

Metodología para el diseño optimizado y semiautomático de rampas en múltiples fases en minería a cielo abierto

Pedro Sanhueza
Laboratorio de Planificación Minera
DELPHOS, AMTC, DIMIN,
Universidad de Chile
Avda. Tupper 2007, Santiago, Chile
Email: psanhueza@delphoslab.cl

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

Pierre Nancel y Andrés Parra
Laboratorio de Planificación Minera
DELPHOS, AMTC, DIMIN,
Universidad de Chile
Avda. Tupper 2007, Santiago, Chile
Email: aparra@delphoslab.cl
Email: pierre.nancel@amtc.cl

Abstract—La planificación estratégica de una operación minera es una actividad crítica debido a que es la que mayor influencia tiene en el valor presente neto de un proyecto. Para lograr este objetivo se debe tener en consideración dos problemas relacionados entre sí: el agendamiento de la producción y el diseño de la mina.

El problema de agendamiento ha sido ampliamente estudiado usando distintas técnicas optimización, en donde son usadas como apoyo para el planificador minero. Sin embargo, en el caso del diseño minero, existe una variedad de softwares que permiten materializar un diseño pero depende fuertemente del criterio del planificador y además el diseño de una mina es considerado un arte. El resultado es que un diseño es altamente dependiente de la experiencia del planificador y es una tarea que demanda tiempo, por lo que no se pueden realizar análisis exhaustivos.

En este trabajo se construye una metodología que permita la generación de rampas óptimas y semiautomáticas, a nivel de bloques, en múltiples fases que permita satisfacer las restricciones operacionales que un proyecto de minería a cielo abierto debiera incluir. Para ello se utiliza un modelo matemático que resuelve el problema de rampas en monofase y se extiende para poder resolver el problema de múltiples fases.

I. INTRODUCCIÓN

Una de las etapas más importantes en donde se materializa la planificación minera es el diseño minero, el cual consiste en incorporar las rampas y accesos a las distintas fases que tenga el proyecto minero, de manera de adecuarse lo más fielmente posible al plan minero. Estas rampas permitirán el acceso y el transporte de material desde el interior del rajo hasta su destino, el cual puede ser botadero o planta, por medio de equipos mineros. Cada rampa debe cumplir con criterios operacionales y técnicos para que el diseño sea operativamente aplicable [1], además se deben probar distintos escenarios con el fin de obtener la configuración de rampas que permitan cumplir con el plan minero.

El diseño de rampas en múltiples fases es un problema que ha sido poco abordado por la literatura, ya que no hay un protocolo o guía que sirva para su diseño e implementación. La metodología de diseño que se usa en la actualidad es más bien un “arte” que se lleva a cabo de manera iterativa probando escenarios de aciertos y errores hasta llegar a un diseño que

sea operativo, lo cual toma bastante tiempo y no se asegura un resultado óptimo.

Actualmente existen modelos en otras áreas de la ingeniería que permiten encontrar rutas de caminos óptimas en base a costos o beneficios, en donde se modela el problema como un grafo utilizando variaciones del algoritmo de Dijkstra [2] en el cual a cada arco se le otorga un “peso” que se desea minimizar. Trabajos como los de Brazil et al. [3] apuntan a resolver el problema de diseño de rampas en minería subterránea aplicando el teorema de Dubbins [4] en un espacio tridimensional con una pendiente fija. Cabe señalar que los modelos anteriores y sus variaciones no resuelven el problema de conectividad respetando restricciones operacionales, es más, la mayoría de ellos resuelve un problema en dos dimensiones.

Hoy en día no existen trabajos acerca de optimización de rampas en minería a cielo abierto por lo que surge la idea de crear una herramienta capaz de encontrar rampas de una forma óptima dada una secuencia de fases en donde se debe velar que el diseño de rampas sea operativo, es decir, que haya conexiones entre ellas de tal manera de obtener una secuencia de extracción, que permita cumplir con los requerimientos operativos y estratégicos de la compañía minera.

II. MODELO RAMPAS EN MONOFASE

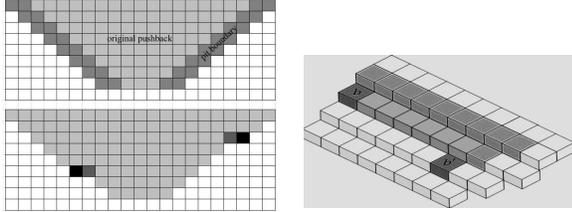
Este modelo estático fue desarrollado para modelar las rampas de una mina a rajo abierto y los bloques pertenecientes a la rampa deben salir por el diseño minero. Se resuelve un problema de optimización matemática lineal, cuya función objetivo es la maximización del beneficio total del pit diseñado.

El programa computacional para la construcción del pit con rampa utiliza el modelo de bloques y un documento de texto con los parámetros técnicos a utilizar como la noción de frontera, sentido de la rampa, pendiente de la rampa, ancho de rampa, bloque de partida de rampa, puntos obligatorios de pasada y ángulo global e interrampa.

El modelo consta de una frontera alrededor del pit final en la cual la rampa tiene factibilidad de ir avanzando, al estar alrededor del pit final esto permite que la rampa este lo más

cercana a este y no se aleje demasiado. Todos los demás bloques que se encuentran dentro de la frontera es llamado pit reducido (en el cuál todos los bloques son extraídos) esto se aprecia en la Figura 1a.

Antes de aplicar el modelo matemático, se encuentran rutas de caminos factibles que respeten las condiciones de pendiente mediante el algoritmo Dijkstra [2] utilizando un grafo con los bloques, en donde se asume que es posible crear una rampa desde b a b' como se aprecia en la figura 1b, a esto llamaremos caminos elementales.



(a) Vista en perfil con 2 bloques de ancho de frontera y un pit diseñado con una rampa de dos bloques de ancho. El bloque negro es la parte lateral de la rampa.

(b) Vista isométrica de un camino elemental en un nivel k con extremidades b y b' .

Fig. 1: Ejemplo de frontera, pit diseñado y camino elemental.

La nomenclatura utilizada para el modelo es la siguiente:

- B : el modelo de bloques.
- K : el nivel máximo a la cual la rampa puede comenzar.
- B_k : es el conjunto de bloques en el nivel k , $k \in \{0, 1, \dots, K\}$.
- R : es el pit reducido.
- R_k : $R \cap B_k$.
- p_b : es el beneficio del bloque b .
- p_{R_k} : es la suma de los beneficios de todos los bloques del pit reducido en el nivel k .
- I_k es el conjunto de índices i de todos los caminos elementales del nivel k .
- s_k^i : es el i -ésimo camino elemental en el nivel k .
- o_k^i : es el primer bloque de s_k^i .
- f_k^i : es el último bloque de s_k^i .
- O_b : es el conjunto de predecesores del bloque b ; O_{R_k} el conjunto de predecesores de R_k .
- H_k^i : es el conjunto de bloques en el nivel k entre s_k^i y R_k que se requieren extraer para completar el ancho de rampa.
- L_k^i : es el conjunto de bloques del nivel k entre H_k^i y R_k que se requieren extraer para prevenir un desnivel entre la rampa y el pit.
- D_k^i : es el conjunto de bloques en el nivel $k-1$ debajo de los bloques de rampa $s_k^i \cup H_k^i$.
- Z_k^i : es el conjunto de bloques en el nivel k afuera de s_k^i (en el sentido opuesto a R_k) para evitar diseñar el pit entre la rampa y el talud.

Las variables del problema son definidas como sigue:

$$y_b = \begin{cases} 1, & \text{si el bloque } b \text{ es extraído} \\ 0, & \text{si no} \end{cases}$$

$$x_k^i = \begin{cases} 1, & \text{si todos los bloques del nivel } k \text{ de } s_k^i \text{ corresponden} \\ & \text{a la parte lateral de la pared de la rampa en el} \\ & \text{nivel } k \text{ y } f_k^i \text{ es el primer bloque de la pared lateral} \\ & \text{de la rampa en el nivel } k-1 \\ 0, & \text{si no} \end{cases}$$

En donde el dominio de la variable y es B , el dominio del índice k de la variable x es $\{0, 1, \dots, K\}$ y el dominio del índice i de la variable x es I_k .

El modelo matemático es formulado como sigue:

$$\max \sum_{b \in B} p_b y_b + p_{R_K} + \sum_{k=1}^K \sum_{i \in I_k} p_{R_{k-1}} x_k^i \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i \in I_k | f_k^i = o_{k-1}^j} x_k^i \geq x_{k-1}^j \quad (\forall k > 1, \forall j \in I_{k-1}) \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I_k} x_k^i \leq 1 \quad (\forall k \geq 1) \quad (3)$$

$$y_b \leq y_{b'} \quad (\forall b \in R^C, \forall b' \in O_b \cap R^C) \quad (4)$$

$$\sum_{i \in I_k} x_k^i \leq y_b \quad (\forall k \geq 1, \forall b \in O_{R_{k-1}} \cap R^C) \quad (5)$$

$$x_k^i \leq y_b \quad (\forall k \geq 1, \forall b \in s_k^i \cup H_k^i \cup L_k^i) \quad (6)$$

$$x_k^i + y_b \leq 1 \quad (\forall k \geq 1, \forall b \in D_k^i \cup Z_k^i) \quad (7)$$

$$\sum_{i \in I_k} x_k^i \geq y_b \quad (\forall k \geq 1, \forall b \in B_{k-1} \setminus R_{k-1}) \quad (8)$$

$$x_k^i = 0 \quad (\forall k < K, \forall i \in I_k | \{s_{k+1}^j | f_{k+1}^j = o_k^i\} = \emptyset) \quad (9)$$

$$y_i = 0 \quad (\forall b \in R) \quad (10)$$

La función objetivo (1) maximiza el beneficio global del diseño con rampa el cual corresponde al beneficio de todos los bloques extraídos. La restricción (2) asegura la conectividad entre las trayectorias de rampa. La restricción (3) indica que hay como máximo una rampa por nivel. La (4) y (5) impiden la extracción de cualquier bloque en que sus predecesores no hayan sido previamente extraídos. La restricción (6) asegura que para cada camino elegido, todos los bloques en el camino elemental k , todos los bloques requeridos para completar el ancho de rampa y todos los bloques entre la rampa y el pit reducido en el nivel k son extraídos. La restricción (7) previene la extracción de bloques debajo de los bloques de rampa. La restricción (8) garantiza que existe un camino elemental en el nivel k por encima de los bloques extraídos. La restricción (9) impide que una ruta no conectada sea una ruta elegible.

Finalmente la restricción (10) impide la extracción de todos los bloques pertenecientes al pit reducido ya que estos ya están considerados en la función objetivo.

Como resultado del modelo se genera un documento de texto, que agrega columnas de atributo al modelo de bloques, tales como las capas de la frontera, el diseño de rampa y el diseño de pit con rampa. En la Figura 2 se puede visualizar un resultado de diseño de rampas aplicado a un modelo de bloques y su posterior materialización en su software CAD en la Figura. En la Tabla I se muestra una comparación entre la envolvente, el modelo matemático y su posterior diseño en un software CAD.

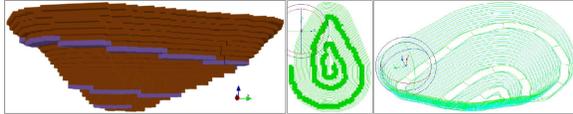


Fig. 2: Modelo de rampas en monofase.

Tabla I: Comparación entre envolvente, modelo matemático y modelo diseñado.

	Tonelaje total [Mton]	Beneficio total [MUSD]	Razón estéril mineral
Envolvente	59.7	245.56	0.452
Modelo matemático	60.88	232.7	0.496
Modelo aplicado CAD	64.22	230.57	0.574

III. METODOLOGÍA PARA EXTENSIÓN DEL MODELO

La metodología para extender el modelo de monofase a uno de multifase consiste en primer lugar en dividir el problema en dos: fases concéntricas y fases direccionadas. Esto debido a que generalmente siempre se tienen geometrías de esta índole.

A. Fases concéntricas

Para construir rampas en forma concéntricas se asume que las rampas no interectuarán entre sí, por lo que la mejor opción son rampas tipo espiral. Para ello se utiliza el programa monofase para ir calculando las fases una a una en donde se puede entregar previamente un punto de partida de rampa o dejar que el programa encuentre el punto de partida óptimo.

En la Figura 3 se muestra un resultado que se puede obtener en esta etapa. Cabe señalar que se hace una combinación entre rampas en espiral en sentido horario o antihorario de tal forma de encontrar la combinación que maximice el beneficio de extracción.

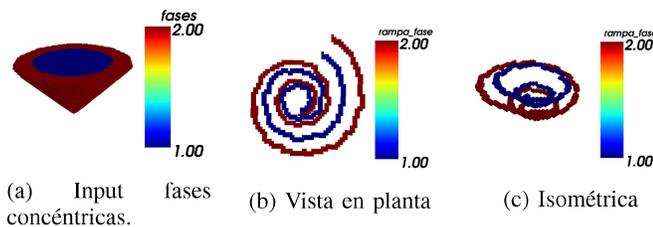


Fig. 3: Modelo de rampas concéntricas para dos fases. Se muestran las rampas pertenecientes a una fase uno y dos.

B. Fases direccionadas

En este caso las fases comparten una cara del pit, existe un problema de espacio para que la rampa de las fases siguientes se vayan desarrollando por lo que la mejor opción es usar rampas tipo switchback hasta que se llegue a una profundidad mayor a la fase anterior.

En esta parte la metodología consiste en ir construyendo la rampa por tramos utilizando el programa de optimización en monofase. Estos tramos son construidos mediante un proceso iterativo en el cuál se pregunta si se quiere ir conectando con la rampa anterior y/o realizando switchback. Si se quiere conectar en algún punto se busca el punto de partida adecuado de tal forma de llegar con la pendiente deseada y poder conectarse.

Se tiene la flexibilidad de que el diseñador escoja el diseño que más le parezca, se pueden intentar hacer conexiones en distintos puntos de la rampa de las fases anteriores o simplemente continuar la fase sin empalmarlas.

En la Figura 4 se muestran resultados de lo que se obtendría cuando se le entrega al programa dos fases direccionadas con una conexión entre rampas respectivamente.

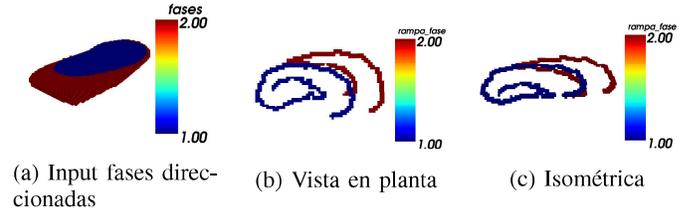


Fig. 4: Modelo de rampas direccionadas para dos fases. Se muestra las rampas pertenecientes a una fase uno y dos.

IV. CONCLUSIÓN

Actualmente no existe una herramienta que optimice el diseño de rampas en múltiples fases. Es por lo anterior que se plantea el uso de una herramienta capaz de asistir al planificador para lograr construir rampas, dado una serie de fases operativas, en un corto periodo de tiempo y que sean óptimas en cuanto al beneficio de extracción.

Con esta herramienta es posible probar varias configuraciones de rampas, por lo que permite analizar en forma exhaustiva un modelo con fases y posteriormente se puede unificar con algún programa CAD para acelerar aún más el proceso de planificación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el apoyo prestado por CONICYT Proyecto Basal FB0809 (Advanced Mining Technology Center) y a Becas CONICYT Magíster Nacional.

REFERENCIAS

- [1] W. Hustrulid, M. Kuchta, and R. Martin. CRC Press/Balkema, 2013, vol. 1, ch. 5, pp. 441–450.
- [2] E. W. Dijkstra, *A short introduction to the art of programming*. Technische Hogeschool Eindhoven Eindhoven, 1971, vol. 4.
- [3] M. Brazil, D. A. Thomas, J. F. Weng, J. H. Rubinstein, and D. H. Lee, “Cost optimisation for underground mining networks,” *Optimization and engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 241–256, 2005.
- [4] L. E. Dubins, “On curves of minimal length with a constraint on average curvature, and with prescribed initial and terminal positions and tangents,” *American Journal of mathematics*, vol. 79, no. 3, pp. 497–516, 1957.