

NATIONAL UNIVERSITY OF ENGINEERING

COLLEGE OF GEOLOGICAL, MINING AND METALLURGICAL ENGINEERING

MINING ENGINEERING PROGRAM



OPTIMIZED DESIGN OF CARGO AND CARRYING SYSTEM IN UNDERGROUND MINING

PROJECT REPORT

COURSE: GM106 MINING PLANNING

**STUDENTS: CAMPOS DELGADILLO, JENNER
CHIPANA MAYHUA, ROGER JOEL
ESPINOZA CRISTOBAL, BERLYN KELWIN
FLORES DIAS, JOE ELOHARD
HUALAN YUPANQUI, JHON CHRISTIAN**

INSTRUCTOR: BRAÑES GALLARDO, HENRY, PE

Lima - Peru

2020

Abstract

This project is focused on the design and simulation of cargo and carrying systems for underground mining. The simulation is carried out (using the FlexSim 7.3.0 software) to a mining process including storage hoppers and haulage equipment in order to estimate the desirable truck fleet size and the capacity of the trucks and the hoppers as well as assessing whether the design of the access roads is acceptable for the success of the operations. It is concluded that the dimensions of the loading system has been overestimated compared to the existing equipment fleet size. Therefore, it is required to increase the number of trucks or the truck haulage capacity to improve the mine productivity.

INDICE

Resumen	
Abstract.....	2
1. INTRODUCTION.....	5
2. OBJECTIVES.....	7
3. DESIGN ANALYSIS.....	8
3.1. Underground Mining	8
3.2. Leveled Underground Mining.....	8
3.3. Ore Extration Point	9
3.4. Loading Point.....	10
3.5. Hoppers	10
3.6. Operation Intereferences	11
3.7. Failures in Mining Equipment	14
3.8. Dimensioning and Selection of Mining Equipemnt.....	15
3.8.1. LHD (Load-Haul-Damp Machine).....	15
3.8.2 Truck	17
3.8.3. Trains.....	18
3.8.4. Sky Time	19
3.8.5. ASARCO NORM.....	19-20
3.9. Extraction Rate.....	20
3.10. Process Simulation	20
3.11. Discrete Event Simulation (SED)	21
3.12. Mining System	21
3.13. Productivity	21
3.14. Mining Production Plan	22
3.15. Reliability	22
4. SIMULATION	22
4.1. Simulation Software	24

4.2	Case Analysis	25
5.	RESULTAS ANALYSIS	27
5.2.	Cargo and Carrying System	27
5.3.	Production Level Calculation.....	29
5.3.1	Calculation of stock piling area.....	29
6.	CONCLUSIONS	33
7.	RECOMMENDATIONS	34
8.	BIBLIOGRAPHY	35

1. INTRODUCCIÓN

Un proceso productivo puede ser evaluado antes de su ejecución simulándolo en un modelo que permita introducir cambios para analizar alternativas, optimizando eficacia y eficiencia. Actualmente existen diversas herramientas que permiten realizar simulaciones y análisis de sistemas complejos. Este tipo de herramientas es de gran utilidad para los procesos de producción minera, donde intervienen una gran cantidad de variables de incertidumbre.

La gran complejidad y diversidad de proyectos mineros generan una vasta necesidad de nuevas soluciones tecnológicas que permitan facilitar el trabajo en todos los eslabones de la cadena de producción (Van Niekerk, Kleingeld & Booyesen 2013). Aquí es donde las herramientas tecnológicas, en particular los softwares diseñados para el desarrollo de proyectos mineros, y en especial los softwares de simulación, tienen la oportunidad de acercarse a esos requerimientos y buscar métodos innovadores para satisfacerlos, ofreciendo productos y servicios que aporten a los procesos mineros y permitan agregarles valor y mejorar la eficiencia productiva.

La simulación ha sido ampliamente utilizada para examinar problemas de minería a cielo abierto y subterráneo (Newman *et al.* 2010; Vásquez- Coronado & Tenorio 2015), analizar activos mineros (Hodkiewicz, Richardson & Durham 2010), estudiar el impacto ambiental producido por el transporte de carbono (Tarshizi *et al.* 2015) y analizar posibles fallas en equipos (Sharma *et al.* 2009). También ha sido utilizada en otras industrias, como la agropecuaria (Iannoni & Morabito 2006), para resolver problemas de transporte (Gómez & Correa 2011; Jong & Ben-Akiva 2007) y desastres naturales (Li *et al.* 2015).

Encontrar el funcionamiento óptimo de un proceso constituye una tarea de gran complejidad. Esto se debe a la gran cantidad de variables que se presentan en todos los ámbitos de la actividad minera (Hudson 2003), como por ejemplo en el proceso de optimizar el cálculo de la capacidad de almacenamiento de una tolva o de un *stock pile* para obtener la productividad deseada.

Cuando se trabaja con este tipo de problema (con muchas variables) una buena práctica es efectuar cálculos iterativos que permiten encontrar una "solución provisoria". Posteriormente, al poner en funcionamiento el sistema y realizar las mejoras necesarias en base a los resultados obtenidos, se puede alcanzar la "solución óptima".

Actualmente una importante herramienta para optimizar los sistemas, con una mínima inversión de tiempo y dinero, son los simuladores de procesos que permiten detectar, controlar, analizar y corregir las falencias en un sistema. La simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a cabo experiencias con el mismo, con la finalidad de asimilar el comportamiento del sistema o de evaluar diversas estrategias (dentro de los límites impuestos por un criterio o un conjunto de ellos) para entender el funcionamiento del sistema (Sokolowsky 2009).

Actualmente, en la mayoría de los proyectos mineros, los ingenieros seleccionan los equipos y las maquinarias a utilizar; no cuentan con una herramienta automática confiable y apropiada para evaluar y decidir cuál de ellos es mejor para su proyecto, por lo que esta tarea se realiza en función de la experiencia (Baudino *et al.* 2012).

La selección se basa en dos aspectos: 1) la experiencia o información obtenida de un equipo al operar en algún yacimiento y 2) por el temor a fracasar al cambiar un equipo por otro de tecnología poco conocida (Ortiz *et al.* 2007). El objetivo es que el equipo sea suficiente para obtener la producción deseada, pero sin sobredimensionarlo, pues resulta contraproducente. Mediante simulación se pueden analizar diferentes escenarios y brindar múltiples opciones para mejorar el proceso productivo. La simulación puede proveer ventajas en términos financieros para operaciones mineras existentes y nuevas fases de desarrollo.

En este trabajo se presenta el estudio de capacidades de una mina subterránea en expansión utilizando el software de simulación FlexSim. En particular, se desea determinar si la flota de transporte es adecuada para obtener una cierta producción diaria.

2. OBJETIVOS

- Optimizar el carguío y acarreo de una operación minera haciendo uso de herramientas informáticas.
- Identificar eventos que generen interferencia operacional para diferentes componentes del sistema minero subterráneo.
- Realizar la simulación del sistema minero y analizar los impactos en la productividad.

3. ANÁLISIS DE DISEÑO

3.1. Minería subterránea

Una mina subterránea es aquella explotación de recursos mineros que se desarrolla por debajo de la superficie del terreno, la explotación de un yacimiento para una mina subterránea se realiza cuando su extracción a open pit no es posible por motivos económicos, sociales o ambientales. Es necesario la realización de tuneles, pozos, chimeneas, galerías; así como cámaras de carguío y almacenamiento.

La forma de extracción del mineral y el tratamiento del hueco creado son los factores que definen de alguna manera, el método de explotación en este caso debajo de la superficie, pudiéndose distinguir en tres grupos:

Sostenimientos de los huecos con macizo rocoso:

Método de cámaras y pilares

Método de tajeo por subniveles

Shrinkage stoping

Relleno o fortificación de los huecos:

Método de corte y relleno

Metodo de almacenamiento

Métodos de hundimiento:

Sublevel caving

Block/panel caving

3.2. Mina subterránea por niveles

Para llevar a cabo el método de explotación antes descrito, es necesario el desarrollo de distintos niveles operacionales al interior de la mina, en los cuales se desarrollan diferentes labores, operan diferentes equipos y tienen distintos diseños. Este sistema de niveles permite juntar el mineral proveniente de cada uno de los puntos de extracción, agrupándolo en excavaciones verticales llamadas piques, que conectan los distintos niveles, los cuales van disminuyendo en número hacia los niveles más profundos. Para finalmente retirar el mineral de la mina, desde un número reducido de piques, mediante un equipo de mayor capacidad en el nivel inferior. Esto con el fin de hacer más eficiente y rentable el proceso.

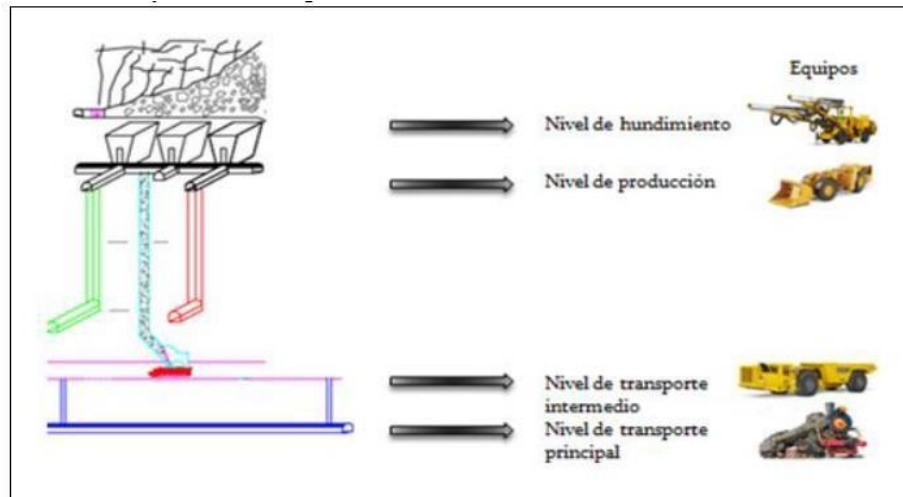


Figura 1. Esquema de un sistema minero por niveles

3.3. Punto de extracción

Corresponde al lugar donde se produce el carguío del mineral quebrado, mediante equipos LHD, el cual cae por un conducto denominado batea, que conecta el nivel de producción con el nivel de hundimiento. A este punto de extracción se accede mediante las zanjass que se disponen a lo largo de las calles productivas.

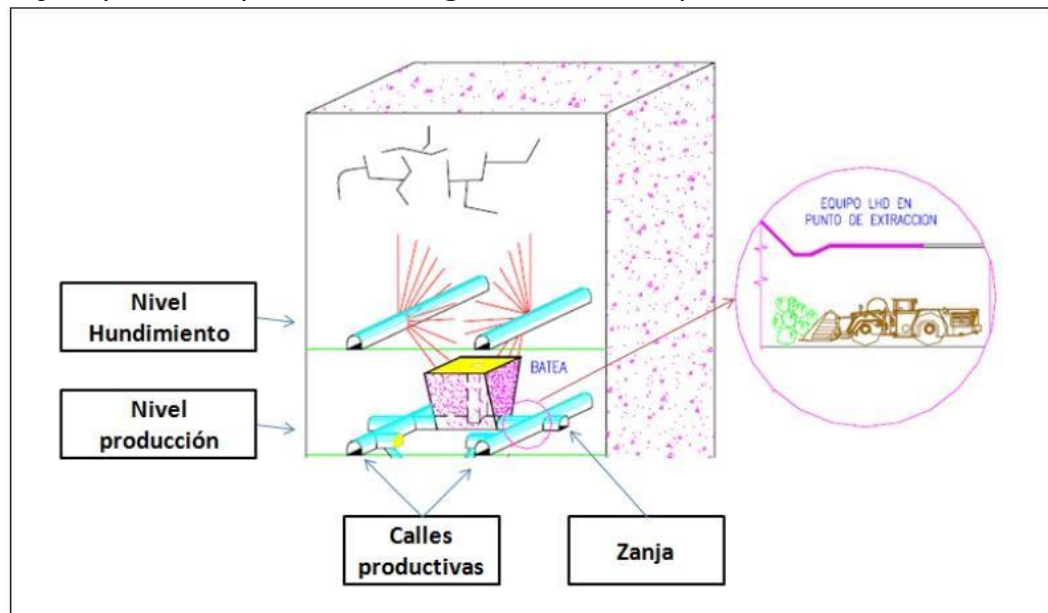


Figura 2. Esquema punto de extracción

3.4. Punto de vaciado

Otro elemento importante de este nivel son los puntos de vaciado, en este lugar se ubica un piques de traspaso (ore passes), que corresponde a una construcción vertical o subvertical cuyo objetivo es el transporte de mineral, estéril y/o relleno desde un nivel a otro en una mina subterránea, sirviendo también como almacenaje de estos componentes.

En este punto el LHD vacía el material recolectado desde el punto de extracción. Dependiendo de la calle puede existir uno o varios piques, estos cuentan en su extremo superior con una parrilla y un martillo, el cual cumple la función de asegurar una granulometría específica del mineral que pasa al siguiente nivel. Mientras que en el extremo inferior se ubica un buzón, que cumple la función de entregar el material de manera controlada, al equipo que opera en el nivel inferior encargado de recibir este material.

3.5. Tolvas

Los buzones corresponden a sistemas de carguío estacionarios que se ubican en el extremo inferior de las chimeneas. Reemplazan al tradicional sistema de carguío mediante cargador frontal, permitiendo obtener menores tiempos y costos de la operación, menores requerimientos de ventilación y mayor seguridad.

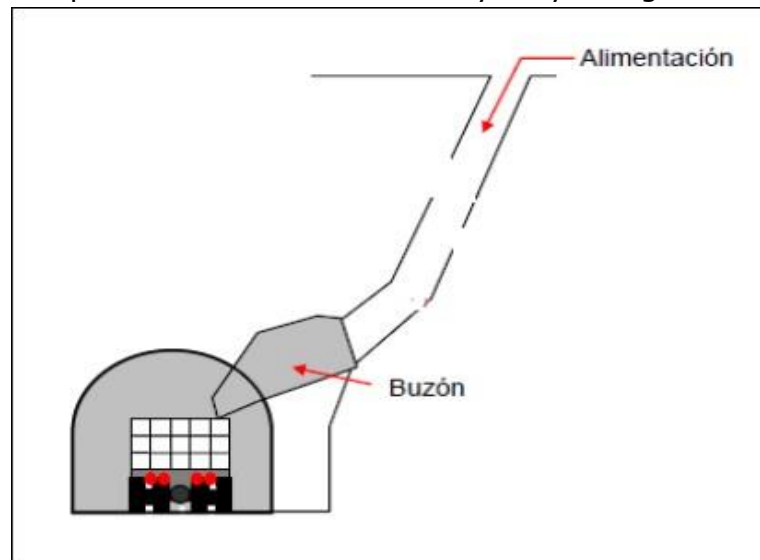


Figura 3. Esquema de pique de traspaso con tolva o buzón de carguío.

3.6. Interferencias operacionales

Las interferencias operacionales corresponden a eventos o condiciones que perjudican el funcionamiento de la operación, impidiendo que esta se realice de la forma que se tiene presupuestada. Estas interferencias afectan la productividad del sistema minero y por ende la planificación minera. Este tema es de gran relevancia dentro de los sistemas mineros que son agregados por niveles, ya que estas interferencias operacionales pueden no solo afectar al sector o nivel en que ocurren, sino que también comprometer el comportamiento de la operación en los demás niveles. Dentro de la operación podemos encontrar diversos lugares o procesos donde pudiesen aparecer interferencias con la operación, dentro de los cuales vamos a destacar al menos los siguientes: puntos de extracción, piques de traspaso y los equipos mineros.

- **Puntos de extracción**

A nivel de puntos de extracción podemos identificar al menos los siguientes tipos de interferencias operacionales, asociados a su fenomenología:

FENOMENOLOGÍA	INTERFERENCIAS OPERATIVAS
Grado de fragmentación	Colgadura
	Sobretamaño
Humedad	Barro
	Enllampamiento
Campo de esfuerzos	Inestabilidad
	Colapso

Tabla 1. Interferencias operacionales asociadas a los puntos de extracción

Una colgadura se refiere a la formación de un arco estable de rocas de mineral o bloques que se atascan en lo alto de la columna de mineral, que impide el libre flujo gravitacional, dejando inoperante el o los puntos de extracción afectados. Dependiendo de la altura donde se genere este arco, el impacto en la operación es diferente:

A baja altura en el mejor de los casos afectara solo a un punto de

extracción, este problema puede ser resuelto con técnicas de fragmentación secundaria. Un arco a media altura resulta ya inaccesible para su fragmentación y puede afectar varios puntos de extracción, sin embargo, una característica en común entre ambas es que el arco estable se forma en material ya fragmentado por el proceso de hundimiento y pueden detectarse tempranamente por la simple observación del punto de extracción. Un tercer y más peligroso tipo de colgadura son aquellas que se forman debido a que el proceso natural de quiebre de la roca se ha detenido y la extracción en niveles inferiores ha continuado.

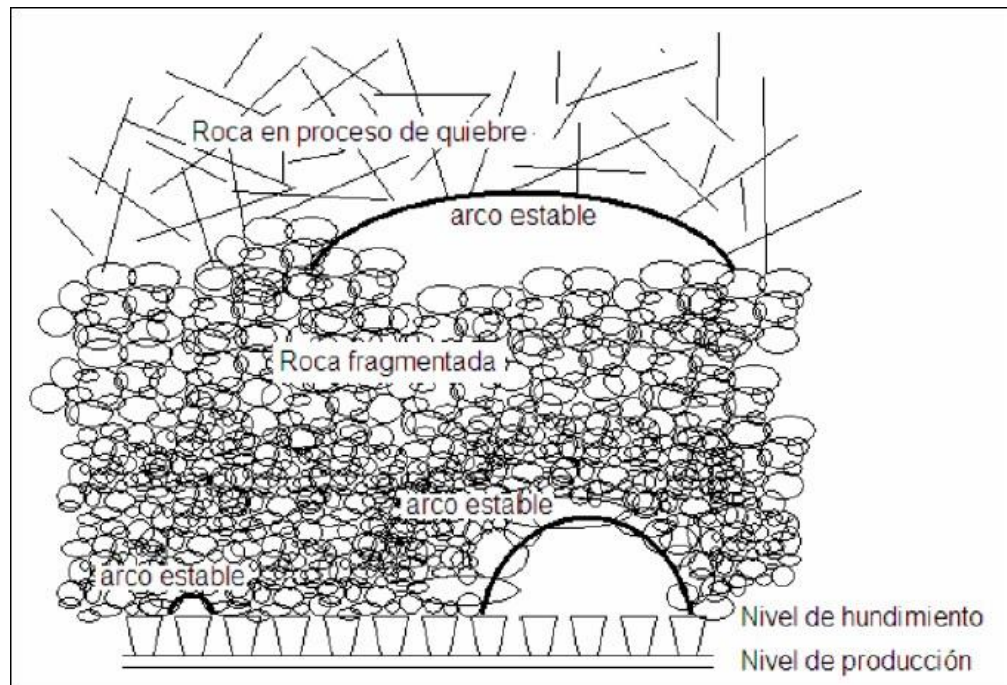


Figura 4. Esquema de colgaduras en los puntos de extracción

Otra interferencia operacional es el sobretamaño, entendiéndose este como la aparición de colpas (rocas de un tamaño superior al manejable por los equipos de carguío o parrillas) en los puntos de extracción, interrumpiendo el carguío de material.

Su magnitud es variable, así como también su impacto en la productividad el sistema. Flujos menores de barro a través de los puntos de extracción no implican su paralización, debido a que si bien resulta una práctica riesgosa, puede accederse al punto en el equipo LHD y retirar mineral utilizando extracción controlada. En otras ocasiones el flujo es de tal magnitud, que se hace imperativo cerrar cruzados de producción completos por razones de seguridad. Los empapamientos son otro tipo de interferencia que se detecta a

nivel de los puntos de extracción. Se produce por la compactación de material fino, que juntos a la presencia de agua y bajas temperaturas genera un aglomerado de material que imposibilita el carguío de material.

La explotación minera por hundimiento genera una gran redistribución de esfuerzos al interior del macizo rocoso, debido a que en general, el material fragmentado no puede transmitir esfuerzos. Eventualmente la infraestructura minera no es capaz de resistir la condición de esfuerzos imperantes, generándose condiciones de inestabilidad y deformaciones importantes en las excavaciones que hacen imposible la utilización del sector por motivos de seguridad. En un caso extremo la roca colapsa bajo su propio peso luego de haber alcanzado su límite máximo de deformación.

- **Piques de traspaso**

El escurrimiento del mineral a través de un pique debe ser totalmente expedito y libre. Al almacenar material en los conductos este tiende a compactarse a medida que la columna crece, la roca tiende a formar un arco natural conocido como colgadura de un pique.

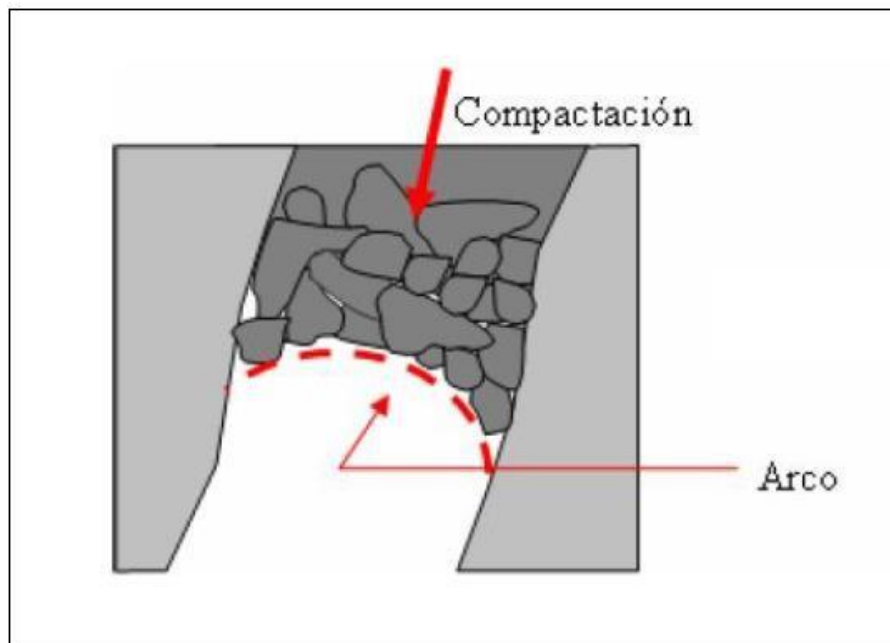


Figura 5. Esquema de colgadura de un pique

En zonas donde hay bajas temperaturas puede que sea frecuente el

congelamiento del material debido a la presencia de agua entre los espacios del material, lo cual genera colgaduras (1). Otra consideración es que el material fino puede generar compactación en las paredes del pique produciéndose el enlompamiento y por consecuencia la disminución de la sección de este (2). Por último la erosión que sufre el pique puede un caseroneo (aumento del diámetro del pique producido por derrumbes) el cual puede ser de ayuda si este material que fue desprendido fluye junto al resto del material (3), pero en algunos casos puede desprenderse un bloque de tal magnitud que bloquee el pique interrumpiendo la operación (4).

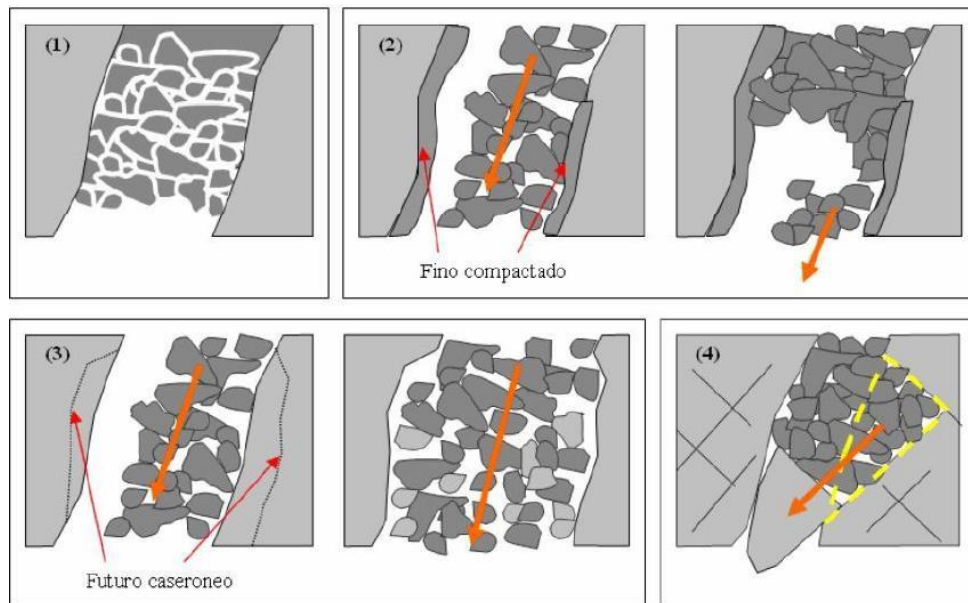


Figura 6. Interferencias operacionales en el pique de traspaso

3.7. Fallas en equipos mineros

Los equipos mineros son elementos fundamentales para poder realizar las operaciones unitarias, que en conjunto hacen que el sistema minero sea productivo. Es muy importante que las máquinas operen según lo planificado, para poder cumplir con el plan productivo de la faena minera. Al igual que en cualquier industria, los equipos mineros tienen mantenciones programadas cada ciertas horas de trabajo, esto con el fin de evitar fallas que pudieran comprometer las operaciones en las que participan. A pesar de lo anterior, los equipos eventualmente pueden presentar fallas, daños o condiciones que no permitan que estos sean operados bajo condiciones seguras, estas se pueden deber a diversos factores como por ejemplo: estado de las carpetas de

rodado, condiciones del área de carguío y descarga, factores humanos, granulometría del mineral a cargar, mantenciones a destiempo o ineficientes etc.

Estas interferencias operacionales pueden afectar la productividad, ya que producen un desbalance del sistema de manejo de materiales, afectando no solo al nivel en que se encuentra el equipo sino también a los demás niveles mineros. Esto debido a que la flota de equipos que operan en cada nivel, está diseñada para manejar el material proveniente de los niveles superiores, y a su vez entregar la cantidad de material acorde a las capacidades de los niveles inferiores, de manera que los equipos y el sistema funcione de manera eficiente.

3.8. Equipos mineros

En un sistema minero subterráneo encontramos diversas operaciones unitarias (perforación, tronadura, carguío y transporte) además de operaciones auxiliares que dan soporte a las anteriores (soporte, ventilación, drenaje, comunicaciones, etc.), cada una de estas operaciones utiliza equipos específicos que permiten realizar la labor de manera más eficiente y segura. Para el estudio realizado por esta memoria solo serán analizadas las operaciones de carguío y transporte, las cuales para el caso particular de esta faena minera utilizan los siguientes equipos: LHD, camiones y trenes.

3.8.1. LHD

Estos equipos son utilizados en el nivel de producción, cumplen las labores de carguío y transporte (corresponde a un equipo mixto) del mineral, La funciones de este equipo contemplan principalmente el carguío de mineral en los puntos de extracción, transporte hacia los piques de traspaso y descarga del material en el punto de vaciado, también son utilizados para el traslado de marina (material resultante del proceso de construcción de galerías subterráneas, mediante perforación y tronadura).

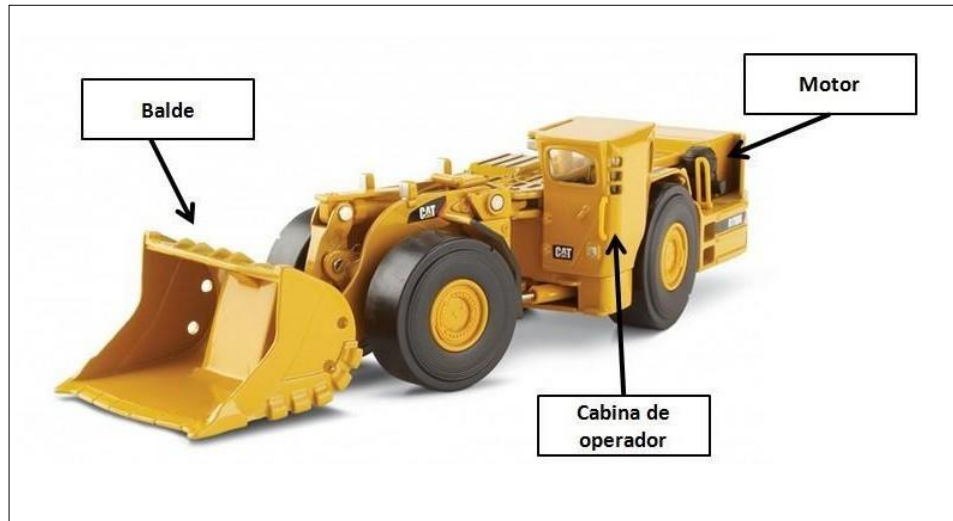


Figura 7. Equipo LHD

Estos equipos son diseñados especialmente para trabajar en minería subterránea:

- Pequeños radios de giro.
- Angostos y baja altura.
- Gran capacidad de tolva.
- Buena velocidad de desplazamiento.
- Descarga a camiones, piques y piso.
- Existen diesel y eléctricos.
-

El tamaño del LHD es función del layout disponible, recuperación, productividad, distancias a recorrer y fragmentación esperada.

El tipo de LHD a escoger (diesel o eléctrico) dependerá de los requerimientos y la experiencia práctica que se tenga en la faena. Dentro de las consideraciones a tener se encuentran las siguientes:

ITEM	LHD Diesel	LHD eléctrico
Flexibilidad	Flexibles y faciles de mover no solo para cambiar el equipo en un nivel sino para usarlo en otras actividades como limpieza de calles y barro	Están limitados a la zona de producción Limita el acceso a las zonas de trabajo Se limita el uso de las unidades a otras tareas lo que es bueno
Reducción secundaria	Se puede realizar reducción secundaria detrás de las maquinas	Se debe tener cuidado con los cables eléctricos
Ventilación	Requieren de aire fresco en la frente	Operan bajo mínimos requerimientos de aire → se debe considerar polvo
Automatización	<ul style="list-style-type: none"> •Es posible automatizar estos equipos. •No se pueden hacer conexiones con barreras de seguridad eléctricas 	<ul style="list-style-type: none"> •Es posible automatizar estos equipos. •Se pueden hacer conexiones con barreras de seguridad eléctricas y la unidad que permite el apagado del equipo en condiciones de emergencia.
Otros		Carga mejor Alta disponibilidad Menor costo capital Silencioso Mas frío

Tabla 2. Comparación entre LHD diesel y eléctrico

3.8.2 Camiones

Los camiones corresponden a equipos de transporte de materiales, corresponden a un sistema de transporte discontinuo (a diferencia de correas transportadoras que corresponden a un sistema continuo). Estos equipos son utilizados en minería subterránea como a cielo abierto. Existen diversos tipos de camiones dentro de los que podemos destacar los camiones de carretera y los camiones mineros. Los primeros tienen un precio de adquisición bajo, comparado con los mineros, comúnmente entre los 60.000 y 140.000 dólares, son equipos operados por diesel y no cuentan con articulación central, la vida útil de estos equipos es baja ya que no están hechos para operar en las condiciones severas que impone la minería, típicamente tienen 2 a 3 años de vida útil.



Figura 8. Camión de carretera

Por otro lado los camiones mineros o dumpers, se utilizan en el transporte de materiales en minería subterránea, son equipos especialmente diseñados para operar bajo las exigencias y dificultades que presentan las faenas mineras subterráneas, se distinguen por su capacidad de transporte y sus bajas dimensiones, son equipos diesel o eléctricos, cuentan con articulación central, el precio es muy superior a los camiones de carretera, comúnmente entre los 280 y 570 mil dólares, y la vida útil típica de estos equipos es de 5 a 6 años.



Figura 9. Camión minero subterráneo

Estos equipos son utilizados en minería de block/panel caving, cumpliendo la función de transportar el mineral que es cargado ya sea mediante equipos LHD o mediante buzones ubicados en piques de traspaso de mineral, para luego ser transportados hacia otros piques de traspaso o hacia el exterior de la mina.

3.8.3. Trenes

Este sistema se utiliza para el transporte horizontal de materiales (pendientes de 0 a 2%), en minas de alta capacidad productiva, con distancias de transporte considerables. Al circular sobre rieles estos equipos tienen rutas fijas a diferencias de los camiones. Tienen como principales ventajas la alta productividad, confiabilidad, seguridad, bajo costo de mantención y operación. En cambio posee desventajas como la alta inversión inicial, altos costos de instalación, talleres de mantención especializados y baja flexibilidad en el transporte. Se tienen del tipo diesel y eléctricos, pudiendo ser autónomos, es decir sin necesidad de utilizar un conductor.

3.8.4. Tiempo de ciclo

El tiempo de ciclo en el proceso de carguío y transporte se calculara de la siguiente manera:

3.8.5. ASARCO Norm

La norma ASARCO (American Smelting & Refining Co.) es el marco de referencia utilizado para la definición de conceptos y distribución de los tiempos en que el equipo, máquina, o instalación incurren durante la operación.



Figura 10. Definición gráfica de tiempos según norma ASARCO

Donde:

- Tiempo Nominal: Corresponden al espacio de tiempo en que se realiza la medición (espacio muestral). Este tiempo dependerá del tiempo de continuidad de la faena productiva.
- Fuera de servicio: Espacio de tiempo en que el equipo se encuentra fuera de servicio o no disponible, ya sea, por una mantención programada o imprevistos de tipo mecánico o eléctrico.
- Tiempo disponible: Espacio de tiempo en que el equipo se encuentra electromecánicamente habilitado para operar.
- Tiempo operativo: Espacio de tiempo en que el equipo está operando (con operador).
- Tiempo de reserva: Corresponde al espacio tiempo en que el equipo está electromecánicamente disponible para trabajar, pero no está siendo utilizado en labores productivas, ya sea por falta de operador o que bajo condiciones específicas de la faena no pueda ser operado.

- Demoras programadas: Espacio de tiempo en que el equipo no opera debido a actividades normadas por ley, tales como colación o cambio de turno.
- Demoras no programadas: Espacio de tiempos en que el equipo no opera, debido a condiciones propias de la operación o ineficiencias de ésta, tales como carga de combustible, acomodo o limpieza del lugar de faena, etc.
- Pérdidas operacionales: Espacio de tiempo en que el equipo no puede operar, debido a la espera de equipo complementario, tales como sistemas de alumbrado, martillo picador, etc.
- Tiempo efectivo: Espacio de tiempo en que el equipo se encuentra realizando aquellas tareas para los cuales fue adquirido y diseñado.

3.9. Tasa de extracción

La velocidad o tasa de extracción se define como la cantidad de material que se extrae desde un área determinada durante un tiempo específico. Esta tasa puede ser calculada tanto para un punto de extracción como para el área completa en explotación. En la práctica existen restricciones tanto para la velocidad máxima del punto como la del área.

En general la tasa de extracción actúa como una cota restrictiva, en primer lugar esto es porque no se debe extraer a mayor velocidad que la velocidad en que se va generando el material debido a la propagación del caving (velocidad de propagación), la segunda etapa ocurre inmediatamente después de la primera y se conoce como la velocidad de régimen. En esta parte el cerro ha alcanzado su fragmentación completa, el caving ha llegado a superficie, o ha conectado con material quebrado superior y por tanto es posible extraer a mayores velocidades, pero restringido siempre por el sistema de manejo de materiales.

3.10. Simulación de procesos

Se refiere a la construcción de un modelo abstracto que representa algún sistema de la vida real. Simulación es el proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir experimentos, con el propósito de entender el

comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias con las cuales se puede operar el sistema.

Entre nuestras razones para experimentar con un modelo en lugar del sistema real podemos destacar:

- El sistema es demasiado complejo como para resolverlo analíticamente
- Experimentar con el sistema minero es costoso
- Experimentar con el sistema es inapropiado y peligroso

Existen varios software de simulación en el mercado, dentro de los cuales podemos destacar por ser los más conocidos:

- Arena
- Automod
- Flexsim
- Promodel
- Simul8
- Slam 2
- Witness

3.11. Simulación de evento discreto (SED)

Se refiere a la simulación de sistemas que pueden ser representados por una secuencia o serie de eventos. La simulación describe cada evento discreto, moviéndose de uno a otro, a medida que el tiempo transcurre. Las variables de estado cambian de valor en momentos instantáneos de tiempo, y no en forma continua.

3.12. Sistema minero

Unidad productiva que conjuga el comportamiento geomecánico de la roca, las operaciones unitarias, el diseño y geometría de la mina, para cumplir un determinado plan de producción minero a un determinado costo, dilución y recuperación minera.

3.13. Productividad

En esta memoria nos referimos a la productividad como la cantidad de material extraída por un determinado sistema minero en un determinado tiempo.

3.14. Plan de producción minero

El plan minero corresponde al programa de producción de corto, mediano y largo plazo de una faena minera, que contempla a lo menos el ritmo de producción, sectores por explotar, leyes y destinos de los diferentes materiales que se extraen.

3.15. Confiabilidad

Probabilidad de que un determinado sistema minero opere para producir una determinada cantidad de mineral. Es función de la tasa de falla intrínseca de los componentes del sistema minero.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación se presenta un enfoque metodológico que permite estudiar y evaluar los puntos críticos de un sistema de transporte de una mina subterránea, con el objetivo de determinar la producción diaria de la misma. Para ello, se utiliza una metodología basada en el modelado y posterior simulación del sistema bajo estudio. La importancia de la metodología utilizada se basa principalmente en la etapa de “retroalimentación” que permite detectar falencias en el modelo obtenido, ajustar parámetros y rediseñar escenarios de prueba.

En particular, este trabajo se enfoca en la simulación basada en procesos. En este caso, las actividades más importantes del sistema son modeladas y mediante parámetros de tiempos, obtenidos luego de hacer pruebas reales en la mina subterránea, se ejecuta la correspondiente simulación.

La técnica de simulación implica replicar artificialmente las características de un sistema a través de un modelo e imitar su operación a medida que transcurre el tiempo. En la Figura 5 puede observarse un esquema del proceso de simulación. En este esquema se puede apreciar que los resultados obtenidos pueden utilizarse para mejorar el modelo inicial y ajustar parámetros de la simulación, de forma tal que la simulación resultante sea lo más parecido al sistema real.

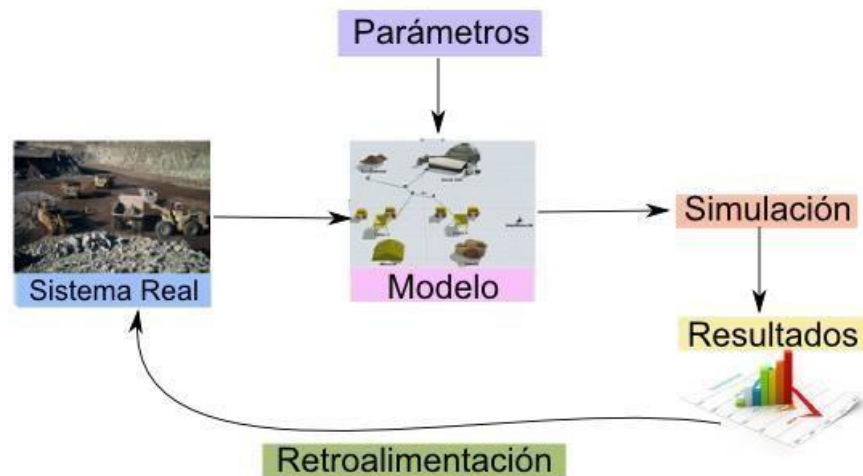


Figura 11. Esquema del proceso de simulación.

Con base en el análisis del comportamiento del modelo, luego es posible inferir las características operacionales del sistema real. Simular requiere construir un programa que posibilite seguir la secuencia de los eventos y observar cómo cambian los descriptores del sistema en orden cronológico. Es por ello que una simulación debe contener una variable que represente el tiempo de simulación llamado *clock* o reloj (Kelton, Sadowski & Sturrock 2008). Una de las etapas más importantes es el modelado. Medina-Pasaje (2005) plantea que:

“El modelado, como herramienta de abstracción y simplificación de la realidad, es pues una técnica extremadamente útil para enfrentarse a la complejidad, al facilitar tanto la comprensión como la resolución de los problemas. No existe un modelo único, ni correcto, de una determinada situación, solo modelos adecuados o no a un cierto fin, pues toda abstracción es por definición incompleta”.

En la primera etapa se define el objetivo del estudio de la simulación, es decir, qué métricas son de interés para evaluar el caso de estudio particular. En la segunda, se caracterizan las operaciones más importantes y sus distribuciones, incluyendo políticas, operaciones y recursos. Por último, en la tercera etapa se definen las entidades, servidores y recursos.

La definición de parámetros incluye las variables de entrada, parámetros y variables de respuesta del modelo. Para obtener las variables de entrada es necesario realizar una recolección de datos y determinar su distribución estadística. Generalmente, la obtención de estas variables se realiza mediante mediciones en el sistema real.

La etapa de simulación incluye la codificación del modelo conceptual al software seleccionado. Esta codificación debe ser validada y verificada con el fin de garantizar un resultado certero.

Los resultados obtenidos se analizan para determinar si el modelo satisface las condiciones requeridas por el sistema real y se investigan las métricas de interés para determinar si es necesario realizar modificaciones sobre el diseño del modelo original.

La etapa de retroalimentación incluye evaluar alternativas de oportunidad de mejorar y analizar nuevas alternativas de diseño.

4.1. Software de simulación

Los simuladores son herramientas computacionales que permiten experimentar y analizar el comportamiento obtenido de procesos de producción en diferentes escenarios (Maxera-Bedón 2005). Actualmente, existen en el mercado algunos simuladores bastante compactos y fáciles de entender por los usuarios (Sánchez 2005; Dyer & Jacobsen 2006; Cortés *et al.* 2004).

Estos softwares se pueden clasificar como software de simulación de propósito general, como Arena (ARENA Simulation Software 2016), FlexSim (FlexSim 2016), AweSim (Zúñiga-Arriaza & Araya 2010) y GPSS/H (Software Products 2016); y softwares diseñados específicamente para resolver problemas que pueden surgir durante un proyecto minero, como HAULSIM (Haulage Simulation 2016), SIMULART (SIMULART 2016) y SimMine (Mining-technology.com 2016).

También existen herramientas de modelado de propósito general que pueden ser aplicados a proyectos mineros, como UML (Giubergia *et al.* 2012) y Redes de Petri (Giubergia *et al.* 2014).

4.2 Caso de estudio

En este trabajo, el modelo de simulación se realizó con base en una operación minera subterránea. El transporte del material se llevó a cabo mediante cuatro camiones de capacidad conocida. El material se transportó desde dos tolvas de almacenamiento en el subsuelo, hasta dos puntos de descarga en superficie (planta de procesamiento y desmontera). La mina consta de dos niveles:

Nivel 1: la tolva es utilizada para la extracción del mineral.

Nivel 2: se encuentra en desarrollo, por lo que la tolva es utilizada para la extracción de material estéril.

Los camiones volquete de 40 t de capacidad son cargados por los propios conductores del equipo para lo cual cada tolva posee un sistema hidráulico de descarga. Los camiones cargados inician el viaje a la superficie a través de una rampa, con una pendiente de 25° de inclinación, y posteriormente un tramo horizontal hasta su destino final, que es la planta de procesamiento para el mineral y la desmontera para el material estéril. La Figura 12 muestra las distancias entre cada punto del sistema a evaluar.

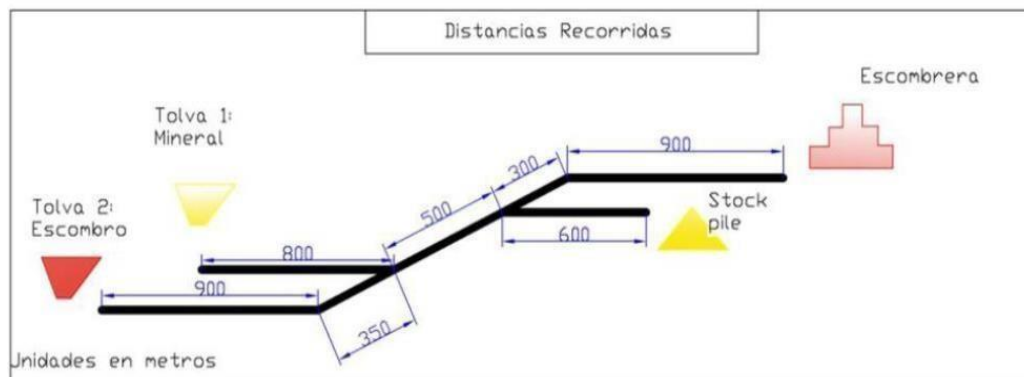


Figura 12. Esquema del sistema real.

La Figura 13 muestra la vista en perspectiva de la planta, los puntos de extracción, la desmontera y los trayectos que conectan cada punto estudiado en la simulación, utilizando el software FlexSim.

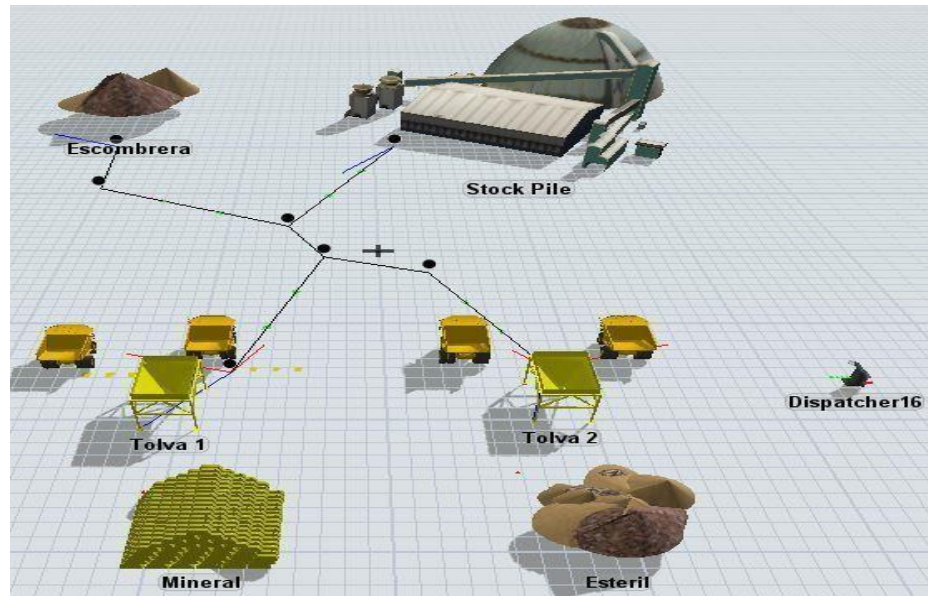


Figura 13. Vista en perspectiva del modelo de mina subterránea.

De los datos obtenidos mediante la toma de muestra de tiempos en la mina se tiene que, cuando los camiones circulan cargados su velocidad promedio es: 15,5 km/h en caminos horizontales y 7,5 km/h en caminos con pendientes. Cuando los camiones circulan descargados su velocidad es 25 km/h en caminos horizontales y 30 km/h en pendientes.

Adicionalmente se obtuvieron las siguientes medidas del tiempo de carga y descarga: (1) El mineral es cargado en las tolvas con una distribución exponencial con media 3,8 horas. (2) La tolva de mineral carga los camiones con una distribución exponencial con media 6,3 horas. (3) La tolva de estéril carga los camiones con una distribución exponencial de 6,2 horas.

La simulación del proceso de carga y transporte se realizó para un periodo de 24 h en el cual el funcionamiento de los camiones y las tolvas es continuo.

En la siguiente sección se utilizan las herramientas estadísticas provistas por el software FlexSim para analizar el desempeño de los distintos componentes del sistema bajo estudio; mediante los datos estadísticos se pretende estudiar su comportamiento buscando posibles fallas, cuellos de botella y puntos en los que se pueda efectuar alguna mejora.

5. RESULTADOS

5.1. Comportamiento de las tolvas

En la Figura 14 se observa el comportamiento correspondiente a las tolvas de mineral y estéril, donde se indica el porcentaje de tiempo que se encuentran en espera.

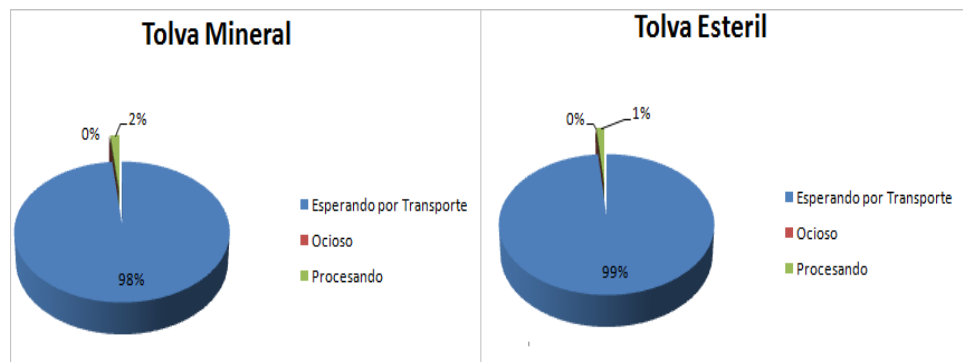


Figura 14. Tiempo de espera de las tolvas.

Esta figura muestra que el tiempo de espera es de 98 % para la tolva de mineral y 99 % para la tolva de estéril. Solo un máximo de 2 % del tiempo se encuentran operando. Por lo tanto, se puede deducir que las tolvas están sobredimensionadas con respecto al número de camiones. En la próxima sección se reafirma lo mencionado al analizar el comportamiento del transporte.

5.2. Comportamiento del transporte

A continuación se estudia el comportamiento de cada una de las unidades correspondiente al sistema de transporte. En la Figura 15 se puede observar que los tiempos de viaje cargado, descargado y tiempo ocioso son similares en los cuatro camiones, debido a que tienen idénticas características.

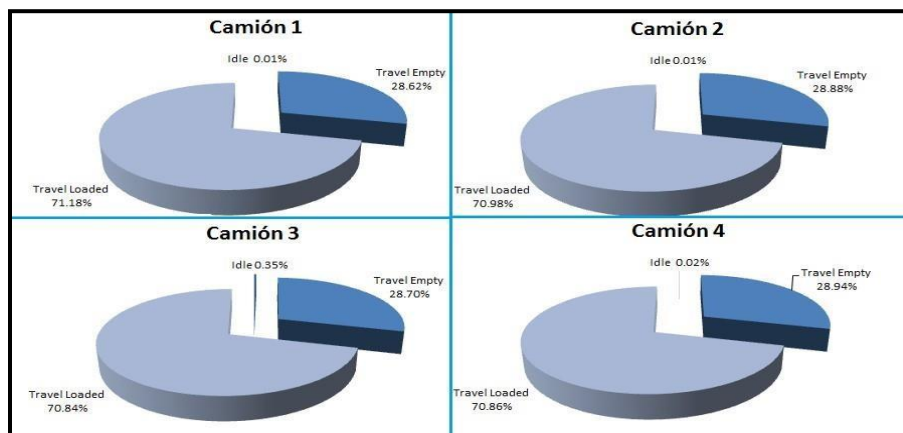


Figura 15. Tiempos del ciclo de los camiones.

Dada la similitud de los datos se ha decidido trabajar con valores promedios, obteniendo el gráfico mostrado en Figura 15, representativo de los cuatro anteriores.

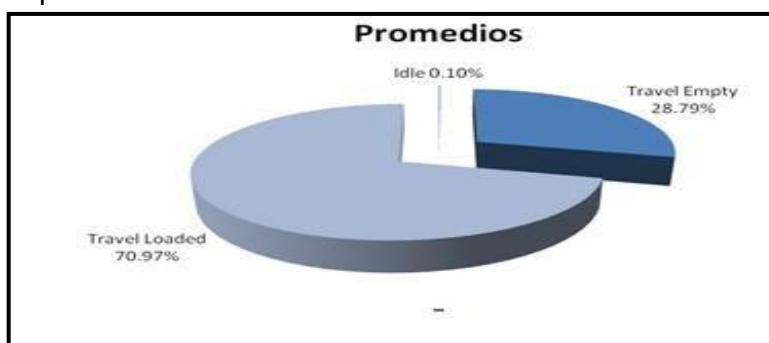


Figura 16. Tiempos promedios.

En la Figura 16 se puede observar que prácticamente el 100 % del tiempo los camiones están viajando, ya sea a buscar material (*Travel Empty*) o llevando material (*Travel Loaded*). Como es de esperarse, la mayoría del tiempo el camión viaja cargado debido a que su velocidad disminuye al 50 % de la velocidad del camión vacío.

Se puede observar un cuello de botella en el sistema de transporte ya que el tiempo ocioso (*Idle*) de los camiones es de 0,1 %, lo que indica que una vez que el camión descarga, ya hay material disponible para ser transportado.

Haciendo el análisis del comportamiento de las tolvas y del transporte, es claro que existe una falencia en el sistema, ya que la cantidad de camiones no es la suficiente para transportar la cantidad de material que despachan las tolvas.

5.3. Cálculo de producción

En la Tabla 3 se muestra un resumen de la cantidad de material transportado hasta la desmontera y stock pile para la simulación de 24 h, tanto del peso como del volumen movido. Se encuentra también la cantidad de camiones que ingresaron (Input), cada uno de 40 t.

	Input	Densidad Aparente t/m³	Peso t	Volumen m³
Desmontera	220,00	1,70	8 800,00	5176,47
Stock Pile	221,00	1,90	8 840,00	4652,63
Total	441,00		17640,00	9829,10

Tabla 3. Cantidad de material transportado

5.3.1 Cálculo del área afectada por la desmontera y stock pile en un día

En cuanto a la densidad del material se toma un mineral de hierro, considerando que las densidades eran de 2,85 t/m³ para el mineral y 2,55 t/m³ para el estéril (Manual de Rendimiento de Caterpillar 2010). Luego de ser volado el material, al ocupar más volumen (debido al esponjamiento del 50 %), su densidad va a ser menor: 1,9 t/m³ y 1,7 t/m³, respectivamente. El ángulo de reposo de ambos materiales es de 35°.

Conociendo el volumen y el ángulo de reposo del material se calcula la superficie afectada para la construcción de las pilas para un día. Por lo general, las desmonteras tienen la forma de cono, dado a que el material adopta esta forma naturalmente. Para el cálculo de la pila con forma de cono truncado se toma un ángulo de reposo de material de 35°, que es un valor promedio del rango típico (30°-40°), según el Manual General de Minería y Metalurgia (2006).

Por otra parte, se ha buscado un equipo que tenga una capacidad de 40 t que pueda ser utilizado en la mina subterránea, que cumpla algunas especificaciones como radio de giro y longitud del camión para establecer un radio mínimo (r) para que el camión realice maniobras. La Figura 17 muestra el equipo seleccionado, cuya longitud es de 11,263 m y tiene un radio de giro entre pared de 8,967 m.

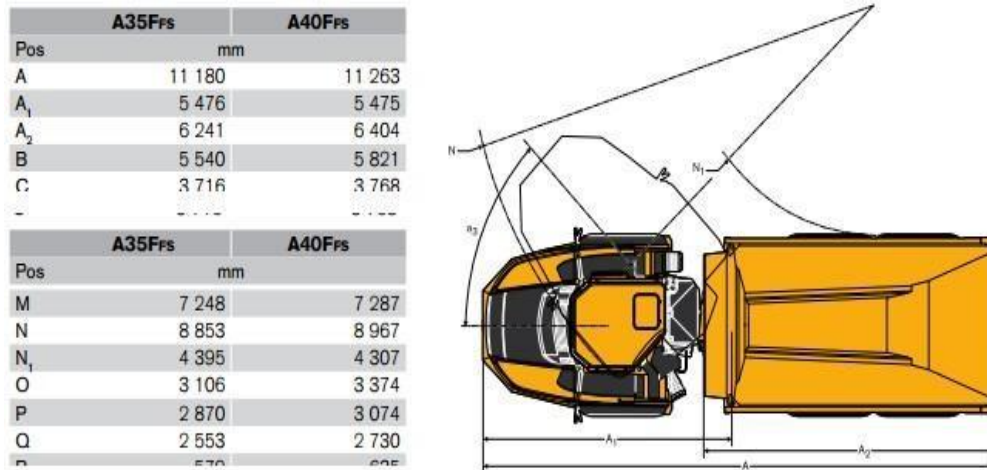


Figura 17: Equipo seleccionado: Dumper Articulado Volvo A40F.

Conociendo el volumen y el ángulo de reposo del material se calcula la superficie afectada para la construcción de las pilas para un día, las cuales tendrán la forma de cono truncado. Se fija un radio menor de 20 m, para que los camiones puedan realizar maniobras en la parte superior de la pila. La fórmula para calcular el volumen es:

$$\frac{1}{3}\pi h(R^2 + r^2 + Rr)$$

Donde:

R: Radio mayor;

r: Radio menor;

h: Altura.

En la Figura 18 se muestran gráficamente los parámetros que participan en la ecuación.

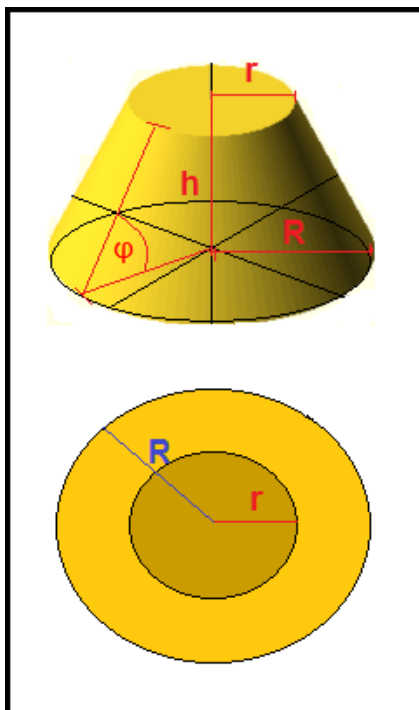


Figura 18. Perfil y vista en planta de una pila de material (stock pile).

5.3.2. Cálculo de superficie para la desmontera

Se realizaron los cálculos correspondientes para determinar la superficie de la desmontera, los cuales arrojaron, para un radio menor ($r=20$ m) y una altura ($h=4,3$ m), una superficie de $2147,1 \text{ m}^2$. A continuación se presentan en la Tabla 4 y la Figura 19 los cálculos realizados.

Tabla 4. Cálculos de las dimensiones de la desmontera

Dimensiones de la desmontera al final del día			
Ang. de Reposo ($\varphi, ^\circ$)	Altura (h,m)	Radio menor (r, m)	Radio mayor (R, m)
35	4,3	20	26,1
Vol. Material, m^3	Vol. Teórico, m^3	Área de la base, m^2	Área de la base, ha
5 176,5	5 086,3	2 147,1	0,215

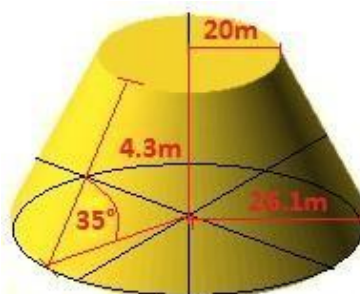


Figura 19. Cálculos realizados para calcular la superficie de la desmontera.

5.3.3. Cálculo de superficie para el stock pile

Se determinó una superficie de 2 077,2 m² para el stock pile radio menor (r=20 m) y una altura (h=4 m). En la Tabla 5 se observan los cálculos efectuados.

Tabla 5. Cálculos de las dimensiones del stock pile

Dimensiones del stock pile al final del día			
Ang. de Reposo (φ , °)	Altura (h, m)	Radio menor (r, m)	Radio mayor (R, m)
35	4,0	20	25,7
Vol. Material, m ³	Vol. Teórico, m ³	Área de la base, m ²	Área de la base, ha
4 652,6	4 636,6	2 077,2	0,208

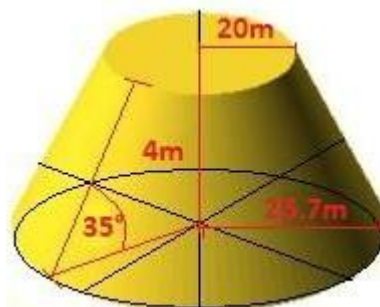


Figura 20. Cálculos realizados para calcular la superficie del stock pile.

6. CONCLUSIONES

- La metodología de trabajo empleada se basa en el modelado y simulación de procesos para el análisis del sistema y apoyo a la toma de decisiones. Cuenta con una etapa de retroalimentación que permite detectar falencias en el modelo originalmente diseñado, plantear nuevos escenarios y modificar los parámetros.
- La simulación de procesos se hace una herramienta imprescindible a la hora de medir la respuesta a la intervención de ciertos parámetros que son parte de este conjunto de procesos, pudiendo exponerlo a distintos escenarios operacionales para buscar un resultado deseado. Además es muy útil ya que permite obtener importantes datos y estadísticas con respecto al funcionamiento del sistema, como también de cada uno de los componentes de éste. Presenta múltiples herramientas a la hora de implementar las restricciones, requerimientos y formas de trabajo que se ven involucradas en la operación real, en el modelo computacional confeccionado, logrando así reproducir de mejor manera el sistema minero en estudio.
- Teniendo en cuenta los datos estadísticos entregados por el software FlexSim se puede concluir que el sistema de carga se encuentra enormemente sobredimensionado respecto al transporte. Por lo tanto, para mejorar la productividad de la mina es necesario incrementar la flota de camiones o aumentar la capacidad de transporte de los camiones.

7. RECOMENDACIONES

- La primera recomendación es continuar con los trabajos de simulación, acercando el modelo aun mas a la realidad de la operación, es decir aumentando los alcances de este. Agregar factores como fallas en los puntos de extracción, colgaduras en los piques de traspasos, problemas asociados a las calles del nivel de producción, etc. Hasta no tener resultados que consideren más variables del sistema, se recomienda avanzar en etapas apuntando a alcanzar la configuración que permite lograr el plan minero.

8. BIBLIOGRAFÍA

FlexSim. www.flexim.com. Acceso 2016.

GIUBERGIA, A.; RIESCO, D.; PRINTISTA, M. & GIL-COSTA, V. 2012: Estereotipos

UML para aplicar en un ambiente de simulación de procesos mineros. En: XVIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación. Argentina, p. 764-773.

GIUBERGIA, A.; GIL-COSTA, V.; LOBOS, J.; OCHOA, C.; PRINTISTA, A. & TISERA, C.

2014: Modelado y diseño de sistemas complejos mediante técnicas de simulación. En: XVI Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación, WICC 2014. Ushuaia, Tierra del Fuego, Argentina, 7-8 mayo, p. 464-468.

GÓMEZ, R. A. & CORREA, A. A. 2011: Análisis del transporte y distribución de materiales de construcción utilizando simulación discreta en 3D. *Boletín de Ciencias de la Tierra* 30: 39-52.

GPSS/H Software Products. Disponible en:

<http://www.wolverinesoftware.com/GPSSHProducts.htm>. Acceso 2016.

HUDSON, J. P. 2003: Factores que afectan productividad y costo en el carguío y transporte. Informe técnico. Runge LatinAmerica Ltda.

Disponible en:

<http://www.editec.cl/mchilena/dic2003/Articulo/informe.htm>.

Norma ASARCO. American Smelting & Refining Co.

Marco de referencia utilizado para la definición de conceptos y distribución de los tiempos en que el equipo, máquina o instalación incurren durante la operación minera. <https://vdocuments.site/norma-asarco-565ddc988171e.html>

APPENDIX A

Engineering Standards and Regulations Applied in the Project

Engineering Standards

The following engineering standards have been applied in the project:

ASARCO Norm

American Smelting & Refining Co.

Reference framework used for the definition of concepts and distribution of the times in which the equipment, machine or installation incur during the mining operation.

Best Practices for Dust Control in in Metal / NonMetal Mining Mine Safety and Health Administration (MSHA)

Respirable silica dust exposure has long been known to be a serious health threat to workers in many industries. These recommended practices are developed to identify available engineering controls that can assist the industry in reducing worker exposure to respirable silica dust.

ISO 19296:2018

Mining — Mobile machines working underground — Machine safety

This standard specifies the safety requirements for self-propelled mobile machines used in underground mining. It deals with hazards, hazardous situations and hazardous events when the machines are used as intended or under conditions of misuse reasonably foreseeable by the manufacturer.

The standard specifies the appropriate technical measures for eliminating or sufficiently reducing risks arising from hazards, hazardous situations or hazardous events during commissioning, operation and maintenance.

ISO 19225:2017

Underground mining machines — Mobile extracting machines at the face — Safety requirements for shearer loaders and plough systems

This standard specifies safety requirements to minimize the hazards that can occur during the assembly, use, maintenance, repair, decommissioning, disassembly and disposal of shearer loaders and plough systems when used as intended and under conditions of misuse which are reasonably foreseeable by the manufacturer, in

underground mining.

**Mine Safety and Health Administration 30 CFR Part 75 RIN 1219-AA11
Safety Standards for Underground Coal Mine Ventilation.**

Section 75.310 Installation of Main Mine Fans

Main mine fans serve a vital role in providing ventilation to prevent methane accumulations and possible explosions as well as providing miners with a healthful working environment. Section 75.310 is primarily directed at protecting the main mine fans from fires and damage in the event of an underground explosion so that necessary ventilation can be maintained. Monitoring of the fans to assure that they are operating properly is an element of this protection.

National Regulations on Mining and Environment

The following government regulations have been applied in the project:

Supreme Decree No. 040-2014-EM.

Peruvian Government Ministry of Energy and Mining.

Environmental Protection and Management Regulations for Exploitation Activities, Benefit, General Labor, Transportation and Mining Storage.

**Maximum Permissible Levels of Elements and Compounds Present in
Gaseous Emissions from Mining-Metallurgical Units.**

Ministerial Resolution No. 315-96-EM / VMM

Sulfur anhydride emissions, particles emissions, lead emissions, arsenic emissions, gases and particles concentration, control points. Measurements carried out in accordance with the provisions of the Protocol Monitoring of Air Quality and Emissions for the Mining Subsector, Ministry of Energy and Mining.

APPENDIX B

Multiple Constraints, Restrictions and Limitations

The following constraints, restrictions and limitation have been considered in the project

Mine Ventilation

The optimization of the cargo and carrying system includes a constraint that treats available mine ventilation as a consumable resource. Diesel particulate matter, DPM, is a primary contaminant found in underground mining. Ventilation is used to dilute DPM below regulatory levels; however, mine ventilation is a limited resource, meaning that airflow through a mine cannot easily be increased once a ventilation system has been implemented.

Transportation Congestion

Vehicle congestion is a source of concern in underground transportation: “more is not always better” when it comes to underground transportation. An excessive number of vehicles consume air and produce gases that overload the ventilation system. Also, requesting vehicles to reverse numerous times during the course of travel is unproductive, as well as unsafe as often the vehicle driver is reliant on the guard to provide adequate warning of personnel and oncoming traffic.

Minimizing the shunting of vehicles, through the use of passing loops, helps to promote safer tramming conditions. Signalling devices are also incorporated within the loops to control traffic at regular intervals.

Uncertainties and Risks

Mining exploration and production is a high-risk venture. Geological concepts with respect to structure and mineral charge are uncertain. On the other hand, economic evaluations have uncertainties related to cost estimation, changing conditions in economically viable sites, changes in mining technology, fluctuations in mineral price and market conditions, political situation, community relations, etc. All these issues must be carefully analyzed in order to ensure the profitability of the project for the most conservative economic conditions and diversity of scenarios. In this project, all these issues have been considered from a conservative scenario and

criteria.

Safety Considerations in

Underground mining transportation present diverse safety issues that must be taken into account in the development of the project. It is important to comply with safety standards pointing to satisfy proper safety levels considering their impact in the project budget. Care of human life, well-being and safety is an important issue to take into account throughout the different stages of the project and its life-cycle.

Environment and Sustainability

Underground mining transportation faces diverse and broad environmental issues at both local and global levels which could affect the project sustainability. The project considers environmental issues such as potential air, soil and water pollution and habitat protection and biodiversity. The project also considers community relations with local people as an important stakeholder of the project.

Schedule

The project must be completed in one academic semester. It is estimated the project requires an average of 150 hours of teamwork with 4-5 students per team. Considering that, besides the senior design project course, students are enrolled in 3-4 additional courses in the academic semester, students have to plan ahead in order for identify all required activities, distribute the tasks among all team members and, finally, integrate all partial tasks to configure the final project.