

Selección y Asignación Óptima de Equipos de Carguío para el Cumplimiento de un Plan de Producción en Minería a Cielo Abierto

Héctor González
Laboratorio de Planificación Minera
DELPHOS, AMTC, DIMIN,
Universidad de Chile
Avda. Tupper 2007, Santiago, Chile
Email: hgonzalez@delphoslab.cl

Nelson Morales
Laboratorio de Planificación Minera
DELPHOS, AMTC, DIMIN,
Universidad de Chile
Avda. Tupper 2007, Santiago, Chile
Email: nmorales@amtc.cl

Andrés Parra
Laboratorio de Planificación Minera
DELPHOS, AMTC, DIMIN,
Universidad de Chile
Avda. Tupper 2007, Santiago, Chile
Email: aparra@delphoslab.cl

Resumen—Una de las etapas fundamentales en el proceso minero es la planificación, proceso en el cual se determina, entre otras cosas, las capacidades de producción y la infraestructura requerida.

La búsqueda por una adecuada ejecución de los planes mineros está fuertemente asociada a la adquisición y uso de equipos. La decisión de qué equipos usar, cuantos se deberían comprar y donde deberían estar trabajando a lo largo de la vida de la mina tiene un fuerte impacto en la rentabilidad del negocio y en la producción alcanzada. Estas decisiones se vuelven incluso más importantes al considerar la gran escala en la cual se trabaja en minería y al uso intensivo de equipos que requieren los procesos asociados.

Este trabajo busca cuantificar la diferencia generada cuando se considera la capacidad asociada a los equipos de carguío para la generación de un plan de producción con respecto a un plan de largo plazo original. Para determinar los planes se consideró la asignación banco/pala óptima, la cual se obtuvo mediante la construcción de un problema de optimización con restricciones en torno a las características de los equipos de carguío, el espacio disponible de operación y la producción esperada.

Los resultados del estudio muestran que los planes de producción obtenidos son distintos a los estimados en el plan de largo plazo, mostrando la variabilidad que se genera en la producción al considerar los equipos de carguío. La presencia de estas fluctuaciones puede indicar que aún se pueden considerar un mayor número de variables dentro la planificación que pueden permitir construir planes más robustos con el fin de garantizar una operación confiable en términos de producción y alimentación a la planta.

I. INTRODUCCIÓN

El carguío y transporte es un proceso productivo de alta importancia dentro del negocio minero, según [1], debido principalmente a la gran magnitud de los costos a los cuales está asociado. Esto es consecuencia de la gran cantidad de equipos involucrados, tanto para el carguío como el transporte, el alto grado de mecanización, menor rendimiento productivo por equipo y, sobre todo, a que es un proceso que se encuentra a lo largo de toda la vida de la mina. Extraer la roca desde la mina no es lo mismo que extraer bloques en un modelo. Se deben considerar aspectos relacionados con los equipos mecánicos que se utilizarán para extraer el material y los

equipos para trasladarlo desde el fondo de la mina hacia su destinos. La decisión sobre *qué* equipos utilizar, *cuántos* comprar y *dónde* deben estar operando impacta fuertemente el valor del negocio minero. Debido a lo anterior es que la creación y resolución de un modelo que logre responder a las tres preguntas mencionadas motiva este trabajo. Por otro lado, la optimización de los equipos está fuertemente relacionada con la optimización del pit, según [2]. Mejorando la selección de equipos se disminuyen los costos mina y aumenta la productividad, entre otras cosas, y por tanto pueden cambiar los límites del pit.

El objetivo de este trabajo es la creación de una metodología para apoyar el desarrollo de un plan de asignación de equipos de carguío de manera óptima que permita el cumplimiento de un plan de producción. Para lograrlo, se cuenta con un proyecto real que será utilizado como plan de producción base.

I-A. Metodología

En primer lugar se realizará una revisión de los datos con el fin de crear el gráfico de agotamiento de mineral a lo largo de la vida mina. Dado que se busca la asignación de equipos de carguío a su lugar de trabajo se deberá contar con un catálogo de equipos con las características de interés; costos y capacidades entre otros. A continuación se trabajará en la construcción del modelo de optimización que determine la asignación de los equipos de carguío a las fases de producción a lo largo del tiempo tal que minimice los costos de producción. Por otro lado se construirá una solución de forma manual con el fin de medir las diferencias con los resultados provenientes del modelo construido, el cual utilizará las mismas consideraciones que el modelo. Ya con todos los parámetros e inputs del modelo definidos y la asignación manual terminada, se procede a correr el modelo. El resultado obtenido será comparado con la asignación manual y con el plan de producción base.

II. DESARROLLO DE MODELO

Dentro de la dinámica en la cual operan los equipos de carguío en una operación minera se pueden considerar numerosos factores que afectan la productividad:

- Disponibilidad Mecánica.
- Factores Operacionales.
- Espacio disponible de operación.
- Precedencias entre bancos de la misma y distintas fases.
- Requerimientos de alimentación a la planta de procesamiento.
- Metas de producción.
- Costos de producción y adquisición de equipos.
- Productividad de los equipos.

Por lo que si un modelo busca anticipar y predecir la producción alcanzada estos factores deben ser incorporados.

II-A. Variables

A continuación se presentan las variables de decisión para el modelo:

$$x_{pbft} = \text{porcentaje de tiempo } t \text{ que la pala } p \text{ está en el banco } b \text{ de la fase } f \quad (1)$$

$$\bar{x}_{pbft} = \begin{cases} 1, & \text{si la pala } p \text{ está en el banco } b \\ & \text{de la fase } f \text{ en el periodo } t \\ 0, & \text{si no} \end{cases} \quad (2)$$

$$z_{bft} = \begin{cases} 1, & \text{si el banco } b \text{ de la fase } f \\ & \text{está activa en el periodo } t \\ 0, & \text{si no} \end{cases} \quad (3)$$

$$\bar{z}_{bft} = \begin{cases} 1, & \text{si el banco } b \text{ de la fase } f \text{ terminó de} \\ & \text{extraerse en el periodo } t \text{ o posterior} \\ 0, & \text{si no} \end{cases} \quad (4)$$

$$w_{pt} = \begin{cases} 1, & \text{si compro la pala } p \text{ en el periodo } t \text{ o antes} \\ 0, & \text{si no} \end{cases} \quad (5)$$

$$\bar{w}_{pft} = \begin{cases} 1, & \text{si la pala } p \text{ está asignada a la fase } f \\ & \text{en el periodo } t \\ 0, & \text{si no} \end{cases} \quad (6)$$

La ecuación (1) es la variable de decisión que va cuantificando la producción asociada a cada equipo en operación mientras que las variables (2) a la (6) son utilizadas para regular las precedencias y las asignaciones de los equipos a la operación.

II-B. Función Objetivo

A continuación se presenta la función objetivo del modelo:

$$\min: \sum K_p \cdot w_{pt} \cdot FD_t + \sum_{p,t,f,b} C_p \cdot x_{pbft} \cdot Q_p \cdot D_p \cdot Fll_p \cdot FO_{bf} \cdot T_t \cdot FD_t \quad (7)$$

La función objetivo del modelo (7) busca minimizar los costos asociados a la adquisición de equipos de carguío (K_p) y el costo operacional (C_p) en función del tonelaje extraído. El tonelaje extraído en cada periodo (T_t) queda expresado por la multiplicación de la capacidad por hora del equipo (Q_p) por

los factores operacionales correspondientes (D_p :disponibilidad mecánica, Fll_p :factor de llenado, FO_{bf} :utilización), la fracción del periodo que está el equipo operando y la duración del periodo. Los valores son descontados en el tiempo utilizando el factor de descuento (FD_t) que corresponda a la duración del periodo. De esta manera se puede utilizar el modelo con periodos de días, semanas o meses.

II-C. Restricciones

Las variables están sujetas a diferentes restricciones con el objetivo de garantizar que la solución obtenida represente de la mejor manera posible la operación. En particular las restricciones indican que: la variable (1) no pueda superar la duración del periodo asignado; el movimiento de material asociado a la variable (1) debe cumplir la meta productiva para el final del total de periodos; los equipos solo pueden ser asignados si la variable (5) indica que el equipo está disponible; para comenzar los trabajos en un nuevo banco la totalidad del material de los bancos predecesores debe ser extraído, lo cual es indicado con la variable (4); las precedencias están dadas por la secuencia de bancos de la misma fase y distintas fases según criterios operacionales; para poder asignar tiempo de trabajo a un banco, el banco debe estar marcado como activo de acuerdo a la variable (3) y con un equipo asignado de acuerdo a la variable (2); para poder asignar un equipo a un banco se debe contar espacio disponible para su ingreso, el cual se ingresa como un input para cada banco y se va actualizando periodo a periodo de acuerdo al material extraído en ese sector; el total de mineral extraído debe cumplir con los requerimientos de la planta; hay un límite de asignación de un mismo equipo a distintos fases de trabajo en cada periodo;

III. RESULTADOS

III-A. Aplicaciones del Modelo

Con el objetivo de facilitar la representación y forma en que se presentan los resultados, se mostrará de manera simultánea los resultados referentes a la asignación manual de equipos y la obtenida con el modelo. Para esto se realizaron los siguientes ejercicios:

- A: Asignación manual de equipos seleccionando los de menor costo por tonelada.
- B: Asignación manual de equipos seleccionando los de menor inversión.
- C: Asignación de equipos según modelo considerando equipos de menor inversión.
- D: Asignación de equipos según modelo.
- E: Asignación de equipos según modelo con restricción de área.

Del Cuadro I se puede apreciar distintas facultades del modelo. En primer lugar, si se observa la diferencia entre los ejercicios B y C se puede notar la diferencia costos asociadas a la asignación de equipos. Estos casos presentan los mismos equipos, sin embargo, el modelo logra encontrar una mejor secuencia de extracción logrando disminuir los costos.

Cuadro I: Resultados generales

Ejercicio	Equipos Seleccionados	Gap de VAC con modelo [%]
A	2 P01 - 2 P12	-162.2
B	2 P01 - 2 P04 - P05	-42.4
C	2 P01 - 2 P04 - P05	-14.3
D	2 P01 - 2 P02 - 2 P03	-
E	2 P01 - 2 P03 - P04	-0.6

Entre los casos C y D se ve que frente a la misma meta productiva el modelo escoge distintos equipos para disminuir los costos sin comprometer la producción. Es en este caso, el que posee menores restricciones en torno a la selección de equipos en donde el modelo logra alcanzar los menores costos.

Otro resultado interesante mostrado en el Cuadro I es la diferencia entre el caso A y B, esto parece indicar que para el periodo de evaluación de 1 año el costo operacional no es tan relevante en relación al costo de adquisición en términos de decisión, ya que se ve la gran diferencia en el costo total. Esto quizás se revierta para cuando se evalúen varios años de operación, en donde el gran tonelaje a mover permita que el costo operacional sea parte importante de los costos totales.

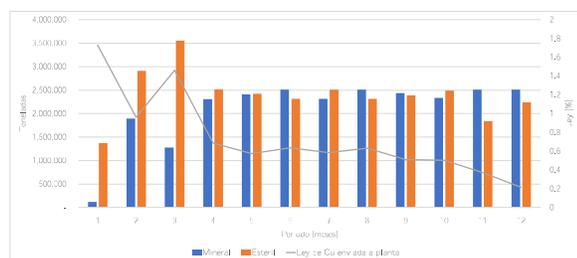


Figura 1: Plan de producción - Ejercicio E

En la Fig 1 se ve el plan de producción generado por la asignación de equipos del caso E. Se puede apreciar que los movimientos de material presentan un ramp-up los primeros periodos para estabilizarse en los siguientes. El plan cumple los requerimientos de planta a partir del 4to mes de producción, esto debido a las restricciones impuestas en las precedencias y en los espacios de operación.

III-B. Modelo vs Largo Plazo

Con respecto a la comparación con el plan de producción obtenido en la planificación de Largo Plazo mostrada en la Fig 2 se puede apreciar que para el mineral en las Fases 2 y 4 la extracción es más lenta que la estimada según el plan de Largo Plazo mientras que la Fase 1 lo hace más rápido después del periodo 4. Esto puede significar que al momento de poner en marcha el plan se presenten problemas con la alimentación de mineral a la planta, sobre todo los primeros meses.

IV. CONCLUSIÓN

La metodología desarrollada permite, dada una flota de equipos, obtener una asignación a los lugares de trabajo de

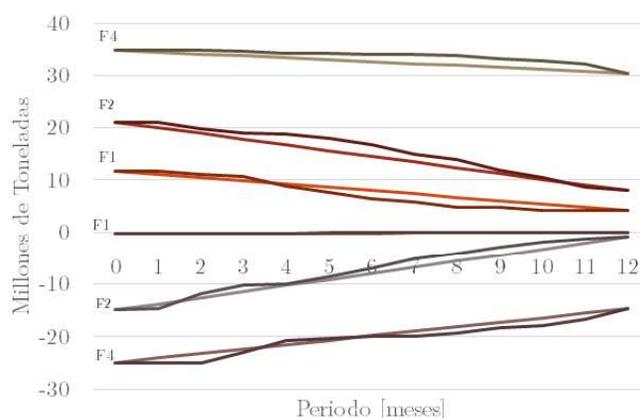


Figura 2: Plan de producción - Ejercicio E

los distintos equipos de carguío, encontrando una secuencia minera de corto/mediano plazo que cumple restricciones de operación y de producción. De esta manera se puede obtener una guía para el planificador, ahorrando tiempo y recursos. Por otro lado, el modelo también puede decidir qué equipos comprar (para el caso de un proyecto greenfield) y asignarlos a los sectores de trabajo.

La consideración de la capacidad de movimiento asociada a equipos reales en vez de a un movimiento diario definido permite obtener un plan que se ajuste mejor a lo que sucede en realidad en la operación minera, permitiendo estimar ingresos y costos de manera más exacta así como también determinar vulnerabilidades en la alimentación a la planta.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer Gonzalo Nelis y a Manuel Rodríguez, miembros del laboratorio Delphos de Planificación Minera por su ayuda a lo largo de este trabajo. También al director del laboratorio, Nelson Morales, por la confianza y apoyo que me dió desde el primer momento.

Este trabajo fue financiado gracias a CONICYT con el Proyecto Basal FB0809 del AMTC y al Proyecto CORFO 14IDL2 30132.

REFERENCIAS

- [1] B. V. A. Le-Feaux, R. Galdames, *Diseño y operaciones de minas a cielo abierto*, 1st ed., 2008, vol. 1, ch. 13, pp. 165 – 167.
- [2] G. H. Bozorgebrahimi. E. Hall, R. A. Blackwell, "Sizing equipment for open pit mining - a review of critical parameters," no. 3, pp. 2–3, 2003.