

Optimización de planificación de desarrollo y preparación de corto plazo en minería subterránea

L. Álvarez

Laboratorio de planificación minera DELPHOS, DIMIN & AMTC, Universidad de Chile

N. Morales

Laboratorio de planificación minera DELPHOS, DIMIN & AMTC, Universidad de Chile

ABSTRACT: Para la planificación de minas subterráneas en un horizonte de corto plazo existe escasa investigación para la programación del desarrollo y preparación. En el presente estudio se presenta una metodología para el agendamiento de las actividades de la construcción de galerías horizontales para un horizonte de un turno o un día que consiste en plantear el problema como un Job Shop Scheduling (JSP) con tiempos de seteo dependiente de la secuencia y equipos paralelos no relacionados, cuyo agendamiento se resuelve por algoritmos genéticos y búsqueda tabú. Esta metodología es aplicada en un caso de estudio, donde se compara con los resultados expresados en frentes equivalentes con un modelo matemático de optimización de largo plazo, los resultados muestran, por una parte, las limitantes del modelo matemático adaptado, destacando los resultados de JSP tanto por su operatividad al considerar el tiempo de traslado de equipos, calidad de la solución como un tiempo de cómputo inferior a los dos minutos.

Keywords: Minería subterránea, Job shop Scheduling, planificación corto plazo.

1 INTRODUCCIÓN

La minería subterránea consiste en una red compleja de excavaciones en el macizo rocoso que tienen el propósito de extraer mineral (Hustrulid, 2001). La planificación de minas subterráneas está principalmente orientada a la optimización de la producción en el mediano o largo plazo (Terblanche, 2017), y en el cumplimiento de la producción de mineral respetando las restricciones operacionales en un horizonte de corto plazo (Nehring, 2012; Diering, 2012; O'Sullivan, 2015).

Por otro lado la planificación del desarrollo y preparación minera que consiste en agendar la construcción de galerías horizontales, verticales, obras civiles de manera condicionada para habilitar los sectores de extracción para dar cumplimiento a los requerimientos del plan de producción es realizada en una segunda etapa y sin optimizar, pero en años recientes se ha investigado el optimizar de manera integral la producción y la preparación para un horizonte de largo y mediano plazo Rocher et al (2011),

Morales et al (2012), Brickey (2015), Terblanche (2015), Muñoz (2018) y Nancel-Penard et al (2020).

Lamentablemente para un horizonte de corto plazo existe una escasa investigación para la optimización de la planificación del desarrollo y preparación, la cual tiene como propósito la coordinación de numerosos recursos desde trabajadores hasta equipos entre diferentes frentes de explotación (Tyson, 2019), cada uno de ellos con sus propias limitaciones (Campeau, 2020) que según Topal (2008) es una tarea compleja.

La construcción o avance de una galería horizontal conlleva un conjunto de actividades que se deben realizarse de manera secuencial, este conjunto de actividades es conocido como ciclo (Cortes, 2018), el cual se presenta en la Figura 1, en el caso de minas de panel caving el ciclo es más extenso en comparación a operaciones de sub level stoping.

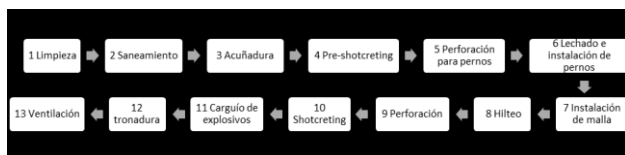


Figura 1: Operaciones del ciclo de minado de una galería horizontal en panel caving.

En este artículo, presentamos una metodología que busca optimizar el agendamiento de las actividades de construcción de galerías horizontales para un horizonte de corto plazo. Esta metodología busca asistir al planificador en la generación del programa del turno del desarrollo horizontal. La metodología consiste en plantear el agrandamiento del turno como un problema de tipo Job Shop Scheduling con tiempos de seteo dependiente de la secuencia y equipos paralelos no relacionados, cuyo agendamiento se resuelve por algoritmos genéticos y búsqueda tabú. La metodología tiene como propósito minimizar el makespan que corresponde el intervalo de tiempo entre el inicio del procesamiento del primer trabajo y el tiempo de terminación del último trabajo. Minimizar el makespan de forma indirecta maximiza la utilización de los recursos, generando la mayor actividad en las frentes en el menor tiempo posible.

En este trabajo se presentan y comparan dos formas de modelar el problema, el primero es mediante la adaptación de un modelo de optimización para largo plazo y el segundo mediante el Job Shop Scheduling. Se debe mencionar que la resolución de un problema de tipo Job Shop Scheduling es una tarea compleja, ya que es un problema combinatorial definido como NP-difícil.

2 ESTADO DEL ARTE

Según Andrade (2019) la planificación de un turno en minería subterránea se realiza de manera manual con apoyo de planillas de cálculo, no garantizando el óptimo para el proceso (Little, 2013; Astrand, 2018a). La planificación manual consume tiempo por lo que limita la cantidad de opciones consideradas (Newman et al. 2007; Song, 2015). La programación de un turno debe contener por lo menos el inicio y termino de cada actividad de la frente, además de la máquina asignada a cada etapa del ciclo. (Astrand, 2018b), por lo general en esa programación se define

como KPI el número de disparos que se pueden alcanzar en un turno. Se debe tener presente que la distancia entre las frentes de trabajo afecta directamente a los rendimientos obtenidos, pero por lo general este tiempo es incorporado como un promedio específico para cada actividad del ciclo.

2.1 Aplicación Job Shop Scheduling en minería subterránea

En trabajos recientes se ha considerado el agendamiento de las actividades del desarrollo horizontal de una mina subterránea como un problema de tipo Job Shop Scheduling. Así, por ejemplo, (Song, 2015), propone la aplicación de una heurística para la asignación de equipos a frentes y otra de agrupamiento, para una mina subterránea en Finlandia de Sub Level Stopping con el objetivo de minimizar el makespan, el tiempo de resolución es de 20 segundos, la aplicación es un total de 34 frentes dividido en 3 grupos, considerando 6 máquinas. Por otra parte (Andrade, 2019) realiza una aplicación de Flow Shop con máquinas en paralelo en una mina de Sub Level Stopping, en Brasil, para un horizonte de corto plazo para el agendamiento de las actividades de desarrollo y producción de caserones, el objetivo del modelo fue maximizar la producción de metal de la operación y fue resuelto mediante programación lineal entera mixta.

(Astrand, 2018b), muestra la aplicación de un Flow shop resuelto por modelo matemático de programación por restricción, para el agendamiento de 12 actividades para el desarrollo de una mina subterránea de Sub Level Stopping, declara algunas actividades que no pueden ser interrumpidas por la voladura como la proyección del Shotcrete. El modelo tiene como función objetivo minimizar el makespan, se realizaron experimentos con 5 o 10 frentes, con 1 o 2 ciclos por frente, con flotas de 1 equipo por operación y de 2 equipos por operación, estudiando un total de 8 escenarios. Finalmente (Schulze,2016) presenta el agendamiento como un shop Flow Híbrido para una mina de potasio explotada por el método room and pillar, el modelo es resuelto por programación entera mixta, aplicado para resolver pequeñas instancias y un modelo heurístico con la metodología de Giffler y Thomson es implementado para

grandes instancias, ambos con el objetivo de minimizar el makespan.

3 DEFINICION DEL PROBLEMA

El problema para resolver consiste en determinar el agendamiento de actividades del ciclo de galerías horizontales en minería subterránea para un horizonte de un turno o un día considerando el tiempo de traslado de las maquinas entre las frentes ya que en la planificación de corto plazo actualmente se considera como un tiempo fijo que se adiciona al tiempo de duración de cada actividad del ciclo e independiente de las distancias entre las frentes. Wang (2020) plantea considerar el tiempo de configuración o seteo para incorporar el tiempo de traslado de los equipos en el Job Shop Scheduling.

Uno de los problemas de la planificación en corto plazo es que estado inicial de la mina es diferente para cada turno, por lo cual los datos de entrada de este problema son los siguientes: tiempos de las actividades del ciclo de minado de la frente, equipos disponibles para cada actividad, tiempo efectivo del turno, tiempo de traslado entre frentes, estado inicial de cada frente. La metodología genera un archivo tipo carta Gantt con la programación del turno que satisface las condiciones de las operaciones del turno y considera el tiempo de traslado. En la Figura 2 se observa un ejemplo de un agendamiento de un turno de 12 horas de una mina subterránea en el que se han descontado 2 horas no operativas, el ciclo de minado está conformado por 7 actividades y se disponen de 2 a 3 maquinas por actividad.

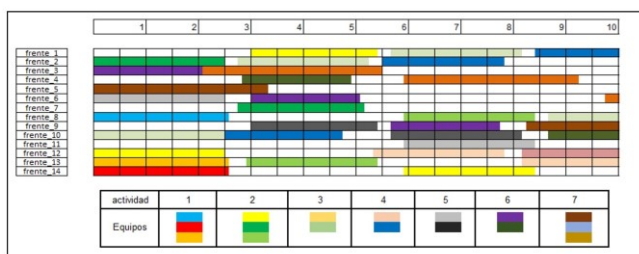


Figura 2: Agendamiento de las actividades de desarrollo.

Disponemos de un conjunto O_j de n frentes O_1, O_2, \dots, O_n en que cada frente O_j consta de un conjunto de actividades $\theta_{i1}, \theta_{i2}, \dots, \theta_{im}$ y se dispone de un conjunto R_m de máquinas R_1, R_2, \dots, R_m . Cada una de las actividades θ_{ij} tiene un tiempo de

procesamiento $[[P\theta]]_{ij}$ y debe ser procesada sobre una única máquina del conjunto R_m y cada máquina sólo puede procesar un trabajo en un instante el cual no puede ser interrumpido (Lenstra, 1992). Se puede contar con más de una máquina para realizar una actividad lo que se denomina maquinas en paralelo (Pinedo, 1995)

4 METODOLOGIA

La metodología propuesta en la presente investigación consiste en plantear al agendamiento de las actividades de desarrollo horizontal de una mina subterránea de block caving en un horizonte de un turno como un problema de Job Shop Scheduling con tiempos de seteo dependiente de la secuencia y equipos paralelos no relacionados, con el propósito de incorporar el tiempo de traslado de los equipos en el proceso de agendamiento logrando minimizar el makespan.

La metodología resuelve el problema mediante algoritmos genéticos y búsqueda tabú que logran resultados casi-óptimos, la gran ventaja en comparación con los métodos exactos es que el tiempo de cómputo es menor. Para evaluar la calidad del agendamiento se calculará la fracción que aporta cada actividad al ciclo de minado denominado como índice de frente equivalente (ver Tabla 1). Para evaluar la calidad del agendamiento se utilizará el KPI número de frentes equivalentes que corresponde a la suma de las actividades equivalentes que se logran realizar para cierto periodo de tiempo como un turno o un día.

Para validar la metodología se plantea la estrategia de incorporar el tiempo de traslado como un incremento en el tiempo de las actividades del ciclo de minado. Este tiempo adicional es constante e independiente de las distancias entre las frentes. Por lo tanto, el problema de agendamiento se puede resolver por un modelo de optimización MILP presentado en (Rocher et al, 2011) y desarrollado adicionalmente por (Nancel-Penard et al, 2020), el agendamiento obtenido por el modelo MILP es óptimo desde el punto de vista matemático. Se compararán los resultados de los agendamientos obtenidos de la metodología propuesta con respecto al resultado del modelo matemático con el propósito de evaluar la calidad de los resultados generados por la metodología

propuesta en términos de frentes equivalentes total.

5 CASO DE ESTUDIO

En el caso de estudio corresponde a una mina de panel caving, se considera un total de 21 frentes ubicadas en el nivel de producción. La mina opera en 2 turnos por día de 12 horas con 6.5 horas de tiempo efectivo por turno. Las tronaduras toman lugar durante el turno de noche. Las actividades del ciclo de minado se presentan en la Tabla 1 con sus respectivos tiempos de duración que corresponde al promedio de datos históricos de la mina. El estado de las frentes al iniciar el turno es dado a conocer en la Tabla 2.

Los experimentos fueron implementados usando la librería JSSP en Python 3.7 y corridos en un PC con 16 RAM, con procesador 2.7 Ghz Core i7 y Windows 10.

Actividad	Duración [min]	Fracción	Equipos
Marina	156	0.15	3
perforación de pernos	148	0.14	3
Lechada	151	0.14	2
Malla	135	0.13	2
Hilteo	148	0.14	2
Shotcreting	125	0.12	2
perforación de desarrollo	202	0.19	3
Total	1065	1.00	

Tabla 1: Actividades del ciclo de minado.

Frente	Actividad	Frente	Actividad
1	Perforación de Pernos	12	Perforación de pernos
2	Perforación de Pernos	13	Marina
3	Shotcreting	14	Marina
4	Shotcreting	15	Shotcreting
5	Perforación	16	Marina
6	Hilteo	17	Hilteo
7	Perforación de Pernos	18	Hilteo
8	Marina	19	Perforación de pernos
9	Hilteo	20	Marina
10	Lechada	21	Marina
11	Hilteo		

Tabla 2: Actividades de frentes al iniciar el turno.

6 RESULTADOS

Los resultados obtenidos por la metodología propuesta para el algoritmo genético y búsqueda tabú son determinados a diferentes tiempos de cómputo de 100, 200, 500 y 1000 segundos. En el caso del algoritmo genético se configuro con una población de 100, 200, 400, 600, 800 y 1000 individuos, con una selección de 2 individuos por torneo y una probabilidad de mutación de 0.1. En el caso de la búsqueda tabú se configuro con un tamaño de vecindad de 50, 40, 30, 20, 10 y 5

individuos, con una lista tabú de 10 individuos, con una permanencia en la lista por 25 iteraciones.

6.1 Resultados Escenario 1

En este caso el tiempo de traslado es de 0 minutos, el modelo matemático reporta una solución óptima es de 9.49 frentes equivalentes, calculadas en menos de un minuto. En la Figura 3 se presenta el agendamiento del modelo matemático. Desafortunadamente, se observa que este agendamiento no es operativo. Por ejemplo, en la frente 1 la actividad de perforación es realizada al inicio por la “maquina 0”, pero a los 30 minutos es reemplazada de forma instantánea por la “maquina 1” por 1 hora y posteriormente es reasignada la “maquina 0”, lo cual no es una práctica en las operaciones mineras subterráneas.

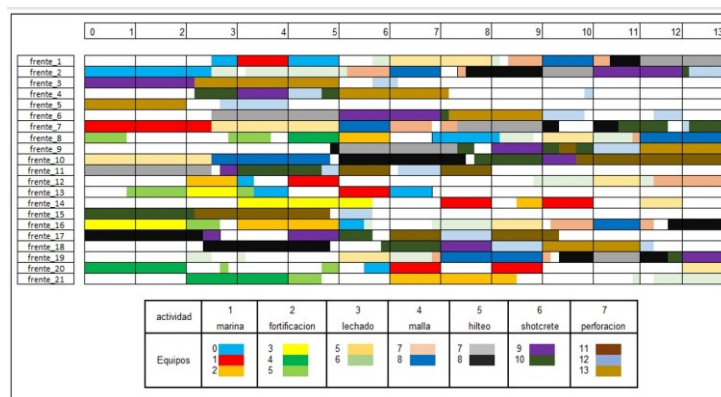


Figura 3: Agendamiento del escenario 1 por modelo matemático

En la Figura 4 se presentan los resultados por el algoritmo genético y la búsqueda tabú para diferentes tiempos de resolución. Al comparar los resultados respecto al modelo de optimización se observa que la búsqueda tabú presenta la menor diferencia en promedio 2.74% respecto al resultado óptimo generado por el modelo matemático. En la Figura 5 se presenta el agendamiento de la mejor solución de la metodología propuesta.

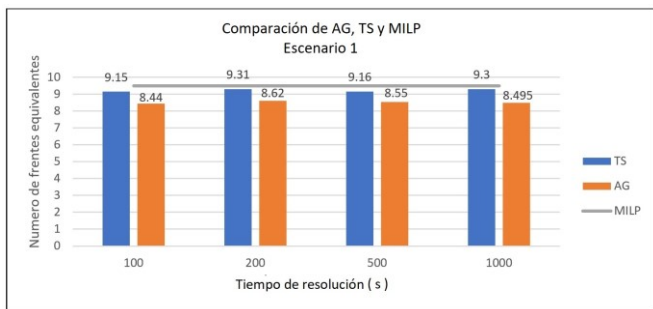


Figura 4: Algoritmo genético y búsqueda tabú con un tiempo de traslado de 0 minutos.

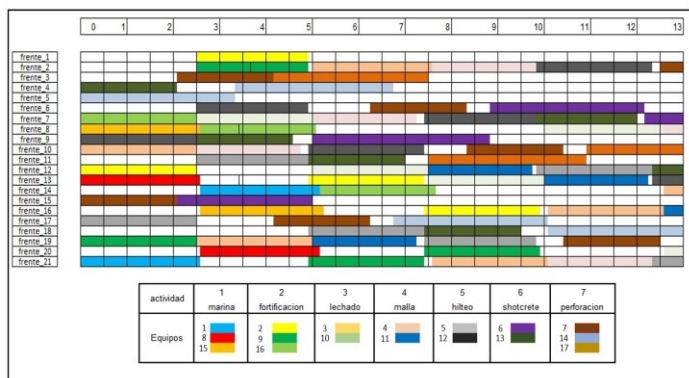


Figura 5: Agendamiento del escenario 1 para mejor solución por metodología propuesta

6.2 Resultados Escenario 2

En este caso el tiempo de traslado es de 15 minutos, el modelo matemático reporta una solución óptima es de 8.74 frentes equivalentes, calculadas en menos de un minuto. En la figura 6 se presenta el agendamiento obtenido. Como ocurre en el escenario anterior, este agendamiento no es operativo. Por ejemplo, en la frente 7 la actividad de fortificación es realizada al inicio por la “maquina 4”, pero a los 90 minutos es suspendida la actividad para asignar a la maquina a la frente 19 por 10 minutos, luego a la frente 12 por 20 minutos y a después a la frente 2 por 20 minutos y volver a terminar la actividad en la frente 7 por 10 minutos. lo cual no es una práctica en las operaciones mineras subterráneas.

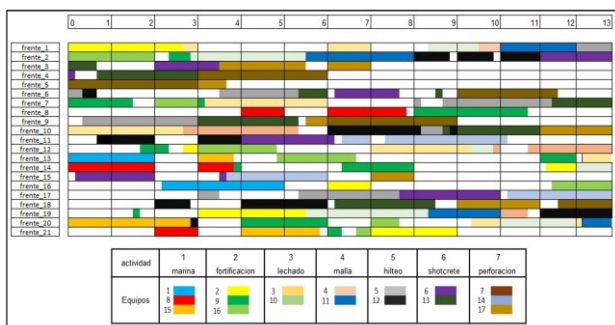


Figura 6: Agendamiento del escenario 2 por modelo matemático.

En la Figura 7 se presentan los resultados por el algoritmo genético y la búsqueda tabú para diferentes tiempos de resolución. Al comparar los resultados respecto al modelo de optimización se observa que la búsqueda tabú presenta la menor diferencia en promedio 2.90% respecto al resultado óptimo generado por el modelo matemático. En la Figura 8 se presenta el agendamiento de la mejor solución de la metodología propuesta, el agendamiento es operacional al considerar que una actividad inicia y termina con el mismo equipo.

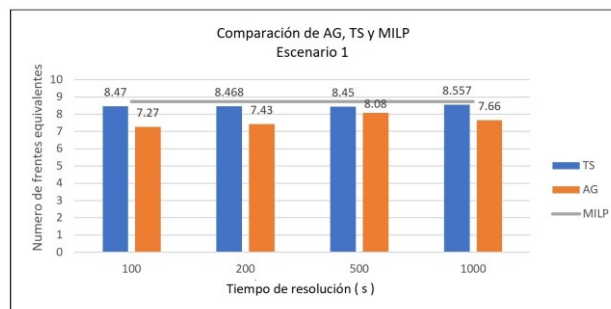


Figura 7: Algoritmo genético y búsqueda tabú un tiempo de traslado de 15 minutos.

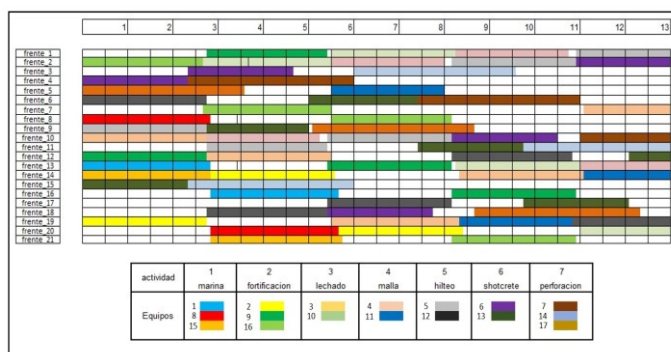


Figura 8: Agendamiento del escenario 2 para mejor solución por metodología propuesta

6.3 Resultados Escenario 3

En el escenario 3 se plantea utilizar tiempos de traslados variables entre las frentes en un rango de 10 a 60 minutos, por lo cual ya no es viable incorporar el tiempo de traslado como un tiempo adicional al tiempo de operación de las actividades del ciclo de minado como se realizó en el escenario 1 y 2, por tanto, ya no es posible resolver el agendamiento por medio del modelo matemático, de manera que solo se reportan los resultados para las dos metaheurísticas.

En la Figura 9 se presentan los resultados por el algoritmo genético y por la búsqueda tabú para diferentes tiempos de resolución. En la Figura 10

se observa el agendamiento de la mejor solución, el agendamiento es operacional al considerar que una actividad inicia y termina con el mismo equipo.

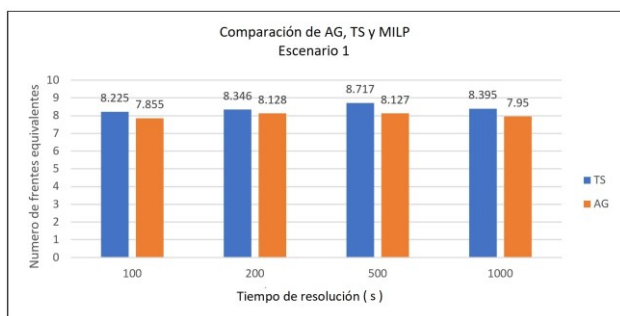


Figura 9: Comparación de Algoritmo genético y búsqueda tabú para el escenario 3

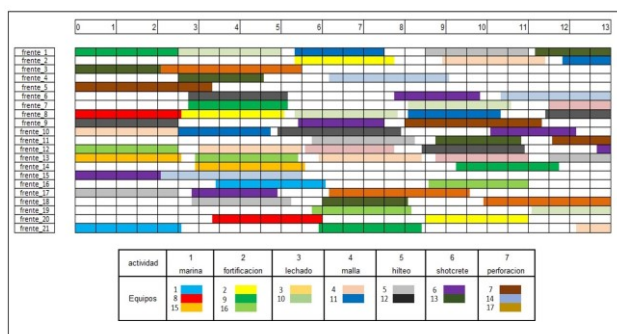


Figura 10: Agendamiento del escenario 3

7 CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló una metodología que resuelve el problema de agendamiento de actividades de desarrollo horizontal de una mina subterránea de block caving para un horizonte de un día, los resultados son casi óptimos y operativos. Este enfoque es evaluado en 5 escenarios que corresponden a distintas alternativas para modelar el tiempo de desplazamiento de equipos entre frentes de operación, además de considerar las diferentes condiciones iniciales del turno, como número de frentes disponibles, estado inicial de la frente y equipos disponibles para cada actividad, además de los tiempos de actividad del ciclo.

En el caso de escenarios donde los tiempos de desplazamiento son nulos o constantes (escenarios 1 y 2) se comparan los resultados respecto al modelo matemático que genera el agendamiento óptimo, como promedio la búsqueda tabú presenta una diferencia de 2.84% y el algoritmo genético 11 %, el tiempo de cómputo se limitó a 1000 segundos, los resultados obtenidos son casi óptimos y además el agendamiento es operativo. sin embargo, si bien el modelo matemático presenta resultados

mejores desde el punto de vista de frentes equivalentes, se observa que el agendamiento no es operativo, con lo cual el valor propuesto no es necesariamente alcanzable.

En el escenario 3 donde los tiempos de traslado dependen de los equipos y los frentes entre los que se desplazan, no es posible aplicar el modelo matemático, pero sí la metodología basada en job shop scheduling y metaheurísticas. los resultados son operativos y en estos escenarios la búsqueda tabú logró los mejores resultados expresados en frentes equivalentes desarrollados durante el periodo de estudio. Estos resultados permitirían que en trabajos futuros se pueda abordar el problema de incorporar contingencias en el periodo de estudio y generar agendamientos dinámicos, además de incorporar el tiempo de traslado de personal o el tema de abastecimiento de suministros.

8 AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el proyecto AFB180004 de CONICYT/PIA.

9 REFERENCIAS

Andrade A. 2019. Understanding plan’s priorities: Short term scheduling optimization, in APCOM 2019, London.

Astrand, M., Johansson, M., Greberg, J. 2018a. Underground mine scheduling modelled as a flow shop: a review of relevant work and future challenges. J. S. Afr. Inst. Min. Metall, 118 (12), 1265-1276.

Astrand M., Johansson M., Zanarini A. 2018b. Fleet Scheduling in Underground Mines Using Constraint Programming, In: van Hoeve WJ. (eds) Integration of Constraint Programming, Artificial Intelligence, and Operations Research. CPAIOR 2018. Lecture Notes in Computer Science, vol 10848.

Brickey, A.J., 2015. Underground production scheduling optimization with ventilation constraints. Thesis (PhD Mining and Earth Systems Engineering), USA, University of the Colorado School

Campeau L., Gamache M. 2020. Short-term planning optimization model for underground mines, Computers & Operations Research, 115, 12 pages.

Cortes D., Martinez Y., Silva M. 2018. Maximising resource utilisation in scheduling of underground mining works with multiple faces', Y Potvin & J Jakubec (eds), Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 399-406,

- Diering T., 2012. Quadratic programming applications to block cave scheduling and cave management, Caving 2012, Sudbury, Canada, Paper No. 6809.
- Giffler B., Thompson G. 1960. Algorithms for Solving Production Scheduling Problems, Operations Research 8, 487-503.
- Hustrulid W. 2001. Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), Littleton, Colorado, USA
- Lenstra J. 1992. Job Shop Scheduling. In: Akgül M., Hamacher H.W., Tüfekçi S. (eds) Combinatorial Optimization. NATO ASI Series (Series F: Computer and Systems Sciences), vol 82. Springer, Berlin, Heidelberg
- Little J., Knights P., Topal E. 2013. Integrated optimization of underground mine design and scheduling, Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 113 (10), 775-785.
- Morales N., Rubio E., Madariaga E., Alarcón M., 2012. Integrating constructability of a project into the optimization of production planning and scheduling, in Proceedings Sixth International Conference & Exhibition on Mass Mining.
- Muñoz G., Espinoza D., Goycoolea M., Moreno E., Queyranne M., Rivera-Letelier O. 2018. A study of the Bienstock-Zuckerberg algorithm, Applications in Mining and Resource Constrained Project Scheduling. Computational Optimization and Applications, 69, 501-534.
- Nancel-Penardab P., Morales N, Rojas V & González T. 2020, A heuristic approach for scheduling activities with or-precedence at an underground mine, International Journal of Mining, Reclamation and Environment, DOI: 10.1080/17480930.2020.1734152
- Nehring M., Topal E., Kizil M., Knights P. 2012. Integrated short- and medium-term underground mine production scheduling, Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 112, 365-378.
- Newman, A., M. Kuchta. 2007. Using aggregation to optimize long-term production planning at an underground mine, Eur. J. Oper. Res. 176 (2) 1205–1218
- Nguyen S. 2013. Automatic Design of Dispatching Rules for Job Shop Scheduling with Genetic Programming Thesis (Doctor of Philosophy in Computer Science), Victoria University of Wellington
- O'Sullivan, D., Newman, A., 2015. Optimization-based heuristics for underground mine scheduling, European Journal of Operational Research. 241, 248–259.
- Pinedo M. 1995, Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1995
- Rocher W., Morales N., Rubio E. 2011. Eight-Dimensional Planning: Construction of an Integrated Model for the Mine Planning Involving Constructability, 35th International APCOM symposium, pp. 393-406.
- Song Z., Schunnesson H., Rinne M., Sturgul J. 2015. Intelligent Scheduling for Underground Mobile Mining Equipment. PloS one, 10 (6), pp. 1-21.
- Schulze, M., Rieck, J., Seifi, C., Zimmermann, J. 2016. Machine scheduling in underground mining: an application in the potash industry. OR Spectrum, 38. pp. 365–403
- Terblanche S., Bley A. 2015, An improved formulation of the underground mine scheduling optimization problem when considering selective mining, ORiON, 31(1), pp. 184–197.
- Terblanche S. 2017. Resource constrained project scheduling models and algorithms applied to underground mining, Thesis (Doctor of Philosophy) Faculty of Engineering at Stellenbosch University
- Topal E. 2008. Early start and late start algorithms to improve the solution time for long term underground mine scheduling. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 108 (2), 99–107
- Tyson N. 2019. Integrating infrastructure and production schedules Optimizing critical path by managing shared locations and materials in underground construction projects, MAusIMM, Deswik.
- Wang H., Tenorio V., Li G., Hou J., Hu N. 2020. Optimization of Trackless Equipment Scheduling in Underground Mines Using Genetic Algorithms. Mining, Metallurgy & Exploration. 37, 1531-1544