

Modelo integrado de simulación y optimización para planes mineros de corto plazo en minería a cielo abierto

F. Orellana, N. Morales, E. Jélvez

Laboratorio de Planificación Minera Delphos, Departamento de Ingeniería de Minas & Advanced Mining Technology Center - AMTC, Universidad de Chile.

ABSTRACT: Haulage system in open pit mining corresponds mainly to shovel-truck type systems, which can represent a high percentage of the operating cost of the mine. In addition, long-term open-pit mining tends to lower productivities because of deepening extraction, so improving the efficiency and productivity of the equipment is essential. However, these systems are complex to analyze, which is due both to the existing operational uncertainty and to the internal interactions that the equipment has. This paper proposes an integrated simulation and optimization model that maximizes productivity in the extraction of material, which is achieved by optimizing the dispatch of trucks during the simulation, subject to operating conditions in real time. Different dispatch strategies are presented and compared, and the results show that the use of this integrated approach translates into better operating results than deterministic methods and traditional simulation.

RESUMEN: El sistema de transporte de materiales en minería a cielo abierto corresponde principalmente a sistemas del tipo pala-camión, los que pueden llegar a representar un alto porcentaje del costo operativo de la mina. Además, la minería a cielo abierto en el largo plazo tiende a productividades menores debido a la profundización de la extracción, por lo que mejorar la eficiencia y productividad de los equipos resulta fundamental. Sin embargo, estos sistemas son complejos de analizar, lo cual se debe tanto a la incertidumbre operacional existente como a las interacciones internas que poseen los equipos. En este trabajo se propone un modelo integrado de simulación y optimización que maximiza la productividad en la extracción de material, lo cual se logra optimizando el despacho de camiones durante la simulación, sujeto a las condiciones de operación en tiempo real. Se presentan y comparan distintas estrategias de despacho y los resultados muestran que el uso de este enfoque integrado se traduce en mejores resultados de operación, respecto a métodos deterministas y simulación tradicional.

1 INTRODUCCIÓN

El sistema pala-camión corresponde al sistema más utilizado para la actividad de transporte de material en minería a cielo abierto a nivel mundial, debido a su flexibilidad de operación, además, tiene un bajo costo de inversión inicial comparado con los otros sistemas de manejo de materiales, pero su costo es alto, debido a la cantidad de equipos utilizados, llegando a representar alrededor del 50-60% de los costos operacionales, como ha sido reportado por varios autores: Alarie & Gamache (2002), Ercelebi & Bascetin (2009) y Upadhyay & Askari-Nasab (2016). Debido a la incertidumbre asociada a los equipos y a las interacciones existentes, resulta complejo analizar este sistema, siendo uno de los principales problemas a enfrentar la utilización eficiente de la flota de carguío y transporte, con

el objetivo de minimizar los costos y maximizar la eficiencia. Los métodos deterministas no son apropiados para analizar este tipo de sistemas, debido a que poseen interacciones internas entre equipos que fallan de manera aleatoria (Torkamani, 2013), por lo que herramientas como simulación de eventos discretos resultan apropiadas para determinar dichas interacciones, aun cuando tiene la limitante de que no optimiza y sólo emula la operación (Banks, 1984).

La incertidumbre operacional tiene impacto en los resultados del plan minero y la principal fuente de variabilidad viene de los eventos y las reasignaciones: se entiende por eventos las fallas y mantenimientos de los equipos, cambios de turno, horarios de colación, términos de explotación de un polígono, entre otros; y por reasignaciones, a cualquier adecuación de los recursos (Manríquez et al., 2015).

Considerando todo lo anterior, se propone una metodología que integra de forma iterativa un modelo de simulación de la operación a cielo abierto y un modelo de optimización del despacho, el cual reasigna la flota cada cada vez que un evento importante ocurre durante la simulación, generando un nuevo despacho en tiempo real.

2 MODELO DE OPTIMIZACIÓN DEL DESPACHO

El modelo de optimización utilizado busca maximizar la productividad de la flota de camiones dentro de un circuito de n puntos de carga y m puntos de descarga, asignando a cada camión un par origen-destino.

La productividad de un equipo corresponde a la cantidad de material que se puede procesar en un tiempo determinado. Consideremos dos tipos de productividades, de carguío y de transporte: la productividad P_i del equipo de carguío en el frente de carga i , y la productividad $P_{k[i,j]}$ del camión k en el circuito $[i,j]$, que va desde el frente de carga i al frente de descarga j . Dichas productividades dependen, entre otros, de la carga promedio, del tiempo de carga/descarga, distancias, velocidades y la disponibilidad del equipo, según la norma ASARCO (ver sección Modelo de Simulación).

Cabe destacar la diferencia entre la productividad de un equipo y el rendimiento del mismo, correspondiendo este último a la productividad por unidad de tiempo.

El problema de optimización que maximiza la productividad de la flota viene dado por:

$$(P) \max \sum_{ijk} \sum_i \sum_j P_{k[i,j]} X_{k[i,j]} - C \cdot \sum_j \mu_j \lambda_j \tag{1}$$

$$\text{s.a.} \quad \sum_k \sum_j P_{k[i,j]} X_{k[i,j]} \leq P_i \quad \forall i \in I \tag{2}$$

$$\sum_k \sum_i P_{k[i,j]} T \geq M_j (1 - \mu_j) \quad \forall j \in J \tag{3}$$

$$\sum_i \sum_j X_{k[i,j]} \leq 1 \quad \forall k \in K \tag{4}$$

$$\sum_i \sum_j X_{k[i,j]} = 0 \quad \text{si } k = k' \quad k' \in K \tag{5}$$

$$\sum_k X_{k[i,j]} \leq N_{camiones} \tag{6}$$

$$\sum_k \sum_j X_{k[i,j]} = 0 \quad \text{si } i = i' \quad i' \in I \tag{7}$$

Donde la variable de decisión viene dada por:

$$X_{k[i,j]} = \begin{cases} 1 & \text{si el camión } k \text{ es asignado al circuito } [i, j] \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

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

M_j = Tonelaje requerido en destino j .

I = Conjunto de frentes de carga.

J = Conjunto de frentes de descarga.

K = Conjunto de equipos de transporte.

C = Constante de productividad [t/h].

μ_j = Variable de holgura de incumplimiento del plan en frente de descarga j .

λ_j = Prioridad del destino j .

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

El significado de cada una de las ecuaciones es: (1) La función objetivo, que busca maximizar la productividad total, penalizando las desviaciones del cumplimiento del plan. (2) La productividad total esperada de los equipos de transporte en el frente i no puede exceder la productividad del cargador. (3) La producción esperada en el frente de descarga j debe ser mayor o igual que el valor planificado en ese mismo destino, penalizado por la variable de holgura μ_j . Esto se realiza con el fin de cumplir el plan minero tanto como sea posible, permitiendo una holgura mínima en la desviación. (4) El equipo de transporte debe ser asignado, a lo más, a un circuito $[i, j]$. (5) Si el camión k' no se encuentra disponible, se debe agregar esta restricción al problema para que este equipo no pueda ser utilizado. (6) Se debe respetar no sobrepasar la cantidad máxima de camiones disponibles. (7) Si el equipo de carguío i' no se encuentra disponible, se debe agregar esta restricción al problema para que este equipo no pueda ser utilizado.

3 MODELO DE SIMULACIÓN

Ahora se describen las componentes principales del modelo de simulación, como los parámetros que posee y la lógica interna de los equipos. Además, se describe la integración del modelo de optimización con el de simulación y se detallan los tipos de despacho a evaluar.

Dentro de la dinámica operacional del sistema de transporte de materiales, se define un objeto como cada uno de los elementos que existe dentro de la simulación, en nuestro caso, equipos, frentes y locaciones. Dependiendo del tipo de objeto se define un estado operacional, que es la situación en que se encuentra cada objeto. Estos estados se encuentran totalmente definidos si las siguientes características están designadas: (i)

para los equipos se requiere posición y la tarea que están realizando actualmente; (ii) para las frentes, los equipos de carguío asignados; y (iii) para las locaciones, los equipos existentes en el lugar.

Por otro lado, los eventos operacionales se definen como sucesos que provocan que el estado operacional de los equipos cambie. Los eventos pueden ser fallas del equipo, cambio de turno, colación, cumplimiento del plan en el frente de extracción y la finalización del plan.

Por su parte, los parámetros operacionales son datos que describen alguna propiedad de una operación. Dichos parámetros pueden ser valores fijos o venir dados por distribuciones. Los parámetros operacionales utilizados son: (i) factor de carga, cantidad de material que el equipo de carguío carga en el camión; (ii) tiempo que el equipo de carguío emplea en cargar el camión, no incluye tiempos de aculatamiento ni esperas una vez posicionado el camión; (iii) tiempo que emplea el camión desde que entra a la locación de carga hasta posicionarse en el punto de carga, sin incluir las demoras por detenciones al realizar la trayectoria ni los tiempos de cola; (iv) tiempo que emplea el camión en descargar su carga actual, no incluye tiempos de aculatamiento en descarga; (v) tiempo que emplea el camión desde que entra a la locación de descarga hasta posicionarse en el punto de descarga, sin incluir las demoras por detenciones al realizar la trayectoria ni los tiempos de cola; (vi) tiempo de viaje entre locaciones de carga y descarga, se distingue entre tiempos de viaje en estado cargado y descargado.

En la Figura 1 se muestra la distribución de tiempo según el modelo de la norma ASARCO (Mena et al., 2013), que incluye: (i) nominal, tiempo en que se produce la medición, correspondiente al espacio muestral, y que depende del tiempo de continuidad de la producción en la faena; (ii) disponible, tiempo en que el equipo se encuentra capacitado de realizar tareas; (iii) fuera de servicio, tiempo en que el equipo no se encuentra disponible, ya sea por una mantención programada o fallas imprevistas en que haya incurrido; (iv) operativo, tiempo en que el equipo se encuentra apto para realizar tareas y cumple con actividades asociadas a la operación; (v) reservas, tiempo en que el equipo se encuentra disponible para realizar alguna tarea, pero que por alguna condición específica no está siendo utilizado; (vi) efectivo, tiempo en que el equipo realiza las tareas acordes a su funcionalidad; (vii) pérdidas operacionales, tiempo en que el equipo no realiza las tareas para

las que fue diseñado, debido principalmente a tiempos de espera del equipo; (viii) demoras programadas, 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 los cambios de turno o tiempos de colación; y (xi) demoras no programadas, 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.

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

Figura 1: Modelo de tiempo según norma ASARCO.

Existen ciertos indicadores de tiempo que derivan de la norma ASARCO, los que corresponden a: (i) **disponibilidad**, porcentaje de horas nominales en que el equipo estuvo en condiciones de ser operado. Sirve para establecer la capacidad de mantención y el marco de referencia funcional que deberá enfrentar la operación; (ii) **utilización (base nominal)**, porcentaje sobre las horas nominales en que el equipo realiza tareas efectivas; (iii) **utilización efectiva (base disponible)**, porcentaje sobre las horas disponibles en que el equipo realiza tareas efectivas; (iv) **utilización operativa**, porcentaje sobre las horas disponibles en que el equipo se encuentra operativo. (v) **factor de utilización**, es el porcentaje sobre las horas operativas en que el equipo realiza tareas efectivas.

La incertidumbre operacional se asocia a: (i) parámetros operacionales, aquellos que tienen relación con tiempos, velocidades y capacidades de los componentes utilizados en la operación; (ii) eventos operacionales, aquellos que afectan a la efectividad de los equipos, como detenciones programadas y fallas operacionales. Para generar cierta aleatoriedad, tanto en la incertidumbre asociada a parámetros como a eventos operacionales, se debe caracterizar la incertidumbre mediante estudios estadísticos de datos (Torkamani, 2013).

En base a la metodología propuesta por Banks (1984), se realiza la lógica de simulación de los equipos en una operación minera a cielo abierto, cuyo diagrama general se puede observar en la Figura 2.

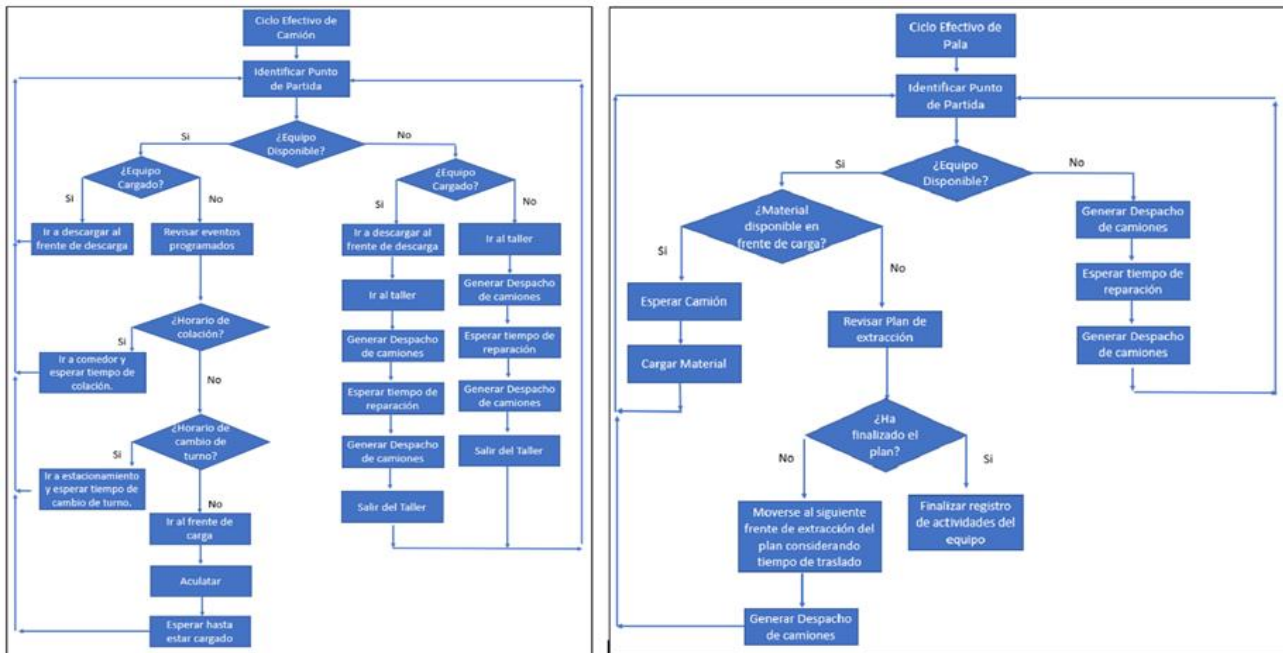


Figura 2: Lógica de simulación de los camiones (izquierda) y de los equipos de carguío (derecha).

4 DSIM OPEN PIT

DSIM Open Pit (en adelante DSIM OP) es una herramienta de planificación que permite estimar la producción de un plan minero a partir de los siguientes tres elementos básicos: el layout de la mina (frentes de carga y descarga, rutas), la flota de equipos de carga y transporte y un plan minero que indica cuánto se desea enviar desde cada frente a cada potencial destino. A partir de estos elementos, DSIM OP realiza simulaciones de eventos discretos del sistema de manejo de material, entregando reportes en términos de producción, velocidades y tiempos de ciclo.

Una de las principales ventajas de DSIM OP es que permite al usuario modelar de manera sencilla la operación de una mina a cielo abierto. Ha sido principalmente utilizado en minería a cielo abierto, donde se han desarrollado estudios de cálculo de productividad de camiones (convencionales y autónomos), de palas y análisis de tiempos de operación, cuyos resultados han sido validados por la industria al realizar simulaciones de corto plazo, en Divisiones de CODELCO como Gabriela Mistral, Radomiro Tomic y Andina, además de operaciones como Escondida, en el caso de BHP. Por otro lado, debido a que es un software programado por los desarrolladores del Laboratorio de Planificación Minera DELPHOS,

permite también el estudio de nuevas estrategias integradas al movimiento de material, como condiciones ambientales (nieve), que pueden inhabilitar los caminos por donde se movilizan los camiones de extracción (Manríquez et al., 2018), o sistemas de manejo de material distintos como In-pit Sizing and Conveying (IPSC), In pit Crusher and Conveying (IPCC), High Angle Conveying (HAC), entre otros, utilizando la versión en código fuente de DSIM (DSIM CORE).

5 MODELO INTEGRADO DE SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DEL DESPACHO

A partir de la Figura 2 se aprecian determinadas situaciones en que los equipos deben generar un despacho de camiones, por lo que es en este tipo de instancias donde se genera el vínculo entra la simulación y la optimización. Al inicio se resuelve el problema de optimización del despacho, con lo cual todos los camiones presentes en la simulación saben hacia dónde dirigirse y en qué circuito van a trabajar. Durante la simulación pueden ocurrir los siguientes eventos: (i) falla/reparación de equipos de carguío y/o camiones; (ii) cumplimiento del plan en una frente de carga.

Ante cada uno de estos eventos, se resuelve nuevamente el problema de optimización, considerando las condiciones actuales de la operación, lo cual genera un nuevo despacho. La

simulación se mantiene con este despacho hasta que otro evento ocurra, momento en que se repite nuevamente este ciclo.

Se considerarán tres tipos de despachos para comparar las productividades que se pueden alcanzar en la operación, a saber:

Optimización Continua: en este caso se realiza una asignación resolviendo el problema de optimización (P) que maximiza la productividad y cada vez que eventos como fallas de equipo, reparaciones y variaciones del *layout* ocurren en la simulación, se resuelve nuevamente el problema (P), considerando las condiciones actuales de la mina. Se realiza usando DSIM CORE.

Optimización Inicial: en este caso también se realiza una asignación resolviendo el problema de optimización (P) que maximiza la productividad al inicio, en sólo en una primera iteración y no se ejecuta nuevamente, por lo que se mantiene la asignación de los camiones fija durante la simulación. Una excepción ocurre cuando la pala cambia de frente de carga durante la simulación, o cambia su destino, en dichos casos se debe actualizar el despacho. Se realiza usando DSIM CORE.

Despacho priorizado: corresponde al despacho que utiliza por defecto el *software* DSIM OP, el cual no resuelve ningún problema de optimización e intenta saturar los equipos de carguío por medio de criterios de distancia y prioridad. El *software* tiene como *input* la productividad en el frente de carga, además de la prioridad de dicho frente. Inicialmente ningún camión está asignado a los equipos de carguío, por lo que comienzan a asignarse de forma secuencial, verificando si la pala no está saturada y la prioridad de ésta.

6 CASO ESTUDIO

El caso de simulación a corto plazo busca estimar la productividad máxima de la operación y comparar los resultados de las diferentes estrategias de despacho. En este caso se considera la utilización de tres frentes de carga (FC-1, FC-2, FC-3) y tres frentes de descarga (chancador, botadero y pila de acopio o *stock*), un estacionamiento para realizar los cambios de turno, un comedor para colaciones y un taller para reparar los camiones. La configuración espacial de cada una de las componentes se puede observar en la Figura 3.

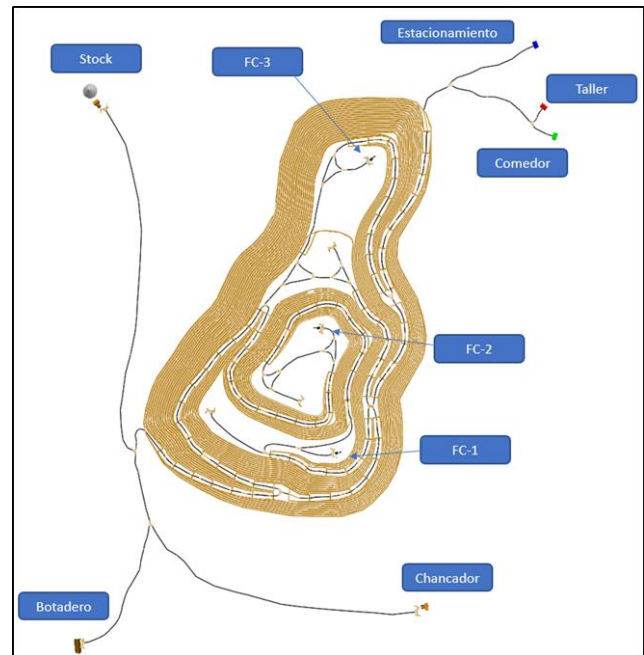


Figura 3: Vista en planta del layout simulación.

Se considera además que cada frente de carga posee infinito material para cargar y que los equipos de carguío se mantendrán en esa frente durante toda la simulación. La asignación entre frentes y sus distancias se pueden observar en la Tabla 1.

Tabla 1: Distancia entre frentes de carga y descarga. Ejercicio a corto plazo.

Frente de carga	Frente de descarga	Distancia [km]
FC-1	Chancador	4.60
FC-2	Botadero	4.86
FC-3	Stock	4.94

Las fallas mecánicas de los equipos de carguío y transporte se distribuyen de forma aleatoria según una distribución de probabilidad que está dada por los *inputs*. Por otro lado, se consideran demoras programadas como cambios de turno y colaciones, cuyo inicio y duración se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Demoras programadas consideradas.

Eventos	Hora de inicio [h]	Duración [h]
Cambio de turno 1 - 2	10.0 – 22.0	0.5
Colación 1 - 2	6.0 – 18.0	1.0

La mayoría de los *inputs* utilizados en este ejercicio se obtienen desde Mena et al. (2013), donde están las distribuciones de los tiempos entre fallas y reparación, tanto de palas como de camiones. Otros parámetros utilizados para la flota de camiones y para los equipos de carguío

se pueden observar en la **Error! Reference source not found.** y **Error! Reference source not found.**, respectivamente.

Tabla 3: Inputs generales de flota de camiones.

Parámetros	Valor
Velocidad cargado - descargado [km/h]	25.0 – 30.0
Tiempo aculatamiento en frente de carga y descarga [s]	30.0
Disponibilidad promedio [%]	83.9 %

Tabla 4: Inputs generales de equipos de carguío.

Parámetros	Valor
Carga promedio [t]	330.0
Tiempo de carga [s]	150.0
Disponibilidad [%]	87.5%

Se debe tener registros de las fallas de los equipos para considerar el efecto de disponibilidad en la asignación. Las distribuciones de los tiempos medios entre fallas y tiempos medios de reparación, para cada uno de los equipos de carguío y transporte, se puede observar en Orellana (2018), págs. 86-87.

Por otro lado, el problema de optimización considera una productividad o meta operativa en cada destino (budget), por lo que se debe considerar esto como un *input* del problema. Las producciones esperadas para los frentes de descarga que se consideran para este escenario se pueden observar en la **Error! Reference source not found.**

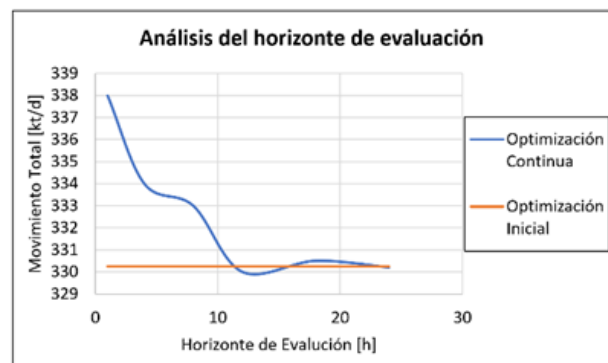
Tabla 5: Producción esperada (meta operativa) en frente de descarga.

Frente de descarga	Producción diaria [kt]
Botadero	90.0
Chancador	110.0
Stock	100.0

Finalmente se debe mencionar que la posición inicial de los camiones en la simulación es aleatoria entre el comedor, el estacionamiento y el taller, y que se consideran 100 réplicas para efectos de realizar las comparaciones entre los distintos sistemas de despacho.

7 RESULTADOS Y ANÁLISIS

Inicialmente se analiza el rendimiento que tiene el despacho de optimización continua en función del horizonte de evaluación productivo, debido a que este despacho considera las posiciones relativas de los equipos en el *layout* a la hora de resolver el problema de optimización, calculando cuál es la combinación más productiva en este horizonte. De la Figura 4 se observa que a medida que el horizonte de evaluación aumenta, el modelo comienza a realizar asignaciones que tienden a la solución inicial que considera la operación en un estado estacionario a largo plazo. En adelante, se



considera un horizonte de evaluación igual a 1 hora debido a que se obtiene un máximo productivo.

Figura 4: Productividad en función del horizonte de evaluación (30 camiones).

Respecto a la simulación de las diferentes estrategias de despacho, inicialmente se realiza un análisis de saturación de la flota, el cual consiste en determinar la productividad del sistema al ir agregando camiones a la simulación. El resultado de esto se puede observar en la Figura 5. Se observa que el despacho según optimización continua siempre tiene un rendimiento mayor al del despacho priorizado y al de la optimización inicial, exceptuando en la última parte en donde se alcanza la saturación del sistema y todos los despachos obtienen el rendimiento máximo (366 [kt/d] para esta configuración). En este caso, el rendimiento máximo considera tener entre 12 a 13 camiones asignados por circuito, lo cual es un resultado netamente teórico ya que las operaciones mineras a cielo abierto utilizan aproximadamente entre 7 a 10 camiones por pala, debido a que la ganancia productiva no compensa el costo operativo de una flota numerosa.

El aumento porcentual de productividad en el escenario de una asignación de 10 camiones

respecto al despacho priorizado es de un 3.4% en el caso de optimización inicial, y si este problema se ejecuta con una frecuencia determinada en la simulación (optimización continua), el aumento productivo puede ser cercano a un 6.0%.

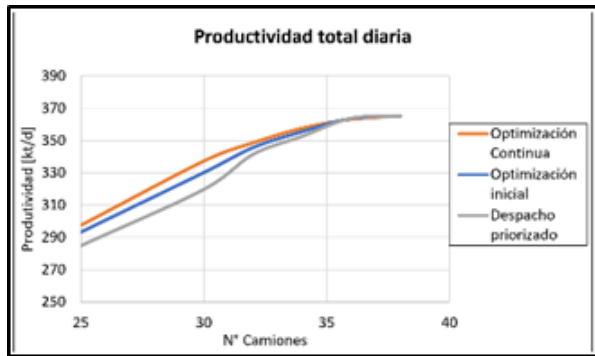
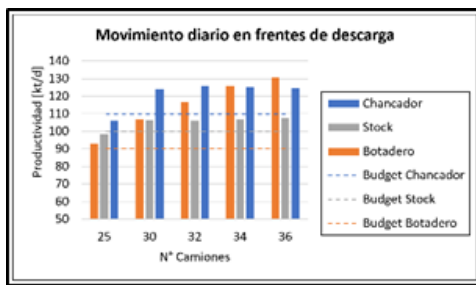
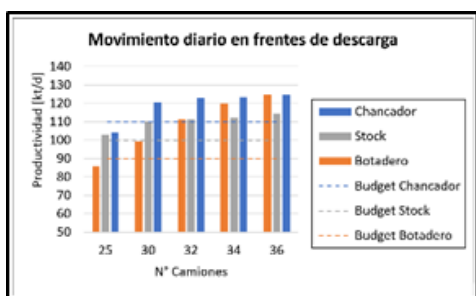


Figura 5: Movimiento total en función del número de camiones.

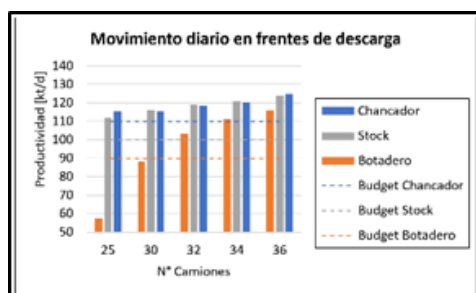
Por otro lado, la distribución del tonelaje extraído y llevado a las distintas frentes de carga para cada una de las estrategias de despacho se puede observar en la Figura 6.



(a)



(b)

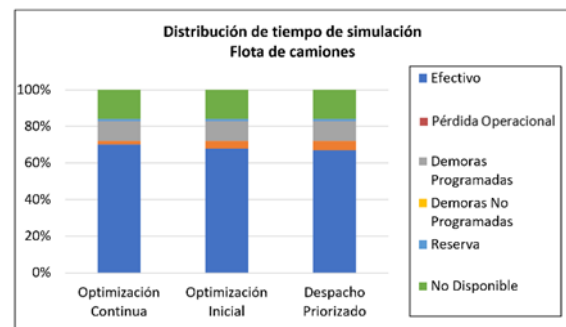


(c)

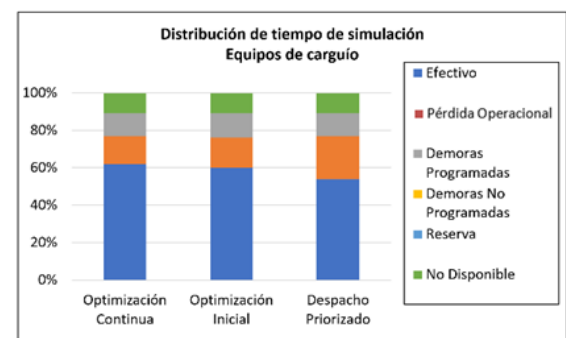
Figura 6: Productividad según destino, considerando (a) optimización continua, (b) optimización inicial, y (c) despacho priorizado.

Se observa que las estrategias de despacho de optimización continua e inicial modifican sus asignaciones de camiones en los distintos destinos, para cumplir al menos con el *target* solicitado (110 [kt/d] en chancador, 100 [kt/d] en stock y 90 [kt/d] en botadero), mientras que el despacho priorizado sólo se preocupa de saturar las palas siguiendo un orden determinado: chancador y stock.

Desde la simulación se obtienen los tiempos efectivos, las pérdidas operacionales, las demoras programadas, el tiempo en reserva y el tiempo no disponible, tanto de la flota de camiones como de los equipos de carguío. La distribución de los tiempos de simulación para la flota de camiones, considerando 30 equipos para las 3 estrategias de despacho, se puede observar en la Figura 7-a. Del mismo modo, se grafican los tiempos de simulación para los equipos de carguío, en la Figura 7-b.



(a)



(b)

Figura 7: Distribución de tiempos de simulación: (a) Flota de camiones (30 camiones), (b) equipos de carguío.

Respecto a los camiones, se observa que su tiempo efectivo encuentra su mayor valor cuando se considera la estrategia de despacho de optimización continua (70%), mientras que su

menor valor ocurre cuando se considera el despacho priorizado (67%). Además, se puede observar que el tiempo no disponible es constante en las tres estrategias de despacho, por lo que teniendo la misma disponibilidad el equipo tiene una mayor utilización en la estrategia de optimización continua.

Para los equipos de carguío, la tendencia observada es idéntica a la de los camiones, en el sentido que se tienen mejores resultados para las estrategias de despacho que consideran el problema de optimización, lo cual se debe a una mejor asignación de los recursos.

Al obtener los tiempos de simulación, se pueden calcular índices operativos como utilización y disponibilidad, tanto de la flota de camiones como de los equipos de carguío. La utilización (en base disponible) de los equipos se puede observar en la Figura 8: ésta es mejor en la estrategia de despacho según optimización continua porque toma mejores decisiones en la asignación del circuito de los equipos. Se observa que, a medida que el número de camiones aumenta, la utilización de la flota de camiones disminuye, mientras que la utilización de los equipos de carguío aumenta. Lo anterior se debe a que cuando hay menos camiones, existe menos congestión en las rutas y menos colas en los frentes de carga, por lo que los camiones tienen menores pérdidas operacionales y son más efectivos, mientras que las palas aumentan su tiempo de espera debido a la falta de camiones, lo que hace que tengan una menor utilización.

Figura 8: Utilización de (a) flota de camiones y (b) equipos de carguío, en función del número de camiones, para cada estrategia de despacho.

8 CONCLUSIONES

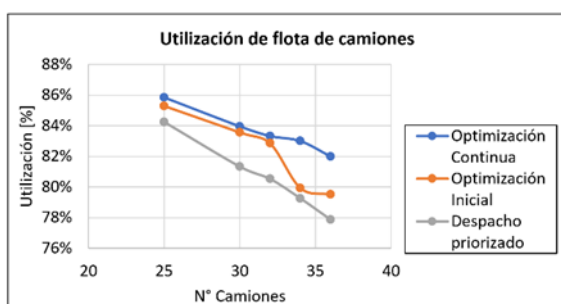
En este trabajo se propone un modelo integrado de simulación y optimización del despacho para operaciones mineras a cielo abierto, con el fin de aumentar la productividad del sistema de transporte de materiales (pala-camión). La metodología propone la interacción de un modelo de optimización que genera el despacho óptimo de los camiones y un modelo de simulación que evalúa esta asignación en tiempo real, a través de tres estrategias de despacho, a saber, optimización continua, optimización inicial y despacho priorizado, las que se implementan y se comparan entre sí.

Las curvas de saturación muestran que las estrategias de despacho como optimización continua y optimización inicial siempre presentan una productividad superior a la estrategia de despacho priorizado, excepto cuando se alcanza la saturación, llegando a obtener en este caso de estudio mejoras de hasta un 6 % de productividad en los casos en que el circuito no se encuentra saturado. Este aumento de productividad está dado tanto por considerar que los equipos de transporte son distintos en términos de disponibilidad, como también por recalcular el despacho cuando ocurren variaciones operacionales importantes, siendo este último el factor de mayor importancia.

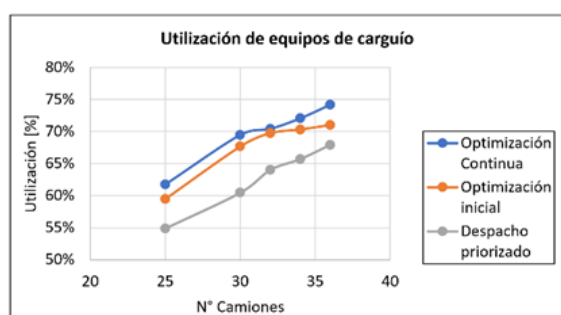
Como trabajo futuro, se podría buscar una mejor representación de la productividad, incorporando distintos perfiles de velocidad en la ruta y que, en vez de ser estimados, sean tomados directamente de la simulación para tener un valor más preciso a la hora de resolver el problema. Es más, esta metodología se podría extender al largo plazo, donde se podría observar la pérdida productiva real que tendría la operación, con el objetivo de retroalimentar los planes de producción y mejorar su adherencia.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte de CONICYT/PIA Proyecto AFB180004 – Advanced Mining Technology Center – Universidad de Chile.



(a)



(b)

REFERENCIAS

- Alarie, S., & Gamache, M. (2002). *Overview of solution strategies used in truck dispatching system for open pit mines*. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, Vol. 16, No. 1, págs. 59-76.
- Banks, J. (1984). *Discrete Event System Simulation*. Pearson Education India.
- Ercelebi, S. & Bascetin, A. (2009). *Optimization of shovel-truck system for surface mining*. J. South Afr. Inst. Min. Metall. Vol. 109, No. 7, págs. 433-439.
- Manríquez, F. (2015). *Tesis de Magíster: Evaluación de la incertidumbre geológica en planes mineros a corto plazo en faenas a cielo abierto*. Santiago, Chile.: Departamento de Ingeniería de Minas, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Manríquez, F.; Morales, N.; Pinilla, G.; Piñeyro, I. (2019). *Discrete event simulation to design open-pit mine production policy in the event of snowfall*. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, Vol. 33, No. 8, págs. 572-588.
- 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, Vol. 23, No. 1, págs. 113-119.
- 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.: Departamento de Ingeniería de Minas, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Torkamani, E. (2013). Master of Science Thesis: *Linkage of Truck-and-shovel operations to short-term mine plans using discrete event simulation*. Edmonton, Canada.: Department of Civil & Environmental Engineering, University of Alberta.
- Upadhyay, S.P. & Askari-Nasab, H. (2016). *Truck-shovel allocation optimisation: a goal programming approach*. Mining Technology, Vol. 125, No. 2, págs. 82-92.