

Operations scheduling in building tunnels of mining projects

Alexander Alberto Correa Espinal ^a, Elkin Rodríguez Velásquez ^b
& Jhoan Sebastián Cadavid Jaramillo

^a Ph.D. Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. alcorrea@unal.edu.co

^b Ph.D. Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. erodrigu@unal.edu.co

^c Ing. Universidad Nacional de Colombia, jscadav0@unal.edu.co

Recibido para evaluación: 09-Febrero-2014, Aceptación: 09-Agosto-2014, versión final: 11-Noviembre-2014

RESUMEN

El presente artículo propone un algoritmo heurístico para resolver un problema de secuenciación de trabajos en la construcción de túneles mineros, a partir de datos de entrada, tales como: el número de máquinas, número de trabajos, la cantidad de etapas, y los tiempos de preparación y operación de los trabajos en cada una de éstas, con el objetivo de minimizar el tiempo de ocupación total de procesamiento de todas las etapas, de tal forma que se obtenga una secuencia más eficiente de la ejecución de este tipo de proyectos. Los resultados obtenidos mediante la aplicación del algoritmo desarrollado a un escenario particular de tres etapas y dos trabajos han demostrado la disminución del tiempo de ocupación total de las etapas en 39 unidades de tiempo frente a una solución arbitraria con una ocupación total de 59 unidades de tiempo, confirmando de este modo que es significativo el algoritmo en la aplicación a un problema que exhibe estas características.

Palabras claves: Planeamiento minero, programación de proyectos, algoritmos heurísticos, problema de programación de taller abierto.

Programación de operaciones en la construcción de túneles de proyectos mineros

RESUMEN

El presente artículo propone un algoritmo heurístico para resolver un problema de secuenciación de trabajos en la construcción de túneles mineros, a partir de datos de entrada, tales como: el número de máquinas, número de trabajos, la cantidad de etapas, y los tiempos de preparación y operación de los trabajos en cada una de éstas, con el objetivo de minimizar el tiempo de ocupación total de procesamiento de todas las etapas, de tal forma que se obtenga una secuencia más eficiente de la ejecución de este tipo de proyectos. Los resultados obtenidos mediante la aplicación del algoritmo desarrollado a un escenario particular de tres etapas y dos trabajos han demostrado la disminución del tiempo de ocupación total de las etapas en 39 unidades de tiempo frente a una solución arbitraria con una ocupación total de 59 unidades de tiempo, confirmando de este modo que es significativo el algoritmo en la aplicación a un problema que exhibe estas características.

Palabras claves: Planeamiento minero, programación de proyectos, algoritmos heurísticos, problema de programación de taller abierto.

1. Introducción

En el presente artículo se quiere mostrar la solución a un problema de programación de ocurrencia cotidiana, donde n etapas o tramos necesitan completarse para obtener un proyecto, como es la construcción de un túnel minero, para el cual se deben ejecutar una serie de trabajos, donde se instalan ductos de ventilación, aire, agua y energía, además

de servicios como comunicaciones y transporte de insumos necesarios en la extracción de mineral. Todos los trabajos son independientes, es decir, el inicio de uno no tiene como condición que se haya terminado otro(s). Los trabajos se componen de operaciones que deben ser realizadas en todos los tramos del túnel, mediante una única intervención ininterrumpida, y no es necesario cumplir con una secuencia estricta de tramos o etapas, sino llevarlas todas a cabo,

particularidad conocida en la literatura como *Open Shop Scheduling Problem (OSP)*, el cual es un problema de etapas-multi-procesamiento.

Para el problema en estudio se asume la restricción de tiempos de preparación dependientes de la secuencia. Cada trabajo tiene asociada una máquina dedicada, es decir, que hay una cantidad equivalente de m máquinas para todo el proyecto. Las máquinas son móviles dedicadas a cada trabajo, permitiendo que cada operación de un trabajo pueda realizarse sin necesidad de ocupar otra máquina, lo cual es posible al movilizar la máquina de un tramo a otro cuando el trabajo que acompaña, termina su operación y se requiere en otra etapa (tramo). Una vez terminada una operación de un trabajo en un tramo, debe pasar a otro, sin embargo existe un tiempo de preparación al pasar de uno a otro, que se puede interpretar como el tiempo de transporte de herramientas, insumos para la operación o la adecuación del sitio, generando así la restricción de tiempos de preparación dependientes de la secuencia inter-etapas. Otra consideración es que las operaciones pueden realizarse acompañadas de uno o más asociadas a otros trabajos diferentes, permitiendo con ello que un tramo pueda ser abordado en un periodo de tiempo por todas las operaciones de los trabajos requeridos.

Los problemas relacionados a proyectos mineros han sido ampliamente estudiados desde lo ambiental como se refleja en el trabajo de (Roe *et al.*, 2002), en su edición de mejores prácticas ambientales en minería, enfocándose en que si bien no es posible eliminar el costo ambiental, si es posible disminuirlo a través de la mejora de la operación minera.

A nivel de planeación, autores como (Bastante *et al.*, 2003), muestran planteamientos para el diseño y la planeación de procesos mineros optimizados mediante un algoritmo heurístico, considerando el análisis financiero de la operación de un proyecto minero. Estos estudios han mostrado mejoras desde una orientación ambiental o financiera de forma aislada, por lo cual es preciso plantear una solución que contemple los efectos del tiempo ocupado

en la ejecución de trabajos para estos proyectos frente al impacto ambiental asociado, y lo que se refiere a la eficiencia operacional que se traduce en costos de operación.

Considerando lo anterior, se presenta el siguiente trabajo que dirige su esfuerzo en mostrar cómo se programan las operaciones que conforman los trabajos necesarios de un túnel minero, de tal modo que el tiempo total de ocupación de todas las etapas o estados de los procesos sea minimizado. Para mostrar la capacidad de los algoritmos heurísticos se presentan resultados computacionales que evidencian que estos procedimientos son efectivos para encontrar una solución factible con el mejor desempeño encontrado dentro del proceso de búsqueda y evaluación de alternativas, que además en problemas de tamaño pequeño pueden encontrarse muy cercanas a la solución óptima, proporcionando una eficiencia operacional en términos económicos como lo presenta (Lemieux, 2000) y en la reducción de tiempos para el desarrollo del proyecto.

Para el desarrollo de este trabajo, en las secciones 2 y 3 se realiza una aproximación conceptual, a través de una breve descripción del marco teórico de los sistemas de explotación minera y procedimientos heurísticos respectivamente. Posteriormente, en la sección 4, se hace una descripción del problema, a través de un diagrama de flujo, que permita proyectar un programa en Visual Basic® que brinde una solución computacional. Los resultados computacionales se muestran en la sección 5 y las conclusiones del estudio en la sección 6.

2. Sistemas y métodos de explotación minera

Para comprender el escenario de operación sobre el cual se plantea el problema de secuenciación de tareas, se presenta a continuación la figura 1, que enseña la configuración del ciclo minero.

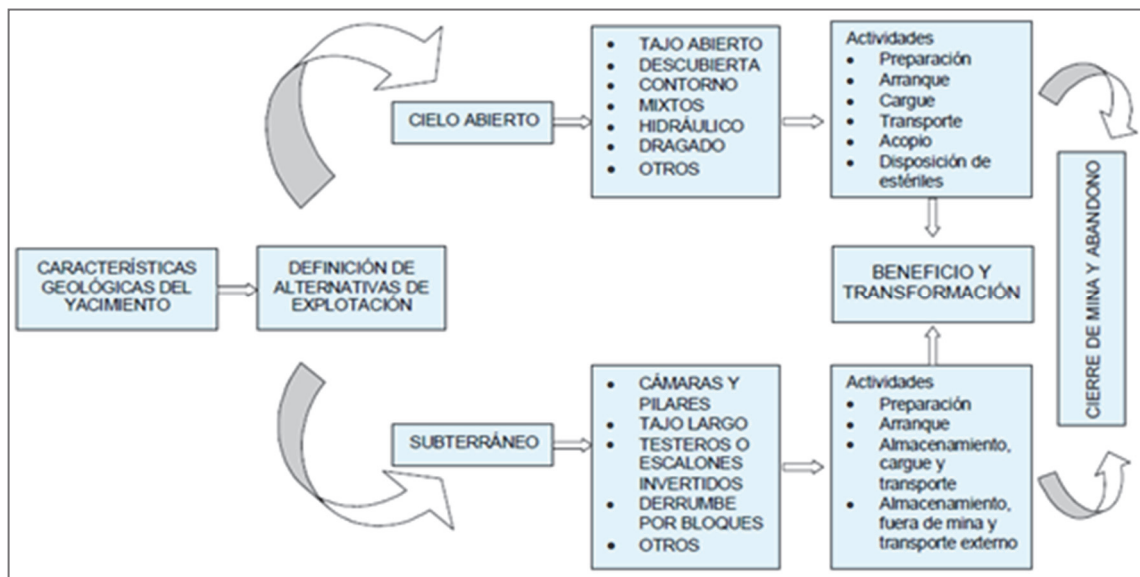


Figura 1. Sistemas y métodos de explotación

Fuente: (Ministerio de Minas y Energía, 2002).

La forma de operación dentro de un proyecto minero depende de la manera en que el mineral es extraído de la fuente, encontrando que la explotación se desarrolla en forma subterránea, a cielo abierto, por perforación o por dragado, en los cuales las actividades son:

- a) Extracción del mineral por medios mecánicos (como explosivos o palas cargadoras en el caso de material suelto).
- b) Separación de las rocas consideradas mineral y los desechos no mineralizados.
- c) Trituración del mineral.
- d) Clasificación por tamaños del mineral por medio de rejillas.
- e) Re - trituración del mineral en caso de que el tamaño no sea el adecuado para las tareas de tratamiento.
- f) Extracción y transporte al lugar de acopio.
- g) Transporte hacia la planta de tratamiento.

Como objetivo del presente estudio, se tiene la programación de los trabajos en la construcción y montaje de un túnel minero, en el cual se ejecutan obras de infraestructura a nivel subterráneo.

2.1. Operación en minería subterránea

En la minería subterránea se inicia con la eliminación de la menor parte de material, sobrecapa o excedente para tener acceso al yacimiento de mineral.

Para acceder al depósito de mineral es necesaria la construcción de un túnel, conocido también como Galería. Estos conductos, llevan a una red de túneles que tienen acceso al mineral. Por el método minero de excavación de galerías, secciones de roca son retiradas creando una cavidad subterránea que por lo general se llena con un agregado de cemento y roca de desecho.

Es bien conocido que la minería subterránea es un medio menos destructivo para llegar al yacimiento de mineral, pero más costosa y además, presenta riesgos de seguridad más elevados que la minería superficial, incluida la de cielo abierto (Bahn, 2013).

2.2. Túneles o galerías de mina

En el túnel de mina se tienen unas condiciones de proyecto y diseño que difieren de un túnel vial, puesto que en el de mina se buscan soluciones para acceder a las capas de mineral, para posteriormente excavar y efectuar la extracción del mineral.

La iluminación en el interior de los túneles se consigue normalmente mediante lámparas de acetileno de llama desnuda, producida por la reacción de carburo de calcio con agua, la cual además se utiliza como instrumento que avisa de la falta de oxígeno, sin embargo es habitual el empleo de luz eléctrica.

Durante la perforación de túneles es importante mantener la mejor ventilación posible, que permita evacuar los gases de los explosivos utilizados y los procedentes del terreno (principalmente dióxido de carbono CO₂), y con ello evitar accidentes por asfixia.

En el caso de los túneles donde no hay pozos de ventilación y el acceso al túnel es por una sola boca se hace necesario la instalación de tuberías y equipos de ventilación; lo más habitual es utilizar la instalación de aire comprimido como de ventilación, instalando grifos de aireación cada cierta longitud (Glehn y Bluhm, 2001).

2.2.1. Instalaciones auxiliares

En la construcción y operación de túneles de minería existen elementos de apoyo que proporcionan condiciones de seguridad y ambientes adecuados para el trabajo al interior de las minas. Estos elementos son instalaciones auxiliares de ventilación, aire comprimido, eléctricas e instalaciones de agua para la conducción de agua captada y conducción de agua para perforación de barrenos (Hernández et al., 2011).

3. Planteamiento Heurístico

Problemas como el estudiado en este artículo son clasificados como *NP-hard* desde el punto de vista de la complejidad computacional. Para este tipo de problemas, el tiempo necesario para hallar la solución óptima mediante algoritmos diseñados para tal fin (algoritmos exactos), aún en versiones pequeñas del problema y usando los mejores computadores actuales, puede crecer exponencialmente, por lo que se justifica explorar otro tipo de técnicas de solución. En estas situaciones cobra importancia el uso de los llamados métodos heurísticos, que si bien no garantizan el hallazgo de la solución óptima en todos los casos, producen soluciones de buena calidad en tiempos computacionales razonables.

El presente trabajo propone el uso de un algoritmo heurístico constructivo para abordar el problema en estudio.

Los algoritmos heurísticos constructivos son procedimientos que partiendo de una "solución vacía", repetidamente amplían la solución actual hasta tener una solución completa al problema.

El heurístico constructivo presentado en este trabajo elige una etapa (tramo a intervenir) en cada iteración, de manera cronológica. Para decidir que etapa se elige, en cada iteración se calcula cual sería la diferencia entre el mayor y el menor tiempo de terminación de las actividades a realizar en la etapa, de ser estas programadas a continuación y se selecciona aquella con la menor diferencia, bajo el razonamiento de que esto acortará el tiempo de ocupación total del programa. El algoritmo termina cuando todas las etapas han sido incluidas en el programa.

4. Problema

A partir de la información del marco teórico, en el cual se ilustra las diferentes alternativas que se tienen a nivel de explotación de minas y de los conceptos sobre procedimientos heurísticos que abordan temas de programación de actividades, se propone un procedimiento que busca minimizar el tiempo de ocupación total de todas las etapas. El problema a tratar en este trabajo parte del

estudiado por (Lin *et al.*, 2008), añadiendo a la restricción de no-espera la de tiempos de preparación dependientes de la secuencia entre etapas para cada trabajo.

(Graham *et al.*, 1979) muestran que, de acuerdo con su complejidad, este tipo de problemas es clasificado como NP-Hard, concepto al que se hizo referencia en la sección 3. Los mismos autores proponen una notación ampliamente aceptada para clasificar los problemas de programación de tareas. De acuerdo con tal notación, el problema estudiado en este artículo se clasifica como Om/no-wait, S_{jk}/D , donde D representa el tiempo total de ocupación del proyecto.

El modelo propuesto pretende entonces la programación de los trabajos asociados a la instalación de ductos de ventilación, aire, agua y energía, además de servicios como comunicaciones y transporte de insumos necesarios en la extracción de mineral, en los proyectos de túneles mineros.

Los elementos de estudio se toman con base en los escenarios que se presentan en el desarrollo de proyectos mineros como es la apertura y desarrollo de frentes mineros y obras de infraestructura para beneficio y transformación que consiste en la preparación, implementación y puesta en marcha de las obras indispensables para llevar a cabo la extracción y captación de los minerales, su acopio, su transporte interno y su beneficio.

En el desarrollo de proyectos mineros donde al ser ejecutado un tramo o etapa de éste por una de las empresas que llevan a cabo algún trabajo, las actividades pueden afectar de forma positiva o negativa las siguientes intervenciones de otros actores que continúen luego. En este sentido el tiempo de procesamiento efectuado por una actividad está condicionado a un tiempo de preparación dependiendo de la relación de precedencia de una etapa a la siguiente, como es descrito claramente por (Allahverdi *et al.*, 2006).

4.1. Notación

A continuación se define la notación a utilizar para la descripción del problema y la solución propuesta.

Tabla 1. Notación

Índices
j = trabajo, $j \in J = \{1, 2, \dots, n\}$
k = etapa, q = etapa, $k, h \in K = \{1, 2, \dots, s\}$
l = máquina, $l \in L = \{1, 2, \dots, m\}$
Denotando como O_{jk} a la operación del trabajo j en etapa k , los datos de entrada son:
t_{jk} =tiempo de procesamiento de O_{jk}
S_{jkh} =tiempo de preparación del trabajo j al pasar de la etapa k a la etapa h .
Variables de decisión
C_{jk} =tiempo de terminación de O_{jk}
A_{jk} =tiempo de inicio de O_{jk}
$C_{max,k}$ =último tiempo de terminación de la etapa K
$A_{min,k}$ =tiempo más temprano de inicio de la etapa K

4.2. Ejemplo de un problema y su solución

Para ilustrar de manera más amplia el comportamiento de la función objetivo en estudio, se plantea un ejemplo a través de una asignación arbitraria factible (no generada por el modelo propuesto), para ello suponga que hay dos trabajos, el primero corresponde a la instalación del sistema de ventilación y el segundo relacionado a la red de energía eléctrica, estos trabajos deben ser ejecutados en los tres tramos de la mina, y los respectivos tiempos de operación se muestran en la tabla 2, los datos son tomados del ejemplo que presenta (Lin *et al.*, 2008) para dos trabajos y tres etapas, y los tiempos de preparación entre etapas para cada trabajo, se presentan en las tablas 3 y 4, respectivamente.

Tabla 2. Tiempos de operación de los trabajos en cada etapa

Tiempos de procesamiento de dos trabajos que deben ser procesados en tres etapas (t_{jk})		
Descripción de trabajos	Sistema de ventilación	Red de energía
Trabajos (Job j)	1	2
Máquina dedicada	A	B
Tiempos de procesamiento		
Etapa k		
1	12	7
2	6	16
3	8	9

Tabla 3. Tiempos de preparación del trabajo 1(S1kh)

Etapa de precedencia k	Etapa siguiente a programar h		
	1	2	3
1	0	1	2
2	3	0	4
3	1	2	0

Tabla 4. Tiempos de preparación del trabajo 2 (S2kh)

Etapa de precedencia k	Etapa siguiente a programar h		
	1	2	3
1	0	1	2
2	3	0	2
3	1	4	0

Al realizar una asignación arbitraria factible con secuencias independientes para ambos trabajos, siendo la secuencia de etapas 1-2-3 para el trabajo 1, y para el trabajo 2 la secuencia 2-1-3, se obtiene el diagrama de Gantt presentado en la figura 2.

Las máquinas A y B se encuentran asociadas a las operaciones del trabajo 1 y 2, respectivamente, y se pueden mover sobre cada tramo acompañando las operaciones del

trabajo según sea requerido. El rectángulo punteado corresponde a la ocupación del trabajo 1, mientras que el rectángulo de líneas paralelas corresponde al trabajo 2, observe adicionalmente que la parte del rectángulo sombreada con una malla de recuadros corresponde al tiempo de preparación de la operación. Las operaciones satisfacen el

criterio de no espera. Para este ejemplo, los tiempos de ocupación en cada tramo 1-2-3 son; [0,12] y [16,26], [0,19], y [20,37], respectivamente con ello el tiempo total de ocupación para la ejecución de las tres etapas es calculado como $(12-0) + (26-16) + (19-0) + (37-19) = 59$ y un *makespan* de 37 unidades de tiempo.

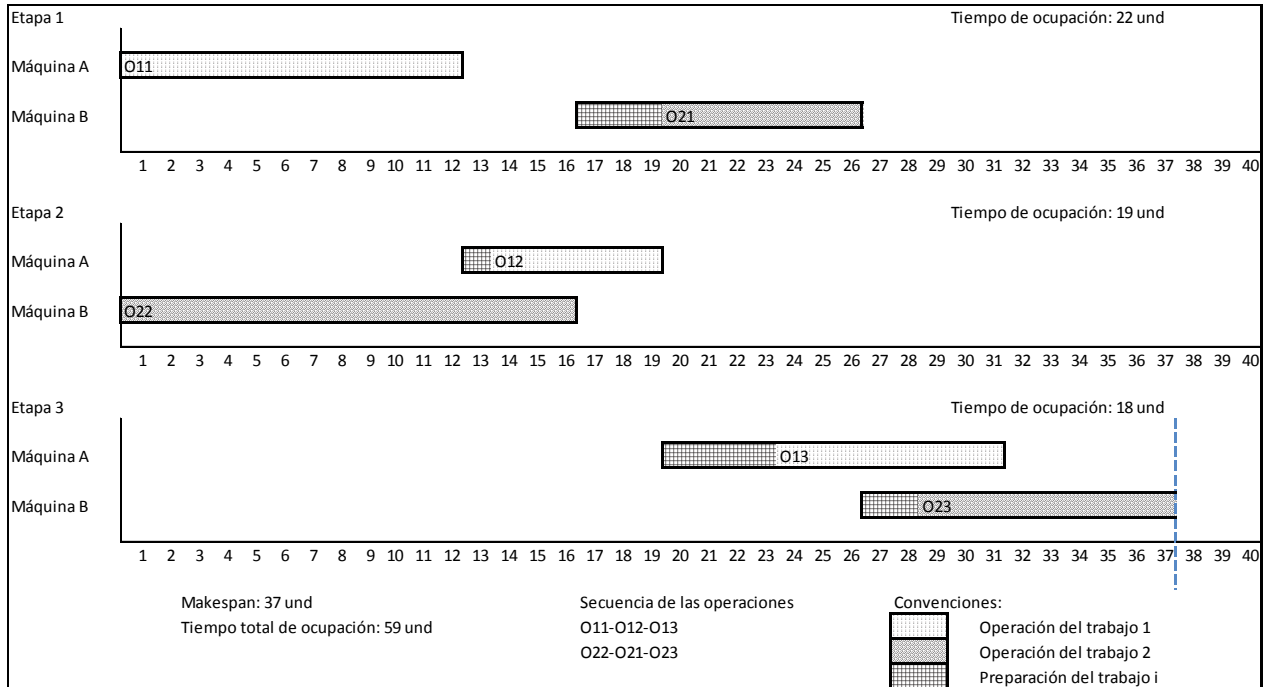


Figura 2. Ejemplo de secuencia arbitraria factible para dos trabajos y tres etapas
Fuente: elaboración propia

5. MODELO DESARROLLADO

Una alternativa diferente a obtener una solución sin criterios analíticos como la presentada anteriormente en la figura 2, es propuesta en esta sección mediante un procedimiento heurístico constructivo, es decir, un procedimiento que construye paso a paso una solución al problema estudiado en este trabajo.

Partiendo del modelo de (Lin *et al.*, 2008), se determina evaluar el escenario que contempla los tiempos de preparación entre etapas, que es un escenario interesante dado que en la mayoría de los problemas reales existen implicaciones por desplazamiento, cambio de herramientas y/o el montaje que puede ser independiente al tiempo de operación en cada etapa, el cual se plantea desde los principios del primer modelo, donde la decisión entre etapas es determinada por los mínimos tiempos de ocupación dentro de cada etapa evaluada, ahora sumándole tiempos de preparación dependientes de la precedencia de las etapas.

El procedimiento inicia con la lectura de los datos asociados al número de máquinas (*m*), el número de etapas (*s*), el tiempo de operación del trabajo *j* en la etapa *k*, denotado como t_{jk} , y el tiempo de preparación que toma al trabajo *j* pasar de la etapa *k* a la etapa *h*, denotado como S_{jkh} . Una vez leídos los datos, el procedimiento decide cada vez

que etapa programar a continuación eligiendo aquella que sugiere el menor tiempo de ocupación teniendo en cuenta para ello los tiempos de operación y el tiempo preparación incurrido. Cuando todas las etapas ya han sido programadas, el procedimiento termina.

A continuación se muestra el pseudocódigo asociado al modelo desarrollado a partir del algoritmo constructivo hacia adelante propuesto por (Lin *et al.*, 2008).

Algoritmo Constructivo hacia adelante

Paso 0: leer trabajos, etapas, tiempos de operación y preparación, $g=0$

Paso 1:

Haga $g=1, j= \{1,2,...,n\}, K= \{1,2,...,s\}$, y $K' = \{\emptyset\}$,

$T_{jk} = t_{jk} + \sum_{k' \in K'} t_{jk'}$ $j \in J, k \in K$

Vaya al Paso 3.

Paso 2: haga $T_{jk} = t_{jk} + \sum_{k' \in K'} t_{jk'} + S_{jkk'}$, $j \in J, k \in K$

Paso 3: calcule $d_k = \max_{j \in J} \{T_{jk}\} - \min_{j \in J} \{T_{jk}\}$, $k \in K$

Paso 4: Haga $d_{k^*} = \min_{k \in K} \{d_k\}$, si existe más de un k^* con el mismo valor, realice el paso 3 donde $\min \{T_{jk}\}$ será reemplazado con el segundo mínimo y así sucesivamente, hasta que solamente se identifique un k^*

Paso 5: Actualice $k^* = k$

Paso 6: La operación O_{jk^*} de cada trabajo j es asignada a la g -ésima posición de la secuencia.

Haga $g=g+1$

Paso 7: haga $K=K \setminus k^*$ y $K'=K' \cup \{k^*\}$

Paso 8: Si $g=m$, termine el algoritmo. Se obtiene la secuencia con los tiempos totales de ocupación. En otro caso regrese al *Paso 2*.

Fin de procedimiento

El procedimiento, que fue implementado y probado en lenguaje de programación de Visual Basic®. Usando la aplicación desarrollada en Visual Basic® para resolver el problema propuesto en la sección anterior, se obtiene una solución con secuencia de etapas 3-2-1 para la ejecución de las operaciones de los dos trabajos, incluyendo en ello los tiempos de preparación. Dicha solución se ilustra mediante el diagrama de Gantt en la figura 3.

El algoritmo aplicado al escenario del ejemplo, donde se tiene los trabajos de instalación sistemas de ventilación y la distribución de energía en tres etapas de un proyecto de túnel minero, ha demostrado que al encontrar la secuencia de las operaciones entre etapas 3-1-2 para ambos trabajos, se logra un tiempo total de ocupación de las etapas de 39 unidades de tiempo frente a 59 unidades en la secuencia arbitraria mostrada en la sección 4, en la figura 2, confirmando de este modo que es significativo el algoritmo aplicado a un problema que exhibe estas características.

Finalmente, el modelo desarrollado puede impactar significativamente los costos a nivel de la operación, que además se refleja en resultados a nivel social y medioambiental, contribuyendo así al incremento de beneficios derivados de la toma de decisiones basadas en datos.

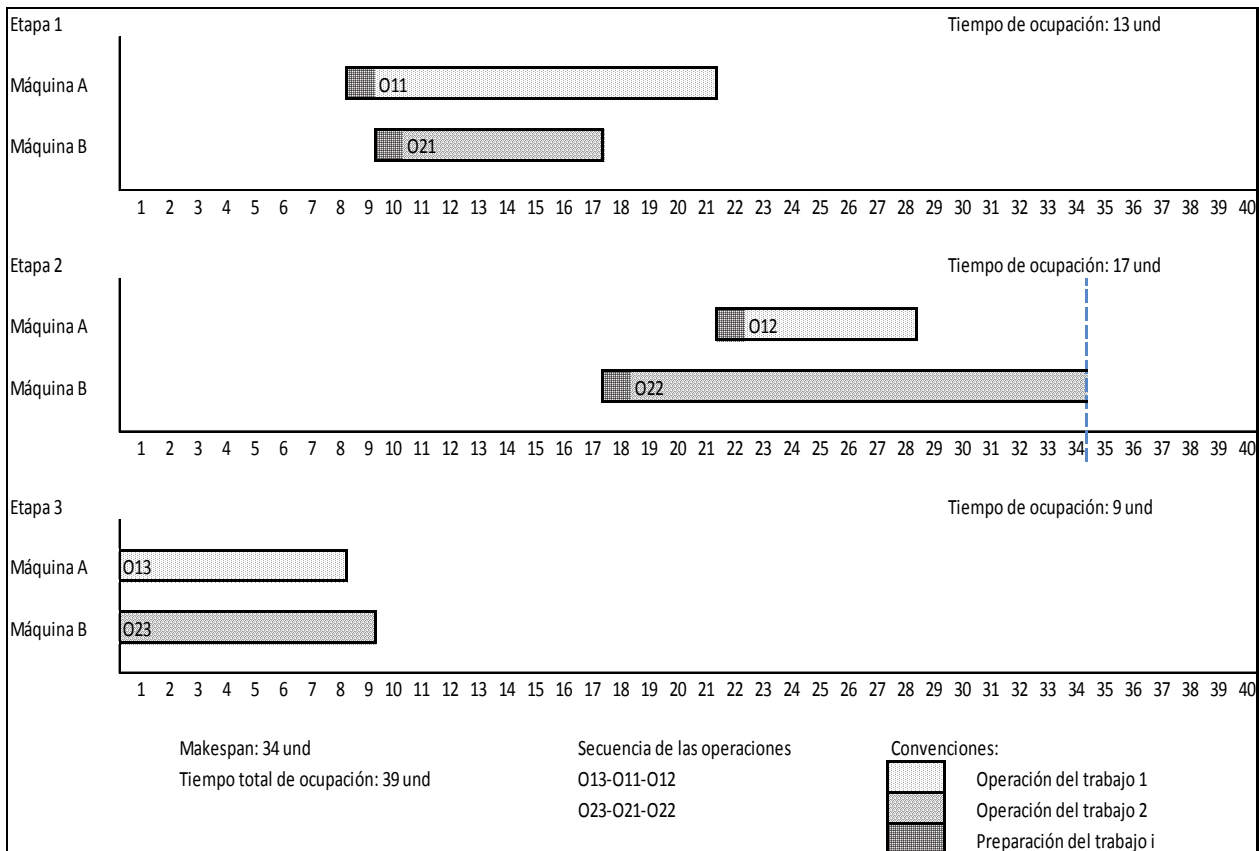


Figura 3. Programación para dos trabajos ejecutados en tres etapas con tiempos de preparación
 Fuente: elaboración propia.

6. Conclusiones

Los proyectos mineros, se caracterizan por un alto costo ambiental, social, por tanto la disminución de los tiempos de operación ayuda a mitigar el impacto negativo que estos proyectos generan en el entorno de operación.

En los problemas de proyectos mineros que se asocian al esquema *Open Shop* debido a la posibilidad de programar los trabajos en distintas secuencias, es difícil cuantificar el

tiempo de ocupación en las etapas, por lo anterior, el procedimiento planteado es de gran interés, considerando que la solución encontrada reduce los tiempos de ocupación, no sólo a nivel individual sino global, de las etapas en el proyecto.

Bajo la consideración de obtener una mayor eficiencia al programar trabajos con características de no espera, tiempos de preparación dependientes de la secuencia, máquinas

móviles, y la posibilidad de operación de los trabajos en simultáneo sobre un tramo de un proyecto, se desarrolla un modelo heurístico que permita encontrar una secuencia con el menor tiempo de ocupación total de todas las etapas.

Se enseña un ejemplo de un escenario en particular, donde inicialmente se analiza el comportamiento de la función objetivo mediante una asignación arbitraria de la secuencia de las operaciones de los trabajos, y posteriormente al mismo ejemplo se aplica el procedimiento heurístico desarrollado, demostrando con éste el aumento en la calidad de la secuencia suministrada al disminuir considerablemente el valor de la función objetivo.

El algoritmo desarrollado busca minimizar el tiempo total de ocupación de las actividades en un proyecto minero en lo relacionado a la construcción de túneles y genera programas factibles y orientados a tal fin.

Los resultados obtenidos concuerdan con el ambiente real; lo que permite ver el potencial que tiene la programación de operaciones para la solución de este tipo de problemas.

Referencias

- [1] Allahverdi, A., Cheng, T.C, Kovalyov, M., 2006. A survey of scheduling problems with setup times or costs. *European Journal of Operational Research*, Volume 187, pp. 985-1032.
- [2] Bahn, S. 2013. Workplace hazard identification and management: The case of an underground mining operation. *Safety Science*, Volume 57, pp. 129–137.
- [3] Bastante, F.G. Taboada, J. Ordoñez. C. 2003. Design and planning for slate mining using optimisation algorithms. *Engineering Geology* 73, pp. 93–103.
- [4] Glehn, F.H, Bluhm, S.J. 2001. Practical Aspects of the Ventilation of High-speed Developing Tunnels in Hot Working Environments. *Tunnelling and underground space technology*. Volume 15, Number 4, pp 471-475.
- [5] Graham, R.L., Lawler, E.L., Lenstra, J.K., Rinnooy, A.H.G, 1979. Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling: A survey. *Annals of Discrete Mathematics*, 5, pp. 287–326.
- [6] Hernández, I., Timón, S., Arroyo, E., Castaño, A., 2011. Manual Técnico para la Ejecución de Galerías. Gobierno de Canarias en colaboración con la empresa Interra, Ingeniería y Recursos S.L.
- [7] Lemieux, M., 2000. Parametric analysis in surface-mine reserve definition: the inherent error and its correction. *Mining Engineering*, pp. 57–64.
- [8] Lin, H.T., Lee, H.T., and Pan W.J.H., 2008. Heuristics for scheduling in a no-wait open shop with movable dedicated machines. *International Journal of production economics*. 111, pp. 368–377.
- [9] Ministerio de Minas y Energía., 2002. Guías Mineras. <http://www.minminas.gov.co/minminas/minas.jsp?cargaHome=3&id_categoria=111&id_subcategoria=252> Consultado en julio de 2013.
- [10] Roe, P.A., Tinney A. 2002. Overview of Best Practice Environmental Management in Mining, Best Practice Environmental Management in Mining Series. Canberra. Commonwealth of Australia. ISBN 062487979 of the series 0642194181.