

Metodología para Diseño Óptimo Semiautomático de Rampas en Minería Subterránea

Sergio Montané
DELPHOS Mine Planning Lab
AMTC
DIMIN, Universidad de Chile
Santiago, Chile
smontane@delphoslab.cl

Pierre Nancel-Penard
DELPHOS Mine Planning Lab
AMTC
DIMIN, Universidad de Chile
Santiago, Chile
pnancel@delphoslab.cl

Nelson Morales
DELPHOS Mine Planning Lab
AMTC
DIMIN, Universidad de Chile
Santiago, Chile
nelson.morales@amtc.cl

Resumen— Hoy en día no existe una metodología que esté aceptada totalmente por la industria minera para el diseño de rampas en minería subterránea, quedando a criterio de cada ingeniero el desarrollo de esta infraestructura. En este trabajo, se pretende presentar una metodología para el diseño de rampas, que contempla el uso de un modelo de optimización. Se definen los inputs del modelo, para luego mostrar los resultados al utilizarlo en un caso de estudio.

Palabras clave: modelo optimización; rampas; minería subterránea; diseño minero

I. INTRODUCCIÓN

La planificación minera surge como disciplina que permite orientar de manera estratégica la minería para transformar un recurso mineral en un negocio minero. El resultado de este proceso es un plan de producción y diseño minero que delimitan la mejor estrategia para capturar valor para los dueños o inversionistas.

El presente trabajo busca desarrollar una metodología que permita asistir el diseño de rampas para minería subterránea, minimizando tanto costos de construcción como costos de operación. La metodología contempla un modelo de optimización al cual se le ingresan los inputs del diseño de rampas, para luego obtener los puntos sugeridos para lograr la configuración que minimiza los costos, quedando como tarea para el ingeniero el diseño final detallado.

Para el desarrollo del modelo de optimización no se considera la variabilidad temporal en la construcción de la rampa y posterior operación de la mina. Esto también se aplica en el cálculo de costos, los cuales no contemplan flujos descontados en el tiempo, sino un valor total. Se contempla el uso de perforación y tronadura como método de construcción de las galerías y el orden en que se ejecutan las obras de construcción es de acuerdo a la disposición de los niveles de producción.

El trabajo incluye en primer lugar el desarrollo del modelo matemático de optimización, incorporando los inputs necesarios que se deben contemplar en el diseño de rampas; luego, se valida el modelo, realizando pruebas que permitan verificar que el comportamiento del modelo de optimización es el esperado al ir

variando los valores ingresados como inputs. Finalmente, se aplica el modelo de optimización a un caso de estudio, con el fin de comparar los resultados obtenidos por medio esta metodología con los resultantes de un estudio de prefactibilidad.

II. MODELO MATEMÁTICO

El modelo matemático consiste en una resolución de un problema de minimización de costos a partir de una ruta que debe ser establecida con el fin de conectar o pasar lo más cerca posible de los puntos de acceso a los niveles productivos de la mina. Para esto, se definen las entradas que debe incorporar el modelo de optimización.

- Se define una forma guía a partir del cual se genera la rampa, la cual va a determinar la forma de ésta. Además, se establece una frontera de tolerancia para la ubicación de los puntos de la rampa a partir de la forma guía.
- Se establecen la cantidad y ubicación de los puntos de acceso a los niveles de producción, junto con el tonelaje asociado a cada uno.
- Se debe ingresar la pendiente máxima tolerable en la construcción de la rampa.
- Se definen los costos asociados a la rampa, asociados tanto a la construcción como a la operación.
- Se define el sentido de la rampa (horario o antihorario).
- Se pueden definir el punto de inicio y el punto de término de la rampa.

De este modelo, se espera que la metodología tenga el flujo de información en la siguiente forma.



Fig. 1 Flujo del modelo de optimización.

Para el modelo matemático, se define la siguiente variable, sea x_{ij} el tramo en metros correspondiente a la distancia entre el punto i y el punto j , que es parte de la rampa. Tiene un valor en metros si es parte de la rampa y un valor 0 si es que no pertenece a ella.

Este valor es utilizado para calcular el costo asociado a la construcción del tramo y para el costo de acarreo de mineral, sujeto a una penalización en caso de que éste sea con forma de arco.

La función objetivo simplificada del problema es la que se presenta a continuación.

$$\min \sum_{i,j} (a_{ij} \cdot x_{ij} \cdot (C_d + C_{va}) + a_{ij} \cdot x_{ij} \cdot C_a \cdot (1 + C_{va}) \cdot Ton_n) \cdot (1 + P_c)$$

a_{ij} : Longitud en metros del tramo o arco que une los puntos i y j ([m]).

C_d : Costo de desarrollo ([USD/m]).

C_a : Costo de acarreo de mineral ([USD/ton/m]).

C_{va} : Costo de ventilación en el desarrollo ([USD/m]).

C_{va} : Costo de ventilación en el acarreo de mineral ([%]).

Ton_n : Tonelaje correspondiente al sector productivo n ([ton]).

P_c : Penalización por arcos ([%]).

Para resolver el problema, se hace uso del optimizador Gurobi y de códigos de la librería MineLink desarrollados en C++.

Una vez que el modelo se ejecuta, éste entrega un reporte de los costos involucrados en el diseño propuesto, detallando además los metros de construcción necesarios para dicha solución. Estos costos son dependientes de los tramos que se deben construir y transitar por los equipos, junto con el tonelaje asociados a los niveles de producción.

Por otro lado, se tiene como output un archivo de texto que contiene los puntos que son parte de la solución, los cuales representan la sección de la rampa. Al visualizar estos puntos, éstos se ven como bloques, cuyo tamaño varía dependiendo de la resolución que se utilice. Este diseño contempla las dimensiones originales del diseño final, sus costos y el tonelaje asociado a la construcción. Cabe mencionar que esta solución debe ser refinada por el ingeniero a cargo del diseño, pasando desde los puntos a la sección real de la galería mediante el uso de algún software CAD minero.

Es importante destacar que la resolución que se utilice para ubicar el espacio de trabajo para el diseño de la rampa depende del usuario. Esta resolución define el tamaño de los bloques que representan los puntos del volumen de trabajo y define el nivel de detalle que pueda tener la solución. Por lo tanto, es que el usuario debe tener un criterio de diseño de manera que pueda verificar que los resultados que se tengan sean factibles de realizar. En este sentido, el diseño entregado por el modelo debe ser refinado y operativizado posteriormente.

III. CASO DE ESTUDIO

Para evaluar el funcionamiento del modelo de optimización y la metodología, se hace uso de un caso de estudio, buscando replicar los diseños obtenidos.

Los datos que se utilizan en el desarrollo del presente caso son proporcionados por una empresa de ingeniería, cuya identidad no será revelada por acuerdos de confidencialidad. Los datos provienen de un estudio de prefactibilidad realizado por la empresa en el año 2014, que abarca desde el ámbito geostadístico hasta el análisis económico final. El proyecto (desde ahora “Proyecto B”) corresponde a una mina cuyos productos principales son oro y plata y su método de explotación es Bench & Fill.

El layout propuesto considera los siguientes criterios:

- La mina estará dividida en tres zonas de explotación: Mina Y este, Mina Y oeste y Mina V. Cada una de estas minas tendrá su propia rampa de acceso, las que estarán ubicadas de acuerdo a la distribución y morfología del yacimiento.
- Los niveles de producción estarán separados cada 12 metros verticalmente, los que tendrán un drift principal para conectar los cruzados que permiten el acceso a los drifts de extracción.

Se destaca, además, que desde el nivel 1,187 [m] hasta el nivel 1,475 [m], existe un drift principal que conecta dos niveles consecutivos a través de galerías llamadas pivotes. Desde el nivel 1,487 [m] hasta el nivel 1,691 [m] se tiene un drift principal por cada nivel, esto quiere decir que no existen pivote desde el nivel 1,487 [m] hacia arriba.

Para utilizar el modelo de optimización, se escogen tres zonas: Zona Y este, Zona Y oeste inferior y Zona Y oeste superior.

Los resultados obtenidos se presentan en la Fig. 2, donde se observa una comparación entre el diseño preliminar obtenido con la metodología propuesta y los que se tenían del estudio de prefactibilidad del caso de estudio.

Al comparar los diseños originales con los obtenidos del modelo se observa que, en general, el modelo puede replicar los diseños hechos por el estudio de ingeniería. Para la zona este inferior, se puede ver que la réplica es casi la igual al diseño original, pues sigue el mismo trayecto y ocupan el mismo espacio físico. En la zona oeste inferior se observan diferencias en la parte de arriba, pues el diseño obtenido desde el modelo de optimización tiene un trayecto mayor en dicho sector; mientras que en el sector de abajo se nota similitud en los diseños. Esta diferencia se debe a que el diseño original presenta dos pendientes en esa zona, lo cual no se puede ingresar en el modelo de optimización directamente. Para lograrlo habría que separar esta rampa en dos y luego adjuntarlas. Finalmente, en la zona oeste superior se ve similitud en los diseños, salvo ciertas diferencias en el sector inicial de la rampa, debido a que esa zona tiene mayor complejidad para modelar y crear la forma guía de la rampa.

TABLA 1. Costos diseños caso de estudio.

Caso de Réplica	Costo Total Aproximado [MUSD]
Zona Y este	10.8
Zona Y oeste inferior	10.5
Zona Y oeste superior	5.5

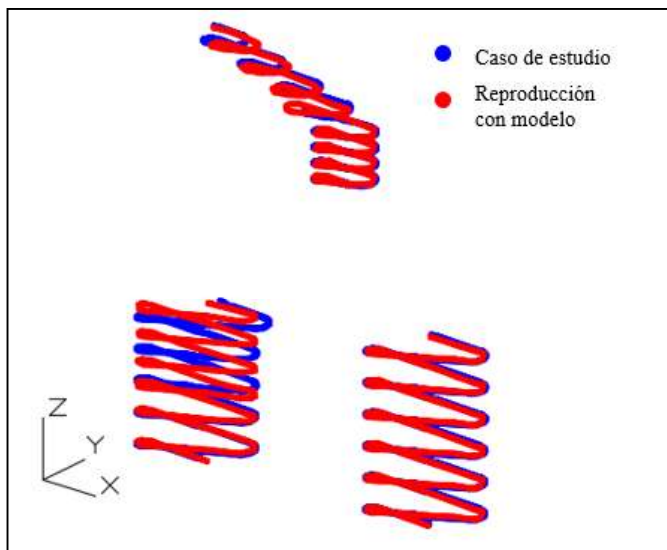


Fig. 2. Visualización de diseños reales y reproducción con modelo en las tres zonas.

IV. CONCLUSIONES

Los diseños realizados en el caso de estudio permitieron verificar que el modelo es capaz de replicar en gran parte los diseños del estudio de ingeniería, por lo que se tiene una herramienta que puede proponer soluciones factibles en la industria.

Los tiempos requeridos para la ejecución del modelo de optimización resultan ser prudentes, entre 1 a 3 minutos dependiendo del caso. La complejidad radica en establecer bien la forma guía de la rampa de acuerdo a las condiciones del caso.

Finalmente, se tiene que el modelo es capaz de entregar soluciones que pueden asistir en el diseño de rampas de una mina, facilitando la labor del ingeniero a cargo y entregando un criterio de mayor objetividad.

A modo de recomendación, se tiene que el modelo puede ser mejorado en bastantes aspectos, con el fin de que las soluciones sean más flexibles y consideren una mayor cantidad de parámetros.

Dado que el modelo no contempla un secuenciamiento de construcción ni extracción, se puede considerar el factor

temporal en la construcción de la rampa y operación de la mina, con el fin de tener un costo actualizado del diseño.

Otra mejora que se puede realizar es con respecto a la flexibilidad de la forma guía para la rampa, agregando otro tipo de diseños que permitan tener opciones al usuario, las que pueden hacer que el modelo se vuelva más complejo a la hora de programar y cambie la metodología de resolución.

REFERENCIAS

- [1] Brazil, M., Lee, D. H., Rubinstein, J. H., Thomas, D. A., Weng, J. F. and Wormald, N. C. (2002) A network model to optimise cost in underground mine design. The University of Melbourne, Australia.
- [2] Brazil, M., Lee, D. H., Rubinstein, J. H., Thomas, D. A., Weng, J. F. and Wormald, N. C. (2004) Optimization in the design of underground mine access. Uncertainty and Risk Management in Orebody Modelling and Strategic Mine Planning.
- [3] Brazil, M. and Thomas, D. A. (2006) Network optimization for the design of underground mines. The University of Melbourne, Australia.
- [4] Brazil, M., Grossmann, P. A., Lee, D. H., Rubinstein, J. H., Thomas, J. F. and Wormald, N. C. (2007). Constrained path optimisation for underground mine layout. Proceedings of the World Congress on Engineering: July 2-4, 2007, London U.K.
- [5] Brazil, M., Grossman, P., Rubinstein, J. H. and Thomas, D. A. (2014) Improving underground mine access layouts using software tools. Interfaces. Vol. 44 (2): 195-203.
- [6] Chang, A. J., Brazil, M., Rubinstein, J. H. and Thomas, D. A. (2013) Optimal curvature-constrained paths for general directional-cost functions. Optimization and Engineering. Vol 14 (3): 395-416.
- [7] Chatterjee, P. K. and Sridhar, C. K. (1986) Computer-aided mine design and planning for underground mines. Can Inst Mining Metallurgy Bull. Vol. 79: 55-60.
- [8] De Smith, M. J. (2006) Determination of gradient and curvature constrained optimal paths. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. Vol. 21 (1): 24-38.
- [9] Ghaffariyan, M. R., Stampfer, K., Sessions, J., Durston, T., Kuehmaier, M. and Kanzian, C. (2010) Road network optimization using heuristic and linear programming. Journal of Forest Science. Vol. 56 (3): 137-145.
- [10] Grossmann, P. A., Brazil, M., Rubinstein, J. H. and Thomas, D. A. (2013) Minimal curvature-constrained paths in the plane with a constraint on arcs with opposite orientations. International Journal of Computational Geometry & Applications. Vol. 23 (3): 171-196.
- [11] Newman, A. M., Rubio, E., Caro, R., Weintraub, A. and Eurek, K. (2010) A review of operations research in mine planning. Interfaces. Vol. 40 (3): 222-245.
- [12] Stebbins, S. (2011) Mining Cost Service. CostMine, InfoMine USA.