estado del sistema:** son la recopilación de la información necesaria para definir por completo el sistema en un tiempo dado.

- **Entidades:** representa a un objeto perteneciente a la simulación. Estas entidades pueden ser dinámicas lo cual les permite poder desplazarse dentro del sistema, o estáticas, por lo tanto, se mantienen fijas en el sistema. Las entidades también pueden contener atributos, que pertenecen únicamente a ellas.
- **Recursos:** corresponde a una entidad que le brinda servicios a otra entidad dinámica.

En base a los conceptos mostrados anteriormente, en [13] se define el concepto de **simulación de eventos discretos** como un modelo en el que las variables de estado sufren algún tipo de cambio, solo en puntos discretos de tiempo cuando ocurre un evento. Los eventos ocurren en base a los tiempos de actividad y retraso, que corresponden a la duración de una actividad y en cuanto tiempo se realiza esa actividad, que a su vez están asociados a una distribución de probabilidad. El modelo de simulación de eventos discretos, se ejecuta a lo largo de un tiempo determinado, mediante un sistema capaz de avanzar el tiempo simulado. Cada vez que ocurre un evento, se actualiza el estado del sistema, junto con la captura o liberación de algún recurso que pueda ocurrir en ese momento.

## 2.7. Estado del arte

Con respecto al estado del arte, se puede mencionar que si bien, no existen muchos estudios relacionados a la optimización de los LHDs dentro de la mina, si existen diversos estudios relacionados a la simulación de la operación de una mina subterránea, lo cual también tiene relación con esta memoria y se puede utilizar de base.

Como se menciona anteriormente, no se encontró un problema similar al propuesto capaz de coordinar múltiples LHDs y realizar una optimización de la cantidad de material extraído. Sin embargo, en [5], se tiene un modelo utilizado para optimizar la producción de un LHD, para una calle con 10 puntos de extracción, lo cual es un modelo bastante simplificado, pero podría tomarse en consideración como base de un modelo más complejo. Aquí se utiliza un modelo de optimización del tipo programación entera (IP).

En la Figura 2.7, se puede apreciar el layout que se quiere optimizar, juntos con su respectivo cartir, ambos son las entrada que recibe el modelo. Es importante mencionar que este modelo no busca maximizar la producción, en este caso la función objetivo de este modelo busca minimizar el tiempo en que se realiza por completo el cartir, es decir, minimizar el tiempo en que se demora el LHD en extraer todo el material disponible.

En [14] se tiene una optimización de la extracción de material pero en una mina a cielo abierto. En esta investigación se utiliza un modelo de optimización muy típico dentro de los problemas de optimización, el modelo MILP (mixed integer lineal programing), el cual cuenta con una función objetivo a maximizar y las restricciones que modelan el problema. En este caso la función objetivo consiste en una ponderación de 3 funciones objetivos:

- minimizar la máxima desviación entre el material enviado a la planta de procesamiento y la capacidad de producción de material de la planta por periodo.
- minimizar la máxima desviación entre el metal puro obtenido y el material puro que se espera obtener de la planta de procesamiento del material.
- minimizar el costo de movimiento de las palas.

Date	1/10/2007				
Drift	1				
Working shift	2				
LHD vehicle number	3				
	Left side				
<b>Drawpoint</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
Bucketfuls	10	13	13	11	9
	Right side				
<b>Drawpoint</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
Bucketfuls	7	10	13	14	10
Dumping site /turning point	1				

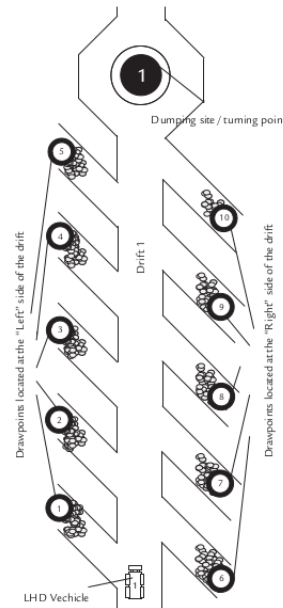


Figura 2.7: Problema simplificado de estudio similar [5].

Debido a que esta investigación esta destinada a la minería a cielo abierto, solo se utiliza como ejemplo de como modelar un proceso minero mediante un modelo del tipo MILP, en donde se debe especificar una función objetivo y las restricciones que modelan el problema.

Finalmente, en [15] se realizó una simulación de la operación de un sector de la mina El Teniente, el objetivo de esta memoria era estimar la producción del sector Diablo Regimiento de la mina El Teniente mediante simulación de eventos discretos. Al ser una simulación de un sector muy parecido al que se trabajará en secciones posteriores, presenta mucha información sobre el proceso de simulación, los parámetros que se utilizaron, además de que se utilizó el mismo software de simulación.

En este caso, se presenta una metodología capaz de simular un proceso real dentro de una mina, cuenta con varias etapas en las que primero se define la zona de estudio, se hace un levantamiento de la información, se conceptualiza el modelo, se programa en el software, se calibra y valida, para finalizar con el análisis de los resultados obtenidos. Con respecto a los resultados obtenidos, se menciona que el software DSim es una buena herramienta para simular los distintos sectores de la mina. También se observa que que la simulación solo presenta entre un 4% y un 9% de variación con respecto a la producción real. Por lo tanto, esta metodología se seguirá en gran parte de la memoria.

# Capítulo 3

## Metodología

A continuación se presenta la metodología que se utilizará a lo largo de la memoria, en donde se detallan los pasos que se seguirán para conseguir los objetivos impuestos al principio de éste. Se creará un sistema de despacho capaz de optimizar y mejorar la producción total de la mina. Luego este sistema será probado mediante una simulación de eventos discretos de la operación de una mina.

En la Figura 3.1, se aprecia la metodología a utilizar en donde se tienen dos grandes bloques. El primer bloque está relacionado al sistema de despacho que se generará, en el cual primero se realiza una definición de la zona de estudio, mediante los supuestos y restricciones que se mostrarán más adelante, para terminar conceptualizando un modelo matemático capaz de optimizar la producción de la mina.

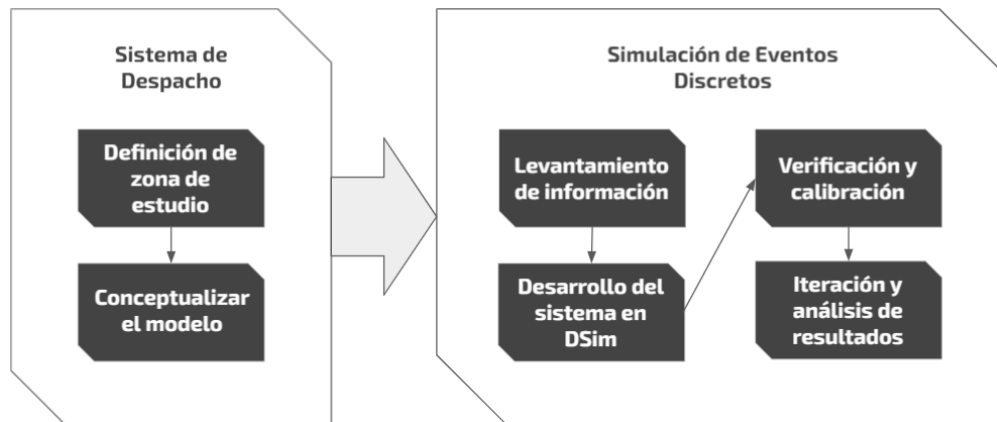


Figura 3.1: Metodología

En el segundo bloque, se presentan las actividades relacionadas a la simulación del proceso con el cual se validará el correcto funcionamiento del sistema de despacho. Se comienza con un levantamiento de información, en el cual se obtienen todos los datos necesarios para modelar la operación de la mina. Luego se procede a desarrollar el sistema en el software DSim, es decir, se introduce el layout, los parámetros, los equipos, etc., que se encargan de representar la operación de la mina, además de implementar el sistema de despacho antes mencionado. Se debe realizar una verificación de que todo funciona correctamente y una

posterior calibración, ya sea, para obtener resultados cercanos a los reales, además de calibrar el modelo de optimización del sistema de despacho, finalmente se obtienen los resultados luego de varias iteraciones de la simulación y se analizan.

A continuación se presentan los supuestos utilizados para facilitar el modelado del problema y de que forma se generará la solución.

### 3.1. Supuestos

Para facilitar el modelado del problema, se realizan las siguientes suposiciones con respecto al funcionamiento del nivel de producción de la mina:

- Todos los LHDs son iguales.
- Se conoce la posición de todos los LHDs en tiempo real, además de sus posiciones iniciales.
- En una primera instancia no se considera la carga de combustible de los LHDs.
- Modelo determinista, es decir, durante el periodo a evaluar no existe ningún tipos de fallas, ya sea por parte de los LHDs o en la mina. Si ocurre una falla dentro del turno se debe correr nuevamente el sistema con las situaciones actualizadas. Esto pasa también en el caso de mantenencias o carga de combustible de cada LHD.
- El layout de la mina es conocido. Dado este layout se realizan algunas asignaciones independientes del sistema de despacho, como asignar un LHD a un cierto sector de la mina. Este cierto sector podría ser: (i) una calle y una ruta a un punto de vaciado, no compartidas con otros LHD, (ii) varias calles y rutas a puntos de vaciado, no compartidas con otros LHD o (iii) varias calles y rutas a puntos de vaciado, compartidas con otros LHD. Esta asignación permite dividir el problema de optimización en varios problemas, uno por cada zona.
- Se tienen metas de producción para cada zona de confinamiento (mínimo y máximo).
- El cartir incorpora las restricciones geomecánicas propias del plan minero.

Con estos supuesto se procede a describir la metodología que se utilizará para la realización del sistema de despacho.

### 3.2. Sistema de despacho

El sistema de despacho debe ser capaz de optimizar el orden en el que se extrae el material desde los distintos puntos de extracción para así maximizar la producción de cada zona de confinamiento, minimizando las interferencias que se producen y manteniendo una extracción del material de forma homogénea.

El sistema tendrá en una primera instancia 3 entradas:

- Layout de la zona de producción, en donde se especifiquen las zonas de confinamiento. A partir de este layout, se obtendrán las distancias entre cada punto de interés dentro de la mina.



- Flota de LHDs disponibles, en donde se especifica que LHD se dirige a que zona de confinamiento, esto debido a que pueden existir más de un punto de inicio de los LHDs.
- Cartir con el material a extraer de cada punto de extracción.

También se tendrán distintos conjuntos de datos con los que el sistema debe trabajar:

- $t \in T$  horizonte de planificación
- $k \in K$  conjunto de calles en la zona de producción
- $i \in I(K)$  conjunto de puntos de extracción en la calle  $k$
- $m \in M$  conjunto de LHDs disponibles

Además se cuenta con distintos parámetros que se mantendrán fijos durante todo el proceso minero, los cuales son los siguientes:

- $T_d$  Tiempo de descarga del LHD
- $T_c$  Tiempo de carga del LHD
- Capacidad del LHD
- Velocidades promedio del LHD, tanto cuando esta cargado como cuando está descargado
- Distancias entre cada punto de extracción y el punto inicial, a otros puntos de extracción y al punto de vaciado. Estos datos se derivan del layout.

Teniendo las distancias dentro de la mina, además de las velocidades del LHD cuando esta descargado y cargado, se puede obtener el tiempo que toma ir desde una ubicación a otra, lo cual será utilizado en el modelo.

El layout de la mina permite la extracción del material de un punto de extracción desde solo un sentido de la calle, por lo tanto, si el LHD quiere extraer material desde el otro lado de la calle debe realizar una inversión, lo cual toma cierto tiempo que también es conocido.

Para realizar la optimización del orden en que cada LHD extrae el material en su calle, se desarrollará un modelo de optimización. Este modelo se construirá para que cumpla los siguientes casos de forma secuencial:

- **Caso Base:** un LHD,  $x$  puntos de extracción, una calle y un punto de vaciado
- **Caso General:**  $m$  LHDs,  $x$  puntos de extracción,  $N$  calles y  $M$  puntos de vaciado.

El modelo de optimización estará compuesto de dos partes, la primera es una optimización intra calle, la cual no considera la presencia de más LHDs dentro del sector de producción, es decir, cumplirá con el caso base. El objetivo de este modelo es identificar el orden en el que se deberían extraer los puntos de extracción de la calle, para así maximizar la cantidad de material extraído. Este modelo también entrega el lado por el cual el LHD debe comenzar a extraer material y el momento en el que el éste debe invertirse para comenzar a extraer el otro lado.

La segunda parte del modelo es un modelo a tiempo real, y que tiene como objetivo asignarle un nuevo punto de extracción a cada LHD. Este modelo reúne información sobre

todo lo que está pasando en el sector de producción para que cada vez que un LHD necesite un nuevo punto de extracción, ya sea, porque acaba de realizar una descarga o se le asignó una nueva calle, éste le asigne un nuevo punto que se asemeje lo más posible al orden obtenido en el modelo anterior, minimizando las interferencias que esto podría producir con los demás LHDs y manteniendo una extracción homogénea dentro de cada calle.

### 3.2.1. Modelo de optimización intra calle

Como se mencionó anteriormente, este modelo se utilizará para resolver el caso base del problema, es decir, cuando el LHD se encuentra solo en el sector de producción y se busca maximizar la cantidad de material que se extrae. En este caso se realizarán dos modelos que se complementarán para cumplir con el caso base, el primer modelo tendrá la función de ser la base para el segundo modelo, ya que con el primero se comprobará que los resultados del segundo son correctos.

#### Modelo ILP

El primer modelo será del tipo ILP (Integer Linear Programming). Este modelo busca maximizar la producción de cada calle maximizando la cantidad de veces que el LHD extrae material desde algún punto de extracción. Con el fin de maximizar la extracción de material, el modelo entrega como resultado el orden y el momento exacto en el que se debe extraer cada uno de los puntos de la calle evaluada, incluyendo implícitamente el lado por el que debe comenzar el LHD y el momento en el que se debe invertir.

Como se mencionó anteriormente, en base al layout de la mina se puede obtener información sobre las distancias entre un punto y otro, además, gracias a las velocidades promedio del LHD cuando esta cargado y descargado, se puede saber el tiempo de desplazamiento entre un punto y otro, este tiempo se calcula como:

$$\frac{\text{distancia [m]}}{\text{velocidad [m/s]}} = \text{tiempo [s]}$$

En base a lo anterior se pueden calcular los siguientes tiempos relacionados a la operación del LHD:

- $t_{i \rightarrow j}$ , este tiempo corresponde al tiempo de ciclo de trabajo de un LHD, es decir, el tiempo que le toma a un LHD extraer material desde un punto de extracción  $i$ , ir hasta el punto de vaciado ( $pdv$ ) más cercano, vaciar el material y trasladarse a un punto de extracción  $j$ , este tiempo se representa de la siguiente forma

$$t_{i \rightarrow j} = t_c + t_{i \rightarrow pdv}^c + t_d + t_{pdv \rightarrow j}^v \quad (3.1)$$

en donde  $t_c$  y  $t_d$  son el tiempo de carga y descarga respectivamente,  $t_{i \rightarrow pdv}^c$  corresponde al tiempo que le toma al LHD cargado ir desde el punto de extracción  $i$  hasta el punto de vaciado, mientras que  $t_{pdv \rightarrow j}^v$  representa el tiempo que le toma al LHD vacío ir desde el punto de vaciado al punto de extracción  $j$ . Si se debe realizar una inversión para ir al punto de extracción  $j$ , este tiempo se agrega al tiempo  $t_{i \rightarrow j}$ .

- $t_{i \rightarrow pdv}$ , este tiempo es semejante al anterior, sin embargo no contempla la ida a un nuevo punto  $j$ , en este caso el LHD se queda en el punto de vaciado.
- $t_{pi \rightarrow i}$ , es el tiempo que le toma al LHD ir desde el punto inicial ( $pi$ ) a cada punto de extracción  $i$ .
- $t_{pdv \rightarrow pi}$ , este tiempo corresponde a lo que tarda un LHD ir desde un punto de vaciado hasta el punto inicial.

Otro parámetro importante conocido es la cantidad máxima de material que se puede extraer desde cada punto de extracción, en base a esta cantidad, además de la capacidad del LHD, se sabe la cantidad de veces máxima que el LHD puede extraer material desde cada punto ( $B_i$ ). También se tiene como parámetro conocido la duración total del periodo evaluar ( $t_{total}$ ).

Como se mencionó anteriormente, maximizar la cantidad de material extraído es equivalente a maximizar la cantidad de veces que el LHD extrae material desde todos los puntos de extracción, es por esta razón que se tiene la siguiente variable de optimización:

$$x_{it} = \begin{cases} 1 & \text{si el LHD comienza a extraer material del punto de extracción } i \text{ en el tiempo } t \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

en donde  $x_{it}$  es una variable binaria que representa el momento exacto  $t$  en el que un LHD comienza a extraer material desde el punto de extracción  $i$ . En base a esta variable de optimización, se genera la siguiente función objetivo encargada de maximizar la cantidad de veces que el LHD extrae material, además de las restricciones propias del problema.

$$\max \sum_{i,t} x_{it} \quad (3.2)$$

$$\text{s.a. } \sum_t x_{it} \leq B_i \quad \forall i \in I \quad (3.3)$$

$$\sum_i x_{it} \leq 1 \quad \forall t \in T \quad (3.4)$$

$$x_{it} + x_{js} \leq 1 \quad \forall t \in T, i \in I, j \in I, s = t + 1, \dots, t + t_{i \rightarrow j} \quad (3.5)$$

$$x_{it} = 0 \quad \forall i \in I, t = 0, \dots, t_{pi \rightarrow i} - 1 \quad (3.6)$$

$$x_{it} = 0 \quad \forall i \in I, t = t_{total} - t_{pdv \rightarrow i} - t_{pdv \rightarrow pi}, \dots, t_{total} - 1 \quad (3.7)$$

La ecuación (3.2) representa la función objetivo del problema, en este caso, maximizar la cantidad de veces que el LHD extrae material. La ecuación (3.3) restringe la cantidad máxima de veces que se puede extraer desde cada punto de extracción. La ecuación (3.4) permite que el LHD solo extraiga material desde un punto a la vez. La ecuación (3.5) restringe que se pueda extraer material desde un punto antes que se haya cumplido el tiempo de ciclo desde la ultima extracción que se realizo. Finalmente, la ecuación (3.6) hace que un LHD no pueda extraer material desde un punto de extracción antes de que llegue desde su posición inicial

del turno, y la ecuación (3.7) permite que se deje un tiempo al final del turno para que el LHD pueda volver a su posición inicial.

Este modelo será resuelto en el lenguaje de programación Python (version 3.6) mediante el optimizador Gurobi (version 9.0.2) [16]. Sin embargo, dependiendo del número de puntos de extracción por calle, del número de calles y LHDs, de la duración del turno, el proceso de resolución del problema con la herramienta mencionada anteriormente, puede tener una larga duración o simplemente no encontrar el óptimo.

### Heurística de resolución

Debido al elevado tiempo de computo al momento de realizar el calculo de la solución del modelo presentado anteriormente, el cual se estima de orden exponencial dependiendo la cantidad de puntos de extracción por calle, se propuso una heurística que pudiera resolver el mismo problema pero en una cantidad de tiempo mucho menor. Esta heurística consiste en ordenar los puntos de extracción en función del tiempo de ciclo de cada uno, para posteriormente asignarle este orden de extracción al LHD, esto debido a que en el óptimo, para extraer una mayor cantidad de material en un tiempo determinado, se deben extraer los puntos más cercanos primero.

Para realizar esta heurística se necesita contar con los siguientes valores para cada uno de los puntos de extracción de la calle evaluada

$$t_i = t_{pdv \rightarrow i}^v + t_c + t_{i \rightarrow pdv}^c + t_d \quad (3.8)$$

$$t_{init \rightarrow i} = t_{pi \rightarrow i}^v + t_c + t_{i \rightarrow pdv}^c + t_d \quad (3.9)$$

en donde  $t_i$  es el tiempo de ciclo del LHD desde el punto de vaciado y  $t_{init \rightarrow i}$  el tiempo de ciclo del LHD desde el punto de inicio de éste. En base a estos valores, se deben realizar los siguientes pasos para encontrar el óptimo:

1. Realizar dos rankings en función de los valores de  $t_i$  y  $t_{init \rightarrow i}$  para cada uno de los lados de la calle, de forma que los puntos de extracción con un menor tiempo de ciclo se encuentren más arriba en cada ranking.
2. Escoger un lado de la calle.
3. Asignar el LHD a cada punto de extracción en base al ranking. El ranking a utilizar depende tanto de la posición en la que se encuentra el LHD como del lado de la calle en el que está trabajando. Se permiten repeticiones hasta que el material del punto de extracción se haya acabado.
4. Para cada posible punto de cambio de lado de la calle, calcular la máxima cantidad de material que se puede obtener. Se permite como máximo un solo cambio de lado de la calle.
5. Se repite el punto 3 y 4 utilizando el lado contrario al escogido en el punto 2

Finalmente, se busca la combinación que entregue una mayor cantidad de material extraído. En este caso la heurística entrega como resultado el lado por el cual se debe comenzar a extraer material y la cantidad de material que se debe extraer de éste antes de cambiarse de

lado. El orden en el que se debe extraer el material viene dado por el ranking y la cantidad de material a extraer de cada lado, es decir, se sigue el ranking del lado inicial hasta que se extrae la cantidad de material asignada a ese lado, para que luego el LHD se invierta y extraiga material desde el otro lado de la calle siguiendo el ranking de ese lado.

Esta heurística será programada directamente en el lenguaje de programación Python (version 3.6), ya que, para resolverla no se necesita de gran poder computacional o librerías especializadas.

Una vez se tienen los dos modelos intra calle, en los Capítulos 4 y 5 se realiza una comparación entre ambos modelos para de esta forma comprobar el correcto funcionamiento de la heurística propuesta y evidenciar la diferencia entre los tiempos de ejecución entre cada modelo. En este caso se medirá la cantidad de material total extraído que arroja cada modelo para un mismo problema, además del tiempo que le toma a cada uno de ellos resolver este problema.

### 3.2.2. Modelo de optimización de las interacciones entre los LHDs

Una vez se tiene el modelo intra calle, se puede comenzar a trabajar en el modelo de optimización general, el cual debe tener en cuenta la presencia de más LHDs en el sector de producción, lo que puede producir interferencias en la planificación entregada por el modelo anterior. Este modelo se ejecutará en tiempo real cada vez que un LHD necesite un nuevo punto de extracción mientras está realizando su turno.

Debido a que en este caso se debe trabajar con la interacción entre los LHDs y las diferentes interrupciones que esta puede generar en la cantidad de material extraído, se deben tener en cuenta las siguientes restricciones:

- No puede haber más de un LHD recorriendo la misma calle, ya que, si bien las calles son bidireccionales, éstas solo cuentan con el espacio para un LHD.
- En el caso de que un punto de vaciado esté siendo ocupado por un LHD, ningún otro LHD puede ocupar dicho punto, por lo tanto, se deben aplicar esperas o escoger otro punto de vaciado dependiendo el caso.

En la Figura 3.2, se puede ver un ejemplo de un layout de una mina excavada mediante block caving, en la cual se aprecian cada una de las calles (extraction drives) con sus puntos de extracción (drawpoints), además de el punto de vaciado (crushing station) y el punto inicial de los LHDs (workshop). Es importante notar que dentro de cada calle el LHD no tendrá interacción con los demás LHDs, sin embargo, cuando el LHD necesite ir al punto de vaciado, deberá desplazarse por rutas que son comunes para todos los LHDs (s1, s2), pudiéndose producir múltiples interrupciones en la operación del sector de producción.

El modelo de optimización que se propone a continuación busca manejar estas interrupciones y de esta forma maximizar la extracción de material. El modelo también cuenta con otros objetivos secundarios, los cuales son aumentar la utilización de cada LHD, disminuyendo las esperas que estos deban realizar, además de mantener una extracción de material uniforme dentro de cada calle. Este modelo será ejecutado cada vez que un LHD necesite un nuevo punto de extracción.

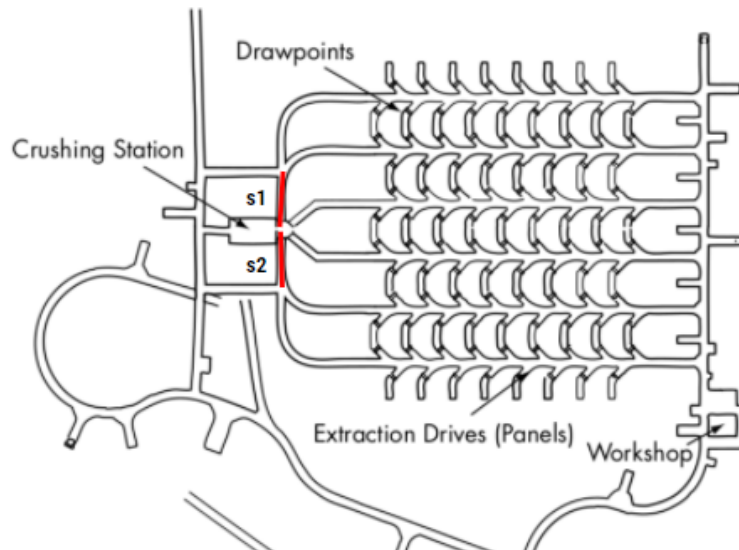


Figura 3.2: Layout de ejemplo en donde se señalan las rutas compartidas y que generarán interferencias entre los LHDS dentro de la mina.

### Definición de parámetros

En este caso, se tiene como parámetro el tiempo de ciclo de trabajo de un LHD desde el punto de vaciado y el tiempo de ciclo de un LHD desde el punto inicial, en las ecuaciones (3.8) y (3.9) respectivamente, se puede ver como se calculan estos tiempo. También se tiene el ranking de puntos de extracción por calle obtenido anteriormente con la heurística, cada punto cuenta con una posición en este ranking dependiendo su cercanía al punto de vaciado, es decir, si el punto de extracción está más cerca al punto de vaciado, tendrá una posición más alta en el ranking.

Otro factor a tomar en cuenta es la “importancia” asociada a cada punto. Esta importancia aumenta a medida que un punto no es extraído. De esta forma en la siguiente iteración del modelo este punto tendrá una mayor posibilidad de ser extraído y una vez es extraído esa importancia disminuye.

Para asignarle la importancia a cada punto, cuando un LHD es asignado a una calle, estas importancias son igual a 0 para todos los puntos. A medida que el punto no es extraído esta importancia aumenta  $1 \cdot C$ , donde  $C$  corresponde a una constante, y cuando el punto es extraído su importancia no desciende a 0 nuevamente, sino que se calcula en base a la diferencia que hay entre la cantidad de material extraído del punto con sus vecinos como se ve a continuación [3]

$$\frac{(Ton\_extrado\_Punto - Ton\_extrado\_Vecinos)}{Ton\_extrado\_vecinos) \cdot D}$$

con  $D$  una constante.

Un conjunto importante, son las rutas que son compartidas por más de un LHD, ya que, es allí donde se producirán las interrupciones entre los LHDS. Sin embargo, se descartan las rutas que se encuentran entre el punto inicial y la entrada a la calle, ya que, los LHDS no

transitan por estas rutas mientras están extrayendo material, solo transitan por estas rutas cuando son asignados a una nueva calle y deben desplazarse hasta ella. Tampoco se toman en cuenta las demás rutas presentes en el nivel de producción, solo se analiza lo que sucede en las rutas marcadas como “s” en la Figura 3.2.

En base a estas rutas compartidas se obtiene un parámetro que depende de la posición en la que el LHD ejecute el modelo de optimización. Este parámetro se define como las interrupciones que genera un LHD yendo a un punto determinado en un tiempo determinado.

Para esto, se debe tener una forma de como saber que LHD pasará por cual ruta compartida  $s$  y en que tiempo. Para guardar la información mencionada anteriormente, se creará la matriz binaria “ $S$ ”, la cual tendrá igual número de filas que el número de rutas compartidas presentes (en este caso hay 2 rutas compartidas) y el número de columnas será igual a la cantidad de segundos de un turno (en este caso el turno se ha contemplado de 24 horas o 86400 segundos, por lo tanto la matriz cuenta con 86400 columnas). Esta matriz tendrá un 1 si un LHD se encuentra en esa ruta compartida en ese instante de tiempo y 0 si no hay ningún LHD.

$$S = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 1 & 1 \\ & & & \vdots & & & \\ 0 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Sin embargo, trabajar con toda la matriz no es necesario, ya que, los ciclos de tiempo entre cada extracción de material son mucho menores al total del turno. Es por esto, que se extraerán ventanas de un tiempo determinado de esta matriz para poder trabajar. Además de las rutas compartidas por los LHDs, se debe contar con el tiempo en el cual se está llevando a cabo el llamado al modelo, para de esta forma poder obtener una ventana de la matriz  $S$  y poder evaluar las interrupciones que se provocan con cada posible punto de extracción.

En principio existirán “ $n - 1$ ” LHDs trabajando y se debe asignar al LHD  $n$ ésimo, por lo tanto para calcular la cantidad de interrupciones que se producirían si el LHD fuera a determinado punto, se calcula para cada posible punto de extracción una matriz  $S_{LHD}$  propia, en donde para cada una de las rutas compartidas, se asigna un 1 en el tiempo “ $t$ ” si el LHD se encuentra en esa ruta y tiempo, y un cero en otro caso, quedando registrado así cuando el LHD estará en cada ruta compartida si va a determinado punto de extracción. Es importante mencionar que esta matriz  $S_{LHD}$  propia del LHD debe tener la misma dimensión que la ventana que se extrajo de la matriz  $S$  para poder realizar la comparación.

Como son dos matrices binarias, para saber donde se producen intersecciones entre ellas, basta con realizar una multiplicación punto a punto, esta operación mostrará un “1” en los lugares donde se producirán interferencias. Como existen  $n - 1$  LHDs trabajando, se deben aplicar esperas al LHD que se esta asignando para no perjudicar el trabajo de los demás LHDs. Como se mencionó, la multiplicación de ambas matrices arroja en que punto existen interferencias, luego se deben ubicar estas interferencias y realizar un desplazamiento en la matriz  $S_{LHD}$  hacia la derecha desde la primera columna que presenta una interferencia. Este desplazamiento se debe realizar hasta que ya no existan las interferencias vistas anterior-

mente. La cantidad de tiempo que debe esperar el LHD es igual a la cantidad de veces que se debió desplazar la matriz hacia la derecha. Sin embargo, al desplazar la matriz  $S_{LHD}$ , se pueden haber producido nuevas interferencias, por lo cual se debe realizar este proceso hasta que no se generen más interferencias. Las esperas que se van generando se suman.

A continuación se puede ver un ejemplo de como se realiza el proceso de la generación de esperas para el LHD a asignar, en donde  $S_v$  corresponde a la ventana obtenida desde  $S$  y también se aprecia la matriz  $S_{LHD}$

$$S_v = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$S_{LHD} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$S_{LHD} * S_v = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$S_{LHD} \text{ con esperas} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Interrupciones = 2

Aquí se puede apreciar como al multiplicar  $S_v$  con  $S_{LHD}$ , se producen 2 interferencias. Por lo tanto, a partir de estas interferencias, es decir, desde la tercera columna, la matriz  $S_{LHD}$  es desplazada hacia su derecha en su totalidad de filas. Además como la matriz  $S_{LHD}$  tuvo que ser desplazada dos lugares hacia la derecha para evitar las interferencias, se produjeron dos momentos de espera del LHD o interrupciones. Luego se debe volver a hacer el mismo proceso hasta que no existan más interferencias.



$$S_{LHD} \text{ con esperas} * S_v = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$S_{LHD} \text{ con esperas} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Interrupciones = 0

Como en este caso no existían interferencias, no se aplican más esperas, la matriz  $S_{LHD}$  no sufre ningún cambio y la cantidad total de interrupciones que generaría ese punto de extracción serían un total de 2 unidades de tiempo.

### Variable de decisión

Teniendo todos los parámetros, se debe definir la variable de decisión que ayudará a maximizar los resultados obtenidos. Como se mencionó anteriormente, este modelo de optimización busca aumentar la producción total, disminuir las interferencias producidas entre los LHDs y mejorar la uniformidad de la extracción. Para ello, cada vez que un LHD necesite un nuevo punto de extracción, se evaluará que punto de extracción obtiene los mejores resultados, es por esto que se tiene la siguiente variable de decisión

$$y_{it} = \begin{cases} 1 & \text{si el LHD debe dirigirse al punto de extracción } i \text{ en el tiempo } t \text{ para extraer material} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

la cual envía al LHD que realizó la llamada a un punto de extracción determinado.

### Función objetivo

Una vez se cuenta con toda la información, los parámetros y la variable de decisión, se procede a definir la función objetivo que ayudará en el proceso de elección del próximo punto de extracción, esta función se presenta a continuación

$$\max \frac{\alpha}{rank_i + 1} - \beta \cdot interrupciones_i + \gamma \cdot importancia_i \quad (3.10)$$

$$\text{s.a. } \sum_i y_{it} = 1 \quad \forall t \quad (3.11)$$

en donde  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  corresponden a constantes las cuáles serán calibradas mediante el método de búsqueda aleatoria para maximizar la producción. La ecuación (3.10) cuenta de tres términos, el primero busca maximizar el ranking del punto de extracción  $i$ , es decir, busca escoger el punto más cercano al punto vaciado o inicio, el segundo término busca minimizar las interrupciones que se provocarían al escoger el punto de extracción  $i$  y finalmente, el tercer término busca obtener una extracción más homogénea de los puntos dentro de la calle. Con esta función objetivo se evalúa cada punto de extracción disponible para extraer y se escoge aquel que maximice la función objetivo. La ecuación (3.11) sirve como restricción a la cantidad de puntos que se pueden escoger, en este caso se puede enviar al LHD a un solo punto de extracción en el mismo tiempo.

### Algoritmo de resolución

Finalmente, se procede a definir el algoritmo que se utilizará para escoger el próximo punto de extracción, el cual será escogido en base a los parámetros definidos anteriormente, a la variable de decisión y a la función objetivo.

Este algoritmo consiste en probar todos los posibles puntos de extracción y escoger el que maximice la ecuación (3.10), a continuación se detallan los pasos que se deben seguir para realizar este proceso:

1. Escoger un punto de extracción  $i$ .
2. En base al punto de extracción  $i$  obtener su  $rank_i$ ,  $interrupciones_i$  e  $importancia_i$ .
3. Calcular el resultado de la siguiente ecuación:

$$\frac{\alpha}{rank_i + 1} - \beta \cdot interrupciones_i + \gamma \cdot importancia_i \quad (3.12)$$

en donde  $rank_i$ ,  $interrupciones_i$  e  $importancia_i$  son los parámetros calculados anteriormente. El resultado de la ecuación será igual a  $r_i$ , el cuál debe ser guardado junto con el índice  $i$ .

4. Se repiten los pasos 1, 2 y 3 para cada punto de extracción.
5. Habiendo calculado el resultado de la ecuación (3.12) para cada uno de los puntos de extracción, se escoge el punto de extracción que tenga el resultado más alto, es decir, la variable  $y_{it}$  será igual a 1 para ese punto de extracción y será 0 para todos los demás puntos. En el caso que hayan dos puntos de extracción que tengan el mismo resultado, se escogerá uno de ellos al azar. De esta forma se consigue maximizar el valor de la ecuación (3.12), lo cual es exactamente lo mismo que se propone en la ecuación (3.10) con la función objetivo.

Este algoritmo también será programada directamente en el lenguaje de programación Python (version 3.6), ya que, para resolverlo no se necesita de gran poder computacional o librerías especializadas, debido a su simpleza.

### 3.3. Simulación

Una vez generados cada uno de los modelos definidos anteriormente, se realizarán simulaciones de la operación del nivel de producción de algunos casos de estudio que serán

presentados más adelante, en donde para cada caso de estudio se tendrá un caso base que servirá de comparación al caso en donde se utilizan los modelos de optimización. Esto servirá para comprobar el correcto o no funcionamiento de estos modelos en una situación más realista.

### 3.3.1. Simulador

Cada una de las simulaciones serán llevadas a cabo en el software “Delphos Simulator UG” (DSim UG) [17], el cual es un software de uso académico capaz de simular sistemas de transporte de material en la minería subterránea. Este software recibe como entrada un archivo del tipo “JSON” con toda la siguiente información:

- **Layout:** lo primero que se detalla en la entrada de información al simulador es el layout en el cual se llevará a cabo esta simulación, este layout debe definir en su totalidad cada una de las calles de producción, con sus respectivos puntos de extracción y de vaciado. También se deben detallar lugares importantes como lo son talleres, lugar de petróleo, etc., además de las rutas que conectan a cada lugar con el resto del nivel de producción.
- **Equipos Estáticos:** dentro de este tipo de equipos presentes en el nivel de producción, se encuentran principalmente los piques de traspaso y martillos.
- **Equipos Móviles:** en este apartado se destacan principalmente los LHDs, en donde se especifica información relevante para la simulación, como la cantidad de material que pueden transportar, las distintas velocidades a las que se mueve el LHD en cada caso, eventos de falla y mantención, además de cualquier otro parámetro que sea relevante. En este apartado también se encuentran las patrullas cachorreras, las cuales están encargadas de realizar las reducciones secundarias que se presenten en la mina.
- **Plan:** en este apartado se debe especificar la cantidad de material disponible para cada punto de extracción, ya sea, para un turno, un día, un mes, dependiendo el horizonte de simulación.
- **Preferencias:** finalmente se detallan los parámetros de la simulación, en donde se especifica el número de réplicas o iteraciones que se realizaran, el horizonte de simulación, la duración de cada turno, entre otros valores.

### 3.3.2. Variabilidad de Réplicas

Una vez se tienen todos los modelos implementados en el simulador, se debe realizar un estudio para cada caso sobre la cantidad de réplicas o iteraciones que debe contener la simulación, esto con el fin de eliminar o disminuir la variabilidad que se puede producir entre una simulación y otra.

Para conocer el valor óptimo de réplicas que debe contener cada simulación, se evaluará como varía el promedio del material total extraído al aumentar el número de réplicas. Este promedio se calculará en base a la cantidad de material extraído por réplica y la cantidad de réplicas, es decir, el material extraído promedio para la réplica  $n$ , será igual al promedio del material extraído entre las réplicas 1 hasta la  $n$ . A partir del promedio obtenido anteriormente, se calcula la diferencia porcentual entre el promedio de cada réplica con respecto al promedio de la réplica anterior y se escoge la cantidad de réplicas en función de en que momento la diferencia porcentual se mantiene constante en un valor cercano a 0.

### 3.3.3. Métricas de evaluación

Teniendo la cantidad de réplicas que se necesitan simular para obtener resultados correctos, se necesitan ciertas métricas para poder comparar los casos base de cada caso de estudio, con su respectivo caso optimizado y de esta forma poder comprobar si existen mejoras o no en algún punto del nivel de producción.

Las métricas a utilizar serán las siguientes:

- **Productividad nivel de producción:** consiste básicamente en la cantidad de material que se extrae en el periodo evaluado. Esta será una de las principales métricas a utilizar, ya que, uno de los principales objetivos de la memoria es maximizar la productividad de la mina.
- **Factor operacional:** este indicador permite realizar una comparación entre el tiempo efectivo de trabajo del LHD y las interferencias que pueden ocurrir a lo largo del turno u horizonte de simulación. El factor operacional se calcula como

$$\frac{t_{efectivo}}{t_{efectivo} + t_{interferencia}}$$

- **Uniformidad de extracción:** este indicador se medirá obteniendo el porcentaje de material extraído de cada uno de los puntos de extracción en base al plan entregado, y a este conjunto se le sacará la desviación estándar. De esta forma se medirá cual es la diferencia de porcentaje de extracción en cada punto.

En base a estos tres indicadores se puede realizar una comparación entre el caso base y el caso optimizado, ya que, cada uno de estos indicadores está relacionado con un término de la ecuación (3.10), que corresponde a la función objetivo del modelo de optimización.

# Capítulo 4

## Casos de estudio

A continuación se presentan distintos casos de estudio, con los cuales se podrá comprobar el correcto funcionamiento o no de los modelos, teniendo para cada uno de ellos un caso base que servirá de comparación para los casos optimizados.

### 4.1. Parámetros de diseño LHD

Para todos los casos de estudio se utilizará el mismo tipo de LHD, el cual es el “Sandvik LH 517”, por lo tanto, toda la información perteneciente al LHD es compartida.

En la Tabla 4.1, se muestran los parámetros que se utilizarán en las simulaciones para cada uno de los LHDs, en donde se puede ver tanto la velocidad con el LHD vacío como con el LHD cargado. También se puede observar la capacidad del LHD, además de su factor de balde, el cual corresponde a la cantidad de material que realmente el LHD puede cargar. Al final se tienen los tiempos que se demora el equipo en cargar y descargar el material, se puede ver que en el caso del tiempo de carga el tiempo es igual a 30+10, esto significa que el equipo se tarda 30 segundos en cargar el material, pero se demora 10 segundos adicionales en posicionarse para cargar el material, lo mismo ocurre en el caso de la descarga.

Parámetro	Valor	Unidad
Capacidad [18]	10	yd <sup>3</sup>
Factor de balde [18]	11.1	ton
Tiempo de carga [18]	30+10	s
Tiempo de descarga [18]	15+10	s
Velocidad vacío [15]	13.5	km/h
Velocidad cargado [15]	10.0	km/h

Tabla 4.1: Parámetros equipos LHD autónomos.

#### 4.1.1. Modelos de interferencias operacionales

Dentro de la operación de la mina, existen diversas fuentes de interferencias, especialmente relacionadas con la operación de los LHDs. A continuación se presentan los modelos que

describen estas interferencias, tanto para la probabilidad de que ocurra un suceso o cuanto se tardará en corregir dicho suceso. Estos modelos se encuentran corriendo en simultáneo con la simulación.

### Mantenciones programadas de equipos

Los LHDs tienen mantenciones en función del tiempo que han operado, en este caso específico las mantenciones son cada 50 horas, mientras que en la Tabla 4.2 se tiene el tiempo que tarda la mantención o MTTR (Mean Time To Repair) [15].

MTTR de mantención (Distribución uniforme)	
Factor Escalar [hora]	error ( $\sigma$ )
5	-1,+4

Tabla 4.2: Parámetros de la distribución uniforme que modela el tiempo de mantención de los LHDs.

### Carga de combustible

Esta tarea se realiza para mantener el suficiente combustible para tener un correcto funcionamiento la mayoría del tiempo. En este caso, el modelo a utilizar recarga los estanques de 400 litros de los LHDs cada 12 horas exactas, mientras que en la Tabla 4.3, se puede ver la distribución de tiempo que le toma a cada LHD realizar su proceso carga de combustible [19].

MTTR de carga de combustible (Distribución triangular)	
Factor Escalar [min]	error ( $\sigma$ )
15	-1,+3

Tabla 4.3: Parámetros de la distribución triangular que modela el tiempo de carga de combustible de los LHDs.

### Fallas de LHDs

Las fallas se pueden producir de forma inesperada dentro de la mina, por lo tanto se hace indispensable utilizar un modelo capaz de modelar estas fallas. En la Tabla 4.4 se puede ver la distribución de probabilidades para saber cada cuanto va a ocurrir una falla [20].

MTBF de falla (Distribución Weibull)	
Factor Escalar [días]	Factor Forma
3.103	0.698

Tabla 4.4: Parámetros de la distribución weibull que modela el tiempo entre fallas de los LHDs.

En la Tabla 4.5, se muestra la distribución de probabilidades para saber el tiempo que se tardará en reparar la falla [20].

MTTR de falla (Distribución Weibull)	
Factor Escalar [hr]	Factor Forma
1.513	0.301

Tabla 4.5: Parámetros de la distribución weibull que modela el tiempo de reparación de fallas de los LHDs.

## 4.2. Caso de estudio 0

Antes de presentar los casos de estudio que ayudarán a ver los resultados obtenidos con el modelo general, se hace muy relevante presentar los casos que se utilizaron para validar lo presentado en la sección 3.2.1 la cual se refería al modelo intra calle.

En la Figura 4.1, se presentan dos ejemplos muy simples, en los cuales existe solo una calle, un LHD, un punto de vaciado y 4 o 6 puntos de extracción. Este caso se utiliza para comprobar que ambos modelos propuestos en la sección mencionada entregan los mismos resultados, además de evidenciar la diferencia en los tiempos de ejecución de un modelo contra el otro. Las distancias, tiempos de carga y descarga, tiempos de inversión y material disponible en cada punto de extracción es el mismo en ambos casos y cada modelo fue generado exactamente con la misma información.

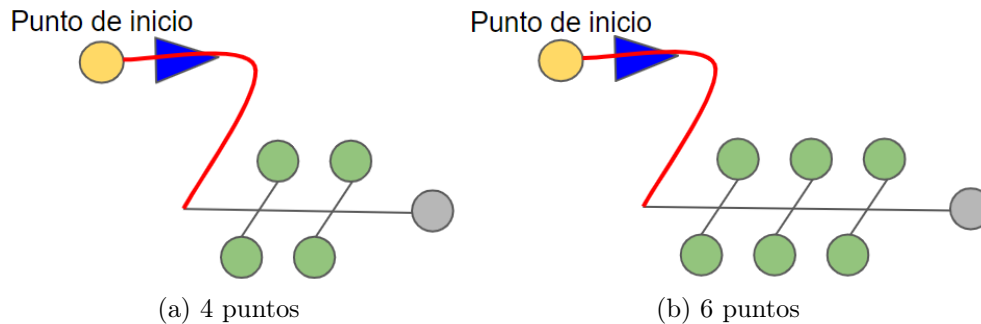


Figura 4.1: Caso 0 en el cual se tiene una sola calle, un LHD, un punto de vaciado al final de la calle y 4 o 6 puntos de extracción.

## 4.3. Caso de estudio 1

A continuación se presenta el primero de dos casos de estudio que servirán para comprobar el correcto funcionamiento del sistema de despacho en su totalidad. Este caso de estudio corresponde al “Nuevo nivel mina perteneciente a la mina El Teniente” [21], en donde se especifica en detalle cada uno de los parámetros, variables y modelos que se utilizan para simular este caso, además de su respectiva validación con datos históricos de una mina similar.

El layout del Nuevo nivel mina de El Teniente es información confidencial, por lo tanto, no se puede presentar. Sin embargo la información más relevante sobre el caso de estudio y la que más podría afectar al modelo propuesto es la siguiente:

- **Número de calles:** el layout cuenta con un total de 16 calles de producción.

- **Número de puntos de extracción:** cada calle cuenta con 23 puntos de extracción por cada lado de la calle, sin embargo, la calle 1 y 16 solo cuentan con puntos de extracción por un solo lado de la calle.
- **Número de piques de traspaso:** dentro de todo el nivel de producción existen 48 piques de traspaso, 3 por cada calle, además de esto existe un martillo pica roca por cada pique de traspaso.
- **Flota LHD:** la flota de LHDs destinada a la extracción de material es de 14 LHDs.
- **Horizonte de simulación:** el horizonte de simulación es de solo un día, en el cual existen dos turnos con una hora de colación entre ellos.
- **Cuadrillas de cachorro:** se asignaron dos cuadrillas encargadas de realizar las reducciones secundarias.
- **Modelo de falla, mantención y colgaduras:** este caso cuenta además con varios modelos capaces de simular la variabilidad que puede existir dentro de la mina, ya sea con los modelos de falla y mantención del LHD presentados anteriormente, o también es importante destacar el modelo de colgaduras utilizado.

Con respecto al plan de producción, en [21] se especifica que el plan de producción es de un total de 35.000 [tpd], con un total de 378 puntos de extracción activos, entre los cuales existen puntos en comienzo de quiebre, fin de quiebre o liberados, lo cual afecta su velocidad de extracción siendo igual a 0.30, 0.65 y 0.85 [ton/ $m^2$ -día], respectivamente. Además de la velocidad de extracción, se tiene un área promedio por punto igual a 374 [ $m^2$ ], lo cual entrega toneladas entre 100 y 300 [tpd] para cada punto de extracción. En la Figura 4.2, se puede ver el plan de extracción para cada una de las calles en el nivel de producción.

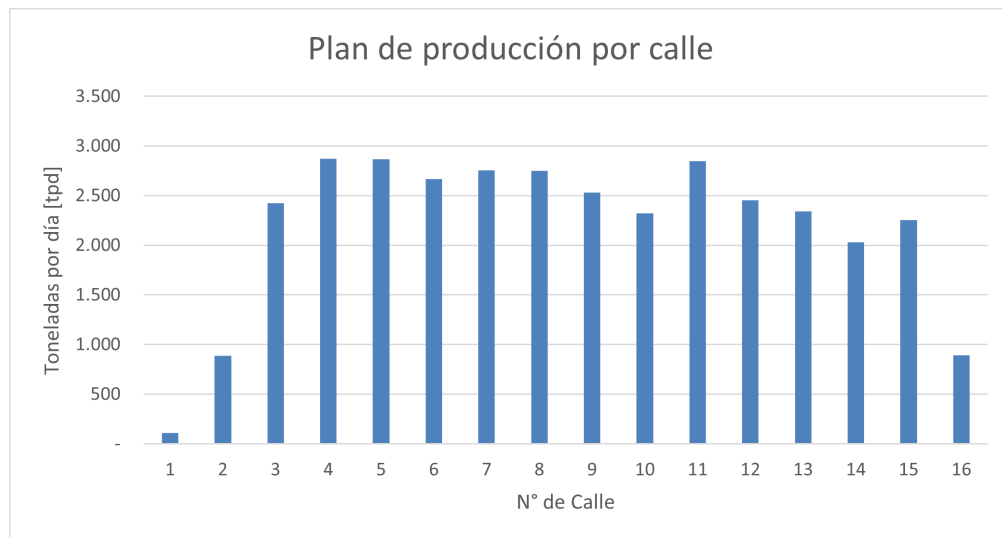


Figura 4.2: Material a extraer por cada calle en el caso de estudio 1.

En este caso de estudio, las asignaciones de tareas que se realizan son las predeterminadas en el simulador DSim, en donde solo se escoge un nuevo punto de extracción cuando el punto anterior se quede sin material o se cuelgue, en estos dos casos, el nuevo punto a extraer es un punto de extracción disponible y que no haya cumplido su producción diaria.

En [21], se busca mejorar la producción de la mina mediante el confinamiento dinámico



de los equipos, lo cual implica asignar un equipo a zonas dinámicas que pueden ir cambiando durante la operación de la mina. Estas asignaciones tienen como fin principal evitar las pérdidas operacionales producidas por las reducciones secundarias. Para realizar la comparación entre la operación normal de la mina y la operación con confinamiento dinámico, se presentan dos casos:

- **Caso Base:** en este caso, al momento de realizarse una reducción secundaria, se detiene toda la operación del nivel de producción, incluyendo la operación de los LHDs.
- **Caso Confinamiento Moderado:** como se mencionó anteriormente, en este caso se busca disminuir las pérdidas operacionales que producen las reducciones secundarias. Es por esta razón, que cuando se produce una reducción secundaria solo detienen sus operaciones los equipos que se encontraban trabajando en la misma calle en la que se realizan estas reducciones. De esta manera, se aumenta la producción total de la mina, ya que mientras se realizan las reducciones secundarias aun hay LHDs realizando sus operaciones con normalidad.

En esta memoria se trabajará con ambos casos, caso base y caso con confinamiento moderado, con el objetivo de ver si existe alguna diferencia entre estos dos casos y comprobar si el sistema de despacho funciona de la misma forma con dos operaciones distintas. Es importante mencionar que todo lo demás con respecto a la operación de la mina se mantiene igual entre ambos modelos. Con respecto al plan de producción, si en algún caso se acaba el plan del día 1 se seguirá extrayendo material acorde el plan del día 2 de los puntos que no hayan alcanzado su velocidad de extracción máxima.

En ambos casos los puntos de vaciado se encuentran dentro de las calles de extracción, por lo tanto, los LHDs no tendrán interacción con los demás LHDs salvo cuando se dirijan al taller o deban cambiarse de calle. Sin embargo, estas interferencias no son consideradas en el modelo de optimización, por lo que, al no ocurrir interferencias, el término relacionado a las interferencias de la función objetivo de la ecuación (3.10) es igual a cero, por lo tanto se elimina de la ecuación, quedando de la siguiente forma

$$\max \frac{\alpha}{rank_i + 1} + \gamma \cdot importancia_i \quad (4.1)$$

## 4.4. Caso de estudio 2

Como se mencionó en el caso de estudio 1, éste no presenta interferencias entre los distintos LHDs mientras se encuentran extrayendo material, es por esto que se creó un caso para poder comprobar esta parte del modelo relacionada a las interferencias. Este caso debe ser similar al visto en la Figura 3.2, es decir, debe tener puntos de vaciado fuera de las calles, de esta forma si podrían existir interferencias entre los distintos LHDs.

Para que el caso sea lo suficientemente realista, se extrajo una sección del caso de estudio 1, la cual consta de 8 calles de extracción, con 5 puntos de extracción por cada lado de la calle y se agregó un punto de vaciado común para todas las calles al final de éstas. La información más relevante de este caso de estudio se detalla a continuación:

- **Número de calles:** el layout cuenta con un total de 8 calles de producción.
- **Número de puntos de extracción:** cada calle presenta puntos de extracción a ambos lados de la calle, además cuenta con 5 puntos de extracción por cada lado de la calle.
- **Número de piques de traspaso:** dentro de todo el nivel de producción existen solo 1 pique de traspaso, el cual se encuentra en la última salida de cada calle.
- **Flota LHD:** la flota de LHDs destinada a la extracción de material es de 6 LHDs.
- **Horizonte de simulación:** el horizonte de simulación es de solo un día, en el cual solo existe un turno de 24 horas.
- **Modelo de falla, mantenimiento y colgaduras:** este caso cuenta con los mismos modelos de falla y mantenimiento relacionados al LHD mencionados en el caso anterior, ya que, éstos modelos fueron obtenidos en un layout similar al propuesto. Con respecto al modelo de colgaduras, en este caso no se utilizó ninguno, esto debido a que al ser un layout diseñado, no se tiene información histórica para poder comprobar su buen funcionamiento, además de que en el modelo de optimización no tiene gran relevancia.

En la Figura 4.3 se puede ver el layout del caso de estudio 2, en donde se aprecian las calles con sus respectivos puntos de extracción, además del taller (cuadrado verde) y el punto de vaciado común (rombo azul).

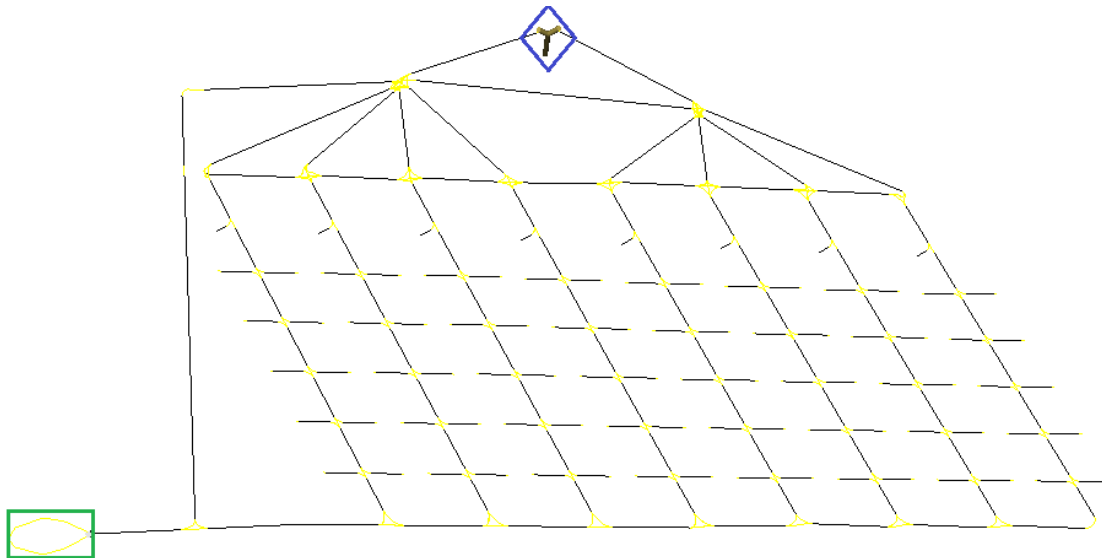


Figura 4.3: Layout caso de estudio 2.

En este caso, al tener varias rutas comunes para llegar al punto de vaciado, los LHDs tendrán interferencias entre ellos y tendrán que realizar esperas mientras otro LHD se encuentre en su calle de destino. Por lo tanto, en este caso si se puede probar el modelo completo, teniendo como función objetivo la ecuación (3.10). En este caso de estudio al igual que el anterior, las asignaciones realizadas a los equipos son las predeterminadas por el simulador DSim, en donde se escogen puntos de extracción aleatoriamente.

Con respecto al plan a utilizar para este caso, se asume que todos los puntos de extracción se encuentran liberados, es decir, tienen una velocidad de extracción entre 0.7 a 1 [ton/ $m^2$ -día], además el área promedio por punto es igual a 374  $m^2$ , por lo tanto, dan toneladas entre

261 y 374 [tpd] por cada punto de extracción. También se agregó un factor inversamente proporcional a la distancia entre la calle y el punto de vaciado, es decir, las calles más alejadas del punto de extracción presentan una menor velocidad de extracción. En este caso el plan de producción total es igual a 17.000 [tpd] y en la Figura 4.4 se aprecia el plan de producción por calle de un día.



Figura 4.4: Material a extraer por cada calle en el caso de estudio 2.

# Capítulo 5

## Resultados

En la presente sección se muestran los resultados obtenidos mediante las simulaciones para cada uno de los casos de estudio descritos en la sección anterior, en donde, sin tomar en cuenta el caso 0, para cada caso se presenta el estudio de variabilidad de réplicas, seguido de la calibración de parámetros que se realizó para obtener los mejores resultados, para finalizar con los resultados obtenidos para el caso base comparado con el caso con el sistema de despacho, que posteriormente serán analizados en la siguiente sección.

### 5.1. Caso de estudio 0

Con respecto al caso de estudio 0, se obtuvieron los siguientes resultados. En la Tabla 5.1 se pueden apreciar los resultados obtenidos para el caso con 4 puntos de extracción en la calle, en donde para cada modelo intra calle propuesto en la sección (3.2.1) se mide la cantidad de material obtenido y el tiempo de ejecución que le toma a cada modelo llegar a ese resultado.

Caso 4 Puntos de Extracción		
Modelo	Baldadas Extraídas	Tiempo de Ejecución [s]
ILP	24	315
Heurística	24	0.01

Tabla 5.1: Material extraído y tiempo de ejecución para cada modelo intra calle en caso de estudio 0 con 4 puntos de extracción.

En la Tabla 5.2, se pueden apreciar los mismos resultados vistos anteriormente pero para el caso con 6 punto de extracción, en este caso se realizan las mismas mediciones, es decir, se mide el material extraído en cantidad de baldadas, además del tiempo que le toma al modelo llegar a ese resultado.

Caso 6 Puntos de Extracción		
Modelo	Baldadas Extraídas	Tiempo de Ejecución [s]
ILP	22	1699
Heurística	22	0.02

Tabla 5.2: Material extraído y tiempo de ejecución para cada modelo intra calle en caso de estudio 0 con 6 puntos de extracción.

## 5.2. Caso de estudio 1

A continuación se presentan los resultados obtenidos para el caso de estudio 1, tanto para el caso base como para el caso con confinamiento moderado. Primero se analizó la variabilidad de las réplicas de la simulación para determinar cuantas se deben ejecutar para obtener resultados congruentes entre una simulación y otra. Luego se calibraron las constantes presentes en la función objetivo del modelo de optimización, para obtener los mejores resultados. Finalmente, se realiza una comparación entre el caso sin despacho, ya sea el caso base o el caso con confinamiento moderado, y el caso con el sistema de despacho.

### 5.2.1. Caso base

En esta sección se muestran los resultados obtenidos para el caso base del caso de estudio 1. Como se mencionó anteriormente, en este caso se producen grandes pérdidas operacionales, debido a las interrupciones que generan los equipos encargados de las reducciones secundarias.

#### Variabilidad de réplicas

En la Figura 5.1, se puede apreciar la variabilidad que genera agregar una nueva réplica a la simulación en la cantidad de material extraído, esto se realiza tanto para el caso base como para el caso base con el sistema de despacho, en total se ejecutan 50 réplicas.

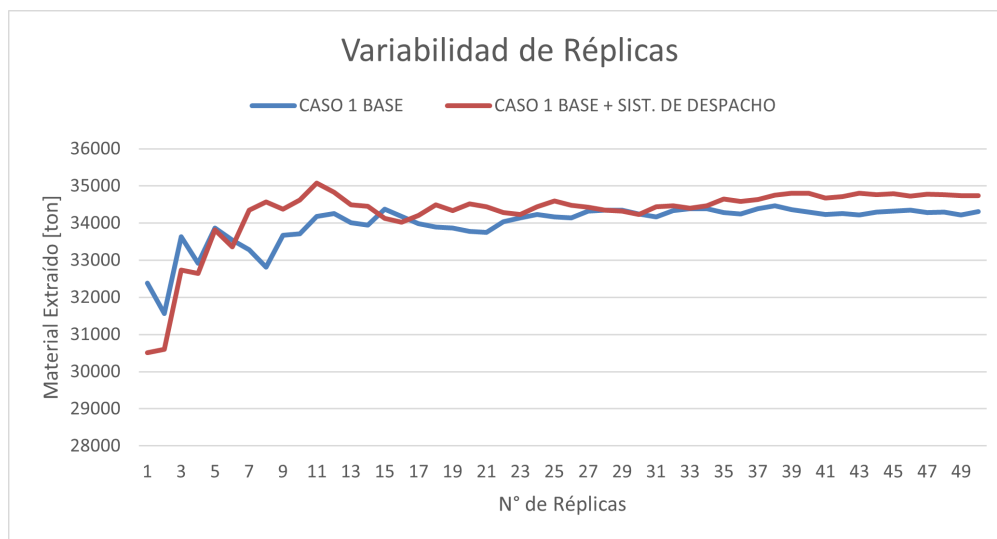


Figura 5.1: Variabilidad de réplicas para el caso de estudio 1 en su caso base y su case base más el sistema de despacho.

En la Figura 5.2, se aprecia la diferencia porcentual que existe entre una réplica y su réplica anterior, en donde queda en evidencia que para un número mayor a 30 réplicas, la diferencia porcentual no supera los 0.005, es por esta razón que se decide realizar un total de 30 réplicas en cada simulación y de esta forma obtener datos congruentes entre una simulación y otra.

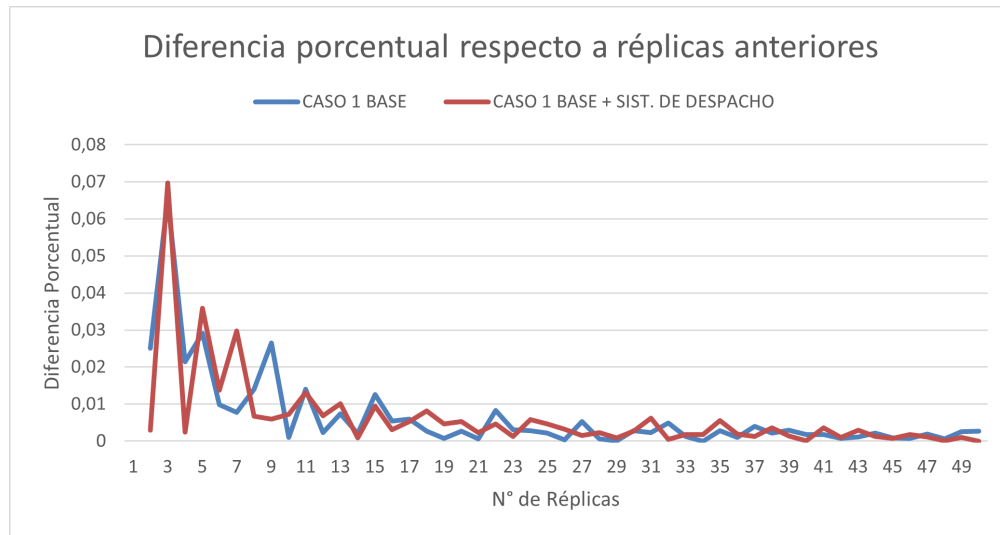


Figura 5.2: Diferencia porcentual de réplicas para el caso de estudio 1 en su caso base y su case base más el sistema de despacho.

### Calibración de constantes $\alpha$ y $\gamma$ de la función objetivo

Teniendo la cantidad de réplicas que se deben hacer en cada simulación, se procede a realizar el proceso de calibración de las constantes  $\alpha$  y  $\gamma$  de la función objetivo del caso de estudio, es decir, la ecuación (4.1).

En la Tabla 5.3, se observan los resultados obtenidos al igualar una de las dos constantes a 0, esto con el objetivo de comprobar que cada parte de la función objetivo funciona de forma correcta. Como se mencionó anteriormente, cuando el plan del día 1 se terminaba o ya estaba completamente asignado y hay LHDs disponibles, se sigue con el plan del día 2 de los puntos que no alcanzaron su velocidad máxima de extracción en el día. Es por esta razón que en la Tabla 5.3 se puede ver el promedio de extracción y su desviación estándar para ambos días.

$\alpha$	$\gamma$	Producción [ton]	Factor operacional [%]	Promedio de extracción [%]		Desviación estándar [%]	
				día 1	día 2	día 1	día 2
3	0	35.997	66	95	6	6	9
0	3	33.291	66	93	2	4	4

Tabla 5.3: Análisis de sensibilidad al igualar a 0 una de las constantes  $\alpha$  o  $\gamma$ .

En la Tabla 5.4, se puede apreciar el proceso de calibración para el valor de las constantes  $\alpha$  y  $\gamma$ , en donde ambas constantes fueron escogidas de forma aleatoria en el intervalo de 1 a 4. Se busca la combinación de valores que maximicen la producción, el factor operacional y

disminuya la desviación estándar del porcentaje de extracción principalmente del día 1. Por estas razones se escoge el valor de  $\alpha$  igual a 2,33 y el de  $\gamma$  igual a 1,57.

$\alpha$	$\gamma$	Producción [ton]	Factor operacional [%]	Promedio de extracción [%]		Desviación estándar [%]	
				día 1	día 2	día 1	día 2
2,96	1,25	35.278	66	95	5	5	8
1,67	2,84	34.369	68	95	4	5	6
3,99	3,47	33.910	64	95	2	5	3
3,68	3,49	33.739	66	94	3	6	4
1,01	2,47	34.868	66	95	4	4	6
1,95	3,93	34.147	65	94	3	5	5
1,69	1,89	34.133	65	95	3	5	5
2,33	1,57	35.369	66	95	6	5	8

Tabla 5.4: Calibración constantes  $\alpha$  y  $\gamma$  caso de estudio 1 base.

### Comparación entre el caso base y el caso base con el sistema de despacho

En esta sección se mostrarán los resultados finales obtenidos tanto para el caso base como para el caso base con el sistema de despacho luego de haber realizado la calibración de las constantes. Como se mencionó en secciones anteriores, los principales indicadores a evaluar son la producción, el factor operacional, el porcentaje promedio de extracción de cada punto y su desviación estándar.

En la Tabla 5.5, se pueden apreciar los resultados que se obtuvieron en el caso base sin el sistema de despacho.

Producción [ton]	Factor operacional [%]	Promedio de extracción [%]		Desviación estándar [%]	
		día 1	día 2	día 1	día 2
34.345	65	94	3	6	4

Tabla 5.5: Resultados obtenidos en el caso 1 base sin el sistema de despacho.

En la Figura 5.3, se muestra una comparativa entre el plan de producción por calle, el material extraído por calle en el caso base y el material extraído por calle en el caso base con el sistema de despacho. Se puede observar que existe un pequeño incremento en la cantidad de material extraído por calle en el caso base con el sistema de despachos, además de que solo este último cumple con el plan de producción para cada una de las calles.

En la Tabla 5.6, se muestran los indicadores anteriormente mencionados obtenidos para el caso base y el caso base con el sistema de despacho del caso de estudio 1. En la tabla se puede ver que existe un incremento en la producción total de la mina en un 3% con respecto al caso base. El factor operacional no sufre cambios. Con respecto al promedio de extracción por cada punto, se puede ver un aumento de un 1,19% en el día 1 y un 2,71% en el día 2. Con respecto a la desviación estándar del promedio de extracción, este valor disminuyó un 1,47% en el día 1 y aumento un 4,11% en el día 2.

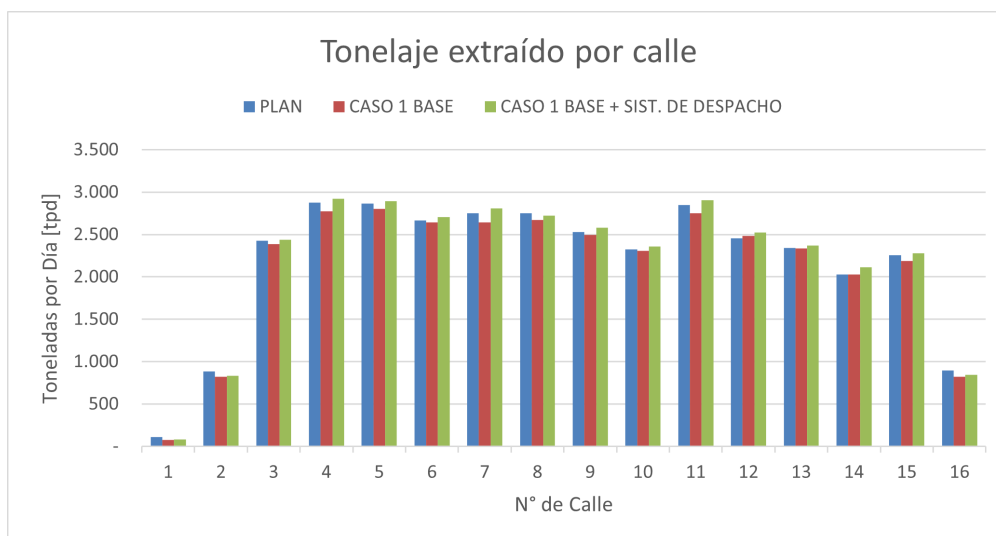


Figura 5.3: Comparación para el caso 1 entre el plan de producción por calle, el tonelaje extraído por calle en el caso base y el tonelaje extraído en el caso base más el sistema de despacho.

Indicador		Caso Base	Base + Sist. Despacho	Diferencia [%]
Producción total [ton]		34.345	35.369	2,98
Factor operacional [%]		65,2	65,5	0,34
Promedio de extracción [%]	día 1	94,2	95,4	1,19
	día 2	2,9	5,6	2,71
Desviación estándar [%]	día 1	6,2	4,8	-1,47
	día 2	4,2	8,3	4,11

Tabla 5.6: Indicadores para el caso base y el caso base con el sistema de despacho del caso de estudio 1.

### 5.2.2. Caso confinamiento moderado

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para el caso con confinamiento moderado en el caso de estudio 1. El confinamiento moderado permite a los LHDs continuar con su normal funcionamiento cuando se encuentran trabajando los equipos encargados de las reducciones secundarias, siempre y cuando el LHDs no se encuentre en la misma calle que dichos equipos. Esto disminuye las demoras operacionales, ya que los LHDs no necesitan dejar de trabajar, lo que finalmente mejora la productividad total de la mina.

#### Variabilidad de réplicas

En la Figura 5.4, se puede apreciar la variabilidad que genera agregar una nueva réplica a la simulación en la cantidad de material extraído, esto se realiza tanto para el caso con confinamiento moderado como para el caso con confinamiento moderado y el sistema de despacho, en total se ejecutan 50 réplicas.

En la Figura 5.5, se aprecia la diferencia porcentual que existe entre una réplica y su réplica anterior, en donde queda en evidencia que para un número mayor a 30 réplicas, la diferencia



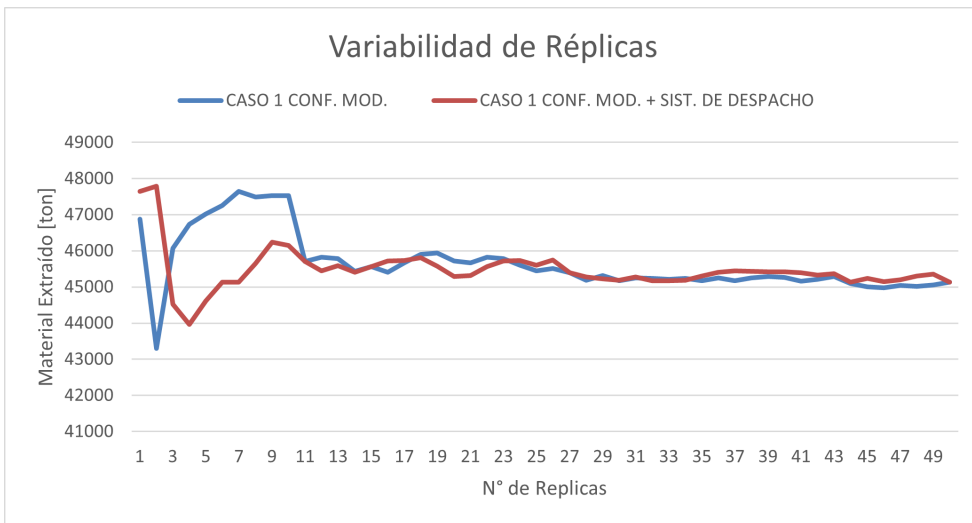


Figura 5.4: Variabilidad de réplicas para el caso de estudio 1 con confinamiento moderado y con confinamiento moderado y el sistema de despacho.

porcentual no supera los 0.005, es por esta razón que se decide realizar un total de 30 réplicas en cada simulación y de esta forma obtener datos congruentes entre una simulación y otra.

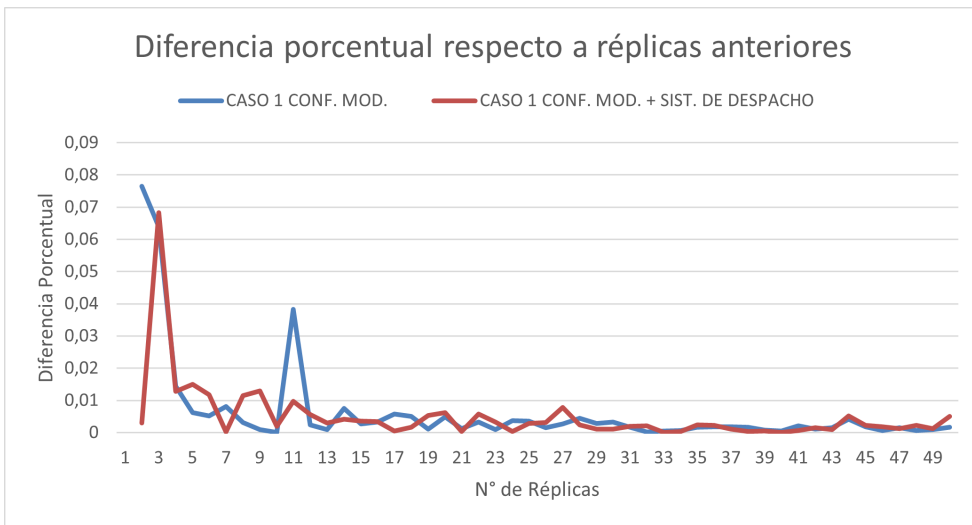


Figura 5.5: Diferencia porcentual de réplicas para el caso de estudio 1 con confinamiento moderado y con confinamiento moderado y el sistema de despacho.

### Calibración de constantes $\alpha$ y $\gamma$ de la función objetivo

Teniendo la cantidad de réplicas que se deben hacer en cada simulación, se procede a realizar el proceso de calibración de las constantes  $\alpha$  y  $\gamma$  de la función objetivo del caso de estudio, es decir, la ecuación (4.1).

En la Tabla 5.7, se observan los resultados obtenidos al igualar una de las dos constantes a 0. Esto con el objetivo de ver como se comporta el modelo de optimización cuando se elimina uno de los dos términos de la ecuación (4.1).

$\alpha$	$\gamma$	Producción [ton]	Factor operacional [%]	Promedio de extracción [%]		Desviación estándar [%]	
				día 1	día 2	día 1	día 2
3	0	46.213	87	96	31	7	38
0	3	43.826	89	97	26	3	31

Tabla 5.7: Análisis de sensibilidad al igualar a 0 una de las constantes  $\alpha$  o  $\gamma$ .

En la Tabla 5.8, se puede apreciar el proceso de calibración para el valor de las constantes  $\alpha$  y  $\gamma$ , en donde ambas constantes fueron escogidas de forma aleatoria en el intervalo de 1 a 4. Se busca la combinación de valores que maximicen la producción, el factor operacional y disminuya la desviación estándar del porcentaje de extracción, principalmente del día 1, aunque en este caso si tienen una importancia mayor los resultados asociados al plan de producción del día 2, ya que, es significativa la cantidad de material que se extrae acorde a este plan. Por estas razones se escoge el valor de  $\alpha$  igual a 2,33 y el de  $\gamma$  igual a 1,57.

$\alpha$	$\gamma$	Producción [ton]	Factor operacional [%]	Promedio de extracción [%]		Desviación estándar [%]	
				día 1	día 2	día 1	día 2
2,96	1,25	45.061	88	97	29	2	34
1,67	2,84	45.248	88	97	29	3	35
3,99	3,47	44.909	88	96	29	3	35
3,68	3,49	44.606	88	97	28	3	33
1,01	2,47	44.289	88	97	27	3	32
1,95	3,93	45.369	88	97	30	3	35
1,69	1,89	44.382	87	96	28	3	33
2,33	1,57	45.853	88	98	31	3	36

Tabla 5.8: Calibración constantes  $\alpha$  y  $\gamma$  caso de estudio 1 con confinamiento moderado.

### Comparación entre el caso con confinamiento moderado con el caso con confinamiento moderado y el sistema de despacho

En esta sección se mostrarán los resultados finales obtenidos tanto para el caso con confinamiento moderado como para el caso con confinamiento moderado con el sistema de despacho luego de haber realizado la calibración de las constantes. Como se mencionó en secciones anteriores, los principales indicadores a evaluar son la producción, el factor operacional, el porcentaje promedio de extracción de cada punto y su desviación estándar.

En la Tabla 5.9, se pueden apreciar los resultados que se obtuvieron en el caso base sin el sistema de despacho.

En la Figura 5.6, se muestra una comparativa entre el plan de producción por calle, el material extraído por calle en el caso con confinamiento moderado y el material extraído por calle en el caso con confinamiento moderado y el sistema de despacho. Se puede observar que existe un pequeño aumento de la cantidad de material extraído por calle en el caso con

Producción [ton]	Factor operacional [%]	Promedio de extracción [%]		Desviación estándar [%]	
		día 1	día 2	día 1	día 2
45.106	87	96	30	5	36

Tabla 5.9: Resultados obtenidos en el caso 1 con confinamiento moderado sin el sistema de despacho.

el sistema de despacho. También se puede mencionar que el plan se cumple a cabalidad en ambos casos estudiados.

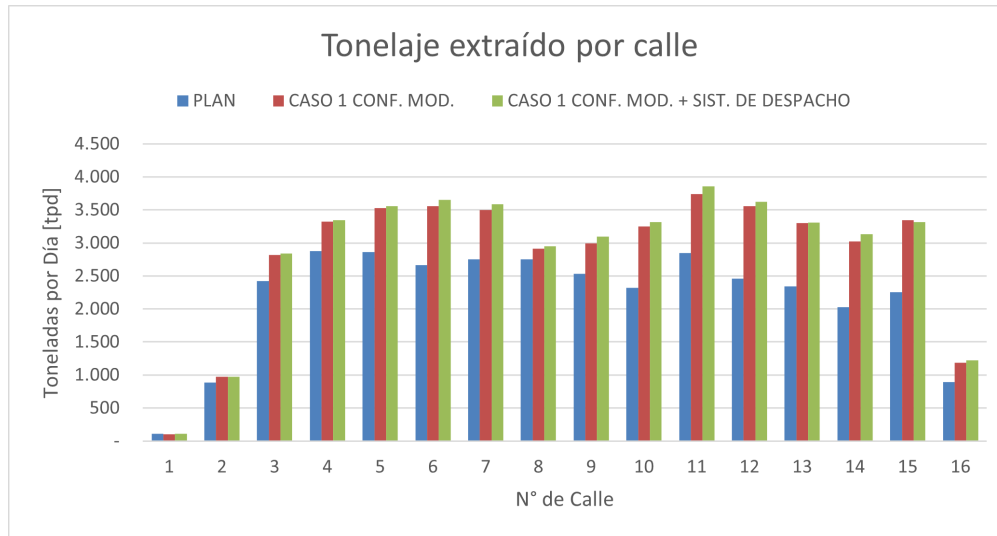


Figura 5.6: Comparación para el caso 1 entre el plan de producción por calle, el tonelaje extraído por calle en el caso con confinamiento moderado y el tonelaje extraído en el caso con confinamiento moderado más el sistema de despacho.

En la Tabla 5.10, se muestran los indicadores anteriormente mencionados obtenidos para el caso con confinamiento moderado y el caso con confinamiento moderado y el sistema de despacho del caso de estudio 1. En la tabla se puede ver que existe un incremento en la producción total de la mina en un 3% con respecto al caso base. El factor operacional no sufre cambios. Con respecto al promedio de extracción por cada punto, se puede ver un aumento de un 1,19% en el día 1 y un 2,71% en el día 2. Con respecto a la desviación estándar del promedio de extracción, este valor disminuyó un 1,47% en el día 1 y aumento un 4,11% en el día 2.

Indicador		Conf. Mod.	Conf. Mod. + Sist. Despacho	Diferencia [%]
Producción total [ton]		45.106	45.853	1,66
Factor operacional [%]		87,7	88,1	0,39
Promedio de extracción [%]	día 1	95,7	97,5	1,88
	día 2	29,7	30,5	0,80
Desviación estándar [%]	día 1	5,5	2,9	-2,57
	día 2	35,6	36,3	0,67

Tabla 5.10: Indicadores para el caso con confinamiento moderado y el caso con confinamiento moderado y el sistema de despacho del caso de estudio 1.

### 5.3. Caso de estudio 2

A continuación se presentan los resultados obtenidos para el caso de estudio 2. Primero se analizó la variabilidad de las réplicas de la simulación para determinar cuantas se deben ejecutar para obtener resultados congruentes ente una simulación y otra. Luego se calibraron las constantes presentes en la función objetivo del modelo de optimización, para obtener los mejores resultados. Finalmente, se realiza una comparación entre el caso sin despacho y el caso con el sistema de despacho.

#### 5.3.1. Variabilidad de réplicas

En la Figura 5.7, se puede apreciar la variabilidad que genera agregar una nueva réplica a la simulación en la cantidad de material extraído, esto se realiza tanto para el caso 2 como para el caso 2 con el sistema de despacho, en total se ejecutan 50 réplicas.

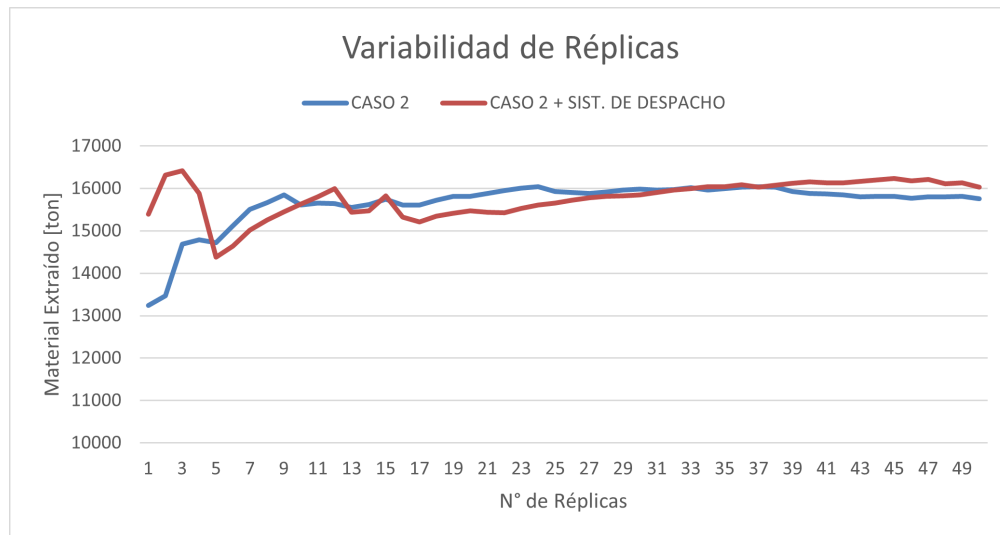


Figura 5.7: Variabilidad de réplica para el caso de estudio 2 y el caso de estudio 2 más el sistema de despacho.

En la Figura 5.8, se aprecia la diferencia porcentual que existe entre una réplica y su réplica anterior, en donde queda en evidencia que para un número mayor a 20 réplicas, la diferencia porcentual no supera los 0.01 y se mantiene estable, es por esta razón que se decide

realizar un total de 25 réplicas en cada simulación y de esta forma obtener datos congruentes entre una simulación y otra.

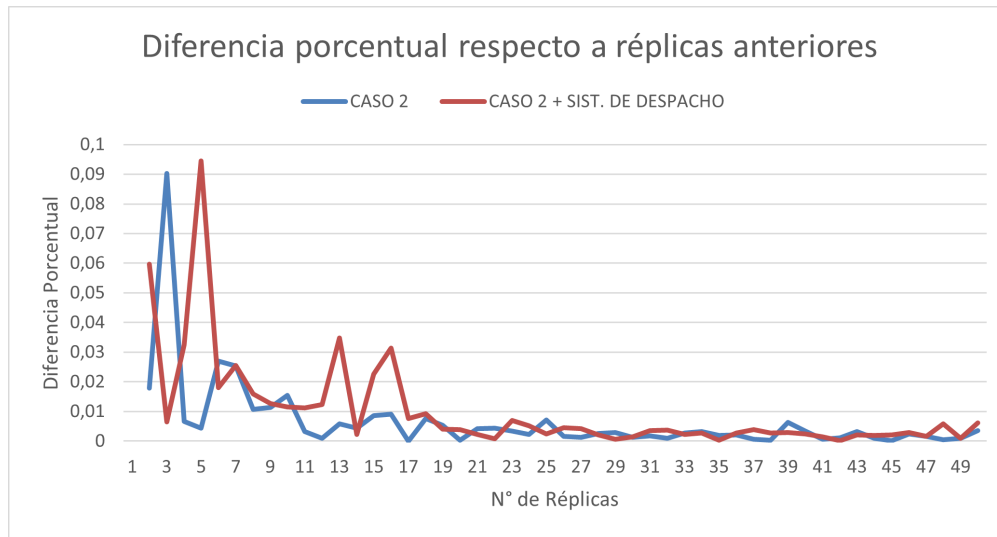


Figura 5.8: Diferencia porcentual de réplicas para el caso de estudio 2 y el caso de estudio 2 más el sistema de despacho.

### 5.3.2. Calibración de constantes $\alpha$ , $\beta$ y $\gamma$ de la función objetivo

Una vez se tiene la cantidad de réplicas que se deben hacer en cada simulación, se procede a realizar el proceso de calibración de las constantes pertenecientes a la función objetivo del caso de estudio, es decir, la ecuación (3.10).

En la Tabla 5.11, se aprecian los resultados que se obtienen al igualar a 0 dos de las tres constantes de la función objetivo de la ecuación (3.10). Esto con el fin de comprobar que cada término de la ecuación mencionada funcione correctamente.

$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	Producción [ton]	Factor operacional [%]	Promedio de extracción [%]	Desviación estándar [%]
5	0	0	15.913	98,2	92,9	14,7
0	4	0	15.681	99,0	90,2	14,6
0	0	2	16.178	98,6	94,4	8,0

Tabla 5.11: Análisis de sensibilidad al igualar a 0 dos de las constantes  $\alpha$ ,  $\beta$  o  $\gamma$ .

En la Tabla 5.12, se muestra proceso de calibración del valor de las constantes  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ . Todas las constantes fueron escogidas de forma aleatoria entre los intervalos de 3,5 y 6,5 en el caso de  $\alpha$ , 1,5 y 4,5 en el caso de  $\beta$  y 0,5 y 3,5 en el caso de  $\gamma$ . Se busca la combinación de constantes que maximicen la producción, el factor operacional y disminuyan la desviación estándar del porcentaje de extracción. En base a lo anterior y lo mostrado en la Tabla 5.12, se escogen los valores de 5,16 para  $\alpha$ , 4,14 para  $\beta$  y 1,99 para  $\gamma$ .

$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	Producción [ton]	Factor operacional [%]	Promedio de extracción [%]	Desviación estándar [%]
4,75	3,85	0,75	15.773	98,9	90,1	12,9
4,69	2,03	3,29	16.067	98,7	92,8	10,6
6,17	2,73	0,53	16.445	98,7	95,5	10,6
3,86	3,48	3,48	16.754	99,0	97,9	7,2
4,31	3,79	1,79	15.948	99,1	92,0	10,01
5,70	1,77	2,99	16.309	98,9	94,3	9,0
5,16	4,14	1,99	16.857	99,1	98,7	7,9
4,58	1,95	2,42	15.846	98,9	90,3	11,8
3,90	3,78	1,12	16.302	99,1	95,4	7,7
4,27	3,33	1,20	15.861	99,0	91,4	9,2
5,35	4,01	2,98	16.155	99,1	93,3	8,9
5,25	4,30	2,91	16.070	99,1	92,2	11,7

Tabla 5.12: Calibración constante  $\beta$  caso de estudio 2.

### 5.3.3. Comparación entre el caso base y el caso base con el sistema de despacho

En esta sección se mostrarán los resultados finales obtenidos tanto para el caso 2 como para el caso 2 con el sistema de despacho luego de haber realizado la calibración de las constantes. Como se mencionó en secciones anteriores, los principales indicadores a evaluar son la producción, el factor operacional, el porcentaje promedio de extracción de cada punto y su desviación estándar.

Producción [ton]	Factor operacional [%]	Promedio de extracción [%]	Desviación estándar [%]
15.739	98,3	91,7	14,6

Tabla 5.13: Resultados obtenidos en el caso 2 sin el sistema de despacho.

En la Figura 5.6, se muestra una comparativa entre el plan de producción por calle, el material extraído por calle en el caso 2 y el material extraído por calle en el caso 2 con el sistema de despacho. Se puede observar que existe un pequeño aumento de la cantidad de material extraído por calle en el caso con el sistema de despacho. Si bien, en ninguno de los dos casos se cumple el plan total diario, en el caso con el sistema de despacho la producción se queda muy cerca.

En la Tabla 5.14, se muestran los indicadores anteriormente mencionados obtenidos para el caso 2 y el caso 2 con el sistema de despacho. En la tabla se puede ver que existe un incremento en la producción total de la mina en un 7,1 % con respecto al caso 2. También se aprecia un leve aumento en el factor operacional promedio de los LHDs de un 0,78 %. Con respecto al promedio de extracción por cada punto, se puede ver un aumento de un 6,93 %, además de que la desviación estándar de este valor disminuyó en un 7,48 %.

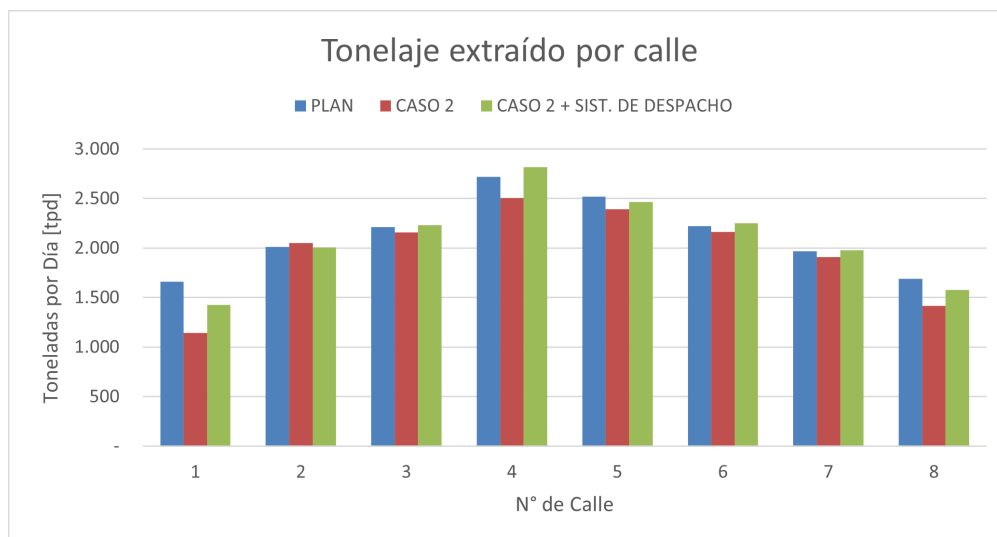


Figura 5.9: Comparación entre el plan de producción por calle, el tonelaje extraído por calle en el caso 2 y el tonelaje extraído en el caso 2 más el sistema de despacho.

Indicador	Caso 2	Caso 2 + Sist. Despacho	Diferencia [%]
Producción total [ton]	15.739	16.857	7,10
Factor operacional [%]	98,3	99,1	0,78
Promedio de extracción [%]	91,7	98,7	6,93
Desviación estándar [%]	14,6	7,9	-6,70

Tabla 5.14: Indicadores para el caso 2 y el caso 2 con el sistema de despacho.

# Capítulo 6

## Análisis de Resultados

En este capítulo se realizará un análisis de cada uno de los resultados presentados en el capítulo anterior y de esta forma evaluar las mejoras y pérdidas que podría producir el sistema de despacho en cada uno de los casos.

### 6.1. Caso de estudio 0

En las Tablas 5.1 y 5.2, queda en evidencia que ambos modelos presentados, ILP y heurística, tienen los mismos resultados tanto para el caso con 4 puntos de extracción como para el caso con 6 puntos de extracción. Sin embargo, al considerar el tiempo de ejecución que le toma a cada modelo entregar ese resultado, existe una gran diferencia.

En el primer caso con 4 puntos de extracción el modelo ILP se demora 315 segundos, mientras que la heurística tan solo 0.01 segundos, lo que equivale a que el modelo ILP se demora 31500 veces más que la heurística. Si se evalúa el caso con 6 puntos, la diferencia es aún más notable, ya que, el modelo ILP se demora 1699 segundos mientras que la heurística tan solo 0.02 segundos, lo que equivale a que el modelo ILP se demora 84950 veces más que la heurística. También se puede ver que el tiempo que demora el modelo ILP aumenta de forma exponencial al agregar puntos de extracción. De esta forma queda en evidencia que la heurística entrega los mismos resultados que el modelo ILP pero en una cantidad de tiempo considerablemente menor.

### 6.2. Caso de estudio 1

A continuación se presenta un análisis para los resultados obtenidos en el caso de estudio 1, tanto para el caso base, como para el caso con confinamiento moderado. Además se realizará un análisis general para el caso de estudio 1 en general. Como se mencionó en secciones anteriores, en este caso de estudio, no existen interferencias entre los distintos LHDs en el proceso de extracción del material, como el modelo de optimización propuesto en la ecuación (3.10) no considera otras interferencias, no se analizarán los indicadores encargados de medir este valor.



### 6.2.1. Caso base

En la Tabla 5.3, se aprecian los resultados obtenidos en el caso base con el sistema de despacho, cuando se elimina uno de los términos de la ecuación (4.1). Al comparar estos resultados con los obtenidos en el caso base sin el sistema de despacho de la Tabla 5.5, queda en evidencia que cuando solo se tiene el término asociado al ranking ( $\gamma = 0$ ), es decir, se escoge el punto de extracción más cercano, se obtiene una mayor cantidad de material extraído, cerca de un 4,8 %, y la uniformidad de la extracción no presenta ninguna variación en el plan del día 1. Los resultados asociados al día 2 no son muy representativos, ya que no se alcanza el 10 % del plan de extracción promedio por punto.

En el caso contrario, cuando solo se trabaja con el término asociado a la extracción uniforme del material ( $\alpha = 0$ ), se aprecia una disminución en la cantidad de material extraído del 3,1 %, sin embargo, la desviación del promedio de extracción por punto en el plan del día 1 disminuye un 2,2 %. Con estos resultados, se comprueba el correcto funcionamiento del modelo de optimización, ya que, se comporta de la forma esperado, maximizando la producción en el primer caso y mejorando la uniformidad de la extracción en el segundo caso.

En la Tabla 5.6, se puede ver que la producción total tuvo un aumento del 2,98 %, lo cual indica que el sistema de despacho está mejorando el proceso de extracción de material. El factor operacional no tuvo una gran variación, ya que, como se mencionó anteriormente en este caso no existen interferencias entre los LHDs en el proceso de extracción de material. El promedio de extracción por punto en base al plan del día 1 tuvo un aumento del 1,19 % y en el día 2 un aumento del 2,71 % y esto se puede ver reflejado en la cantidad total de material extraído.

Con respecto a la desviación estándar del promedio de extracción por punto, se puede ver que en el día 1 se tiene una disminución del 1,47 % y en el día 2 un aumento del 4,11 %, sin embargo, solo se deben considerar los resultados relacionados al plan del día 1, ya que en el caso del plan del día 2, solo se tiene un 5,6 % del promedio de extracción por punto. Estos resultados también comprueban el correcto funcionamiento del modelo con respecto a la uniformidad de la extracción.

Otro resultado importante a destacar es que en la Tabla 5.3, cuando  $\gamma$  es igual a 0, se obtiene un 1,78 % más de producción total que en la Tabla 5.6 en el caso base con el sistema de despacho. Por lo tanto, si solo se optimizara la cantidad de material extraído y no se preocupara de realizar una extracción uniforme dentro del plan diario, como se realiza en una operación manual, se obtendría una producción total mayor.

Finalmente, se puede mencionar que el sistema de despacho funciona correctamente, ya que es capaz de aumentar la producción total, mejorando la uniformidad con la que se extrae el material desde los distintos puntos de extracción.

### 6.2.2. Caso confinamiento moderado

En la Tabla 5.7, se aprecian los resultados obtenidos en el caso con confinamiento moderado con el sistema de despacho, cuando se elimina uno de los términos de la ecuación (4.1). Al comparar estos resultados con los obtenidos en el caso base sin el sistema de despacho de la

Tabla 5.9, queda en evidencia que cuando solo se tiene el término asociado al ranking ( $\gamma = 0$ ), se obtiene una mayor cantidad de material extraído, cerca de un 2,45 %, y la desviación del promedio de extracción por punto aumenta un 2 % en el plan del día 1 y el día 2. En este caso si se consideran los resultados del plan del día 2, ya que se supera el 30 % de extracción promedio por punto de extracción, lo cual ya es significativo.

En el caso contrario, cuando solo se trabaja con el término asociado a la extracción uniforme del material ( $\alpha = 0$ ), se aprecia una disminución en la cantidad de material extraído del 2,84 %, sin embargo, la desviación del promedio de extracción por punto en el plan del día 1 disminuye un 2 % y la del plan del día 2 en un 5 %. Con estos resultados, se comprueba el correcto funcionamiento del modelo de optimización en el caso con confinamiento moderado, debido a las mismas razones mostradas anteriormente, maximiza la producción y mejora la uniformidad de la extracción.

En la Tabla 5.10, que muestra una comparación entre el caso con confinamiento moderado con y sin sistema de despacho, se puede ver que la producción total tuvo un aumento del 1,66 %, lo cual indica que el sistema de despacho está mejorando el proceso de extracción de material. El factor operacional no tuvo una gran variación, ya que, como se mencionó anteriormente en este caso no existen interferencias entre los LHDs en el proceso de extracción de material. El promedio de extracción por punto en base al plan del día 1 tuvo un aumento del 1,88 % y en el día 2 un aumento del 0,8 % y esto se puede ver reflejado en la cantidad total de material extraído.

Con respecto a la desviación estándar del promedio de material extraído por punto, se puede ver que en el plan del día 1 se tiene una disminución del 2,57 % y en el plan del día 2 un aumento del 0,67 %, en global sería una disminución del 1,9 %. Sin embargo, si bien los resultados obtenidos con respecto al plan del día 2 tienen validez porque se alcanza un porcentaje promedio de extracción del 30 %, los del plan del día 1 son más relevantes, ya que, en promedio se extrae el 95 % del material de ese día, por lo tanto la disminución debería ser superior a los 2 %. Estos resultados también comprueban el correcto funcionamiento del modelo con respecto a la uniformidad de la extracción.

Otro resultado importante a destacar es que en la Tabla 5.7, cuando  $\gamma$  es igual a 0, se obtiene un 0,78 % más de producción total que en la Tabla 5.10 en el caso con confinamiento moderado con el sistema de despacho. Por lo tanto, al igual que en el caso base, si solo se optimizara la cantidad de material extraído, se obtendría una producción total mayor.

Finalmente, se puede mencionar que el sistema de despacho funciona correctamente, tanto para el caso base como para el caso con confinamiento moderado, ya que es capaz de aumentar la producción total, mejorando la uniformidad con la que se extrae el material desde los distintos puntos de extracción. También se debe mencionar que en el caso con confinamiento moderado, las mejoras en la producción son peores, ya que, en el caso base se logró una mejora del 2,98 %, mientras que en el caso con confinamiento moderado solo de 1,66 %. Esto se debe principalmente a que cuando se acaba el plan de extracción del día 1, se sigue con el plan de extracción del día 2, esto hace que no se pueda realizar una optimización global de la calle, si no que se realizan dos optimizaciones, un para el plan del día 1 y otra para el plan del día 2.

Con respecto a la calibración de las constantes  $\alpha$  y  $\gamma$  presentes en la función objetivo de la ecuación (4.1), en ambos casos se presentan los mejores resultados para la misma combinación de constantes, además al ver las Tablas 5.4 y 5.8 se puede ver la tónica de que cuando  $\alpha$  es superior a  $\gamma$ , se obtiene una producción total mayor. Sin embargo, estos resultados dependen exclusivamente del layout de la mina, ya que, en un layout más grande la importancia asociada a cada uno de los puntos de extracción podría ser demasiado grande, lo que provocaría que con los mismos valores para las constantes no se obtengan los mismo resultados.

### 6.3. Caso de estudio 2

En la Tabla 5.11, se aprecian los resultados obtenidos en el caso con confinamiento moderado con el sistema de despacho, cuando se elimina uno de los términos de la ecuación (3.10). Al comparar estos resultados con los obtenidos en el caso base sin el sistema de despacho de la Tabla 5.13, se puede ver que cuando solo se tiene el término asociado al ranking ( $\beta = 0$  y  $\gamma = 0$ ), se obtiene una mayor cantidad de material extraído, cerca de un 1,11 %, mientras que el factor operacional y la desviación del promedio de extracción por punto aumenta se mantienen muy similares. Se puede ver que el aumento de producción es leve, solo un 1,11 %, esto se debe a que al ir al punto más cercano siempre, el LHD no se preocupa de las interrupciones que se provocarán entre los distintos LHDs.

En el caso cuando solo se tiene el término asociado a las interrupciones ( $\alpha = 0$  y  $\gamma = 0$ ), se puede ver una disminución en la producción cercana al 0,36 %. Al comparar el factor operacional, se tiene una mejora del 0,7 % lo cual parece un valor no muy significativo pero muestra una disminución en las interferencias. Es importante mencionar que en este caso, solo se presentan interferencias de este tipo y que en promedio un LHD cuenta con 17 horas efectivas de trabajo y solo 0,3 horas de interferencias, lo cual hace que el aumento del 0,7 % en el factor operacional indique una disminución de 0,1 horas de interferencias.

En el último caso, cuando solo se tiene el término asociado a la extracción uniforme ( $\alpha = 0$  y  $\beta = 0$ ), se puede ver que la producción aumenta un 2,79 %, el factor operacional un 0,3 %, pero lo más importante es que se disminuye un 6,6 % de la desviación del promedio de extracción por punto. Por lo tanto, con estos 3 análisis queda en evidencia que el modelo funciona de la forma correcta, ya que, el término relacionado al ranking aumentó la producción, mientras que el término relacionado a las interferencias aumento el factor operacional y finalmente, el término encargado de la extracción uniforme disminuyo la desviación del promedio de extracción por punto.

En la Tabla 5.14, se puede ver la comparación entre el caso 2 y el caso 2 con el sistema de despacho, en donde se aprecia que la producción total tuvo un gran aumento del 7,10 %, este resultados es el más importante y demuestra que el sistema de despacho funciona de forma correcta, mejorando la producción total. Con respecto al factor operacional promedio de los LHDs, éste aumento en un 0,78 %, lo cual a su vez significa una disminución de las interferencias promedio por LHD en 7,54 minutos, generando una disminución total de las interferencias de 45,29 minutos al día.

También se aprecia un gran aumento en el promedio de extracción por punto del 6,93 %, lo cual se ve reflejado en la producción total. Finalmente, se observa una disminución del

6,70% en la desviación estándar del promedio de extracción por punto, lo cual es una gran mejora a la uniformidad de la extracción del material.

En base a los resultados obtenidos, se puede mencionar que queda demostrado que el sistema de despacho funciona correctamente en cada una de sus características, ya que, es capaz de aumentar la producción total de la mina, además de disminuir las interferencias que se producen entre los distintos LHDs. También se puede decir que se mejora la uniformidad de la extracción de los distintos puntos de extracción, con lo cual se cumplen los dos objetivos impuestos al principio de la memoria. Sin embargo, también se debe tener en cuenta que este es un caso realista pero sin validación, por lo cual, es necesario realizar más estudios en ambientes más reales para obtener resultados realmente confiables.

Con respecto a la calibración de las constantes, este caso no se puede comparar con el anterior, ya que en este existen 3 constantes variando todo el tiempo. En este caso, los mejores resultados se observan cuando  $\alpha$  y  $\beta$  tienen valores similares. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, estos valores dependen exclusivamente del layout de la mina.

# Capítulo 7

## Conclusiones y Recomendaciones

### 7.1. Conclusiones

En relación al despacho de equipos en sus diferentes procesos, históricamente no se tiene gran conocimiento de un sistema capaz de optimizar sus acciones, menos aún manejar las interacciones que estos tienen entre ellos. Por esta razón se realizó esta memoria, en la cual se propone un sistema de despacho capaz de optimizar el proceso de extracción, traslado y depósito del material dentro de la mina.

El sistema de despacho propuesto presenta distintos resultados dependiendo el caso de estudio y, por ende, el tipo de mina y layout en el cual sea probado. En el caso de estudio 1 se puede ver que la producción total aumenta un 2,98 % en su caso base, mientras que un 1,66 % en su caso con confinamiento moderado, los cuales son resultados significativos. También es importante mencionar, que se mejora la uniformidad de extracción en los distintos puntos de extracción, ya que, se logra una disminución de la desviación estándar del promedio de extracción por punto cercana al 1,47 % en el caso base y del 2,57 % en el caso con confinamiento moderado. Por lo tanto, se puede concluir que el sistema de despacho es capaz de aumentar la producción total de la mina además de extraer el material de forma uniforme. Es importante recordar que la simulación de este caso de estudio está validado con datos históricos de minas similares, con lo cual los distintos resultados obtenidos mediante las simulaciones son válidos.

Con respecto al caso de estudio 2, éste si presenta mejoras notorias con respecto a la cantidad de material extraído, el cual presenta un aumento del 7,10 % con respecto al caso base. Además se logra disminuir en 7,5 minutos por cada LHD las interferencias que se producen entre los distintos LHDs. Con respecto a la uniformidad de extracción, se presenta una disminución del 6,70 % en la desviación estándar del promedio de extracción por punto, lo cual significa una gran mejora en la uniformidad de la extracción del material.

También es importante mencionar que en este caso si se logró demostrar que el modelo es capaz de disminuir las interferencias producidas entre los distintos LHDs que se encuentran extrayendo material, por lo que, en un layout más grande y realista pero del mismo tipo, en donde se pueden llegar a producir muchas más interferencias, este modelo podría mejorar

significativamente la operación de la mina. Sin embargo, hay que recordar que este es un caso ficticio, creado a partir del caso de estudio 1, que no tiene forma de ser validado, ya que, no existen datos históricos que respalden tanto el plan entregado, la flota de LHDs correcta a utilizar, ni la cantidad total de material extraído.

Con respecto a la calibración de las constantes  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  presentes en las funciones objetivo, se puede mencionar que estas no son generales para todos los layouts, si no que deben ser calibradas nuevamente para otro layout distinto.

## 7.2. Recomendaciones para trabajo futuro

Se recomienda validar un caso del mismo tipo que el caso de estudio 2, teniendo a su disposición un layout realista de una mina, además de datos históricos sobre su funcionamiento que sirvan de base para calibrar el caso base con respecto al plan utilizado, la cantidad de material extraído históricamente, además de obtener modelos realistas y dirigidos específicamente a esa mina, de esta forma se podrían validar los resultados obtenidos a partir de este caso de estudio, el cual es el más interesante debido a como fue hecho el sistema de despacho.

Sería interesante realizar simulaciones con varios layout distintos y ver como se comportan ante distintos valores de las constantes  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ , de esta forma se podría comprobar si estas tienen un valor general para todos los layout del mismo tipo o siempre se deben realizar el proceso de calibración.

# Bibliografía

- [1] C. Minero, “Cifras actualizadas de la minería,” Santiago, Chile, 2020.
- [2] P. Darling, M. Society for Mining, y Exploration (U.S.), *SME Mining Engineering Handbook*. SME, tercera ed., 2011.
- [3] Superintendencia General Planificación Minco, “Manual de tiraje mina El Teniente,” inf. téc., Codelco, Santiago, Chile, 2006.
- [4] N. S. Chauhan, “Hyperparameter optimization for machine learning models.” <https://www.kdnuggets.com/2020/05/hyperparameter-optimization-machine-learning-models.html>.
- [5] O. Vasquez, J. Sepúlveda, y F. Córdova, “Modeling and optimization of vehicle operations in underground copper mining,” *Revista Escuela de Minas*, pp. 365–371, September 2011.
- [6] A. Pavez, “Automatización en minería: El futuro es ahora,” *Revista Construcción Minera*, no. 5, pp. 10–17, 2014.
- [7] Vicepresidencia Corporativa de Proyectos, “Estudio de prefactibilidad proyecto mina Chuquicamata subterránea,” inf. téc., Codelco, Santiago, Chile, 2009.
- [8] Universidad de Chile, “SNAS: Software de navegación autónoma subterránea,” 2016. DIBAM 291583.
- [9] Superintendencia Mina Sur y Gerencia de minas División El Teniente, “Post evaluación proceso de extracción con LHD semiautomático sectores Pipa Norte y Diablo Regimiento,” inf. téc., Codelco, Santiago, Chile, 2007.
- [10] J. Vásquez, “Optimización de planes mineros en minas explotadas por panel caving incluyendo actividades de preparación minera,” Memoria, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2018.
- [11] K. B. B. David Mautner Himmelblau, *Análisis y simulación de procesos*. Reverté S. A., 2004.
- [12] A. Schrijver, *Theory of Linear and Integer Programming*. John Wiley and Sons, 1998.

- [13] J. Banks, “Discrete event simulation,” en *Winter Simulation Conference*, (Marietta, Georgia), 1999.
- [14] F. Manríquez, H. González, y N. Morales, “Short-term open-pit production scheduling with hierarchical objectives,” en *39 APCOM 2019*, (Breslavia, Polonia), 2019.
- [15] F. Valenzuela, “Estimación de la producción en sector Diablo Regimiento, mina El Teniente, mediante simulación a eventos discretos,” Memoria, Facultad de ciencias físicas y matemáticas, Departamento de ingeniería de minas, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2017.
- [16] Inc. Gurobi Optimization, *Gurobi optimizer reference manual*, 2020.
- [17] Laboratorio de planificación minera Delphos del AMTC. <https://delphoslab.cl/index.php/software-es/39-delphos-simulator-dsim>.
- [18] Vicepresidencia de proyectos and Gerencia proyecto nuevo Nivel Mina, “Estudio de operaciones y capacidad productiva nivel de producción PNNM,” inf. téc., Codelco, Santiago, Chile, 2016.
- [19] G. de Minas y S. I. Mina, “Línea base actividades de operación nivel de producción mina Esmeralda bloque 1,” inf. téc., Codelco, Santiago, Chile, 2014.
- [20] N. Rojas, “Análisis sistema de manejo de materiales sector pacífico superior,” Memoria, Facultad de ciencias físicas y matemáticas, Departamento de ingeniería de minas, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2020.
- [21] J. Espinoza, “Simulación de la operación de equipos lhd semiautónomos al incorporar un sistema de confinamiento dinámico en el nivel de producción de una mina panel caving.” Memoria para optar al título de Ing. Civil de Minas, Universidad Santa María, Santiago, Chile, 2021.