



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

SIMULACIÓN Y COMPARACIÓN DE DESEMPEÑO DE  
ALGORITMOS DE DESPACHO EN MINERÍA A CIELO ABIERTO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE  
MINAS

DANIEL ALEJANDRO PEDRAZA CASTILLO

PROFESOR GUÍA:

NELSON MORALES VARELA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

CRISTIAN SALAS ARENAS

FREDDY MILLA NANJARÍ

SANTIAGO DE CHILE

2019

## **SIMULACIÓN Y COMPARACIÓN DE DESEMPEÑO DE ALGORITMOS DE DESPACHO EN MINERÍA A CIELO ABIERTO**

La minería es un proceso productivo que busca obtener beneficio económico de mineral in situ. Para Chile es una importante actividad económica que aporta un 11% al PIB del país.

El método de explotación a cielo abierto busca extraer el mineral de manera descendente, este método se enfrenta al crecimiento de las distancias de acarreo mientras la operación avanza, haciendo que los costos de transporte puedan llegar a ser el 60% de los costos operativos totales.

La simulación es un instrumento que permite la evaluación de distintos escenarios a bajo costo, en este trabajo se simulan las operaciones de carguío y transporte de una mina sintética a cielo abierto.

Por medio de la simulación se prueban dos algoritmos de despacho (despacho priorizado y despacho optimizado) en escenarios con distintos layout y Budget, para evaluar su desempeño en cuanto a cumplimiento del plan minero; y así determinar el óptimo para cada caso.

El despacho priorizado busca disminuir el retraso del plan y se destaca por su fácil implementación y sus resultados casi instantáneos, por otro lado, el despacho optimizado busca maximizar el movimiento mineral, pero puede requerir un gran tiempo para generar su solución.

Del estudio se obtiene una preferencia por parte de ambos despachos hacia las rutas más cortas y rutas con mayor requerimiento de movimiento de mineral. La preferencia del despacho optimizado por estas rutas es mayor, enviando más camiones de los necesarios para lograr su Budget y dejando con déficit de camiones a las otras rutas.

Mientras que el despacho optimizado logra siempre una mayor producción, el despacho priorizado logra un mejor cumplimiento de los planes mineros en los escenarios con déficit de camiones.

La eficiencia de las políticas de despacho es uno de los aspectos que determina el costo de transporte, en este trabajo se pudo observar diferencias en las ganancias desde 100,000 a 200,000 USD al día dependiendo del sistema de despacho utilizado.

Finalmente, se concluye que la eficacia del sistema de despacho depende de las circunstancias particulares de la operación y su enfoque debe ser tal que alinee de la mejor forma con el objetivo estratégico de la empresa.

Los sistemas de despacho analizados tienen dos objetivos distintos y dos métodos de obtención de la solución distinta, esto los hace completamente diferentes, pero si se busca combinarlos, la forma es utilizando el método de resolución de despacho optimizado, y modificando su función objetivo para que incorpore también el objetivo del despacho priorizado.

# TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1.	Contexto del estudio .....	1
1.2.	Objetivos.....	2
1.2.1.	Objetivo general .....	2
1.2.2.	Objetivos específicos.....	2
1.3.	Alcances.....	2
1.4.	Estructura del trabajo.....	3
2.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1.	Minería a cielo abierto .....	4
2.2.	Norma ASARCO.....	5
2.2.1.	Definición de tiempos .....	5
2.3.	Simulación de eventos discretos.....	7
2.4.	DSim.....	7
2.4.1.	Dsim Open Pit.....	8
2.5.	Sistemas de despacho .....	9
2.5.1.	Despacho priorizado.....	11
2.5.2.	Despacho optimizado .....	12
2.6.	Cálculo de beneficio económico.....	15
3.	METODOLOGÍA .....	16
4.	DESCRIPCIÓN CASOS DE ESTUDIO .....	17
4.1.	Descripción caso C1 .....	18
4.2.	Descripción caso C2 .....	19
4.3.	Descripción caso C3 .....	21
4.4.	Descripción caso C4.....	22
4.5.	Resumen casos de estudio .....	23
5.	RESULTADOS.....	25
5.1.	Resultados caso C1 .....	25
5.2.	Resultados caso C2.....	28
5.3.	Resultados caso C3.....	31
5.4.	Resultados caso C4.....	32
6.	CONCLUSIONES .....	34
7.	BIBLIOGRAFÍA .....	36

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Operaciones unitarias en minería a cielo abierto (Numaan, 2016).....	4
Figura 2-2: Esquema de ciclo de camión (Chaowasakoo, 2017).....	5
Figura 2-3: Interfaz gráfica software DSim OP.....	9
Figura 2-4: Enfoques de resolución de problema de despacho (Chaowasakoo, 2017) ....	11
Figura 4-1: Vista en planta de mina sintética, layout 1 (LO1).....	18
Figura 4-2: Secuenciamiento de los layout del caso C2 visto en planta. ....	20
Figura 4-3: Ruta saturada por cola de camiones.....	21
Figura 4-4: Vista en planta del layout 6 (LO6).....	22
Figura 5-1: Producción total caso C1.....	25
Figura 5-2: Cumplimiento de plan minero por despacho priorizado en caso C1 .....	27
Figura 5-3: Cumplimiento de plan minero por despacho optimizado en caso C1 .....	27
Figura 5-4: Producción total caso C2.....	29
Figura 5-5: Cumplimiento de plan minero por despacho priorizado en caso C2 .....	30
Figura 5-6: Cumplimiento de plan minero por despacho optimizado en caso C2.....	31
Figura 5-7: Beneficio caso C1 con frente FC2 de ley 0.25% .....	32
Figura 5-8: Beneficio caso C2 con frente FC2 de ley 0.25% .....	33

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Distribución de tiempo de norma ASARCO.....	6
Tabla 2-2: Mejoras productivas al implementar DISPATCH (White & Olson, 1992) ....	10
Tabla 4-1: Parámetros de equipos de transporte.....	17
Tabla 4-2: Parámetros de equipos de carguío.....	17
Tabla 4-3: Demoras programadas.....	17
Tabla 4-4: Plan minero para cada frente de descarga.....	19
Tabla 4-5: Distancia de las rutas en los 5 layout de estudio. ....	20
Tabla 4-6: Parámetros económicos y metalúrgicos.....	23
Tabla 4-7: Resumen de escenarios del Caso C1 .....	23
Tabla 4-8: Resumen de escenarios del Caso C2 .....	23
Tabla 4-9: Resumen de escenarios del Caso C3 .....	24
Tabla 4-10: Resumen de escenarios del Caso C4 .....	24
Tabla 5-1: Producción por pala y total del caso C1 .....	25
Tabla 5-2: Factor de Utilización de equipos en caso C1 .....	26
Tabla 5-3: Producción por pala y total del caso C2.....	28
Tabla 5-4: Factor de Utilización de equipos en caso C2 .....	29
Tabla 5-5: Resultados caso C3.....	31

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Contexto del estudio

La minería es una actividad productiva que busca obtener beneficio económico por medio de la explotación de mineral in situ y de su transformación en materias primas para todo tipo de industrias.

Para Chile, la minería resulta ser importante ya que representa cerca de un 10% del PIB nacional, además, aporta con un considerable número de empleos de manera directa e indirecta, a trabajadores de la industria y a trabajadores que le prestan sus servicios.

La explotación de mineral por el método a cielo abierto busca extraer el mineral de manera descendente desde la superficie y consta con las operaciones de perforación, tronadura, carguío y transporte. Este método se enfrenta a la constante profundización del rajo y al alejamiento de los puntos de vaciado, que hace crecer las distancias de carguío, en consecuencia los costos de transporte aumentan, llegando a representar el 60% de los costos operativos totales (Alarie & Gamache, 2002).

El sistema más común utilizado para la labor de carguío y transporte utiliza palas y camiones, por la flexibilidad y adaptabilidad que dan al sistema.

Los sistemas de despacho computacionales buscan mejorar las operaciones de carguío y transporte. Su aplicación, da a la operación un acercamiento al uso y asignación óptima de los equipos involucrados.

La incertidumbre, propia de operaciones minera es causada por las interferencias entre los elementos que la conforman y la falla de los equipos. Esto dificulta el control del proceso productivo y presentan un reto para la planificación.

El mal control de la incertidumbre puede provocar retrasos inesperados, aumento en los costos operacionales e incumplimiento de metas productivas, es decir, puede comprometer el éxito de un proyecto al poner en riesgo estos tres KPI (Key Performance Indicator, indicadores clave de rendimiento en inglés) que mide todo proyecto.

La simulación es un instrumento que busca modelar la realidad, en particular su bajo costo de implementación (recursos de ordenador y horas hombre para su implementación) la hacen la herramienta idónea para probar estrategias en minería como distintos tipos de despacho, debido a que en esta industria una detención o una mala implementación resulta en millonarias pérdidas.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

Comparar algoritmos de despacho en minería a cielo abierto mediante la simulación de las operaciones de carguío y transporte, con el fin de determinar las ventajas y desventajas que presentan en función del layout de la operación y el Budget de cada frente.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Identificar los indicadores de desempeño del movimiento de mineral en una mina a cielo abierto, que permitan comparar los sistemas de despacho estudiados.
- Generar un sistema de carguío y transporte base, que, por medio de la variación de una condición, manteniendo las otras fijas, permita evaluar las ventajas y desventajas de cada sistema de despacho ante ciertos indicadores de desempeño.
- Diseñar una serie de layout que representen fases progresivas de una mina sintética a cielo abierto, que permita evaluar las preferencias hacia las frentes de los sistemas de despacho evaluados ante distintas distancias de transporte.
- Determinar el apego a los planes de producción que generan los sistemas de despacho, para frentes con distintos requerimientos de movimiento de mineral con una flota de transporte fija.
- Evaluar la ganancia de implementar las permutaciones en los sistemas de despacho en cuanto a utilización de flota de transporte y movimiento de mineral

## **1.3. Alcances**

Se estudian solo las operaciones de carguío y transporte, por lo tanto, los equipos considerados son las palas y los camiones.

No se consideran operaciones anteriores ni paralelas como la perforación y tronadura que afectan la continuidad y el tiempo disponible del carguío/transporte, tampoco las interrupciones en ruta de los equipos involucrados en ellas.

No forman parte del estudio las operaciones posteriores como la conminución y el procesamiento del mineral.

Los puntos de vaciado no presentan fallas, por lo que se asumen siempre disponibles al igual que las rutas.

La carga y uso de combustible no se estudian, así como las interacciones en las rutas con equipos auxiliares.

El estudio se enfoca en el corto plazo, simulando y analizando un día productivo.

## **1.4. Estructura del trabajo**

El presente estudio se organiza en 6 capítulos, cuyo contenido se procede a resumir.

El capítulo 1 presenta una introducción al tema de memoria para posteriormente definir los objetivos y alcances del estudio.

El capítulo 2 muestra la revisión bibliográfica en donde se muestran los antecedentes para llevar a cabo el estudio, haciendo principal énfasis en los métodos de despacho de camiones en minería a cielo abierto.

El capítulo 3 explica la metodología aplicada en el estudio.

El capítulo 4 muestra y describe los casos de estudio de este trabajo.

El capítulo 5 presenta y analizar los resultados obtenidos por las simulaciones.

El capítulo 6 muestra y recopila las conclusiones y análisis obtenidos por este trabajo.

El capítulo 7 muestra las referencias bibliográficas utilizadas en el estudio.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Minería a cielo abierto

La minería a cielo abierto es un método de explotación que busca extraer el mineral de manera descendente desde la superficie y tal como lo muestra la Figura 2-1, consta con las operaciones de perforación (1), tronadura (2), carguío (3) y transporte (4); dependiendo del mineral y la concentración de la sustancia de interés, este puede ser destinado a chancado (5), stock o botadero.

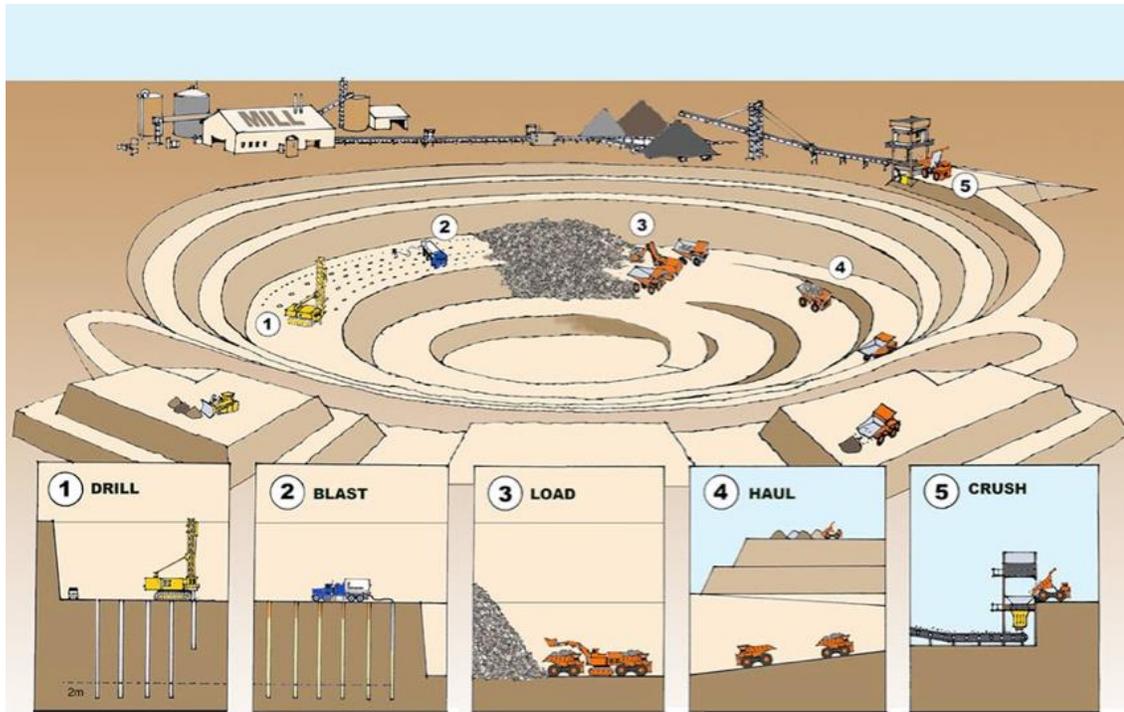


Figura 2-1: Operaciones unitarias en minería a cielo abierto (Numaan, 2016)

El uso de camiones es el método de transporte más utilizado en minería a cielo abierto, estando presente en el 95% de las minas al ser por lejos el más confiable y flexible (Soofastaei, 2015).

Este método de explotación comienza a enfrentar desafíos a medida que pasa el tiempo, el agotamiento de los minerales superficiales, provoca que los rajos se profundicen, lo que trae consigo mayores distancias y tiempos de transporte, esto provoca un aumento también en la flota de transporte si se quiere mantener o aumentar la tasa de producción y, por ende, mayores costos capitales y productivos.

En la Figura 2-2 se muestra el ciclo típico de transporte de un camión, en particular, esta operación puede llegar a representar hasta un 60% del costo operativo total (Alarie & Gamache, 2002), lo que hace que se enfoquen los esfuerzos en su optimización.

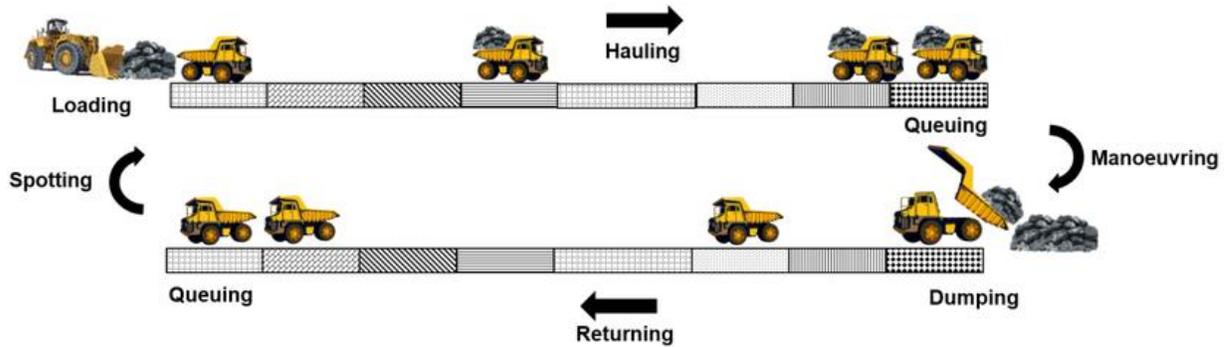


Figura 2-2: Esquema de ciclo de camión (Chaowasakoo, 2017)

## 2.2. Norma ASARCO

La norma ASARCO (American Smelting & Refining Co.) es el marco de referencia utilizado para la definición de conceptos y distribución de los tiempos que un equipo, máquina o instalación incurre durante un periodo de tiempo (CODELCO, 2005).

### 2.2.1. Definición de tiempos

- **Nominal:** Espacio de tiempo en que se produce la medición, correspondiente al espacio muestral. Depende del tiempo de continuidad de la producción en la faena.
- **Fuera de servicio:** Espacio de tiempo en que el equipo no se encuentra disponible, tanto sea por una mantención programada o falla en que haya incurrido.
- **Disponible:** Espacio de tiempo en que el equipo se encuentra capacitado de realizar tareas.
- **Reserva:** Espacio de tiempo en que el equipo se encuentra disponible para realizar alguna tarea, pero que por alguna condición específica no está siendo utilizado.
- **Operativo:** Espacio de tiempo en que el equipo se encuentra apto para realizar tareas y cumple con actividades asociadas a la operación.
- **Demoras programadas:** Espacio de tiempo en que no se realizan las tareas para las que el equipo fue diseñado, pero donde se deben cumplir ciertas actividades normadas por la ley, como lo son los cambios de turno o tiempos de colación.
- **Demoras no programadas:** Espacio de tiempo en que no se realizan las tareas para las que el equipo fue diseñado, pero que ocurren debido a condiciones o circunstancias propias de la operación, o ineficiencias de ésta.
- **Pérdidas operacionales:** Espacio de tiempo en que el equipo no realiza las tareas para las que fue diseñado, debido principalmente a tiempos de espera del equipo.
- **Efectivo:** Espacio de tiempo en que el equipo realiza las tareas acordes a su funcionalidad.

Tabla 2-1: Distribución de tiempo de norma ASARCO

Tiempo Nominal			
Tiempo Disponible			Fuera de Servicio
			Programado
Tiempo Operativo			Reservas
Tiempo Efectivo	Pérdidas Operacionales	Demoras	
		Programado	No Programado

Existen ciertos indicadores que derivan de la norma ASARCO, los que corresponden a:

- **Disponibilidad:** Es el porcentaje de horas nominales en que la flota, equipo, maquila o instalación, estuvo en condiciones mecánicas y/o eléctricas de ser operado. Sirve para establecer la capacidad de mantención en el marco de referencia funcional que deberá enfrentar la operación.

$$D = \frac{\text{Tiempo Disponible}}{\text{Tiempo Nominal}} * 100\% \quad (2-1)$$

- **Utilización (base nominal):** Es el porcentaje sobre las horas nominales en que la flota, equipo o instalación, realiza tareas efectivas. Corresponde a la división entre el número de horas efectivas y horas nominales. Sirve para establecer la eficacia de la operación mina respecto del uso eficiente que se le da a la flota, equipo, máquina o instalación.

$$UBN = \frac{\text{Tiempo efectivo}}{\text{Tiempo nominal}} * 100\% \quad (2-2)$$

- **Utilización Efectiva (base disponible):** Es el porcentaje sobre las horas disponibles en que la flota, equipo, máquina o instalación, realiza tareas efectivas. Sirve para proveer información sobre la eficacia operacional del proceso.

$$UBD = \frac{\text{Tiempo efectivo}}{\text{Tiempo disponible}} * 100\% \quad (2-3)$$

- **Utilización Operativa:** Es el porcentaje sobre las horas disponibles en que la flota, equipo, máquina o instalación, se encuentra operativo. Sirve para proveer información acerca de la capacidad de excedente que está disponible.

$$UO = \frac{\text{Tiempo Operativo}}{\text{Tiempo Disponible}} * 100\% \quad (2-4)$$

- **Factor de Utilización:** Es el porcentaje sobre las horas operativas en que el equipo realiza tareas efectivas.

$$FU = \frac{\text{Tiempo Efectivo}}{\text{Tiempo disponible}} * 100\% \quad (2-5)$$

### **2.3. Simulación de eventos discretos**

La simulación es una técnica numérica que utiliza relaciones matemáticas y lógicas para describir la estructura y comportamiento de sistemas de la vida real en un ordenador. (Banks, 1999)

En particular, la simulación de eventos discretos permite relacionar los eventos por medio de condiciones lógicas y distribuciones de probabilidad.

En minería, permite evaluar tanto la producción, como los desarrollos y la preparación, pero en este estudio se centrará en el primero de estos, evaluando el movimiento de mineral y las pérdidas operacionales como esperas e interferencias.

La simulación de eventos discretos presenta ventajas y desventajas las cuales se listarán a continuación:(García, García, & Cárdenas, 2006)

#### **Ventajas:**

- Bajo costo de implementación, en contraste con el que implica llevar a cabo los experimentos en la realidad.
- Genera conocimiento al mostrar el comportamiento del sistema bajo condiciones distintas a las que se dan en la realidad.
- Ayuda a tomar decisiones, ya muestra lo que puede pasar con ellas de antemano.
- Permite ver el impacto que tienen distintas variables de la operación en una variable global de interés.
- Facilidad de uso por el desarrollo de softwares en la actualidad.
- Su interfaz gráfica permite ver de una manera fácil lo que está ocurriendo.

#### **Desventajas:**

- Alto costo si el proceso simulado es relativamente sencillo.
- Requiere una gran inversión de trabajo en implementación y búsqueda de información
- Requiere un dominio estadístico y del software por parte de quien lo aplica.
- No está diseñada para optimizar, pese a que pueda utilizar optimizadores que mejoren los escenarios simulados.

Su funcionamiento depende de aspectos clave tales como:

- Número de réplicas.
- Duración de las réplicas.
- Relación entre variables.
- Distribución de las variables.
- Calidad de la información de entrada.

### **2.4. DSim**

Delphos Simulator (DSim) es una herramienta computacional que permite la simulación de sistemas de carguío y transporte de mineral.

DSim ha sido programado por el equipo de desarrollo del Laboratorio de Planificación Minera DELPHOS lo que hace de esta una herramienta muy completa y adaptable que está en constante desarrollo en base a las inquietudes de la industria tales como la incorporación de camiones autónomos a la operación, tecnologías de correas de alto ángulo (HAC), chancador en el rajo y correas (IPCC), sizer en rajo y correas (IPSC), cierre de caminos por nieve, etc.

Actualmente cuenta con una versión a cielo abierto (Dsim Open Pit) ya validada en la industria y que está siendo utilizada con fines académicos por docentes y alumnos. Posee también una versión subterránea que está en fase de desarrollo.

#### **2.4.1. Dsim Open Pit**

La versión a cielo abierto del software Dsim (Dsim OP) es una herramienta de fácil uso e intuitiva que ayuda al usuario a simular diversos sistemas de carguío y transporte que involucren palas, camiones, cargadores y correas.

Dsim para su uso requiere de rutas de transporte, las que pueden ser importadas o dibujadas en el mismo programa, en estas se definen los puntos terminales como frentes de carga, frentes de descarga u otros (como comedores, talleres y estacionamientos). También requiere de una flota de equipos tanto de carga como de descarga y finalmente requiere de un plan minero que es utilizado como guía para saber cuánto material debe ser movido, de donde, hacia donde y cuánto tiempo tiene para realizarlo.

Adicionalmente, se puede añadir en DSim una topografía, además de ser una ayuda visual esta función es de mucha importancia a la hora de dibujar las rutas en el software ya que con esta se estima la elevación e inclinación de las rutas.

En la Figura 2-3 se puede apreciar la interfaz gráfica de DSim OP la cual por medio de pestañas ordena de manera lógica el llenado de los parámetros necesarios para su funcionamiento.

Entre sus ventajas se encuentra su adaptabilidad y constante desarrollo. Al estar conformado por librerías que agrupan sus funcionalidades de manera genérica, permite la personalización, modificación, desarrollo e integración funciones y reportes. Está orientado a satisfacer las necesidades de la industria minera, su desarrollo asistido por profesionales de la industria ha enfocado sus funcionalidades en problemas reales, por lo que es un software robusto capaz de simular condiciones por más complejas que sean.

Dsim permite seleccionar el número de réplicas para hacer más robusto el análisis de resultados, otorgando la posibilidad de generar intervalos de confianza para estos.

En el reporte queda registrado el detalle de cada evento de movimiento de mineral hacia una frente en particular y, por consiguiente, el movimiento total de material. También se registra; el consumo de combustible de cada camión; la asignación inicial de la flota a las frentes y sus cambios de rutas; así como el tiempo empleado en cada viaje, colación, cambio de turno y reserva.

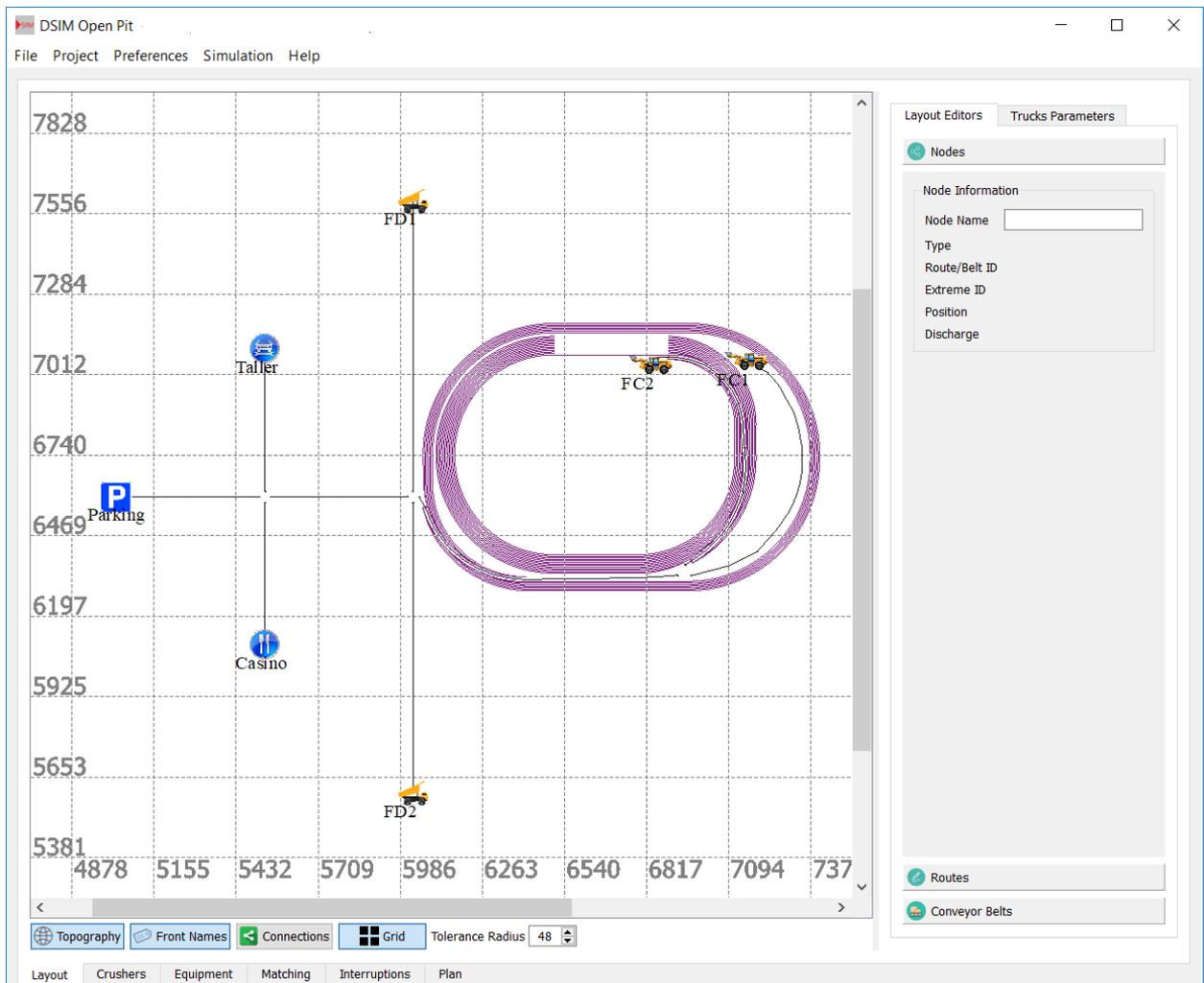


Figura 2-3: Interfaz gráfica software DSIM OP

## 2.5. Sistemas de despacho

Los sistemas de despacho son herramientas computacionales que ordenan a los camiones donde ir a buscar mineral y donde ir a depositarlo, esto por las ganancias en productividad que trae consigo su implementación.

La Tabla 2-2 muestra el aumento en productividad visto con la implementación del software de despacho DISPATCH, siendo esta desde un 7 a un 23%.

El despacho de camiones en un comienzo era hecho por un trabajador en la mina y usualmente se hacía en base a su experiencia, con el paso de los años, los primeros computadores se utilizaron para asistir al personal encargado del despacho y luego, la llegada de computadores de gran capacidad de procesamiento llevó a hacer de la actividad de despacho una completamente realizada por maquinas donde el usuario solo juega el papel de asistir del proceso.

Tabla 2-2: Mejoras productivas al implementar DISPATCH (White & Olson, 1992)

Mina	Lugar	Tipo	Aumento
Barrick Goldstrike	Nevada	Oro	15%
Bong Mine	Liberia	Hierro	10%
Bougainville Copper	PNG	Cobre	13%
Chinoe Mine	New Mexico	Cobre	13%
Coal & Allied	New South Wales	Carbón	Significante
El Cerrejon Zona Norte	Colombia	Carbón	13%
Empire	Michigan	Hierro	10%
IOC	Newfoundland	Hierro	23%
LTV Steel Mining	Minnesota	Hierro	10%
Morenci Mining	Arizona	Cobre	10%
PD, Tyronne	New Mexico	Cobre	11%
Palabora	Sputh Africa	Cobre	7%
Quintette Coal	British Colombia	Carbón	10%

En la Figura 2-4 se muestran los enfoques de resolución típicos que se encuentran en literatura, estos son (Alarie & Gamache, 2002):

- **un camión para m palas:** cada camión pregunta al despachador la pala más conveniente para ser despachado a ella, el despachador toma la decisión con criterios de costos, beneficios y prioridades.
- **n camiones para una pala:** cada pala es ordenada en prioridad y comienza a solicitar camiones para apegarse de la mejor forma a su plan de extracción, la prioridad de determina en función a su retraso con respecto al plan de extracción, siendo la más atrasada la de mayor prioridad.
- **n camiones para m palas:** es un enfoque que considera la totalidad de los equipos para hacer un despacho global, esto lo hace más complejo por la naturaleza combinatorial del mismo, puesto que un gran número de equipos puede resultar tiempos exageradamente grandes de cálculo para llegar a una solución.

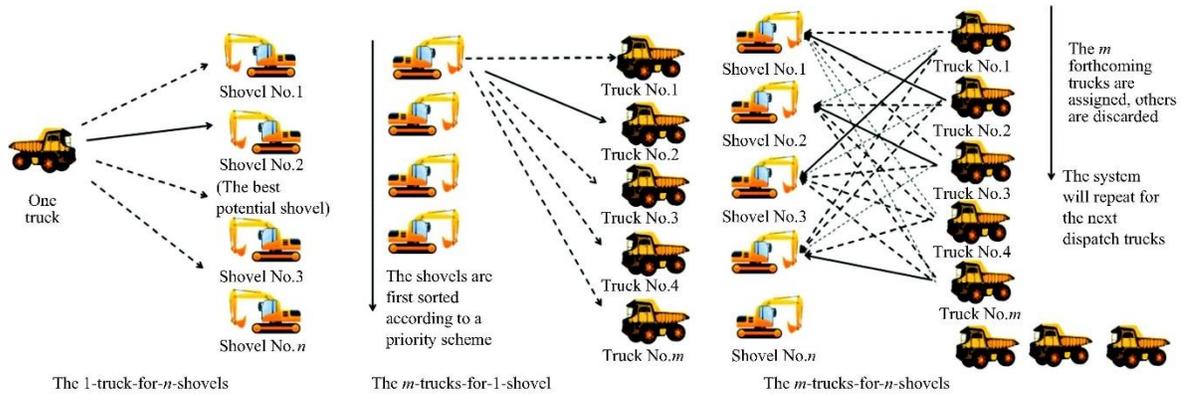


Figura 2-4: Enfoques de resolución de problema de despacho (Chaowasakoo, 2017)

Usualmente los algoritmos de despacho resuelven distintas problemáticas y, en consecuencia, su desempeño se enfoca en mejorar algunos aspectos, dejando de lado otros. El enfoque de los algoritmos de despacho puede ser uno o más de los mencionados a continuación (Munirathinarn & Yingling, 1994): asignación de camión fija, minimizar tiempo de espera de camiones, maximizar camiones, minimizar tiempo de espera de palas, maximizar tiempo de espera de las palas, minimizar desviación del plan de producción, minimizar la saturación de las palas, minimizar la desviación de los objetivos de producción de las palas.

### 2.5.1. Despacho priorizado

El despacho priorizado (DP) es un algoritmo heurístico implementado en el software DSim, que tiene por objetivo el saturar las palas, este algoritmo tiene un enfoque de resolución del tipo un camión para  $n$  palas, es decir, cada camión disponible se hace la pregunta a qué pala ir y se dirige a la pala con mayor prioridad no saturada.

La prioridad de la pala está dada por la ecuación (2-6) y la producción que aporta el camión a la pala por la ecuación (2-7)

$$P_l^R = P_l^I + \left(1 - \frac{d_i}{d_{\text{máx}}}\right) \quad (2-6)$$

Donde:

$P_l^R$ : Prioridad real de la pala  $l$

$P_l^I$ : Prioridad ingresada de la pala  $l$

$d_i$  : Distancia al frente de carga  $i$  [km]

$d_{\text{máx}}$ : Distancia máxima de la operación [km]

De la ecuación (2-6) se desprende que, a igual prioridad, el camión se dirigirá a la pala más cercana.

$$P_{k[i,j]} = \frac{L_k}{t_{[i,j]}} \quad (2-7)$$

Donde:

$P_{k[i,j]}$ : Productividad camión  $k$  [t/h]  
 $L_k$ : Carga media de camión  $k$  [t]  
 $t_{[i,j]}$ : Tiempo de ciclo del circuito [i, j] [h]

### 2.5.2. Despacho optimizado

El despacho optimizado (DO) resulta de la adaptación del problema propuesto por Mena (2013) el cual posee un enfoque de  $m$  camiones para  $n$  palas, y tiene por objetivo maximizar la producción.

Este despacho fue implementado en DSim por una memoria de tesis (Orellana, 2018), para ser explicado es necesario primero definir el tiempo de evaluación del problema y la productividad en las ecuaciones (2-8) y (2-9) respectivamente.

$$t_{evaluación} = t_{restante[i,j]} + t_{perdido[i',j']} \quad (2-8)$$

Donde:

$t_{evaluación}$ : Tiempo de evaluación de productividad [h].  
 $t_{restante[i,j]}$ : Tiempo que queda para realizar circuito [i, j] [h].  
 $t_{perdido[i',j']}$ : Tiempo necesario para completar circuito [i', j'] [h].

El tiempo de restante se define para que la posición del camión sea considerada al momento de calcular un nuevo despacho y así no incurrir en pérdidas productivas al momento de despachar los camiones. De este modo, se logra que los camiones se reasignan al circuito al que les tome el menor tiempo llegar, es decir, al circuito más cercano. Su cálculo consiste en la resta de la variable tiempo de evaluación, que es un valor dado al sistema, con el tiempo perdido, que es el tiempo que tarda este camión en completar su circuito previamente asignado y llegar al nuevo frente de carga.

$$P_{k[i,j]} = \frac{L_k}{t_{evaluación}} \left( 1 + \frac{t_{restante[i,j]}}{t_{ik} + t_{jk} + d_{ij} * \left( \frac{1}{v_{k[i,j]}^L} + \frac{1}{v_{k[i,j]}^U} \right)} \right) * \frac{MTBF_k}{MTBF_k + MTTR_k} \quad (2-9)$$

Donde:

$P_{k[i,j]}$ : Productividad camión  $k$  en el circuito [i, j] [t/h].  
 $L_k$ : Carga media de camión  $k$  [t].  
 $t_{ik}$ : Tiempo de carga del camión  $k$  en frente de carga  $i$  [h].  
 $t_{jk}$ : Tiempo de descarga del camión  $k$  en frente de descarga  $j$  [h].  
 $d_{ij}$ : Distancia entre frente de carga  $i$  y frente de descarga  $j$  [km].  
 $v_{k[i,j]}^L$ : Velocidad del camión  $k$  cargado entre frente de carga  $i$  y frente de descarga  $j$  [km/h].  
 $v_{k[i,j]}^U$ : Velocidad del camión  $k$  descargado entre frente de descarga  $j$  y frente de carga  $i$  [km/h].  
 $MTBF_k$ : Tiempo promedio entre fallas de camión  $k$  [h].  
 $MTTR_k$ : Tiempo promedio para reparar camión  $k$  [h].

$t_{evaluación}$ : Tiempo de evaluación de productividad [h].

$t_{restante[i,j]}$ : Tiempo que queda para el circuito [i, j] [h].

La productividad de un camión es definida como la multiplicación de tres términos, el primer término es la productividad simple que solo considera la carga media del camión y un tiempo arbitrario. En el segundo término que está entre paréntesis, tiene un 1 que exige al problema que cumpla con llevar la carga  $L_k$  en el circuito anterior dentro del tiempo de evaluación, mientras que el término a su derecha representa la productividad del camión en el circuito nuevo [i, j] multiplicado por la fracción de tiempo que resta. Finalmente, el tercer término corresponde a la disponibilidad del equipo en el largo plazo calculada con los tiempos entre fallas y reparaciones según la norma ASARCO (CODELCO, 2005).

El problema de programación lineal definido por Orellana (2018) y cuya solución resulta en el despacho optimizado se muestra en la ecuación (2-10) sujeto a las restricciones mostradas desde la ecuación (2-11) hasta la (2-16).

$$\text{máx} \sum_k \sum_i \sum_j P_{k[i,j]} X_{k[i,j]} - C * \sum_j \mu_j \lambda_j \quad (2-10)$$

$$\sum_j \sum_j P_{k[i,j]} X_{k[i,j]} \leq P_i \quad \forall i \in I \quad (2-11)$$

$$\frac{\sum_k \sum_j P_{k[i,j]} T}{M_j} \geq 1 - \mu_j \quad \forall j \in J \quad (2-12)$$

$$\sum_i \sum_j X_{k[i,j]} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (2-13)$$

$$\sum_i \sum_j X_{k[i,j]} = 0 \quad \text{si } k = k' \quad k' \in K \quad (2-14)$$

$$\sum_k \sum_j X_{k[i,j]} = 0 \quad \text{si } i = i' \quad i \in I \quad (2-15)$$

$$\sum_i X_{k[i,j]} \leq N_{camiones} \quad (2-16)$$

$$X_{k[i,j]} = \begin{cases} 1 & \text{si el camión } k \text{ es asignado al circuito } [i, j] \\ 0 & \text{en el caso contrario} \end{cases} \quad (2-17)$$

Donde:

$P_{k[i,j]}$ : Productividad camión  $k$  en circuito [i, j] [t/h].

$X_{k[i,j]}$ : Variable de decisión binaria.

$P_i$ : Productividad del equipo de carguío  $i$  [i, j] [t/h].

$T$ : Tiempo de análisis (se utiliza por defecto  $T=24$  [h]) [h].

$M_j$ : Tonelaje requerido en destino  $j$  [t].

$I$ : Conjunto de frentes de carga.

$J$ : Conjunto de frentes de descarga.

$K$ : Conjunto de equipos de transporte.

$C$ : Constante de productividad [t/h].

$\mu_i$ : Variable de holgura de incumplimiento de plan en frente de descarga  $j$ .

$\lambda_i$ : Prioridad de destino  $j$ .

$N_{camiones}$ : Número total de camiones a utilizar.

La ecuación (2-17) muestra el comportamiento es un variable de decisión binaria que toma el valor 1 si el camión  $k$  está asignado al circuito  $[i, j]$  y toma el valor 0 en caso contrario.

La ecuación (2-11) es una restricción que limita la productividad de los camiones  $k$  asociados al frente de carga  $i$  a no exceder la productividad del cargador  $i$ .

La ecuación (2-12) es una restricción que busca que el tonelaje requerido por el punto de descarga  $j$  se cumpla, esta condición añade una variable de holgura ( $\mu_j$ ) que toma como valor el incumplimiento porcentual del plan de destino en casos donde el plan minero no se cumpla, el problema siga teniendo una solución.

La ecuación (2-13) es una restricción para asegurar que el camión  $k$  está asignado a los más a un circuito.

La ecuación (2-14) es una restricción que fuerza al problema a no utilizar los camiones  $k'$  no disponibles.

La ecuación (2-15) es una restricción que fuerza al problema a no utilizar los circuitos de los frentes  $i'$  no disponibles.

La ecuación (2-16) es una restricción que asegura que los camiones asignados no superen el total de camiones del sistema.

Finalmente, la ecuación (2-10) muestra la función objetivo del problema, esta busca maximizar el movimiento de mineral en el sistema de transporte en el largo plazo y está sujeta a penalizaciones al no cumplir el plan minero. La penalización está representada por la sumatoria con signo negativo, en ella la variable  $\lambda_j$  representa la importancia que tiene el cumplimiento del tonelaje requerido para una frente en específico, así, junto con  $\mu_j$  que representa el porcentaje que no será cumplido por esa frente en cierto despacho, hacen que la maximización minimice el incumplimiento ( $\mu_j$ ) para frentes más importantes que otras.

La resolución de este problema se da cada vez que hay un cambio en la operación como lo son la falla o reparación de los equipos y el cumplimiento de plan minero de una frente.

Para resolver el problema, se utiliza la herramienta Gurobi que permite la resolución de un problema de programación lineal (PPL). Su uso requiere fijar un la precisión con la que se resolverá el problema, se utilizará la misma regla utilizada por Orellana (2018): se fija la precisión en un 1%, si tarda más de 10 segundos se fijan las variables de decisión mayor a 0.7 en 1 y se resuelve de nuevo iterativamente.

## 2.6. Cálculo de beneficio económico

Un beneficio económico es uno de los objetivos más importantes que persigue el negocio minero, para su cálculo se propone utilizar la ecuación (2-18).

$$B = t * [Ley_{Cu} * R_{Cu} * FC * I * (P_{Cu} - C_{F\&R}) - C_{mina} * L - C_{planta} * I] \quad (2-18)$$

Donde:

$B$ : Beneficio económico [USD].

$t$ : tonelaje movido [t].

$Ley_{Cu}$ : Ley de cobre [%].

$R_{Cu}$ : Recuperación metalúrgica de cobre [%].

$FC$ : Factor de conversión de libra a toneladas y de porcentaje a fracción, su valor es 0.22046.

$I$ : Indicador, si el mineral está bajo ley de corte toma el valor 0, en caso contrario el valor 1.

$P_{Cu}$ : Precio de cobre [USD/lb].

$C_{mina}$ : Costo mina [USD/t/km].

$L$ : Largo de la ruta [km].

$C_{planta}$ : Costo planta [USD/t].

$C_{F\&R}$ : Costo fundición y reparación [USD/t].

Esta ecuación, permitirá comparar a un nivel económico los sistemas de despacho, los parámetros fijos son el precio del cobre, recuperación del mineral y los costos operacionales, estos datos fueron obtenidos de benchmarking en la industria.

Como parámetros móviles se tomarán el tonelaje movido y el largo de la ruta dados por el movimiento de mineral de las simulaciones y el layout de cada caso de estudio.

Finalmente, la ley de cobre se considerará constante para cada frente de la operación simulada y para hacer el estudio más robusto se evaluarán 5 escenarios de leyes en total.

### 3. METODOLOGÍA

En la siguiente sección se listarán las etapas que se consideran para realizar el trabajo de memoria.

**Definición de inputs y foco de estudio:** se determinarán los parámetros fijos y variables, estos últimos ayudarán a conocer el comportamiento de los algoritmos de despacho.

**Generación de caso base:** se generará un modelo de simulación base para comparar con los otros escenarios, de esta forma se podrá cuantificar los cambios ocasionados por los parámetros variables.

**Determinación de simulaciones:** se hará un listado de los casos que variarán de manera aislada y compuesta los distintos parámetros móviles que son objeto a estudio.

**Simulación y obtención de resultados:** una vez definidos los puntos anteriores se procederá a realizar las simulaciones que buscan poner a prueba en las mismas condiciones los sistemas de despacho a simular.

**Comparación y análisis:** con los resultados obtenidos se recopilarán y analizarán, además de obtener conclusiones y transformar datos obtenidos en información.

## 4. DESCRIPCIÓN CASOS DE ESTUDIO

En la presente sección explicarán los casos de estudio. Para el presente trabajo se diseñaron 4 casos de estudio. Los dos primeros con el fin de poner a prueba los sistemas de despacho mencionados en la sección 2.5.1 y 2.5.2, comparando su apego al plan minero, en una mina sintética.

Para facilitar la comparación, los dos primeros casos de estudio tienen una flota transporte fija, esta flota es la óptima para cada escenario base (o primer escenario de cada caso de estudio) la cual será exigida por los siguientes escenarios, lo que pondrá en evidencia las preferencias de los sistemas de despacho.

El tercer caso de estudio busca comprobar la funcionalidad de las permutaciones en los sistemas de despacho y a un nivel cualitativo evaluar su ayuda en la fluidez del sistema.

Finalmente, el cuarto caso de estudio toma los resultados de los dos primeros para hacer un ejercicio de evaluación económica de la operación.

Para todos los casos de estudio, se utilizaron como input de los equipos de carguío y transporte los parámetros mostrados en la Tabla 4-1 y Tabla 4-2, estos parámetros corresponden a un camión convencional de 360 toneladas tipo CAT 797F y una pala hidráulica de 38 yd<sup>3</sup> tipo Hitachi EX5600 respectivamente. Serán necesarias 3 baldadas de la pala para llenar el camión.

Tabla 4-1: Parámetros de equipos de transporte

Parámetros	Valor
Carga promedio [t]	354
Velocidad cargado [km/h]	11
Velocidad descargado [km/h]	20
Tiempo de aculatamiento en frente de carga [s]	90
Tiempo de aculatamiento en frente de descarga [s]	90
Disponibilidad promedio [%]	90

Tabla 4-2: Parámetros de equipos de carguío

Parámetros	Valor
Tiempo de carga [s]	96
Disponibilidad promedio [%]	90

Otras consideraciones son las demoras programadas que se muestran en Tabla 4-3, la presencia 2 puntos de aculatamiento para todos los frentes de carga y descarga. Por último, se añade que para todos los casos de estudio se realizan 50 réplicas para que el análisis sea robusto.

Tabla 4-3: Demoras programadas

Parámetros	Hora de inicio [h]	Duración [h]	Tiempo entre repetición [h]
Colación	6	1.0	12
Cambio de turno	12	0.5	12

## 4.1. Descripción caso C1

El caso C1 busca encontrar la importancia del plan minero ingresado al simulador para frentes con rutas de carguío de igual largo.

Para este caso se diseña una mina sintética de tal forma que los frentes de carga estén ubicados a una distancia de 4 km. de cualquier otro punto terminal del layout.

En la Figura 4-1 se pueden apreciar el diseño de mina 1 de este estudio o layout 1 (LO1) el que cuenta con dos frentes de carga y descarga (FC y FD respectivamente) enumerados para diferenciarse, adicionalmente el layout posee un taller mecánico que es el lugar donde los camiones no disponibles por falla son reparados, un casino que es el lugar donde tienen que ir los trabajadores en colación y un estacionamiento que es el lugar donde los trabajadores realizan el cambio de turno, además de ser el punto de partida de los camiones en la simulación.

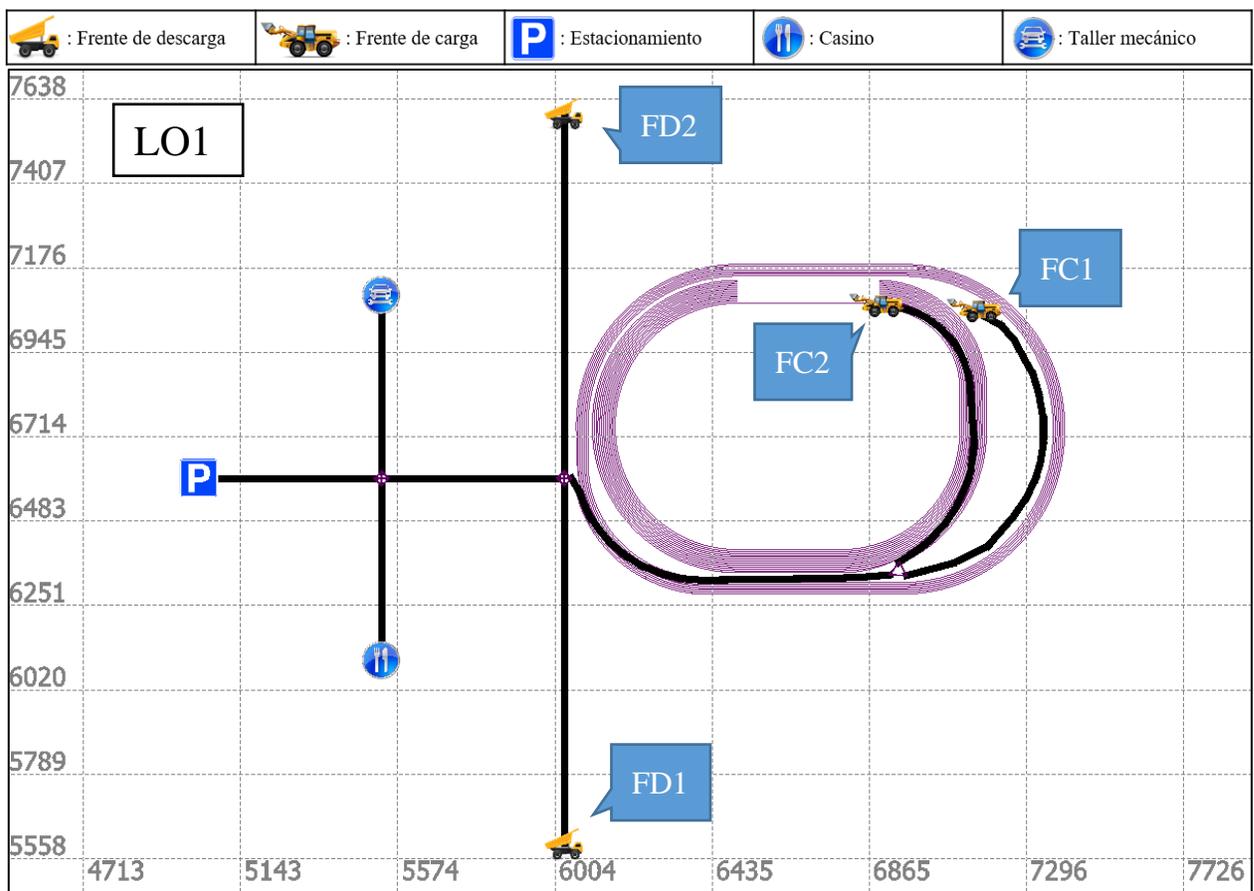


Figura 4-1: Vista en planta de mina sintética, layout 1 (LO1).

En la Tabla 4-4 muestran los 5 planes mineros asociados a las palas en cada frente. Estos son los 5 escenarios por simular en este caso de estudio.

La asignación de material desde el frente de carga hasta el frente de descarga y el posicionamiento de las palas es la siguiente:

- El frente FC1 tiene asignada la Pala 1 (P1) y su material se descarga en el frente FD1.
- El frente FC2 tiene asignada la Pala 2 (P2) y su material se descarga en el frente FD2.

Tabla 4-4: Plan minero para cada frente de descarga

Escenario	Pala 1 [ktpd]	Pala 2 [ktpd]	Diferencia %
PLAN1	204.0	204.0	0%
PLAN2	204.0	224.4	10%
PLAN3	204.0	244.8	20%
PLAN4	204.0	265.2	30%
PLAN5	204.0	285.6	40%

Se asigna que cada frente de carga tenga una frente de descarga propia, con el fin de mostrar visualmente y de manera clara la ruta asignada por el despacho. Además, así no se generan interferencias en los frentes de carga que afecten al movimiento entrante de las frentes de descarga entre camiones que van a distinto destino.

Los planes fueron seleccionados en base a simulaciones de prueba que determinaban la variación mínima que debían tener los planes mineros para generar un despacho distinto entre los sistemas de despacho estudiados.

El cálculo de la flota de camiones se hizo teniendo en cuenta los siguientes elementos:

- El requerimiento de movimiento de material del sistema para plan minero PLAN1, correspondiente al caso base.
- Las distancias del layout LO1
- Parámetros operacionales de los camiones.

La flota resultante fue puesta a prueba por el simulador y ajustada para que los camiones alcanzaran el requerimiento del plan minero. Así, la flota resultante y que será utilizada en todos los escenarios de este caso serán 32 camiones.

Cabe mencionar y repetir que esta flota no está dimensionada para los planes PLAN2, PLAN3, PLAN4 y PLAN5, los que requieren un mayor movimiento de material y, por ende, mayor cantidad de camiones, pero esa condición está pensada para exigir a los sistemas de despacho y ver las preferencias que toman ante la falta de camiones.

## 4.2. Descripción caso C2

El caso C2 busca encontrar la importancia del largo de las rutas en los sistemas de despacho, para dos frentes con el mismo plan minero.

Con este objetivo y tomando como base el layout LO1 que cuenta con dos frentes de carga, ambos situados a una misma distancia de sus respectivos frentes de descarga. Se emula la profundización de las fases, típico del método de explotación a cielo abierto

La Figura 4-2 muestra la secuencia de profundización de la fase, correspondiente a los layout del 2 al 5 (LO2, LO3, LO4 y LO5), posteriores al layout LO1 de la Figura 4-1. Los frentes de carga, de descarga y las locaciones auxiliares mantienen sus posiciones, exceptuando la frente FC2 que es móvil en este caso de estudio.

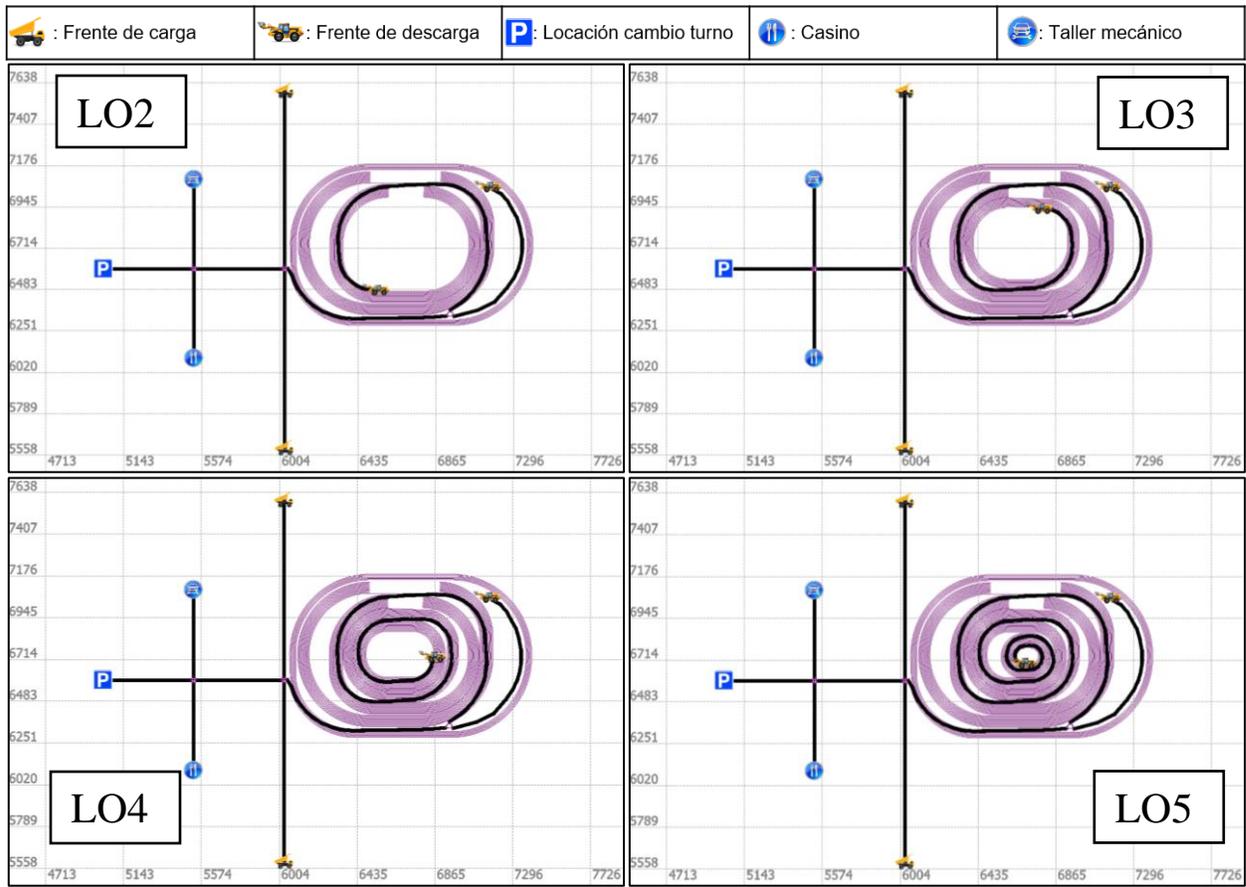


Figura 4-2: Secuenciamiento de los layout del caso C2 visto en planta.

La profundización de la fase resulta en cinco layout donde llamaremos Ruta 1 (R1) a la ruta del frente de carga que mantiene su posición y llamaremos Ruta 2 (R2) a la ruta de la frente de descarga que se profundiza. La Tabla 4-5 resume las distancias de las rutas en los diferentes escenarios.

Tabla 4-5: Distancia de las rutas en los 5 layout de estudio.

Escenario	Ruta 1 [km]	Ruta 2 [km]	Diferencia [%]
LO1	4	4	0%
LO2	4	5	25%
LO3	4	6	50%
LO4	4	7	75%
LO5	4	8	100%

La asignación de material desde el frente de carga hasta el frente de descarga y el posicionamiento de las palas, equivalentemente a la del caso C1 es la siguiente:

- El frente FC1 tiene asignada la Pala 1 (P1) y su material se descarga en el frente FD1.
- El frente FC2 tiene asignada la Pala 2 (P2) y su material se descarga en el frente FD2.

Al igual que el caso C1, y por las mismas razones, la flota de transporte es de 32 camiones. El plan minero para todos los escenarios es igual al plan minero del primer escenario del caso C1 (204 ktpd para cada frente de carga).

### 4.3. Descripción caso C3

El tercer caso de estudio (C3) es distinto a los dos anteriores ya que no busca comparar sistemas de despacho, busca evaluar el efecto de las permutaciones en la fluidez del sistema.

Las permutaciones de camiones son una solución para rutas muy congestionadas en las que se generan líneas de espera (o colas); supongamos que el camión rojo de la Figura 4-3 es el único que tiene por destino la pala no saturada (a la izquierda de la figura), la permutación da la posibilidad de intercambiar el destino del camión rojo por el del verde, haciendo que el camión verde se dirija a la pala no congestionada. Esto añade fluidez al sistema de transporte evitando la espera en cola innecesaria de un camión, en este ejemplo, se puede evitar aproximadamente el tiempo de carga de 3 camiones.

Los beneficios de las permutaciones son la reducción de los tiempos en cola de los camiones y la disminución de los tiempos de espera de las palas, lo que se traduce en una mayor y mejor utilización de los equipos, y en una mayor producción.

El efecto de las permutaciones depende de la congestión de la ruta por lo que se plantearon 3 escenarios con sus respectivas flotas de carguío, mostrados a continuación:

- Caso con Congestión Baja (CCB) con flota de 32 camiones.
- Caso con Congestión Media (CCM) con flota de 48 camiones.
- Caso con Congestión Alta (CCA) con flota de 64 camiones.

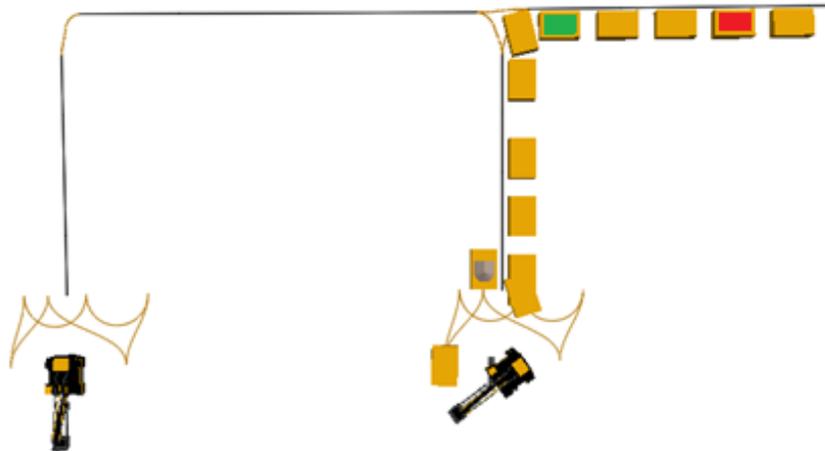


Figura 4-3: Ruta saturada por cola de camiones

La Figura 4-4 muestra el layout 6 (LO6) que se utilizará en el caso C3 de estudio, allí se aprecia una situación que ocurre puede ocurrir en la operación, una fase con tres frentes de carga que comparten una ruta crítica sobresaturada, donde es probable que se produzca el problema descrito anteriormente.

De los sistemas de despacho estudiados solo el despacho priorizado tiene la funcionalidad de las permutaciones programada. El objetivo del caso C3 es analizar las ventajas que tienen las permutaciones, para esto se trabajará con el despacho optimizado que no posee las permutaciones, así se evaluarán las desventajas que tiene no tenerlas, se medirá el tiempo perdido en colas innecesarias y se calcularán las pérdidas causadas por estas.

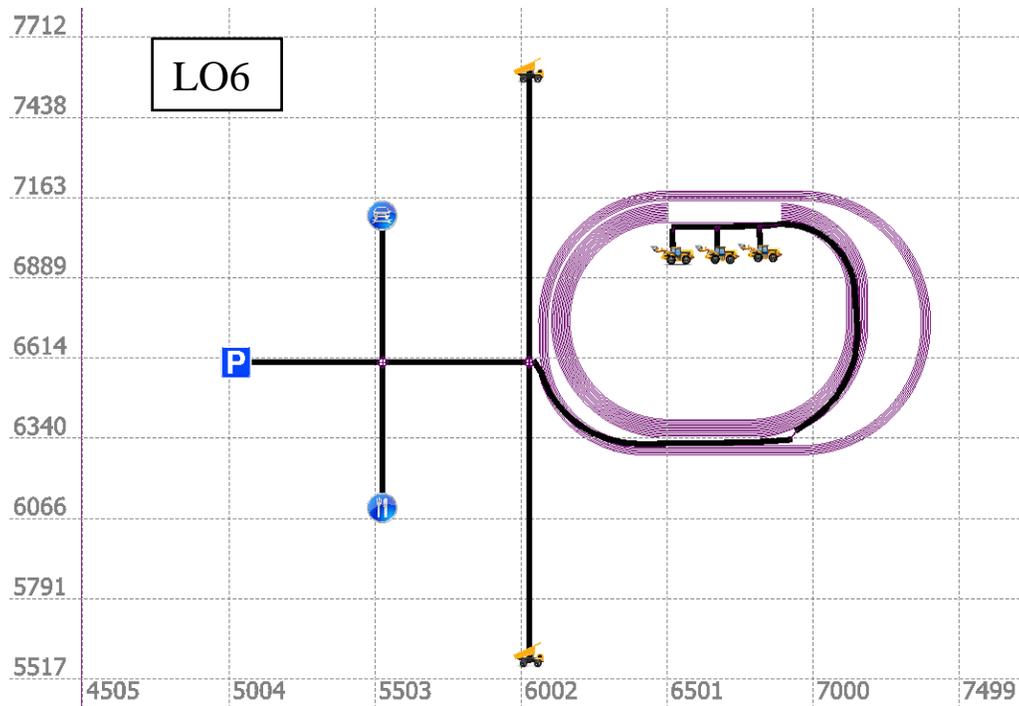


Figura 4-4: Vista en planta del layout 6 (LO6)

#### 4.4. Descripción caso C4

El cuarto y último caso consiste en la valorización económica de los casos C1 y C2, en este caso se desea evaluar el impacto económico que tienen los sistemas de despacho.

Para hacer la valorización económica se consideran 4 escenarios de leyes de cobre en las frentes para reflejar las situaciones más comunes en una operación a cielo abierto. El detalle de los escenarios se lista a continuación:

- Frente FC1 en prestripping y frente FC2 en mineral de ley 0.25% de Cobre.
- Frente FC1 en prestripping y frente FC2 en mineral de ley 0.5% de Cobre.
- Frente FC1 en prestripping y frente FC2 en mineral de ley 0.75% de Cobre.
- Frente FC1 en prestripping y frente FC2 en mineral de ley 1% de Cobre.

Como se puede apreciar, en todos escenarios se impone una situación en la que el frente FC2 tiene una mayor ley que el frente FC1, esta condición se considera por las siguientes razones:

- Es una condición que suele darse en la actualidad, ya que el agotamiento de los yacimientos de óxidos en la superficie conlleva primeras etapas de explotación removiendo mineral estéril, para luego llegar al mineral sulfurado con ley que está a mayor profundidad.

El beneficio económico se calcula con la (2-18) y la Tabla 4-6 muestra los parámetros económicos y metalúrgicos utilizados, estos fueron principalmente extraídos de Medina (2013) y de benchmarking de la industria.

**Tabla 4-6: Parámetros económicos y metalúrgicos**

<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>
Precio cobre [USD/lb]	2.5
Costo mina [USD/t/km]	0.2
Costo Planta [USD/t]	5.75
Costo fundición y refinación [USD/lb]	0.22
Recuperación metalúrgica [%]	85

#### 4.5. Resumen casos de estudio

En la Tabla 4-7 se resumen las principales características del caso C1 y sus escenarios.

**Tabla 4-7: Resumen de escenarios del Caso C1**

<b>Escenario</b>	<b>Layout</b>	<b>Ruta 1 y 2 [km]</b>	<b>Pala 1 [ktpd]</b>	<b>Pala 2 [ktpd]</b>	<b>Flota de camiones</b>
PLAN1	LO1	4	204	204	32
PLAN2			204	224.4	
PLAN3			204	244.8	
PLAN4			204	265.2	
PLAN5			204	285.6	

En la Tabla 4-8 se resumen las principales características del caso C2 y sus escenarios.

**Tabla 4-8: Resumen de escenarios del Caso C2**

<b>Escenario</b>	<b>Layout</b>	<b>Ruta 1 [km]</b>	<b>Ruta 2 [km]</b>	<b>Pala 1 y 2 [ktpd]</b>	<b>Flota de camiones</b>
LO1	LO1	4	4	204	32
LO2	LO2	4	5		
LO3	LO3	4	6		
LO4	LO4	4	7		
LO5	LO5	4	8		

En la Tabla 4-9 se resumen las principales características del caso C3 y sus escenarios

Tabla 4-9: Resumen de escenarios del Caso C3

Escenario	Layout	Ruta 1 [km]	Ruta 2 [km]	Ruta 3 [km]	Pala 1, 2 y 3 [ktpd]	Flota de camiones
CCB	LO6	4.2	4.4	4.6	204	32
CCM						48
CCA						64

En la Tabla 4-10 se resumen las principales características del caso C4 y sus escenarios.

Tabla 4-10: Resumen de escenarios del Caso C4

Escenario	Ley Cu FC1 [%]	Ley Cu FC2 [%]
E1	0	0.25
E2	0	0.5
E3	0	0.75
E4	0	1

## 5. RESULTADOS

En esta sección del trabajo se mostrarán los resultados del estudio y se discutirán con el fin de facilitar las conclusiones.

### 5.1. Resultados caso C1

La Figura 5-1 muestra el movimiento total de mineral de los escenarios simulados en el caso C1, la Tabla 5-1 a su vez muestra el detalle del movimiento de este caso. Se puede apreciar como en todos los escenarios el despacho optimizado logra una mayor producción que el despacho priorizado, es decir, logra su objetivo de maximizar el movimiento de mineral.

Tabla 5-1: Producción por pala y total del caso C1

Escenario	Despacho Priorizado			Despacho optimizado		
	Movimiento P1 [kt]	Movimiento P2 [kt]	Movimiento total [kt]	Movimiento P1 [kt]	Movimiento P2 [kt]	Movimiento total [kt]
PLAN1	207.8	207.4	415.2	230.8	260.5	491.4
PLAN2	235.1	234.3	469.4	230.8	260.5	491.4
PLAN3	222.7	238.2	460.9	215.6	276.1	491.7
PLAN4	196.5	264.8	461.3	184.8	300.9	485.7
PLAN5	179.8	278.2	458.1	169.6	300.9	470.5

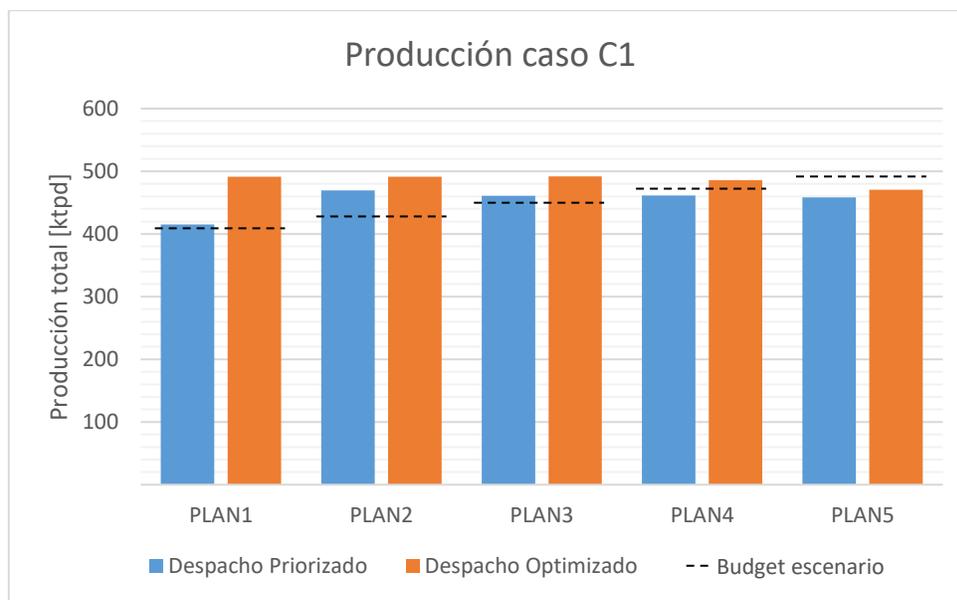


Figura 5-1: Producción total caso C1

En cuanto al cumplimiento del plan minero, el despacho optimizado con su mayor producción es capaz de satisfacer el movimiento total de mineral del plan minero en 4 de los 5 escenarios simulados, incumpliendo el escenario PLAN5 que resulta ser el más exigente en cuanto a demanda de movimiento de mineral. Por su lado, despacho priorizado que logra la producción de mineral total en solo 3 escenarios, estos son el PLAN1, PLAN2 y PLAN3, incumpliendo la producción del PLAN4 y PLAN5 que solicitan un mayor movimiento de mineral.

Así, el despacho optimizado mueve más mineral y logra la producción total en un escenario más que el despacho priorizado, este es el escenarios PLAN4.

Adicionalmente se puede apreciar como la diferencia en la producción de ambos sistemas de despacho disminuye progresivamente a medida que la flota de transporte se ve exigida a cumplir un objetivo de producción mayor.

En la Tabla 5-2 se muestran los factores de utilización según la norma ASARCO de los equipos de carguío y transporte de este caso.

**Tabla 5-2: Factor de Utilización de equipos en caso C1**

Escenario	Despacho Priorizado		Despacho Optimizado	
	FU Camiones [%]	FU Palas [%]	FU Camiones [%]	FU Palas [%]
PLAN1	97%	65%	99%	78%
PLAN2	99%	74%	99%	78%
PLAN3	99%	72%	99%	78%
PLAN4	99%	72%	99%	77%
PLAN5	99%	72%	98%	75%

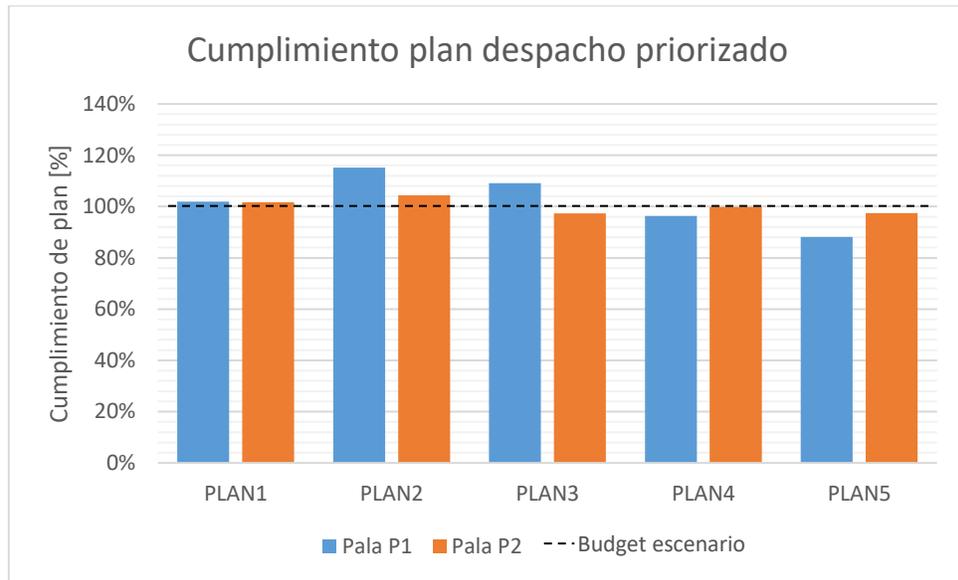
Se puede apreciar factores de utilización muy altos para la flota de transporte, esto se debe a lo exigido que estaba el sistema para lograr la producción en todos los casos. El único valor bajo el 99% de factor de utilización lo tiene el despacho priorizado en el escenario PLAN1, esto debido a que al ver completada la meta productiva decide dejar un par de camiones en reserva por un corto tiempo. En contraste, el despacho optimizado no toma en consideración el cumplimiento de la meta productiva y si tiene camiones disponibles para cargar simplemente los envía a un destino en lugar de dejarlos en reserva.

Los equipos de carguío del despacho optimizado tienen un mayor factor de utilización en todos los escenarios, la diferencia que este despacho tiene con el despacho priorizado disminuye a medida que la flota se ve más exigida conforme avanzan los escenarios.

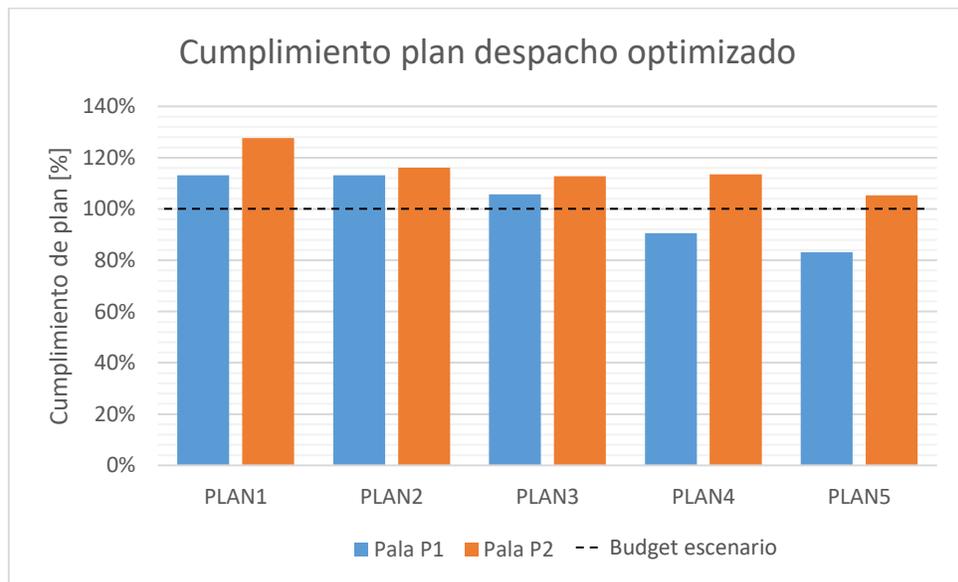
Mientras los factores de utilización del despacho priorizado aumentan relativamente mientras avanzan los escenarios, los del despacho optimizado muestran el comportamiento contrario, la razón principal por la que le ocurre esto al despacho priorizado es porque se ve con mayores problemas para lograr la producción requerida, este comienza a exigir más a los camiones para que saturen a las palas, impidiendo que estos entren en reserva. Por otro lado, el factor de utilización disminuye en el despacho optimizado porque por intentar cumplir de manera más estricta con los requerimientos de movimiento de mineral, el despacho optimizado, a medida avanzan los escenarios comienza a saturar más la pala con mayor requerimiento y esto resulta en mayores interferencias y tiempos de espera en cola por parte de los camiones, por ende, menores factores de utilización para los equipos de carguío en promedio.

La mayor producción obtenida por el despacho optimizado se debe principalmente al mejor uso de la flota de camiones, llegando a tener un factores de utilización un 13% mayor en sus equipos de carguío en comparación al despacho priorizado.

Para analizar la distribución de la producción en los distintos frentes de carga se procede a analizar las Figura 5-2 y Figura 5-3.



**Figura 5-2: Cumplimiento de plan minero por despacho priorizado en caso C1**



**Figura 5-3: Cumplimiento de plan minero por despacho optimizado en caso C1**

La Figura 5-3 muestra algo curioso, en el escenario PLAN1 la pala P2 tiene una producción mucho mayor a la pala P1 teniendo todas las condiciones iguales, esto ocurre porque para el despacho optimizado cualquier solución que asegure al menos el lograr la producción requerida para cada frente le es equivalente. Así enviar un camión a cualquier pala luego de logrado el requerimiento le produce el mismo aumento en movimiento de mineral, entonces podría tanto enviar la misma cantidad de camiones a ambas palas o enviar el número de camiones que aseguren justo el requerimiento de una pala y enviar el resto a la otra.

Si el adelanto de mineral no fuera considerado, el despacho optimizado muestra un mejor apego al plan en los tres primeros escenarios, ya que en estos cumple el Budget de ambas frentes, a diferencia del despacho priorizado que cumple en Budget de ambos frentes solo en dos primeros. Por el contrario, tomando esta consideración en los últimos dos escenarios el despacho priorizado es el que tendría un mejor cumplimiento del plan minero

Se aprecia un comportamiento distinto en los sistemas de despacho, mientras el despacho optimizado siempre logra una mayor producción en la pala de mayor Budget, el despacho priorizado no logra este comportamiento en 2 de sus 5 escenarios. Es más, en el escenario PLAN3 no logra el requerimiento de la pala P2 a costa de exceder el requerimiento de la pala P1.

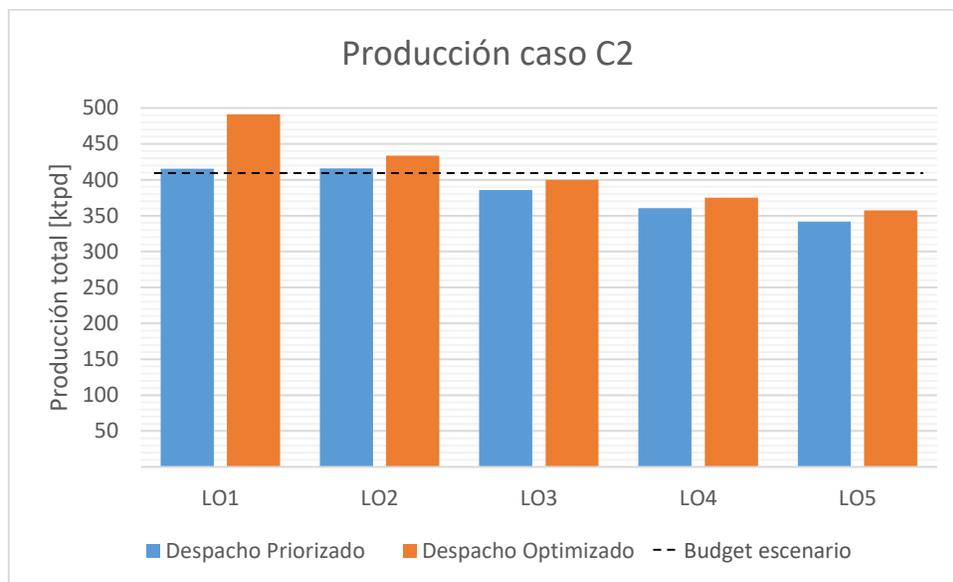
Otro punto que destacar es que el despacho optimizado logra el movimiento de mineral de la pala con mayor requerimiento, por ende, para este despacho un mayor Budget en palas a la misma distancia es sinónimo de una mayor prioridad.

## 5.2. Resultados caso C2

La Tabla 5-3 muestra el detalle del movimiento que se tuvo en los escenarios del caso 3, la Figura 5-4 a su vez muestra solo el movimiento total logrado por ambos despachos. Aquí se puede apreciar el mismo comportamiento que en el caso C1, el movimiento total mina es mayor en el despacho optimizado en todos los escenarios que se simularon. Este mayor movimiento está fuertemente relacionado con la mayor utilización que presenta la flota de camiones, con una diferencia máxima de un 15%.

Tabla 5-3: Producción por pala y total del caso C2

Escenario	Despacho Priorizado			Despacho optimizado		
	Movimiento P1 [t]	Movimiento P2 [t]	Movimiento total [t]	Movimiento P1 [t]	Movimiento P2 [t]	Movimiento total [t]
PLAN1	207.8	207.4	415.2	230.8	260.5	491.4
PLAN2	207.8	208.2	416.0	230.8	202.8	433.7
PLAN3	208.2	177.7	385.9	230.5	169.2	399.7
PLAN4	207.4	152.9	360.4	230.8	144.4	375.2
PLAN5	207.4	134.2	341.6	230.8	126.4	357.2



**Figura 5-4: Producción total caso C2**

El despacho optimizado supera al despacho priorizado en el cumplimiento del plan minero, logrando el movimiento total requerido en los dos primeros escenarios. Por su parte el despacho priorizado cumple el movimiento total del plan únicamente en el primer escenario.

La diferencia de mineral movido de las frentes desde el escenario LO2 al LO5 es prácticamente el mismo, solo en el primer escenario esta diferencia es evidentemente mayor.

La Tabla 5-4 muestra los factores de utilización de la flota de transporte y equipos de carguío a lo largo de los escenarios del caso C2.

**Tabla 5-4: Factor de Utilización de equipos en caso C2**

Escenario	Despacho Priorizado		Despacho Optimizado	
	FU Camiones [%]	FU Palas [%]	FU Camiones [%]	FU Palas [%]
LO1	97%	65%	99%	78%
LO2	99%	65%	99%	69%
LO3	99%	61%	99%	64%
LO4	99%	57%	99%	60%
LO5	99%	54%	99%	57%

Al igual que en el caso C1, la flota de transporte del despacho priorizado en el primer escenario tiene un factor de utilización algo menor debido a que envía camiones a reserva al completar el requerimiento de movimiento de mineral de las frentes. Pero de todas formas es un valor muy cercano al 100%.

La diferencia entre el factor de utilización de ambos sistemas de despacho disminuye mientras aumentan las distancias, uno de los motivos por lo que esto ocurre es por el aumento de los tiempos de espera en colas que tiene la flota de transporte del despacho optimizado al saturar

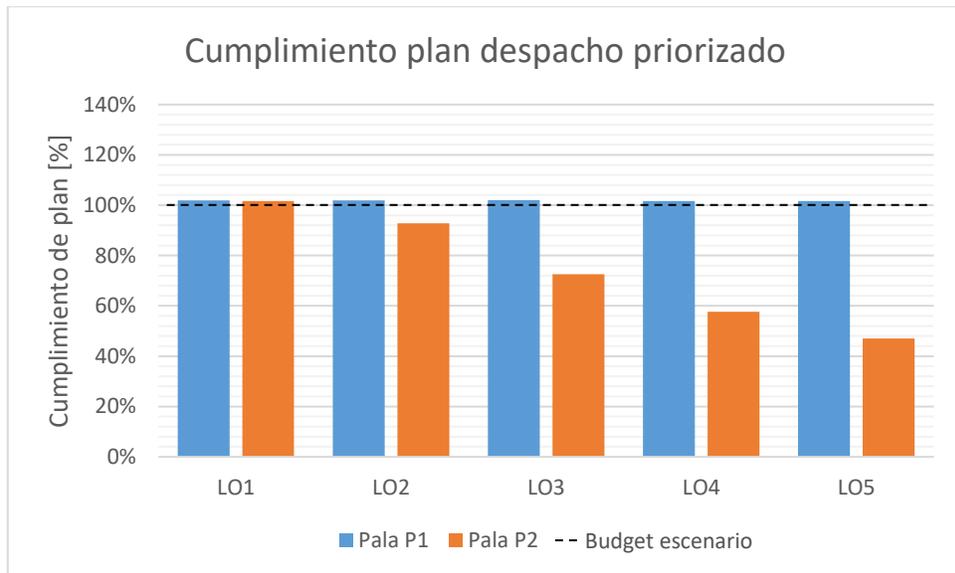
de gran manera la ruta más corta. Otro de los factores es la mayor utilización que el despacho priorizado hace a la flota de transporte, ya que a medida que los ciclos de transporte aumentan por el aumento de las distancias, la productividad de los camiones disminuye y este sistema empieza a utilizar más a los camiones dejando de enviarlos a reserva ya que

Como se puede esperar, el aumento de las distancias que a su vez conlleva mayores ciclos de transporte, resulta en un menor factor de utilización para los equipos de carguío en ambos sistemas de despacho, a pesar de esto, el sistema de despacho optimizado logra un mejor uso de la flota de transporte en todos los escenarios logrando un mayor factor de utilización de las palas en todos estos.

La Figura 5-5 muestra el cumplimiento porcentual del plan minero del despacho priorizado en el caso C2, en ella se puede apreciar como el plan minero se cumple para ambas frentes en el escenario LO1. En los escenarios posteriores, solo se cumple el Budget del frente FC1 mientras aumenta progresivamente el incumplimiento del Budget del frente FC2 a medida que el largo de su ruta aumenta.

El cumplimiento porcentual del plan minero del despacho optimizado se muestra en la Figura 5-6. En esta figura se aprecia el mismo comportamiento que lo mostrado por el despacho priorizado, se cumple el Budget en las mismas frentes y aumenta el incumplimiento del frente FC2 con su profundización.

El cumplimiento de ambos sistemas de despacho se diferencia en que el despacho optimizado excede el Budget una vez cumplido, esto trae como consecuencia un mayor incumplimiento en el requerimiento de la pala P2 en 4 de los 5 escenarios. De esta forma, sin considerar el material adelantado al plan minero, el despacho priorizado presenta un mejor cumplimiento.



**Figura 5-5: Cumplimiento de plan minero por despacho priorizado en caso C2**

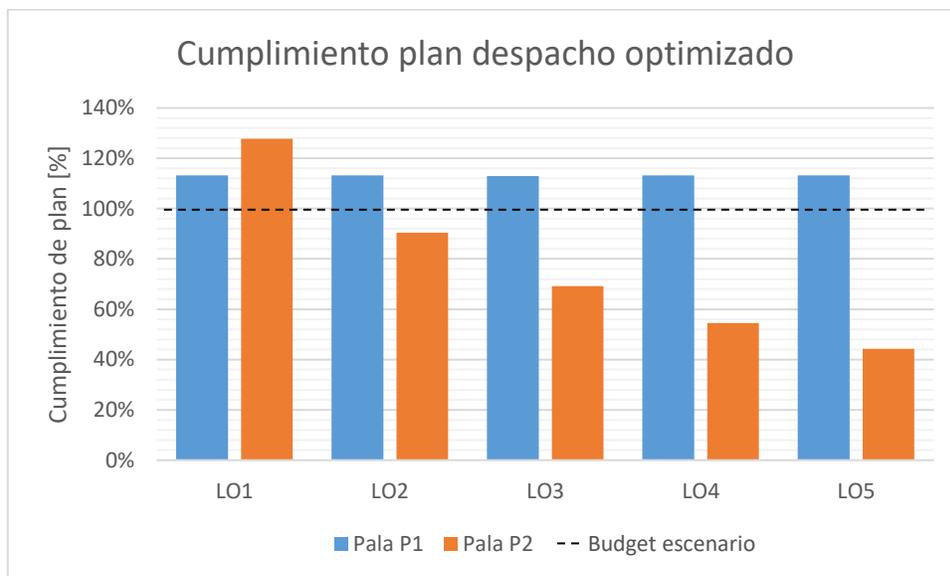


Figura 5-6: Cumplimiento de plan minero por despacho optimizado en caso C2

Ambos despachos cumplen el movimiento de mineral requerido por el plan minero para la pala más cercana, lo que muestra la importancia del largo de las rutas para ambos sistemas de despacho, dando una mayor prioridad de despacho a las rutas más cortas, pero se puede apreciar la que el despacho optimizado le da una prioridad mayor causado por su objetivo de maximizar movimiento de mineral en el sistema.

### 5.3. Resultados caso C3

El uso de las permutaciones solo es necesario cuando todos los camiones salen a la vez de una locación, este fenómeno se observa en la simulación en solamente en su inicio.

Una vez los camiones son cargados no se observa nuevamente el fenómeno debido a que el tiempo de carga de la pala y el de descarga en los frentes de descarga dan una separación a los camiones de forma natural e impide que estos estén lo suficientemente cercanos para que se produzcan colas.

La separación que adquieren los camiones en su carga y descarga se mantiene al terminar un evento programado como lo son el cambio de turno y la colación, ya que el inicio de estos eventos para cada camión depende del momento que llega a la locación asignada, en consecuencia, el término de los eventos también.

Tabla 5-5: Resultados caso C3

	Flota afectada [%]	Tiempo promedio espera [min]
CCB	3	4
CCM	12	20
CCA	37	54

El análisis arroja un promedio general de camiones afectados por la ausencia de permutaciones igual al 12% de la flota, con un promedio de 20 min en cola por día equivalentes a un 0.003% del tiempo total de simulación y al 6% de un ciclo de transporte.

Si bien, las permutaciones generan una mejora en la fluidez de la producción, su efecto mejorándola es muy pequeño.

#### 5.4. Resultados caso C4

En la Figura 5-7 se muestra el beneficio del caso C1 para el escenario de la frente FC2 con ley 0.25%, se puede apreciar un beneficio creciente para ambos despachos causado por el aumento en el movimiento de mineral de la frente FC2, que es la que posee el mineral.

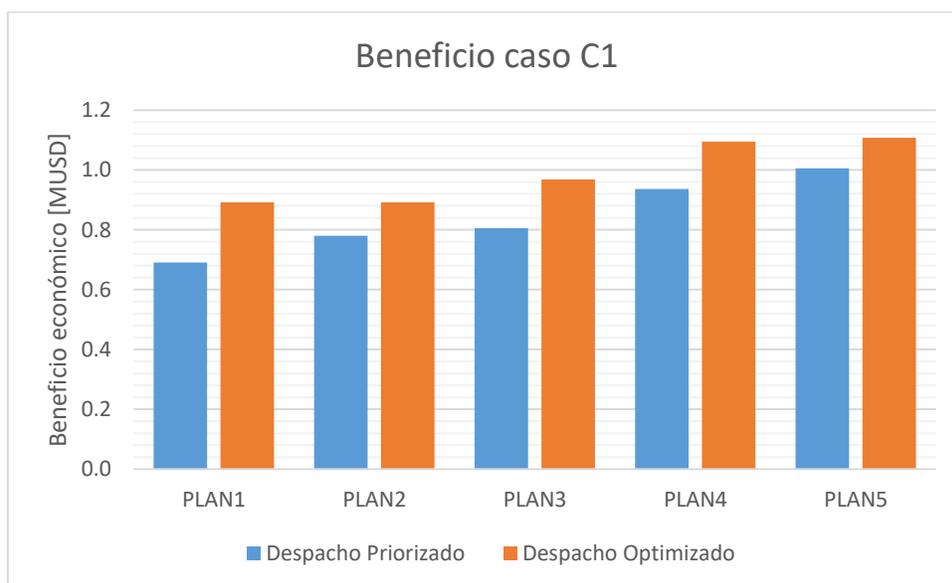
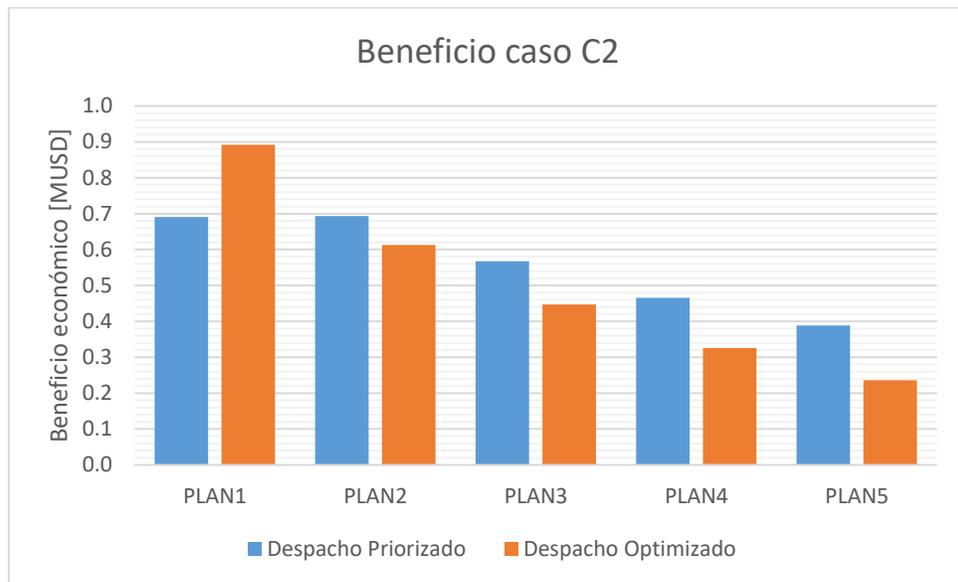


Figura 5-7: Beneficio caso C1 con frente FC2 de ley 0.25%

Para todos los escenarios del caso C1, el despacho optimizado logra un mayor beneficio ya que como fue analizado anteriormente, su movimiento de mineral para la frente FC2 es mayor que el del despacho priorizado en todos ellos.

La Figura 5-8 se muestra el beneficio del caso C1 para el escenario de la frente FC2 con ley 0.25%, El beneficio para ambos despachos tiene un comportamiento decreciente provocado por la disminución en el movimiento de mineral de la frente FC2, responsable de los ingresos.

A partir del escenario LO2 el beneficio comienza a ser mayor para el despacho priorizado y la diferencia porcentual del beneficio de los despachos aumenta, este comportamiento se debe a que, a partir de ese escenario, el movimiento del frente FC2 en el despacho priorizado cada vez mayor al de despacho optimizado.



**Figura 5-8: Beneficio caso C2 con frente FC2 de ley 0.25%**

Solo se muestra el resultado del primer escenario del caso C4, de ley 0.25% en el frente FC2, debido a que otros escenarios muestran exactamente el mismo comportamiento. A medida que la ley del FC2 aumenta, el beneficio aumenta fuertemente lo que resulta en una diferencia porcentual menor entre el beneficio del despacho priorizado y del despacho optimizado.

## 6. CONCLUSIONES

El presente estudio busca comparar el desempeño de dos sistemas de despacho de minería a cielo abierto por medio del análisis de cumplimiento del plan minero. En la presente sección se presentarán las principales conclusiones obtenidas con la realización del estudio.

Con la ayuda de la simulación se logra emular el funcionamiento de las operaciones carguío y transporte propias de una operación minera cielo abierto en una mina sintética.

El uso de dos sistemas de despacho bajo las mismas condiciones permitió evaluar y comparar su desempeño en cuanto a cumplimiento del plan minero, bajo distintos escenarios con distintos layout y Budget. Esto permitió apreciar el comportamiento de los sistemas de despacho en diversas condiciones.

El despacho optimizado cumple su objetivo al ser el sistema de despacho con mayor movimiento de material en todos los casos y escenarios, superando el plan minero que se le provee en muchos de ellos. Esto lo logra por medio del intensivo uso de la flota de transporte, que logra factores de utilización un 13% mayor a las del despacho priorizado en los equipos de carguío.

Ambos sistemas de despacho tienen una preferencia por saturar las rutas cortas. Esta preferencia es mayor en el despacho optimizado, esto ayuda a que su movimiento de material sea mayor, resultando usualmente en exceder el plan minero asociado a esas rutas, teniendo un efecto negativo al dejar menos camiones disponibles para las rutas más largas.

Otra preferencia que tienen ambos despachos es por las rutas de palas con mayor requerimiento de movimiento de mineral, al igual que en el caso de las rutas cortas, la preferencia del despacho optimizado es mayor, resultando en el sobreenvío de camiones a esa ruta con el costo de dejar menos camiones disponibles para otras rutas.

Frente a la escasez de camiones, el despacho priorizado presenta un mejor cumplimiento del plan minero, ya que en esta condición no excede la producción de las frentes, haciendo un uso más inteligente de la flota disponible.

De la evaluación económica se concluye que el mejor apego al plan del despacho priorizado en situaciones con rutas de distinto largo resulta en un mayor beneficio económico a pesar de mover una menor cantidad de mineral. Esto tiene validez en minas con fases donde el mineral de interés económico se encuentre en las rutas más largas.

En el caso de las minas con mineral en las fases con mayor productividad, el beneficio económico sería mayor con el despacho optimizado.

Adicionalmente el despacho priorizado entrega un valor agregado: no producir retrasos en el movimiento de mineral de fases, por adelantar mineral en otra.

La elección de un algoritmo de despacho acorde a las condiciones de operación puede significar un aumento en las ganancias de la operación, en la mina sintética en la que se hizo el estudio la elección del mejor sistema de despacho generó por sobre el otro ganancias desde los 100,000-200,000 USD al día.

Del estudio de las permutaciones se concluye que, en las simulaciones, estas presentan una mejora en la fluidez del sistema de transporte, pero su mejora resulta ser despreciables al evitar colas que representan el 0.003% del tiempo simulado (un día). Sin embargo, ayudan a la operación a representar de mejor manera la realidad ya que evitan las colas innecesarias que se presentan solo al inicio de la simulación y no en las operaciones que son continuas.

En resumen, la eficacia del sistema de despacho depende las condiciones particulares de la mina en la que se aplique por lo que solo es posible dar guías de su uso en situaciones específicas y determinadas. Dependiendo del objetivo estratégico de una empresa se tiene que buscar un despacho que se le alinee de la mejor forma. Cambios tanto en la operación como en factores externos pueden hacer de un sistema de despacho el mejor o peor.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Alarie, S., & Gamache, M. (2002). Overview of Solution Strategies Used in Truck Dispatching Systems for Open Pit Mines. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 16(1), 59–76.
- Banks, J. (1999). Discrete Event System Simulation. *Winter Simulation Conference*, 7–13.
- Chaowasakoo, P. (2017). Digitalization of mine operations: Scenarios to benefit in real-time truck dispatching. *International Journal of Mining Science and Technology*.
- CODELCO. (2005). Norma ASARCO. *Documento Interno, División Codelco Norte*.
- García, E., García, H., & Cárdenas, L. (2006). Simulación y Análisis De Sistemas Con Promodel. *Primera Ed. México Pearson Education*.
- Medina, I. (2013). *Tesis de Magister: Valores de corte multivariable en planificación minera*. Santiago, Chile: Universidad de Chile.
- Mena, R., Zio, E., Kristjanpoller, F., & Arata, A. (2013). Availability-based simulation and optimization modeling framework for open-pit mine truck allocation under dynamic constraints. *International Journal of Mining Science and Technology*, 23(1), 113–119.
- Munirathinarn, M., & Yingling, J. C. (1994). A review of computer-based truck dispatching strategies for surface mining operations. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 8(1), 1–15.
- Numaan, H. (2016). Cyber Threats to the Mining Industry. *Trend Micro Forward-Looking Threat Research (FTR) Team*.
- Orellana, F. (2018). *Tesis de Magíster: Modelo integrado de simulación y optimización para planes mineros de mediano plazo en minería a cielo abierto*. Santiago, Chile: Universidad de Chile.
- Soofastaei, A. (2015). The Effect of Average Truck Speed on Fuel Consumption in Surface Mines. *Engineering and Mining Journal*.
- White, J., & Olson, J. (1992). On improving truck/shovel productivity in open pit mines. *23rd APCOM Proceedings*.