

Optimización de Planes de Producción en Panel Caving incluyendo Actividades de Preparación y Desarrollo

Javier Vásquez Candia
Laboratorio de Planificación Minera
DELPHOS, AMTC, DIMIN
Universidad de Chile
Avda. Tupper 2007, Santiago, Chile
Email: jvasquez@delphoslab.cl

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

Javier Cornejo Gonzalez
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Universidad de Chile
Avda. Tupper 2007, Santiago, Chile

Abstract—Los planes de producción en minería subterránea determinan dónde, cuándo y cómo extraer el mineral considerando factores técnicos y económicos. Sin embargo, usualmente, la Preparación Minera (construcción de la infraestructura necesaria para recuperar el mineral en los puntos de extracción) es realizada separadamente de la Planificación de la Producción (extracción de mineral), lo cual puede afectar el cumplimiento del Plan de Producción de Mineral. Por lo anterior, para determinar planes de producción factibles es necesario considerar la mayor cantidad de variables que influyen en la elaboración de dichos planes. El objetivo de este trabajo es resolver un problema de producción subterránea de una mina explotada por Panel Caving, considerando actividades de Preparación Minera y Extracción de Mineral simultáneamente. Para conseguir lo anterior, una metodología es propuesta que integra ambos procesos, más los aspectos operacionales más relevantes en la construcción de un plan de producción. Luego, una herramienta computacional basada en programación entera mixta (MIP) es usada y las actividades mineras son modeladas. Los resultados muestran que esta metodología permite obtener un plan minero óptimo, que integra, simultáneamente, las actividades de preparación y producción. Este plan optimiza la estrategia de consumo de reservas considerando una tasa de desarrollo y producción por periodo. Finalmente, permite al planificador de minas obtener un plan integrado y factible para la planificación a mediano y largo plazo de la mina.

I. ANTECEDENTES

Uno de los aspectos más importantes de la planificación minera en minería subterránea de métodos por hundimiento es definir el orden de extracción de las columnas de mineral buscando siempre extraer las mayores leyes al inicio para maximizar el Valor Presente Neto (VPN). Para que esto ocurra, es necesario contar con una infraestructura que permita recuperar el mineral en los puntos de extracción. Por lo tanto, el orden en el cual los bloques de las columnas son extraídos y la construcción de los niveles productivos que aseguran el acceso y la extracción del mineral deben ser tomados en cuenta en la planificación de minas, además de los factores técnicos y operacionales propios del sistema de explotación. Lo anterior, significa que el proceso global de planificación minera es complejo, por lo que es una práctica común descomponerlo

en diferentes tareas secuenciales y, por lo tanto, abordar el proceso general en planes específicos de forma discretizada e independiente. Desafortunadamente, la desagregación de los procesos de planificación en diferentes etapas significa que el plan de producción final no necesariamente captura el máximo valor de un proyecto [1]. De hecho, como las etapas en los procesos de planificación se llevan a cabo secuencialmente, las decisiones se van realizando con información agregada en cada proceso y los modelos no capturan la complejidad de los próximos pasos aguas abajo, por lo tanto, las decisiones posteriores son sujetas a la inicial. En términos globales, los resultados son sub-óptimos. Un ejemplo de desagregación es realizar separadamente la planificación de la producción y la planificación de la preparación minera. Por lo anterior, la motivación de este paper viene del desacople del programa de extracción (dónde, cuándo y cómo extraer un bloque) y programa de preparación (conjunto de actividades de excavación, obras civiles, infraestructura y montaje llevados a cabo para realizar la extracción de mineral). Más específicamente, la motivación nace cuando este desacople causa un exceso de inversión en desarrollo minero porque el área preparada no es usada en el periodo o la extracción planificada se ve afectada debido a la falta de infraestructura preparada. Un ejemplo de esto lo entrega Díaz y Morales [2], que indicaron que en 2002, Codelco División El Teniente tuvo un 61% de cumplimiento de desarrollo y un 70% de cumplimiento en producción. Este trabajo tiene como objetivo proponer una metodología que permite la optimización de un plan minero, considerando la producción de mineral y la preparación minera. Un software de agendamiento llamado UDESS (Universal Delphos Sequencer and Scheduling) es usado, el cual es un agendador y secuenciador de actividades basado en un modelo de optimización cuya función objetivo es maximizar el Valor Presente Neto en un horizonte de tiempo dado, sujeto a restricciones. Para llevar a cabo esta investigación, la construcción y producción de una mina Panel Caving es modelada y analizada.

II. METODOLOGÍA

La metodología de trabajo consiste en realizar el modelamiento de las etapas de producción y preparación de una mina explotada por Panel Caving. Luego, ambas etapas son llevadas a la herramienta de optimización UDESS para lograr un agendamiento óptimo integrado, sujeto a restricciones. Para evaluar la metodología propuesta, un caso estudio es propuesto y dos experimentos son realizados.

- 1) Solamente optimización de la producción (manera tradicional), sin considerar la Preparación minera, excepto restricciones de Capacidad Mina.
- 2) Optimización de la Producción y Preparación simultáneamente (propuesta).

III. UDESS: HERRAMIENTA DE OPTIMIZACIÓN

La herramienta computacional UDESS (Universal Delphos Sequencer and Scheduling) es un agendador y secuenciador de actividades desarrollado por el Laboratorio de Planificación Minera Delphos, de la Universidad de Chile. UDESS esta basada en programación matemática entera mixta que permite resolver agendamientos en minería subterránea, minería de transición y cielo abierto. El software es actualmente usado para propósitos académicos y de investigación.

A. Funcionamiento

UDESS funciona bajo un concepto de actividades o tareas, las cuales se relacionan mediante precedencias, de forma que el inicio de ciertas actividades está limitado por la consecución de otras. Además, cada actividad posee atributos o recursos que son consumidos durante el horizonte de agendamiento. Los resultados de UDESS corresponden a una carta Gantt en donde se especifica cuánto progresar en cada una de las actividades definidas sobre el horizonte de planificación. Esta "output" es luego exportable a Excel para su análisis e implementación.

B. Función Objetivo

La función objetivo es la siguiente:

$$VPN = \sum_{i=0}^T \beta^{\gamma t} \sum_{i \in A} (v_i \cdot p_{i,t} - v_i^+ \Delta s_{i,t} - v_i^- \Delta e_{i,t}) \quad (1)$$

donde $\beta = \frac{1}{(1+\alpha)^{1/12}}$ es el factor de actualización mensual, α la tasa de descuento anual, y $\gamma t = \sum_{s \leq t} k_s$ corresponde al tiempo acumulado hasta el periodo t . Por otro lado, v_i corresponde al ingreso o costo de cada actividad y $p_{i,t}$ el progreso que alcanza. A su vez, los términos $\Delta s_{i,t}$ y $\Delta e_{i,t}$ vienen dados por:

$$\Delta s_{i,t} = \begin{cases} s_{i,1} & , t = 1 \\ s_{i,t} - s_{i,t-1} & , t > 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$\Delta e_{i,t} = \begin{cases} e_{i,t} - e_{i,t-1} & , t < T \\ e_{i,T} & , t = T \end{cases} \quad (3)$$

Los términos anteriores nos permite identificar el periodo de inicio y el periodo de término de una actividad, lo que ocurre cuando el valor de alguno de estos sea 1.

A partir de la precedencias entre actividades y restricciones, el software agenda las tareas de forma de producir el máximo beneficio.

IV. MODELAMIENTO

A. Generalidades del Modelamiento en Panel Caving

A continuación se muestra las principales generalidades del modelamiento de una mina Panel Caving.

- Se considera que las columnas, numeradas $i = 1, 2, \dots, N$ son discretizadas en $p = 1, 2, \dots, P$ bloques. Por otro lado, el valor económico de cada columna b_i será como la suma de cada valor de p , es decir, $b_i = \sum_{p=1}^P b_{i,p}$, el tonelaje será $w_i = \sum_{p=1}^P w_{i,p}$ y la velocidad de extracción $u_i = u(p_1, p_2, \dots, p_P)$.
- El valor neto económico de cada columna b_i considerará los ingresos por procesar y vender el mineral, menos los costos de extracción, pero no considerará los costos de desarrollos ni preparación.
- Asociada a cada columna de extracción, se considerará una actividad de preparación y desarrollo $D_i = 1, \dots, N$ con un beneficio b_i negativo correspondiente al costo de preparación correspondiente.
- Asumiremos que ya hay una secuencia de columnas a ser extraídas y, por simpleza, asumiremos que se comienza con la columna $i = 1$, se sigue con $i = 2$ y así sucesivamente. Notar que esto es una SECUENCIA y por lo tanto especifica el orden, pero no la cantidad de columnas a habilitar por período.
- Habrán $t = 1, 2, \dots, T$ años para planificar. Se considera un número máximo de columnas H_t a habilitar por año, sujetas a las consideraciones geomecánicas.
- No es necesario extraer la totalidad de una columna. La altura final (envolvente) dependerá del beneficio relativo que esto preste respecto del valor económico de nuevas columnas que pudieran ser habilitadas.
- Hay una capacidad W_t de toneladas a ser extraídas en cada período $t = 1, 2, \dots, T$.
- Nos interesa maximizar el VPN de la secuencia.

La figura 1 muestra el diseño conceptual del modelamiento.

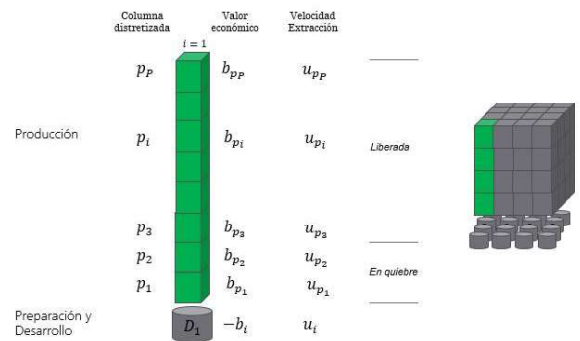


Fig. 1. Modelamiento de una columna.

B. Consideraciones geométricas

Para modelar la extracción de los bloques, es necesario cumplir con ciertos requisitos geométricos. El principio del método minero es usar la gravedad para extraer el mineral fracturado. La figura muestra la precedencia más lógica del método minero. El número del bloque indica el orden de extracción.

El 30% inicial de la columna de roca debe ser extraído cuidando la geometría de hundimiento (ver Figura 2) y controlando las velocidades de extracción debido a que se están propagando las fracturas.

Por otro lado, según [3], es necesario mantener un ángulo de extracción entre 35° a 45° para controlar la sismicidad (ver Figura 2).

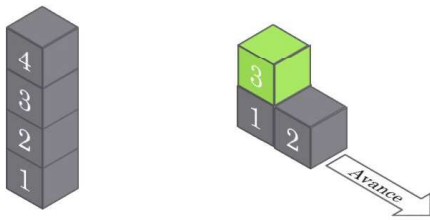


Fig. 2. Modelamiento de una columna (izq) y Modelamiento del Ángulo de Extracción (der) en UDESS

V. RESULTADOS

A. Planes de Producción

La figura 3 muestra los planes de producción obtenidos para ambos experimentos. La tasa de producción de ambos no muestra diferencias. De acuerdo a las leyes medias de cobre, presentan un comportamiento similar decreciente durante el horizonte de extracción sin desviaciones significativas.



Fig. 3. Planes de Producción.

El experimento 2 fue simulado sin restricciones de Desarrollo ni Preparación. Este alcanza un VPN de \$ 683 millones. Sin embargo, cuando el Desarrollo y Preparación son impuestos, el valor decrece considerablemente. Esta situación se debe a que la ejecución del plan no considera las restricciones de constructibilidad. En otras palabras, la producción propuesta por el modelo no puede ser ejecutada debido a la falta de Desarrollo y Preparación Minera.

B. Envoltente de Extracción

La Figura 4 muestra la envoltente de extracción para los experimentos 1 y 2. En ambos casos, se puede ver que las restricciones geométricas son satisfechas y que el ángulo de extracción es mantenido entre 35° y 45° en condiciones de régimen [4].

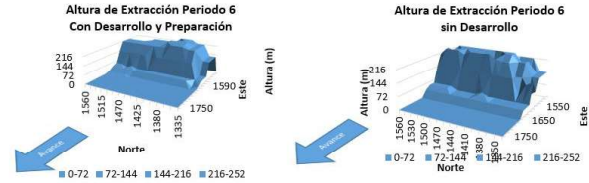


Fig. 4. Envoltentes de Extracción
Envoltentes de Extracción.

VI. CONCLUSIONES

Una metodología para resolver un problema de producción subterránea incluyendo las actividades de desarrollo y preparación minera fue propuesta. Los resultados muestran que UDESS permite obtener un plan minero óptimo, que aborda, simultáneamente, actividades de Preparación y Producción, en los niveles de Producción y Hundimiento. Finalmente, este trabajo propone una metodología que resuelve un problema de agendamiento en métodos mineros con una vista integral entre Desarrollo y Preparación, y Producción, que logra acoplar ambos procesos en la planificación de minas a mediano y largo plazo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el apoyo prestado por el Laboratorio de Planificación Minera Delphos y CONICYT Proyecto Basal FB0809 (Advanced Mining Technology Center).

REFERENCIAS

- [1] Morales, N. Rubio, E. Madariaga, E. Alarcón, M. (2012). 'Integrating constructability of a project into the optimization of production planning and scheduling', MassMin 2012: 6th International Conference & Exhibition on June 10-14, 2012, Sudbury, Ontario, Canada. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum.
- [2] Díaz, G. Morales, E. (2008). 'Tunneling and construction for 140,000 tonnes per day – El Teniente mine – Codelco Chile', MassMin 2008: 5th International Conference & Exhibition on May 9-11, 2008, Luleå Sweden, Chile, pp. 83-96.
- [3] Contreras, J. Cornejo, J. Caviedes, C. (2016). 'Metodología para Estimación de la Tasa de Incorporación de Área en Panel Caving, Codelco – División El Teniente', 1st International Conference on Underground Mining on October 19-21, 2016, Santiago, Chile.
- [4] Cornejo, J. Pinochet A. Caviedes, C. (2016). 'Geometric Control for Strategic Mine Planning at El Teniente Mine', MassMin 2016: 7th International Conference & Exhibition on May 9-11, 2012, Sydney, Australia. AusIMM, 2016.