

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

DESARROLLO DE UN MODELO PARA LA APLICACIÓN DE SIMULACIÓN A UN SISTEMA DE CARGUÍO Y ACARREO DE DESMONTE EN UNA OPERACIÓN MINERA A TAJO ABIERTO

Tesis para optar el Título de INGENIERO DE MINAS, que presenta el bachiller:

JOSUÉ EMANUEL MEZA CASTRO

Asesor: ING. MARIO CEDRÓN LASSUS

Lima, Agosto del 2011

RESUMEN

El siguiente trabajo de investigación desarrolla un modelo a seguir para aplicar los conceptos de la simulación de sistemas a un sistema de carguío y acarreo en una operación minera a tajo abierto en el sur del país.

En el capítulo 1 se realiza una introducción en la que se hace un breve resumen de la situación económica actual del país y de las perspectivas que se tienen para los próximos años. Además de mencionar el auge del sector minero a lo largo de los últimos años y de las perspectivas que se tienen para el sector.

El capítulo 2 desarrolla los conceptos fundamentales de la simulación de sistemas y conceptos estadísticos que se deben manejar para poder entender y realizar el presente trabajo. También se realiza una breve descripción de los distintos campos donde se aplica la simulación de sistemas, ejemplos de aplicación en el ambiente minero y una descripción de las ventajas y desventajas de la simulación.

En el capítulo 3 se realiza una descripción de la operación minera donde se lleva a cabo este trabajo. En el capítulo 4 se enumeran las etapas para el desarrollo del modelo de simulación que van desde la recolección de datos hasta la ejecución de experimentos.

En el capítulo 5 se desarrolla el modelo partiendo de la formulación del problema, seguido la recolección de datos, el análisis de los datos, la descripción de la lógica a seguir para representar la realidad, la verificación y la validación del modelo, el análisis de los resultados, la formulación de escenarios alternativos y la elección del mejor escenario.

Finalmente en el capítulo 6 se plasman las conclusiones y recomendaciones planteadas luego del desarrollo del trabajo.

DEPARTAMENTO
DE INGENIERÍA
SECCIÓN INGENIERÍA DE MINAS



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

TEMA DE TESIS

PARA OPTAR : Título de Ingeniero de Minas

ALUMNO : Josué Emanuel Meza Castro

CÓDIGO : 2003.4078.412

PROPUESTO POR : Ing. Mario Cedrón Lassús

ASESOR : Ing. Mario Cedrón Lassús

TEMA : Desarrollo de un modelo para la aplicación de simulación a un sistema de carguío y acarreo de desmonte en una operación minera a tajo abierto.

No. TEMA : 79

FECHA : 11 de Octubre de 2010

OBJETIVOS : El primer paso para dar inicio a una operación minera a tajo abierto, luego de haber realizado el diseño del tajo mismo es iniciar la remoción de la cobertura de terreno, a esta actividad se le conoce como desbroce. El desbroce se realiza con el fin de remover el material estéril que no tiene valor económico, denominado desmonte, para llegar hasta el mineral con valor económico y poder iniciar con el minado.



Las operaciones unitarias que permiten el minado son: Perforación, voladura, carguío y acarreo. Estas dos últimas tienen como finalidad transportar el mineral y el desmonte hacia el área seleccionada para el depósito de mineral (pila de lixiviación, "Stock pile", etc.) o el botadero de desmonte, según sea el caso.

Debido al gran volumen de material a transportar, el carguío y acarreo es la actividad que genera el mayor costo por tonelada, por esta razón se busca optimizar el proceso para que genere el menor costo posible.

Av. Universitaria 1801, San Miguel
T: (511) 626 2000 anexos 5000, 5001
F: (511) 626 2852

www.pucp.edu.pe/secc/minas

DEPARTAMENTO
DE **INGENIERÍA**
SECCIÓN INGENIERÍA DE MINAS



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

Este trabajo tiene como objetivo principal desarrollar un modelo para aplicar la simulación de eventos discretos al sistema de carguío y acarreo de desmonte en una operación minera a tajo abierto que produce cátodos de cobre al sur del país, con la finalidad de dar a conocer las ventajas, utilidad y beneficios de usar la simulación como una herramienta para entender el comportamiento de un sistema real, poder plantear diversos escenarios y alternativas de mejora sin la necesidad de hacer los cambios reales, ahorrando dinero, recursos y tiempo.

Máximo: 100 páginas

Ing. Mario Cedrón Lassús
Asesor y Coordinador a.i.
Especialidad de Ingeniería de Minas



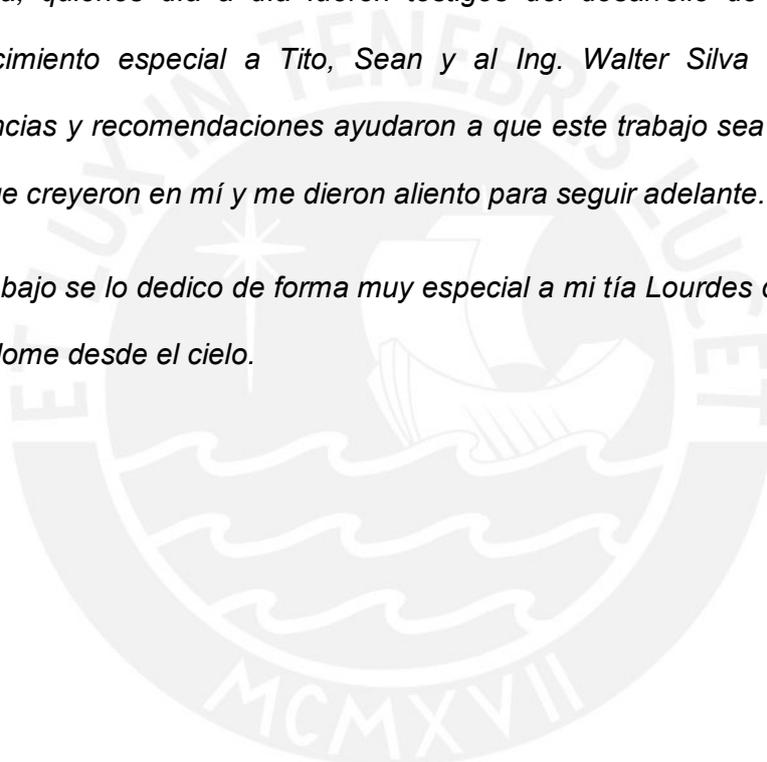
Av. Universitaria 1801, San Miguel
T: (511) 626 2000 anexos 5000, 5001
F: (511) 626 2852

www.pucp.edu.pe/secc/minas

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios que me ha dado la oportunidad para poder seguir con este gran reto que es la vida; a mis padres, Victoria y Josué que con sus consejos, paciencia, esfuerzo, dedicación y apoyo incondicional hicieron que pueda formarme y logre este objetivo; a los buenos amigos que hice en la operación minera MPC, en Arequipa, quienes día a día fueron testigos del desarrollo de este trabajo. Un agradecimiento especial a Tito, Sean y al Ing. Walter Silva quienes con sus sugerencias y recomendaciones ayudaron a que este trabajo sea posible y a todos a los que creyeron en mí y me dieron aliento para seguir adelante.

Este trabajo se lo dedico de forma muy especial a mi tía Lourdes que debe de estar cuidándome desde el cielo.



ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	11
1.1. Introducción.....	11
1.2. Objetivos y Alcances.....	17
1.2.1. Objetivos.....	17
1.2.1.1. Objetivo General.....	17
1.2.1.2. Objetivos Específicos.....	17
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	18
2.1. Conceptos fundamentales de la Simulación.....	18
2.1.1. La naturaleza de la Simulación.....	18
2.1.2. Definición de Sistema.....	19
2.1.3. Componentes del sistema.....	20
2.1.3.1. Entidad.....	20
2.1.3.2. Atributo.....	21
2.1.3.3. Actividad.....	21
2.1.3.4. Evento.....	22
2.1.3.5. Variables del estado del sistema.....	22
2.1.4. Definiciones Adicionales.....	23
2.1.4.1. Fila.....	23
2.1.4.2. Comportamiento de la Fila.....	23
2.1.4.3. Disciplina de la Fila.....	24
2.1.4.4. Demora.....	24
2.1.4.5. Variables globales.....	25
2.1.5. Modelo.....	25
2.1.6. Tipos de Simulación.....	26
2.1.6.1. En función al tiempo.....	27
2.1.6.1.1. Estática.....	27
2.1.6.1.2. Dinámica.....	27
2.1.6.2. En función a la aleatoriedad de los datos.....	28
2.1.6.2.1. Determinística.....	28
2.1.6.2.2. Estocástica.....	28
2.1.6.3. En función a las variables de estado del sistema.....	29
2.1.6.3.1. Discreta.....	29
2.1.6.3.2. Continua.....	29
2.1.7. Aplicaciones de la Simulación.....	30
2.1.8. Simulación en Minería.....	30
2.1.9. Ventajas y Desventajas de la simulación.....	33
2.1.9.1. Ventajas.....	33
2.1.9.2. Desventajas.....	33
2.2. Conceptos estadísticos para la Simulación.....	34
2.2.1. Medidas de dispersión.....	34
2.2.1.1. Varianza.....	35
2.2.1.2. Desviación estándar.....	36
2.2.2. Intervalo de confianza.....	36
2.2.2.1. Intervalo de confianza para la media μ	38
2.2.3. Pruebas de Hipótesis.....	39
2.2.4. Hipótesis estadísticas.....	39
2.2.5. Hipótesis simple y compuesta.....	39

2.2.5.1. Hipótesis nula y alternativa	40
2.2.5.2. Prueba de una hipótesis estadística	41
2.2.6. Pruebas de Bondad de Ajuste	41
2.2.6.1. Prueba Kolmogorov Smirnov (KS).....	42
2.2.6.2. Prueba Chi Cuadrado (χ^2).....	43
CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DE LA OPERACIÓN MINERA	44
3.1. Generalidades	44
3.2. Geología.....	44
3.3. Operaciones Mina	45
3.3.1. Perforación y Voladura	46
3.3.2. Carguío.....	47
3.3.3. Acarreo	47
3.3.4. Servicios Auxiliares.....	49
3.4. Metalurgia.....	49
CAPÍTULO 4. ETAPAS PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS	51
4.1. Formular el problema y planificar el estudio	52
4.2. Recolectar la información y definir el modelo conceptual	53
4.2.1. Método para la adquisición de datos	54
4.2.1.1. Recolección de Datos	54
4.2.1.2. Identificar la distribución de probabilidad	55
4.2.1.3. Evaluar la bondad de ajuste a la distribución escogida	55
4.3. Desarrollar el modelo	56
4.4. Verificación del modelo	56
4.5. Validación del modelo	57
4.6. Diseño de experimentos	57
4.7. Ejecución de experimentos.....	57
4.7.1. Sistema terminal	58
4.7.2. Sistema no terminal	58
4.8. Análisis de resultados.....	58
CAPÍTULO 5. DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN	59
5.1. Descripción del sistema a simular	59
5.2. Formulación del problema y planificación del estudio	60
5.3. Recolección de datos	61
5.3.1. Tamaño de muestra del ciclo de carguío y acarreo.....	63
5.3.1.1. Tamaño de muestra de los tiempos de ciclo de carguío.....	64
5.3.1.1.1. Cargador frontal a un volquete de 15 m ³	64
5.3.1.1.2. Cargador frontal a un volquete de 20 m ³	64
5.3.1.1.3. Excavadora a un volquete de 15 m ³	65
5.3.1.1.4. Excavadora a un volquete de 20 m ³	65
5.3.1.2. Tamaño de muestra de los tiempos de ciclo de acarreo	66
5.3.1.2.1. Volquete de 15 m ³	66
5.3.1.2.2. Volquete de 20 m ³	66
5.3.1.3. Tamaño de muestra de los tiempos de arribo.....	67
5.4. Análisis de datos	67
5.4.1. Análisis de los tiempos de Arribo.....	68
5.4.2. Análisis de los tiempos del ciclo de carguío	70
5.4.3. Análisis de los tiempos del ciclo de acarreo	71
5.5. Identificación de entidades, recursos, atributos y variables de estado.....	72

5.5.1. Entidades.....	72
5.5.2. Recursos	72
5.5.3. Atributos	72
5.5.4. Fila o Cola	73
5.5.5. Lista de procesamiento.....	73
5.5.6. Actividades	73
5.5.7. Demora.....	73
5.6. Consideración para elaborar el modelo	74
5.7. Diseño y desarrollo del modelo	75
5.7.1. Simulación de la llegada de los volquetes al frente de carguío.	76
5.7.2. Simulación del ciclo de carga en los frentes de trabajo.	77
5.7.3. Simulación de acarreo del desmonte hacia el botadero	80
5.7.4. Simulación de la descarga del desmonte en el botadero y del retorno al frente de carguío.	81
5.8. Verificación del modelo	83
5.9. Validación del modelo	84
5.10. Resultados del escenario actual.....	86
5.11. Escenarios alternativos	88
5.12. Análisis de escenarios.....	91
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	93
6.1. Conclusiones.....	93
6.2. Recomendaciones.....	95
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.3.1 Densidades de Material	47
Tabla 3.3.2 Características de la ruta de acarreo de desmonte.....	48
Tabla 3.3.3 Características de la ruta de acarreo de mineral.	48
Tabla 5.3.1 Tamaño de muestra del tiempo de ciclo de carguío de un cargador frontal a un volquete de 15 m ³	64
Tabla 5.3.2 Tamaño de muestra del tiempo de ciclo de carguío de un cargador frontal a un volquete de 20 m ³	64
Tabla 5.3.3 Tamaño de muestra del tiempo de ciclo de carguío de una excavadora a un volquete de 15 m ³	65
Tabla 5.3.4 Tamaño de muestra del tiempo de ciclo de carguío de una excavadora a un volquete de 20 m ³	65
Tabla 5.3.5 Tamaño de muestra para los tiempos de ciclo de acarreo de un volquete de 15 m ³	66
Tabla 5.3.6 Tamaño de muestra para los tiempos de ciclo de acarreo de un volquete de 15 m ³	66
Tabla 5.3.7 Tamaño de muestra de los tiempos de arribo.	67
Tabla 5.7.1 Campos de los bloques de la simulación de la llegada de los volquetes	77
Tabla 5.7.2 Campos de los bloques de la simulación del primer frente de carguío.....	79
Tabla 5.7.3 Campos de la simulación de acarreo hacia el botadero.....	81
Tabla 5.7.4 Campos del proceso de descarga de material	82
Tabla 5.7.5 Campos del proceso de retorno al frente de carguío.....	83
Tabla 5.9.1 Indicadores de desempeño.....	84
Tabla 5.9.2 Resumen de los resultados de los indicadores para 100 replicas.	85
Tabla 5.10.1 Resultados de la corrida del escenario actual.....	86
Tabla 5.10.2 Costo horario de los equipos	86
Tabla 5.10.3 Costo total por operación de equipos.....	87
Tabla 5.10.4 Costo por inactividad de los equipos.....	87
Tabla 5.10.5 Tonelaje transportado en el día.....	87
Tabla 5.11.1 Resumen de los escenarios planteados haciendo variar el número de volquetes	88
Tabla 5.11.2 Resumen de escenarios luego del cambio de configuración.....	90

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Introducción

El Perú es un país privilegiado por la diversidad de recursos naturales que posee, dentro de ellos, los recursos minerales ocupan un lugar importante.

Nuestros yacimientos ricos en oro, plata, cobre, plomo, zinc, estaño, molibdeno, hierro y uranio demuestran el potencial que tiene el país.

Gran parte de esta riqueza geológica aún no ha sido explorada ni explotada. Del 100 % del territorio peruano, el 11.62 % han sido concedido a la actividad minera, el 0.69% se encuentra actualmente en explotación y tan solo el 0.63 % en exploración.

En la actualidad, más de 100 empresas exploradoras se encuentran en el territorio peruano. En su mayoría provenientes de Canadá, Australia, Inglaterra, China y Estados Unidos. Además los 276 prospectos y proyectos mineros¹, unidos a las 398 operaciones mineras que se encuentran actualmente en producción reafirman el gran potencial geológico del Perú.

Perú es considerado uno de los 6 países más ricos en yacimientos minerales a nivel mundial. En el 2009 fue el primer productor de plata, el segundo en cobre y zinc; y el tercer productor de estaño, bismuto, telurio y mercurio. En plomo y molibdeno fue el cuarto y el sexto productor de oro a nivel mundial. En Latinoamérica, en el mismo año, el Perú fue el primer productor de oro, plata, zinc, estaño, plomo, bismuto, telurio y mercurio; y el segundo productor de cobre y molibdeno después Chile y México respectivamente. (Ver Tabla 1.1.1).

¹ Ver los 40 principales proyectos mineros en el gráfico 1.1.1 y en el gráfico 1.1-2

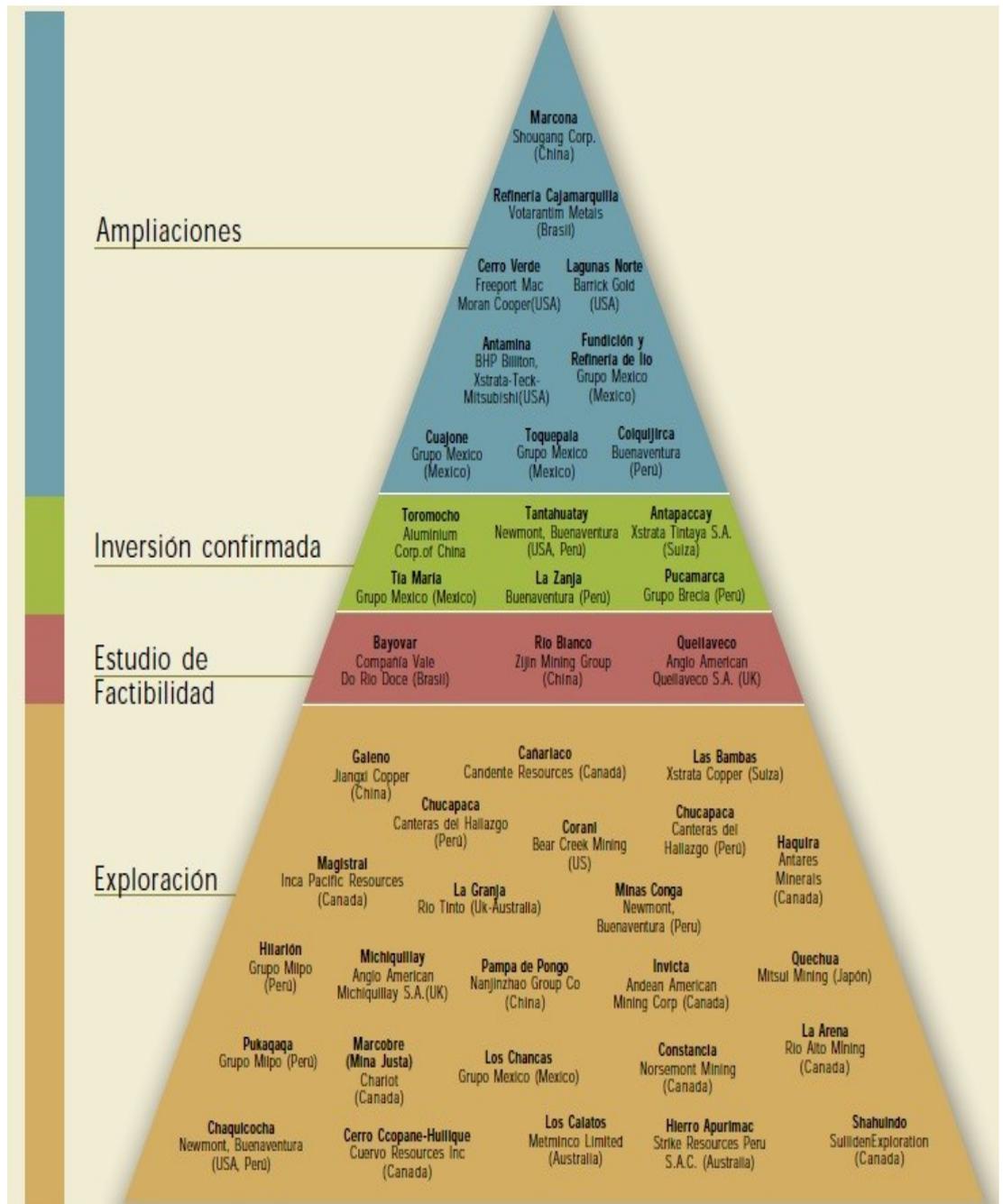


Gráfico 1.1.1 Cartera Estimada de Proyectos de Inversión² / Fuente: MEM

² Información actualizada hasta marzo del 2011. El 8 de Abril el MEM declara inadmisibile el proyecto "Tía María".



Gráfico 1.1.2. Ubicación de los Principales Proyectos Mineros³ / Fuente: MEM

³ Información actualizada hasta marzo del 2011. El 8 de Abril el MEM declara inadmisibile el proyecto "Tía María".

Metal	Mundial		Latinoamérica	
	2008	2009	2008	2009
Plata	1	1	1	1
Zinc	2	2	1	1
Estaño	3	3	1	1
Bismuto	3	3	1	1
Telurio	1	3	1	1
Mercurio	3	3	1	1
Plomo	4	4	1	1
Oro	5	6	1	1
Cobre	3	2	2	2

Tabla 1.1.1 Ubicación del Perú en producción de metales a nivel mundial y de Latinoamérica⁴

Por otro lado, el crecimiento sostenido de la economía peruana, cuyas políticas macro económicas han permitido un crecimiento de 6.8 % durante 7 años⁵, además de haber recibido el Grado de Inversión **BBB-** por parte de SATANDARD & POOR'S, **Ba1** por MOODY'S y **BBB-** por FITCH, tres de las principales calificadoras internacionales de crédito⁶.

Asimismo, un reciente estudio internacional realizado en el año 2009 indica que el Perú tendrá uno de los niveles más bajos de inflación en la región, con un ratio inflacionario proyectado de 2.3% en el 2010 y de 2.7 % en el 2011.⁷

⁴ Fuente: U.S. Geological Survey.

⁵ Hasta el 2007, en el 2008 el crecimiento del PBI fue de 9.8 % y en el 2009 de tan solo 0.9% (se le atribuye esta cifra debido a la crisis internacional). En el 2010 el crecimiento fue de 8.8%(Fuente: MEM Y BCRP)

⁶ Las calificaciones mencionadas son vigentes hasta antes del escenario electoral de Abril del 2011.

⁷ Fuente: Latin Focus Consensus Forecast.

Y si a esto añadimos que las exportaciones mineras se incrementaron de US\$ 3,008 MM a US\$ 18,656 MM (5.2 veces) entre los años 1999 y 2008⁸, además, que en el 2009 hayan alcanzado los US\$ 16,361 MM, a pesar de la crisis internacional y cierre el 2010 con US\$ 21,722 MM, no sorprende que el Perú sea el tercer destino mundial de la inversión minera en exploración (7%) y segundo destino a nivel de América Latina (20%).

En este escenario, que se vislumbra tan favorable para el sector minero, se desarrolla el siguiente trabajo de investigación. El cual se desarrolla en una operación minera a tajo abierto debido a que en un futuro no muy lejano, la mayoría de proyectos serán explotados por dicho método de explotación.

En este contexto las operaciones unitarias de carguío y acarreo son las que generan el mayor costo de operación. Esto se debe principalmente al consumo de combustible y llantas. Por tal razón, lo que se busca es maximizar la productividad de la flota de equipos y por otro lado minimizar los tiempos muertos e improductivos para que al final se pueda trasladar la mayor cantidad de material con el menor costo posible.

Esta investigación se enfoca en el desarrollo de un modelo, en el software de simulación Arena 12, que replique un sistema de carguío y acarreo real de una operación minera a tajo abierto el cual permita plantear escenarios alternativos con el objetivo de reducir las colas generadas en los frentes de

⁸ En los años 2009 y 2010 la exportaciones mineras alcanzaron US\$MM 16,361 y US\$MM 21,722 respectivamente. (Fuente: MEM y BCRP).

trabajo, disminuir las pérdidas asociadas a estos tiempos de espera y aumentar el nivel de producción diario.

Por otro lado, este trabajo intenta despertar el interés de los jóvenes profesionales mineros en realizar investigación en el campo de la investigación de operaciones y en especial en la rama de simulación de sistemas discretos con el objetivo de dar solución a los problemas comunes que suelen presentarse en una operación minera y puedan plantear alternativas de mejora.



1.2. Objetivos y Alcances

1.2.1. Objetivos

A continuación se detallan los objetivos que se desean alcanzar con el desarrollo del siguiente trabajo.

1.2.1.1. Objetivo General

El propósito general de este trabajo es desarrollar y dar a conocer un modelo que sirva como guía, el cual detalle los pasos a seguir para la aplicación de las técnicas de la simulación de sistemas discretos a un sistema de carguío y acarreo en una operación minera a tajo abierto.

1.2.1.2. Objetivos Específicos

- Presentar un esquema que sintetice cada una de las etapas que componen el modelo.
- Detallar cada una de las etapas del modelo.
- Aplicar el modelo.
- Simular diversos escenarios, analizar los resultados y generar conclusiones.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Conceptos fundamentales de la Simulación

2.1.1. La naturaleza de la Simulación

La simulación es una técnica joven que ha sido desarrollada por varios especialistas los que la han definido como:

- ***“Proceso de diseño del modelo de un sistema real y de realización de experiencias con él, con la finalidad de aprender sobre el comportamiento del sistema o de evaluar diversas estrategias para el funcionamiento del mismo” Shannon, 1975.***
- ***“Técnicas para usar computadoras para imitar, o simular, las operaciones de diversos procesos del mundo real. Law y Kelton, 1982.***
- ***“La Simulación hace referencia a una amplia colección de métodos y aplicaciones que imitan el comportamiento de sistemas reales, usualmente en una computadora con el software adecuado.” Kelton y Sadowski, 2004.***
- ***“La Simulación se podría definir como una técnica que imita la operación de un sistema del mundo real a medida que evoluciona con el tiempo.” Winston, 2005.***

Entonces podemos definir simulación como una técnica que nos permite representar, imitar y recrear el funcionamiento de un sistema del mundo real cuando evoluciona con el tiempo.

Esta simulación nos permitirá poder, en primer lugar, entender el funcionamiento del sistema actual para luego poder plantear diversos escenarios y alternativas de mejora en el sistema estudiado.

2.1.2. Definición de Sistema

Se denomina sistema a un grupo de objetos o componentes que son unidos en una interrelación o interdependencia regular con el fin de cumplir un propósito.

Se toma en cuenta la contemplación de un todo, dentro de fronteras definidas por el modelador en concordancia con los objetivos del estudio, y no de las partes de manera aislada.

Ejemplos de sistemas:

- Sistemas de atención al cliente (Entidad bancaria, fast food, restaurantes, etc.).
- Sistema de Manufactura (Fábrica de automóviles, alimento, etc.).
- Clínicas y Hospitales.
- Una central telefónica.
- Sistemas de transporte (Puerto, aeropuerto, etc.).
- Sistemas de construcción.
- Una operación minera, etc.

2.1.3. Componentes del sistema

Para realizar un estudio de cualquier sistema es esencial entenderlo. Para esto es necesario identificar cada uno de los elementos que componen un sistema. Los principales elementos que componen un sistema son:

- Entidad
- Atributos
- Actividad
- Evento
- Variables del estado del sistema

A continuación se definirán estos elementos.

2.1.3.1. Entidad

Representa un objeto de interés en el sistema que requiere una definición explícita.

Puede ser de dos tipos:

- **Dinámica:** la cual se mueve a través del sistema. Es el objeto que recibe el servicio.
- **Estática:** este tipo de entidad “sirve a otras entidades” es decir dan el servicio.

Las entidades se mueven dentro del sistema y podrían dejar el sistema; cambian de status, afectan y son afectados por otras entidades.

Una entidad usualmente representa cosas reales pero también puede darse el caso de que sean ficticias para poder modelar “artificios” necesarios en el desarrollo del modelo. Por ejemplo una parada imprevista.

Como se tratará más adelante, identificar los tipos de entidades es el primer paso para hacer la construcción de un modelo.

2.1.3.2. Atributo

Elemento que describe las características de una entidad que la distingue de otra.

Ejemplos:

- Nombres y/o apellidos de una persona
- Tiempo de llegada a un sistema
- Tipo de pieza
- Tipo de cliente (Socio, no socio, VIP, etc.)
- Densidad del material, etc.

Los atributos son variables locales y el valor que toman solo vale para la entidad a la que pertenecen.

2.1.3.3. Actividad

Representa un periodo de tiempo cuya duración se conoce de antemano.

La duración de una actividad puede ser una constante, un valor aleatorio de una distribución estadística, el resultado de una ecuación o un cálculo basado en un evento.

Puede tomar valores fijos (determinísticos) o resultado de una variable aleatoria (estocástico).

2.1.3.4. Evento

Ocurrencia que cambia el estado del sistema. Puede cambiar el estado de los atributos, de las variables, o el de los acumuladores estadísticos⁹.

Los eventos pueden ser exógenos o endógenos.

Ejemplos:

- Exógeno: Llegada de un cliente, llegada de una materia prima a ser transformada, etc.
- Endógeno: Fin de un servicio.

2.1.3.5. Variables del estado del sistema

Son las variables que representan toda la información necesaria para definir en detalle lo que sucede en el sistema en un momento específico de tiempo.

⁹ Acumulador estadístico: Variable que observa lo que está pasando en el sistema. Se usa al final de la simulación

Ejemplos:

- Situación de un servidor: ocupado, desocupado, inactivo.
- Número de clientes en el sistema: 0, 1, 2,3, etc.

2.1.4. Definiciones Adicionales

2.1.4.1. Fila

También denominada “cola” es lugar donde las entidades esperan cuando no pueden seguir adelante.

Las filas o colas tienen nombre, pueden tener capacidad finita y en caso estén llenas queda a criterio del simulador la decisión que la entidad deba tomar. Por lo general se indica a la entidad que se dirija a la fila que tenga menos entidades en espera.

2.1.4.2. Comportamiento de la Fila

El comportamiento de la fila se refiere a la manera de actuar de una entidad en una cola.

En algunas situaciones la entidad puede evitar la cola, dejar la cola antes de ser atendido o moverse entre filas.

2.1.4.3. Disciplina de la Fila ¹⁰

Se refiere al orden lógico en el cual van a ser atendidas las entidades que se encuentra en la fila. Este orden puede regirse de la siguiente forma:

- FIFO (first in, first out).
- LIFO (last in, first out).
- SPT (shorter processing time).
- LPT (longer processing time).
- HVF (high value first).
- LVF (low value first).

2.1.4.4. Demora

Representa un periodo de tiempo indefinido que es causado por una combinación de condiciones del sistema.

Ejemplos:

- Al llegar una entidad a la fila de un recurso, el tiempo que permanece en la fila esperando a ser atendido, se le denomina demora.
- Al fallar una máquina, la entidad que estaba haciendo uso del recurso tiene que esperar a que la máquina sea reparada y vuelva a operar. Esta espera indefinida se le conoce como demora.

¹⁰ Para mayor información con respecto a la teoría de colas revisar el capítulo 6 de libro "Discrete-Event System Simulation" de la bibliografía.

2.1.4.5. Variables globales

También conocidas como variables de uso general son variables que reflejan una característica del modelo completo. La característica principal es que no están atadas a una entidad en particular.

Se usan para diferente clase de situaciones como por ejemplo:

- Número de partes del sistema.
- Reloj de la simulación.
- Número de recursos ocupados, etc.

Algunas de estas variables son definidas por el software¹¹ y otras son definidas por el usuario.

2.1.5. Modelo

Un modelo es definido como una representación de un sistema con el propósito de estudiar este sistema.

Es una simplificación del sistema y debe ser lo suficientemente detallado para que permita realizar, generar, plantear y validar conclusiones que puedan aplicarse en el sistema real.

El modelo diseña una interpretación subjetiva de un sistema del mundo real a través de un conjunto de supuestos sobre la operación

¹¹ En el presente trabajo de investigación al mencionar software nos referimos al software de simulación Arena 12.0 con licencia para estudiantes.

del mismo. Estos supuestos deben ser representados como relaciones matemáticas o lógicas entre los objetos que interactúan en el sistema, lo cual permite que el modelo pueda ser manipulado para contemplar situaciones alternativas.

2.1.6. Tipos de Simulación

Los modelos puede ser clasificados en modelos físicos y modelos matemáticos.

Los modelos físicos son aquellos que representan físicamente un sistema a escala o con objetos. Estos son conocidos como: maquetas, prototipos, arquetipos etc.

Los modelos matemáticos representan un sistema en términos lógicos y relaciones cuantitativas que serán manipuladas y cambiadas para conocer cómo reacciona el modelo o cómo reaccionará el modelo bajo distintas condiciones y escenarios. Siempre y cuando el modelo matemático sea uno válido.

Un modelo matemático puede ser examinado y estudiado bajo 2 perspectivas: *La solución analítica o la Simulación.*

Si el modelo es lo suficientemente simple este puede ser estudiado bajo sus relaciones lógicas y cuantitativas para obtener una solución analítica exacta. Su nivel de complejidad es tal que se llega a una solución bastante aceptable tan solo con el uso de papel y lápiz, pero hay modelos cuya solución puede llegar a ser bastante compleja requiriendo recursos computarizados. En esos casos de complejidad los modelos deben ser estudiados bajo la simulación, no solo para

un resolución rápida del modelo sino también para asegurar la calidad de los resultados.

Bajo este contexto, los modelos de simulación se clasifican en 3 dimensiones diferentes:

- En función al tiempo,
- En función a la aleatoriedad de los datos y
- En función a las variables de estado del sistema.

Así como detallaremos en líneas siguientes.

2.1.6.1. En función al tiempo

2.1.6.1.1. Estática

Representación de un sistema en un instante en el tiempo en particular. Un ejemplo de esta simulación son los modelos de simulación Monte Carlo.

2.1.6.1.2. Dinámica

Representan el sistema tal cual cómo cambia a lo largo del tiempo. Por ejemplo: Una entidad bancaria durante su horario de atención de 9:00 a.m. a 6:00 p.m.

2.1.6.2. En función a la aleatoriedad de los datos

2.1.6.2.1. Determinística

Este modelo de simulación no usa variables aleatorias. Para cada conjunto de datos de entrada, existirá solamente una respuesta.

Así como ocurre en un consultorio dental siempre y cuando todos los pacientes asistan a sus citas respetando el horario previamente agendado.

2.1.6.2.2. Estocástica

Un modelo de simulación estocástica contiene una o más variables aleatorias. En este escenario sólo se puede estimar la respuesta.

El ejemplo del banco se convierte en estocástico al considerar que la llegada de los clientes es una variable que sigue una distribución exponencial con media 6.

2.1.6.3. En función a las variables de estado del sistema

2.1.6.3.1. Discreta

Es un modelo en el cual las variables de estado cambian en un número entero de puntos en el tiempo.

El sistema de la entendida bancaria es un ejemplo de ellos debido a que el estado de la variable, arribo de clientes, solo cambia en el caso de la llegada de un cliente o cuando el servicio al cliente termina.

2.1.6.3.2. Continua

En un modelo continuo las variables de estado cambian continuamente respecto al tiempo. Este es el caso de un tanque que está siendo llenado por algún líquido. El estado de la variable, nivel de líquido, cambia de forma continua en el tiempo.

El presente trabajo de investigación se enmarca en la simulación de eventos discretos, como se verá en líneas siguientes.

2.1.7. Aplicaciones de la Simulación

Las áreas donde la simulación puede ser aplicada son variadas.

Algunas de ellas son:

- Procesos de manufactura
- Ingeniería de construcción
- Aplicaciones militares
- Logística
- Transporte y distribución
- Servicio y atención al cliente
- Reingeniería de procesos de negocio
- Finanzas
- Entretenimiento, etc.

2.1.8. Simulación en Minería

La aplicación del modelamiento y simulación en minería es una técnica joven que debe su desarrollo al avance tecnológico y al uso intensivo de la informática en el campo minero.

Uno de los primeros documentos publicados fue el de Karsten Rist en 1961. Este modelo fue usado para determinar el número óptimo de trenes necesarios en un sistema de acarreo en una mina subterránea de molibdeno en USA.

Posteriormente los investigadores se dedicaron a sustentar las bases para el manejo de la naturaleza aleatoria de las operaciones mineras. En este contexto Falkie y Mitchell demostraron cómo incorporar la simulación Monte Carlo en los modelos de simulación

estocástica aplicado a minería. Madge en 1964 fue capaz de simular el movimiento de los camiones de una operación minera a cielo abierto en Canadá. Sanford en 1965 construyó un modelo para simular un sistema de fajas transportadoras como tema de tesis para su maestría en la universidad de Pensilvania. Seguido por Morgan y Peterson que mostraron como realizar una simulación estocástica de una operación minera a cielo abierto.

Uno de los mejores ejemplos, en los inicios de la simulación por computadora, fue realizado por Cross y Williamson en el año 1969. Este modelo se aplicó en una operación minera a cielo abierto de cobre al suroeste de los Estados Unidos. La operación tenía un sistema Pala-Camión. En el cual 5 palas cargaban a los camiones con mineral o desmonte para que sean trasladados a la chancadora, botadero de desmonte o al área de lixiviación. En esta simulación se asumió que todos los tiempos de operación eran de naturaleza determinística. Se codificó en el lenguaje de programación Fortran y se usaron miles de líneas de código, además de un tiempo considerable para la escritura.

En 1987 Sturgul y Yi realizaron un modelo más complicado, tomando como base la publicación de Cross y Williamson, en donde consideraban la aleatoriedad estocástica de los tiempos en la operación. A diferencia del trabajo anterior, esta simulación se hizo en el lenguaje GPSS cuya codificación se realizó en menos de 100 líneas y tomó menos de una hora para escribirlas.

Los trabajos presentados en las conferencias del simposium anual APCOM (Application of Computers and Operations Research in the

Mineral Industry) son una excelente fuente de referencias para encontrar modelos de simulación aplicados a la minería.

Actualmente los lenguajes de simulación más usados en operaciones mineras son GPSS/H (con la galería PROOF para la animación) y el software ARENA.

Los principales problemas que se presentan en una operación minera y que pueden ser resueltos con el modelamiento y simulación son:

- Modelamiento de fajas transportadoras.

Donde el reto es predecir el flujo en varios puntos del sistema de fajas y estimar la cantidad de mineral en cada echadero.

- El carguío y acarreo de material en operaciones a cielo abierto.

Se busca determinar el número óptimo de camiones para asegurar un nivel de producción constante o casi constante.

También se usa para determinar la mejor asignación de los camiones a las diferentes palas con el objetivo de minimizar los tiempos de espera en cola.

- Operaciones donde apliquen el método cámaras y pilares.

2.1.9. Ventajas y Desventajas de la simulación

2.1.9.1. Ventajas

- Es ideal cuando se desea implementar algún cambio o variar las condiciones en las que se encuentra funcionando un sistema permitiendo ahorrar en recursos (dinero, personal, equipos, etc.).
- Se ahorra tiempo y se tiene flexibilidad para variar las condiciones.
- Se pueden hacer cambios en el sistema sin tener que parar la operación actual.
- Se pueden comprobar las hipótesis de por qué y cómo es que ocurren ciertos fenómenos.
- Se puede comprimir o expandir el tiempo.
- Mejora el entendimiento de las variables del sistema, la interacción que hay entre ellas y la importancia que tienen en el desempeño del sistema.
- Permite realizar análisis de cuello de botella para identificar donde hay demoras en un determinado proceso.
- Preguntas del tipo “¿qué pasa si?” pueden ser resueltas.

2.1.9.2. Desventajas

- El desarrollo y validación de un modelo complejo puede tomar mucho tiempo y requerir de recursos humanos muy capacitados.

- Los resultados de una simulación son estimados de acuerdo a las entradas y condiciones de operación del modelo. Pueden ser difíciles de interpretar y conocer si una observación es resultado de las interrelaciones del sistema o la aleatoriedad.
- Todavía no se logra una amplia aceptación del uso de esta técnica en muchas empresas.
- Los resultados pueden ser difíciles de interpretar debido a las interrelaciones inherentes al sistema y a la aleatoriedad de algunas variables.
- Requiere la utilización de recursos humanos capacitados y equipo computacional especializado.

2.2. Conceptos estadísticos para la Simulación

2.2.1. Medidas de dispersión

Las medidas de dispersión ilustran sobre la manera como varían los datos observados alrededor de una medida de tendencia central, que generalmente es la media aritmética. Indican cómo están concentrados los datos alrededor del parámetro de centralización, permiten comparar una información con otra y ayudan a verificar si determinadas medidas de tendencia central son o no significativas.

Por ejemplo, cuando la dispersión es muy grande la media aritmética no tiene mucha significación; sin embargo si la dispersión es baja, la media adquiere significación.

Entre las medidas de dispersión están: el rango, la varianza, la desviación estándar, el coeficiente de variación, los intercuartiles, etc.

En este trabajo de investigación se usa principalmente la varianza y la desviación estándar, por eso que se definirá tan solo esas dos medidas de dispersión.

2.2.1.1. Varianza

La varianza es una medida que cuantifica el grado de dispersión o de variación de los valores de una variable cuantitativa con respecto a su media aritmética.

La varianza calculada a partir de una muestra será denotada por S^2 . Es un número real no negativo y tiene unidades de medición al cuadrado, por ejemplo, $\2 , Km^2 , etc.

Definición: La varianza se define como *la media aritmética de los cuadrados de las diferencias de los datos con respecto a su media aritmética.*

$$s^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}$$

2.2.1.2. Desviación estándar

Definición: La desviación estándar es la raíz cuadrada positiva de la varianza.

La desviación estándar calculada a partir de una muestra se denotará por **S**.

Entonces $S = \sqrt{S^2}$

Viene expresada en las mismas unidades en las que vienen expresados los datos.

2.2.2. Intervalo de confianza

Un intervalo de confianza es un rango o intervalo de valores usados para estimar el verdadero valor del parámetro θ , de la población, con cierta probabilidad específica de acierto.

La probabilidad de que el verdadero valor del parámetro se encuentre en el intervalo construido se denomina *nivel de confianza*.

El nivel de confianza se representa con $1 - \alpha$ o en porcentaje $(1-\alpha) \times 100\%$. Sus valores más utilizados son 0.95, 0.98, 0.99 entre otros.

La probabilidad de equivocarnos se llama nivel de significancia y se simboliza con α . Generalmente se construyen intervalos con significancia del 1%, 5%, 10% etc.

Para construir un intervalo de confianza, se puede comprobar que la distribución Normal Estándar¹² cumple:

$$P(-1.96 < z < 1.96) = 0.95$$

(lo anterior se puede comprobar con una tabla de probabilidades o un programa computacional que calcule probabilidades normales).

Luego, si una variable X tiene distribución $N(\mu, \sigma^2)$, entonces el 95% de las veces se cumple:

$$-1.96 \leq \frac{X - \mu}{\sigma / \sqrt{n}} \leq 1.96$$

Despejando μ en la ecuación se tiene:

$$X - 1.96 \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq X + 1.96 \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

El resultado es un intervalo que incluye al μ el 95% de las veces. Es decir, es un **intervalo de confianza al 95% para la media μ** cuando la variable X es normal y σ^2 es conocido.

¹² La distribución Normal estándar es una distribución normal con media $\mu=0$ y varianza, $\sigma^2=1$. Una variable distribuida $N(0,1)$ generalmente se denota con la letra "z".

En particular, si $X \sim N(\mu, \sigma^2)$, entonces $z = (X - \mu) / \sigma$ tiene distribución normal estándar.

2.2.2.1. Intervalo de confianza para la media μ

Por lo general, cuando se quiere construir un intervalo de confianza para la media poblacional μ , la varianza poblacional σ^2 es desconocida, por lo que el intervalo para μ construido anteriormente es poco práctico.

Si en el intervalo se reemplaza la desviación estándar poblacional σ por la desviación estándar muestral S , el intervalo de confianza toma la forma:

$$\bar{X} - 1.96 \times \frac{S}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + 1.96 \times \frac{S}{\sqrt{n}}$$

La cual es una buena aproximación para el intervalo de confianza de 95% para μ con σ^2 desconocido. Esta aproximación es mejor en la medida que el tamaño muestral sea grande.

Cuando el tamaño muestral es pequeño, el intervalo de confianza requiere utilizar la distribución t de Student (con n-1 grados de libertad, siendo n el tamaño de la muestra), en vez de la distribución normal (por ejemplo, para un intervalo de 95% de confianza, los límites del intervalo ya no serán construidos usando el valor 1,96).

2.2.3. Pruebas de Hipótesis

Son métodos que se usan para tomar decisiones sobre poblaciones, a partir de los resultados de una muestra aleatoria escogida de esa población. Para llegar a tomar decisiones estadísticas *se debe partir de afirmaciones o conjeturas con respecto a la población* en la que estamos interesados. *Tales suposiciones pueden ser verdaderas o no.* Una conjetura hecha sobre una población o sobre sus parámetros deberá ser sometida a comprobación experimental con el propósito de saber si los resultados de una muestra aleatoria extraída de esa población, contradicen o no tal conjetura.

2.2.4. Hipótesis estadísticas

Se denomina hipótesis estadística a cualquier afirmación o conjetura que se hace acerca de la distribución de una o más poblaciones.

La afirmación o conjetura puede referirse bien a la forma o tipo de distribución de probabilidad de la población o bien referirse al valor o valores de uno o más parámetros de la distribución.

2.2.5. Hipótesis simple y compuesta

Se denomina hipótesis simple a cualquier hipótesis estadística que especifica completamente la distribución de la población, es decir, especifica la forma de la distribución y el valor de sus parámetros.

Si una hipótesis no especifica completamente la distribución de la población se dice que es una hipótesis compuesta.

2.2.5.1. Hipótesis nula y alternativa

Se denomina hipótesis nula y se representa por H_0 , a la hipótesis que es aceptada provisionalmente como verdadera y cuya validez será sometida a comprobación experimental. Los resultados experimentales nos permitirán seguir aceptándola como verdadera o si, por el contrario, debemos rechazarla como tal.

Toda hipótesis nula va acompañada de otra hipótesis alternativa.

Se denomina hipótesis alternativa y se representa por H_1 o por H_A , a la hipótesis que se acepta en caso de que la hipótesis nula H_0 sea rechazada. La hipótesis alternativa H_1 , es pues una suposición contraria a la hipótesis nula.

Por ejemplo, si se asume que θ_0 es un valor del parámetro desconocido θ de una población cuya distribución se supone conocida, entonces son hipótesis nulas y alternativas las siguientes afirmaciones:

- a) $H_0: \theta = \theta_0$, y $H_1: \theta \neq \theta_0$
- b) $H_0: \theta \leq \theta_0$, y $H_1: \theta > \theta_0$
- c) $H_0: \theta \geq \theta_0$, y $H_1: \theta < \theta_0$

2.2.5.2. Prueba de una hipótesis estadística

Para tomar decisiones estadísticas se requieren de ambas hipótesis (la nula y la alternativa).

La prueba de una hipótesis estadística es un proceso que nos conduce a tomar la decisión de aceptar o rechazar la hipótesis nula H_0 , en contraposición de la hipótesis alternativa H_1 y en base a los resultados de una muestra aleatoria seleccionada de la población en estudio.

La hipótesis nula H_0 es la primera que se plantea y debe ser establecida de manera que especifique un valor θ_0 del parámetro θ en estudio.

La aceptación de una hipótesis significa que los datos de la muestra no proporcionan evidencia suficiente para refutarla.

El rechazo significa que los datos de la muestra lo refutan.

2.2.6. Pruebas de Bondad de Ajuste

Son pruebas de hipótesis que sirven para comprobar que la distribución generada puede aproximarse o no a una distribución teórica dada.

Las hipótesis que emplean estas pruebas son:

H_0 : La variable aleatoria se ajusta a la distribución candidata con los parámetros estimados.

H_1 : La variable aleatoria no se ajusta.

En todos los casos, se debe definir el nivel de significancia (0.05).

Las pruebas de hipótesis con que se utilizarán en este trabajo de investigación son:

- Prueba Kolmogorov Smirnov (KS).
- Prueba Chi Cuadrado (Chi^2).

2.2.6.1. Prueba Kolmogorov Smirnov (KS)

Esta prueba es aplicable **sólo a variables aleatorias continuas**, debido a que es un supuesto de la prueba.

No depende de una distribución específica y no se sabe a priori la distribución de donde se toman los datos.

Calcula las diferencias (en valor absoluto) entre las frecuencias acumuladas observadas y las teóricas en cada clase.

Se busca la mayor diferencia (D_{\max}) y se compara con el valor crítico de tabla KS.

Se puede aplicar para todo tipo de tamaño de muestras, ya sean **pequeñas o grandes**.

Otra ventaja es que permite construir límites de confianza para la distribución acumulada completa.

2.2.6.2. Prueba Chi Cuadrado (χ^2)

Se usa para comprobar que no existe diferencia entre la distribución de frecuencias de la muestra y la distribución teórica.

Esta prueba nos permite determinar si las frecuencias observadas son suficientemente cercanas a las esperadas según nuestra hipótesis nula.

Válida para *tamaños de muestra grande, para distribuciones discretas o continuas.*

Intuitivamente: compara frecuencias observadas contra frecuencias teóricas o esperadas.

El estadístico hallado (*Medida de discrepancia*) se compara con los valores de la tabla χ^2

CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DE LA OPERACIÓN MINERA

3.1. Generalidades

La operación minera donde se lleva a cabo este trabajo de investigación se encuentra al sur del país. Ubicada en las partes altas de la quebrada de Campanayoc, distrito de La Capilla, provincia de Sánchez Cerro. Entre los 2,300 y 2,750 m.s.n.m.

La explotación del yacimiento se realiza mediante el método de minado a tajo abierto. Obtiene como producto final cátodos de cobre cuyo mineral es extraído de óxidos y sulfuros secundarios.

3.2. Geología

Se ha reconocido y trabajado 4 mantos que en conjunto tienen una extensión de 4 km en dirección WNW-ESE y 2 km en dirección NNE-SSW, con buzamiento entre 0° a 25° (en promedio 10°) hacia el SSW. Estos mantos se relacionan a sistemas de cobre porfiríticos originados por el emplazamiento de stocks intrusivos pertenecientes al Batolito de la Costa, controlados principalmente por la familia de fallas del Sistema Incapuquio.

La configuración de los sectores está definida por la mineralización relacionada a sistemas de cobre porfirítico y controles estructurales. Los sectores se clasifican según el siguiente detalle:

- Sector Cuprita
- Sector Cuprita Sur
- Sector Atahualpa
- Sector Atahualpa 3
- Sector Las Garzas

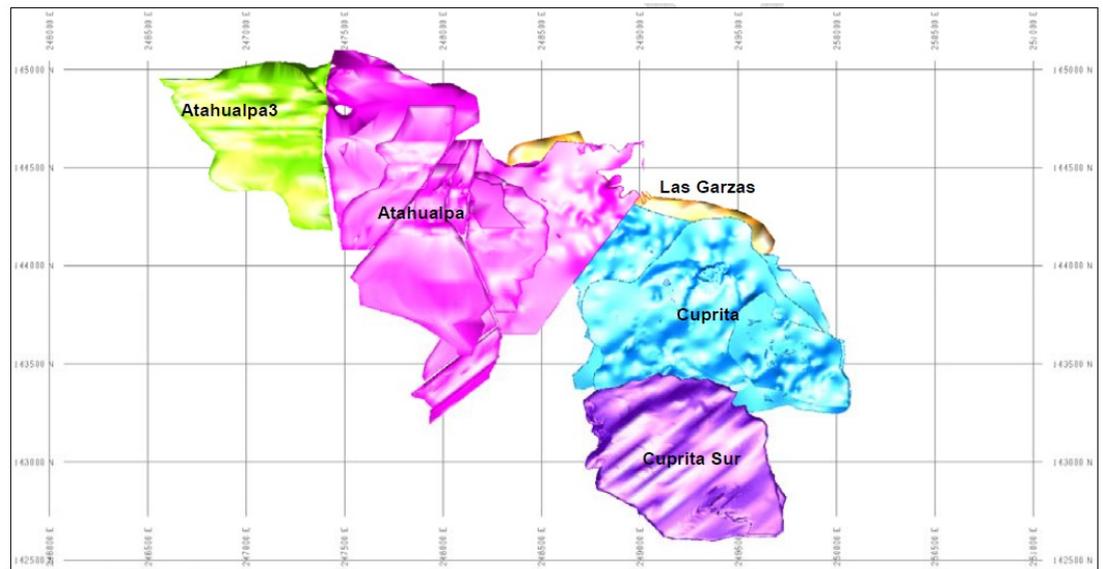


Gráfico 3.2.1 Sectorización del Yacimiento Mineral.

3.3. Operaciones Mina

Por las características del yacimiento el método de explotación de la operación minera es el de tajo abierto.

Los bancos son de 6 metros de altura con un ángulo de inclinación de 75° . El ancho de rampa es de 20 m, la vida de la mina está estimada para 20 años y la explotación está dividida en 6 fases. Actualmente se está explotando la Fase 1 (zona de óxidos) y paralelamente se está realizando el desbroce de la Fase 2. El nivel de producción es de 6000 tn/día de mineral y de 50 000 tn/día de desmonte.

La siguiente imagen detalla las fases de la mina:

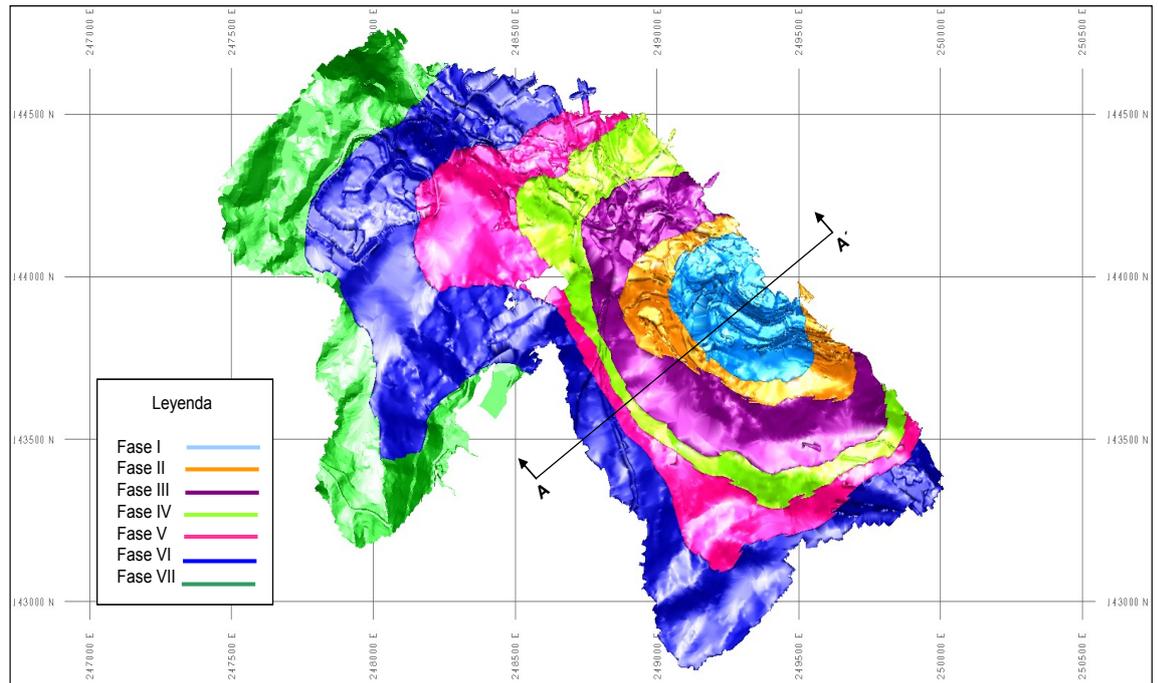


Gráfico 3.3.1 Fases de Minado.

3.3.1. Perforación y Voladura

La perforación se realiza con 3 perforadoras Rock Drill ECM-590 de la marca Atlas Copco y una perforadora Reed Drill R30 C marca Terex las cuales perforan taladros de 6.5 m de longitud y 5" de diámetro.

En el proceso de voladura se utiliza como explosivo el nitrato de amonio energizado (ANFO) Super Fan Dos de la marca FAMESA que son cargados en los taladros de forma manual. Como accesorios de voladura se emplean los Fanel Dual de 14/500 MS y 42/500 MS además de los Booster de Pentolita de 1 Lb.

3.3.2. Carguío

El carguío de mineral se realiza en la Fase 1 y el de desmote se realiza principalmente en la Fase 2.

En ambos casos se hacen uso de Cargadores Frontales 966H y Excavadoras 336D ambos de la marca Caterpillar. Se disponen un total de 4 cargadores frontales y 6 Excavadoras.

3.3.3. Acarreo

El acarreo de mineral se lleva a cabo con volquetes de 20 m³ de la marca Mercedes Benz modelo Actros 4143. El acarreo de desmote se lleva a cabo con 2 tipos de volquetes. Con volquetes de 15 m³ de capacidad modelo Trakker de la marca Iveco y también con los de 20 m³ de la marca Mercedes. En total se cuenta con 50 volquetes. 27 son de 15 m³ y 23 son de 20 m³.

Estos volquetes recorren 2.898 Km de distancia cuando trasladan el mineral desde el frente de trabajo hasta la pila de lixiviación y recorren 2.480 km cuando transportan material estéril desde los frentes de trabajo hasta el botadero de desmote.

Las densidades de mineral y desmote son las siguientes:

Material	Densidad Esponjada (Kg/m ³)
Mineral	2.1
Desmote	1.9

Tabla 3.3.1 Densidades de Material.

Por otro lado la altura promedio en la que trabajan los equipos es de 2700 m.s.n.m.

La velocidad máxima a la que pueden transitar los volquetes es de 40 kph y la resistencia a la rodadura en los perfiles de acarreo es de 3.0 %.

A continuación se detallan las rutas de acarreo de desmonte y mineral.

- **Ruta de acarreo de Desmonte**

Tramo	Distancia (m)	Pendiente Promedio (%)
Banco 2582-Punto 1	1170	10
Punto 1- Punto 2	270	7
Punto 2 - Botadero	1040	-5

Tabla 3.3.2 Características de la ruta de acarreo de desmonte.

- **Ruta de Acarreo de Mineral**

Tramo	Distancia (m)	Pendiente Promedio (%)
Banco 2498-Punto 1	1120	10
Punto 1- Punto 2	490	6
Punto 2 - Punto 3	200	12.5
Punto 3- Pad	88	5

Tabla 3.3.3 Características de la ruta de acarreo de mineral.

Cabe resaltar que en este trabajo de investigación tan solo se ha monitoreado y estudiado el carguío y acarreo de desmonte por ser el sistema donde más volquetes se utilizan motivo por el cual se genera tráfico y mayor cantidad de unidades en cola.

3.3.4. Servicios Auxiliares

Para el mantenimiento de las vías, la compactación del suelo, el acomodo del material volado, el regado de las vías, el abastecimiento de combustible y los trabajos auxiliares en general se usan los siguientes equipos:

- 2 Tractores de cadenas D8T marca Caterpillar.
- 2 Motoniveladoras 135H marca Caterpillar.
- 1 Rodillo R-10 marca Caterpillar.
- 3 Cisternas de Agua.
- 1 Camión cisterna de combustible.
- 6 Torres de Iluminación marca Terex.

3.4. Metalurgia

Esta operación minera tiene como producto final cátodos de cobre de 99.999 % de pureza. Con un nivel de producción de 10 000 Tn de Cu al año.

El mineral pasa por un circuito que engloba el chancado, aglomerado, luego se dirige a las pozas lixiviación, para que después pasa por el proceso de extracción por solventes, seguidamente pasa a la planta de electro

deposición para finalmente obtener los cátodos de cobre luego de un tiempo promedio de 270 días.

Así como se puede apreciar en el siguiente flujograma:



Gráfico 3.4.1 Flujo de Beneficio del Mineral

CAPÍTULO 4. ETAPAS PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS

Para desarrollar un modelo de simulación hay que seguir los siguientes pasos:

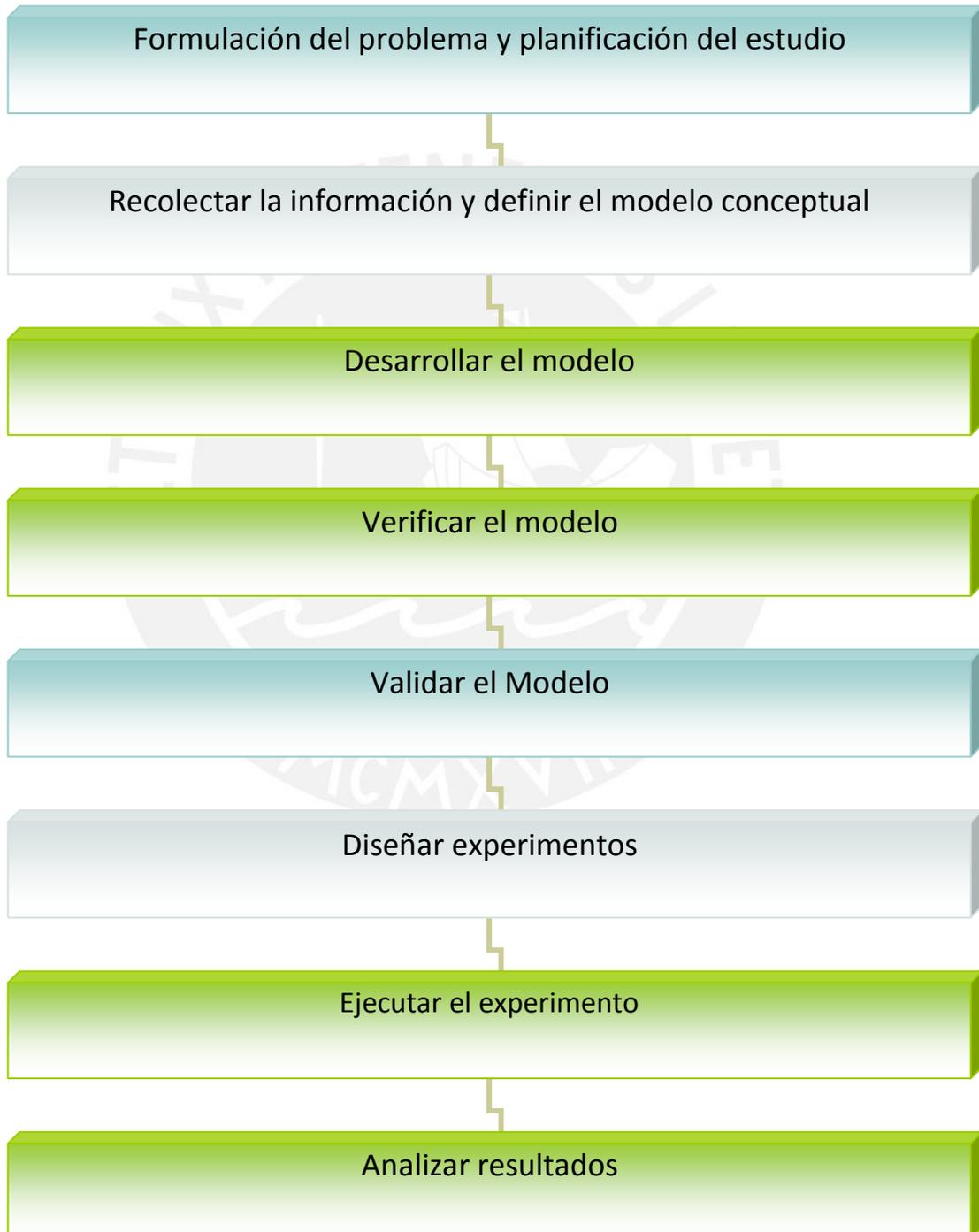


Gráfico 3.4.2 Etapas para el desarrollo de un modelo de simulación

4.1. Formular el problema y planificar el estudio

Todo estudio debería iniciar con la identificación del problema. Este es el primer paso para iniciar el estudio y es de suma importancia debido a que nos permite delimitar el horizonte de estudio.

Es aquí donde se identifica lo que no está funcionando bien en el sistema y se desea mejorar.

El analista debe de estar seguro que el problema descrito está claramente entendido y definido. Además de dar a conocer el objetivo que se quiere alcanzar con el estudio.

Algunas preguntas nos pueden ayudar en este proceso: ¿Se podrá modelar?, ¿Funcionará el modelo?, ¿Cuál será el tiempo que dure el estudio? , ¿Qué recursos serán necesarios para llevar a cabo el estudio?, ¿Qué software se usará?

Una buena práctica es analizar el sistema que se desea estudiar, para esto, la respuesta a ciertas preguntas específicas puede ayudar: ¿Existe el sistema a estudiar?, ¿Es un nuevo diseño o todavía no ha sido diseñado?, ¿Se trata de un sistema simple o de varias pequeñas operaciones?, ¿Es un gran departamento, una unidad completa o una compañía entera?, ¿Se analizará todo el sistema?

Para obtener mejores resultados se tiene que delimitar el sistema para los propósitos del estudio. Es por eso que se debe poner límites iniciales del tamaño del sistema.

Luego de haber establecido límites iniciales hay que definir las métricas de performance.

Una vez establecido como va a ser medido el performance del sistema, se debe investigar o encontrar si hay parámetros iniciales con qué comparar. Estos parámetros e indicadores estarán disponibles si el sistema existe, en el caso de que no exista debe haber sistemas similares los cuales se pueden tomar como referencia.

4.2. Recolectar la información y definir el modelo conceptual

Una etapa fundamental en el desarrollo de un modelo de simulación es la recolección de datos.

Tener datos confiables que representen lo que realmente está pasando en el sistema real es tan importante como tener la lógica del sistema correctamente comprendida.

Si estos datos no se toman correctamente es difícil que el modelo se pueda validar con la realidad del sistema. Por eso es común decir: “si entra basura...., sale basura”.

En los modelos de simulación los datos que comúnmente se suelen adquirir son:

- Tiempo entre llegadas
- Demandas
- Tiempos de carga y descarga
- Tiempos de procesamiento
- Tiempos entre fallas
- Número de servidores
- Tiempos de reparación
- Tiempos de viaje
- Porcentaje de partes que no pasan la inspección

- Porcentaje de entidades que requieren distintos servicios, entre otros.

4.2.1. Método para la adquisición de datos

Para realizar una gestión eficiente de recolección de datos habría que seguir los siguientes pasos:

4.2.1.1. Recolección de Datos

Cuando la operación existe se puede obtener datos de la operación actual, datos históricos provenientes de reportes de producción, estudios de tiempos y movimientos, ventas, paradas de máquina y todo tipo de información que se tenga disponible. En caso contrario es válido utilizar opinión experta o se puede inferir de sistemas similares.

Dentro de la recolección de datos un aspecto a tomar en cuenta es la determinación de tamaño de muestra mínimo a recolectar el cual nos asegure un cierto nivel de confiabilidad y certeza.

Para determinar el **tamaño de muestra “n”** necesario para estimar con un **error máximo permisible prefijado (e)** y conocida la **varianza poblacional (σ^2)** podemos utilizar la siguiente fórmula:

$$n_0 = \frac{z_{1-\frac{\alpha}{2}}^2 \sigma^2}{e^2}$$

Cuando no se conoce la varianza poblacional es necesario hacer un muestro inicial o piloto. Es usual uno de 30 datos que nos permita calcular la varianza muestral s^2 de los n datos de la muestra piloto.

4.2.1.2. Identificar la distribución de probabilidad

Luego de haber adquirido los datos se empieza a construir la distribución de frecuencias o histograma para en base a ella poder escoger una familia de distribuciones.

4.2.1.3. Evaluar la bondad de ajuste a la distribución escogida

Luego de tener una familia de distribuciones de donde elegir se realizan la prueba de bondad de ajuste para determinar la calidad de nuestro ajuste. Para este paso es donde se utilizan los métodos de Chi cuadrado y Kolmogorov-Smirnov.

El software Arena 12 cuenta con una herramienta llamada Input Analyzer el cual nos permite ajustar los datos tomados a una distribución determinada.

Para analizar si los datos ajustan a una distribución X podemos revisar los p-values de las pruebas.

Si el valor del p-value es menor o igual al nivel de confianza (0.05) se rechaza la hipótesis nula de la prueba, caso contrario no existen evidencias de que no siga la distribución dada. La condición para aceptar es entonces que:

$$pvalue > 0.05$$

4.3. Desarrollar el modelo

En esta etapa se refiere a la abstracción del modelo real de tal forma que nos permita representarlo por medio de bloques en el software. Estos bloques son construidos en base a la lógica del modelo real.

Previamente a la construcción del modelo habría que identificar previamente:

- Entidades y recursos
- La lógica de los procesos
- Indicadores de desempeño
- Definir supuestos

4.4. Verificación del modelo

Verificar el modelo se refiere a determinar si la construcción de dicho modelo es correcta. Es decir cerciorarse si la lógica operacional corresponde a la lógica del diseño identificando corrigiendo errores que puedan existir en la programación.

En esta etapa se verifica si los sucesos del modelo están procesados correctamente, si las fórmulas matemáticas son válidas y si las estadísticas y medidas de ejecución están calculadas correctamente

4.5. Validación del modelo

Los resultados que arroje el modelo nos servirá para obtener conclusiones del sistema real lo cual nos permitirá plantear diferentes alternativas o escenarios, por lo que es muy importante que se pueda confiar en el modelo.

La validación se refiere a determinar si el modelo, como abstracción es una buena representación del sistema. Es decir si los resultados que arroja el modelo tienen lógica y son similares a la realidad.

4.6. Diseño de experimentos

Luego de tener la certeza de que el modelo está validado y verificado es aquí donde se plantean las alternativas de mejora.

Se diseñan variantes al modelo de bloques con el objetivo de mejorar el performance de indicadores previamente establecidos.

4.7. Ejecución de experimentos

Una vez diseñado las alternativas al modelo original se realizan corridas y réplicas que nos permitan poder evaluar los distintos escenarios.

En este punto hay que tener en cuenta que existen 2 tipos de sistemas. La identificación del tipo de sistema nos permitirá determinar el número de corridas y la longitud de replica a realizar en el modelo. Estos sistemas son:

4.7.1. Sistema terminal

Tiene una condición fija de comienzo y un evento definido para terminar la simulación.

En este sistema la corrida dura un tiempo específico, las condiciones iniciales son conocidas y las condiciones finales son importantes.

4.7.2. Sistema no terminal

No tiene una condición fija de comienzo y tampoco un evento definido para terminar la simulación.

En este tipo de sistema la corrida dura un período no definido de tiempo, las condiciones iniciales no son importantes y el interés se sitúa en el comportamiento del estado estacionario.

4.8. Análisis de resultados

Esta es la etapa donde se analizan los beneficios de las alternativas planteadas verificando que sean consecuentes con el sistema real.

CAPÍTULO 5. DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN

5.1. Descripción del sistema a simular

Como ya se ha mencionado anteriormente este trabajo de investigación tiene como objetivo desarrollar un modelo del sistema de carguío y acarreo de desmonte en una operación minera a tajo abierto el cual nos permita diseñar escenarios alternativos de mejora al problema que se ha encontrado en la realidad.

A pesar de que en la operación minera el movimiento de material se hace tanto para mineral como para desmonte, se elige simular sólo el sistema de carguío y acarreo de desmonte debido a que es el sistema donde se utiliza el mayor número de volquetes.

Debido a ello sólo se considerará los trabajos que se realicen en el frente de carguío del banco 2582 de la fase 2 y la ruta de acarreo de desmonte.

Esta ruta tiene una distancia promedio de 2.48 Km con 3% de resistencia a la rodadura, un tramo cuya pendiente máxima es de + 10% y otro con pendiente mínima de -5%.

Para efectos de la investigación el registro de los tiempos se realiza desde que el volquete llega al frente de trabajo. Si el equipo de carguío está atendiendo a otro volquete, el volquete que acaba de llegar espera un determinado tiempo para ser atendido por el equipo de carguío (cargador frontal o excavadora) en la fila del equipo de carguío que tiene menor número de volquetes en cola. Una vez que se libera el equipo de carguío, el volquete inicia el movimiento de cuadro y acomodo para ponerse en posición de manera que le permita recibir la carga. Una vez posicionado,

espera a que el equipo de carguío deposite el material en la tolva del volquete, luego de ello el volquete se retira del frente de carguío y se dirige hacia el botadero de desmonte. Al llegar al botadero, realiza la maniobra de acomodo, retroceso y cuadre en una zona específica para que se disponga a descargar la carga. Seguidamente el volquete inicia el proceso de descarga de material, el cual consiste en levantar la tolva para que por gravedad caiga el material. Finalmente luego de descargar el material el volquete retrae la tolva y se dispone a retornar al frente de carguío para realizar un nuevo ciclo.

Este proceso se repite durante todo el día tanto en la guardia día como en la guardia noche. Los turnos de trabajo comienzan a las 7 a.m. y 7.p.m. y son de 12 horas cada uno. Si descontamos las charlas de seguridad, la hora de almuerzo, y algunas paradas por coordinación de trabajos se consideran 10 horas efectivas de operación en cada turno.

5.2. Formulación del problema y planificación del estudio

Luego de haber estado en el tajo se pudo observar que en el banco 2582 se tienen 4 frentes de trabajo. Dos frentes de trabajo con un cargador frontal, cada uno, como equipo de carguío y en los otros 2 restantes el carguío se realiza con excavadoras.

El acarreo se realiza con 19 volquetes, 9 volquetes de 15 m³ y 10 volquetes de 20 m³. No se observa una asignación científica de los volquetes en los frentes de carguío. Por el contrario cuando un volquete llega al banco la decisión de hacer cola en determinado equipo de carguío se basa en el equipo cuyo menos volquetes tenga en cola.

Debido a esta configuración se pudo observar que se forman demasiadas colas, llegando hasta 4 volquetes en espera por frente en determinados momentos de la guardia.

Por otro lado, se pudo observar también que, en reiteradas ocasiones los equipos de carguío (cargadores frontales y excavadoras) empleaban un tiempo considerable en esperar a que las unidades de carguío (volquetes) lleguen al frente de trabajo.

Debido a este escenario y con la consigna de mejorar esta situación es que se decide modelar el sistema real con el objetivo de reducir estos tiempos improductivos.

El estudio se dividió en 2 etapas. La primera etapa se refiere a la toma de tiempos y movimientos de los equipos de carguío y acarreo que trabajaban en los frentes de desmonte.

La segunda etapa del estudio consiste en desarrollar o programar el sistema real en el software Arena 12, verificarlo, validarlo y generar escenarios alternativos de mejora.

5.3. Recolección de datos

Esta etapa se realizó durante 4 semanas en la operación minera. Este registro de los datos se realizó tanto en la guardia día como en la guardia noche durante un periodo mínimo de 2 horas por guardia.

Para obtener mayor precisión y certeza en el registro de los tiempos del ciclo de carguío y acarreo se utilizó como herramienta una laptop en la cual mediante una macros en Excel se registró los tiempos mencionados anteriormente.

Los datos que se registraron en el ciclo de carguío fueron los siguientes:

- Tipo de volquete que llega al frente de carguío.
- Hora de arribo con que llega el volquete al frente.
- Tiempo de espera que transcurre para que el volquete sea atendido por el equipo de carguío.
- Tiempo que el volquete emplea para cuadrarse o posicionarse para recibir la carga.
- Tiempo de carguío.

Los datos que se registraron en el ciclo de acarreo fueron los siguientes:

- Tipo de volquete
- Tiempo de ida. Que es el tiempo que emplea el volquete para dirigirse al botadero de desmonte.
- Tiempo de cuadro o posicionamiento. Se refiere al tiempo en que el volquete emplea en retroceder y posicionarse para disponerse a descargar la carga que lleva en la tolva.
- Tiempo de descarga. Es el tiempo que transcurre mientras el volquete levanta la tolva para la descarga, el tiempo en que cae la carga y finalmente el tiempo en que retrae la tolva para iniciar su retorno.
- Tiempo de vuelta o retorno. Es el tiempo que transcurre mientras el volquete realiza el viaje de regreso al frente de carguío.

Durante las 4 semanas se pudo obtener un total de 551 muestras de ciclos de carguío para ambos tipo de equipos (excavadoras y cargador frontal). Las que fueron clasificadas por tipo de volquete y por tipo de equipo de carguío.

Por otro lado se obtuvo una data de 105 muestras del ciclo de acarreo que han sido clasificadas en función al tipo de volquete (15 m³ y 20 m³)

Para todos estos casos mencionados se calculó el tamaño de muestra mínimo a considerar.

El cálculo del tamaño de muestra para cada ciclo de carguío y de acarreo se muestra a continuación:

5.3.1. Tamaño de muestra del ciclo de carguío y acarreo

Para determinar cuál es el mínimo número de datos que se deben tomar para obtener una data confiable se realizó el cálculo de tamaño de muestra para cada uno de los tiempos del ciclo de carguío y acarreo.

Se inició tomando una muestra de 30 datos para cada uno de los tiempos de ciclo. Luego se calculó la varianza y la desviación estándar y se procedió a calcular el tamaño de muestra, de los 30 datos, haciendo uso de la formula:

$$n_0 = \frac{z_{1-\frac{\alpha}{2}}^2 \sigma^2}{e^2}$$

Considerando un nivel de confianza de un 95% con un error admisible del 10%. A continuación se detalla el cálculo del tamaño de muestra para cada uno de los tiempos de carguío y acarreo.

5.3.1.1. Tamaño de muestra de los tiempos de ciclo de carguío

5.3.1.1.1. Cargador frontal a un volquete de 15 m³

	Tiempo de cuadro	Tiempo de Carguío	Tiempo de Ciclo
Promedio 30 datos	0.36	2.96	3.32
Desviación Estándar	0.15	0.83	0.87
Varianza	0.02	0.68	0.75
Z-(1.96)	3.84	3.84	3.84
e (error)	0.04	0.30	0.33
Tamaño de Muestra	68	30	26

Tabla 5.3.1 Tamaño de muestra del tiempo de ciclo de carguío de un cargador frontal a un volquete de 15 m³

5.3.1.1.2. Cargador frontal a un volquete de 20 m³

	Tiempo de Cuadro	Tiempo de Carguío	Tiempo de Ciclo
Promedio 30 datos	0.34	3.96	4.30
Desviación Estándar	0.14	0.78	0.81
Varianza	0.02	0.61	0.65
Z-(1.96)	3.84	3.84	3.84
e (error)	0.03	0.40	0.43
Tamaño de Muestra	62	15	14

Tabla 5.3.2 Tamaño de muestra del tiempo de ciclo de carguío de un cargador frontal a un volquete de 20 m³

5.3.1.1.3. Excavadora a un volquete de 15 m³

	Tiempo de cuadro	Tiempo de Carguío	Tiempo de Ciclo
Promedio 30 datos	0.41	2.29	2.70
Desviación Estándar	0.17	0.56	0.63
Varianza	0.03	0.31	0.39
Z-(1.96)	3.84	3.84	3.84
e (error)	0.04	0.23	0.27
Tamaño de Muestra	67	23	21

Tabla 5.3.3 Tamaño de muestra del tiempo de ciclo de carguío de una excavadora a un volquete de 15 m³

5.3.1.1.4. Excavadora a un volquete de 20 m³

	Tiempo de Cuadre	Tiempo de Carguío	Tiempo de Ciclo
Promedio 30 datos	0.44	2.82	3.25
Desviación Estándar	0.18	0.42	0.43
Varianza	0.03	0.18	0.18
Z-(1.96)	3.84	3.84	3.84
e (error)	0.04	0.28	0.33
Tamaño de Muestra	66	9	7

Tabla 5.3.4 Tamaño de muestra del tiempo de ciclo de carguío de una excavadora a un volquete de 20 m³

En los cuatro casos el tiempo de cuadro es el que necesita mayor número de datos. Por tal motivo el número de datos para cada uno de los tiempos restantes no será menor al

número de tamaño de muestra que indica el tiempo de cuadro. Para asegurar la confiabilidad del estudio.

5.3.1.2. Tamaño de muestra de los tiempos de ciclo de acarreo

5.3.1.2.1. Volquete de 15 m³

	Tiempo de Ida	Tiempo de Cuadre	Tiempo de Descarga	Tiempo de Retorno	Tiempo de Ciclo
Promedio 30 datos	4.80	0.39	0.87	3.86	9.92
Desviación	0.32	0.12	0.23	0.20	0.31
Varianza	0.10	0.01	0.05	0.04	0.09
Z-(1.96)	3.84	3.84	3.84	3.84	3.84
e (error)	0.48	0.04	0.09	0.39	0.99
Tamaño de Muestra	2	34	27	1	1

Tabla 5.3.5 Tamaño de muestra para los tiempos de ciclo de acarreo de un volquete de 15 m³

5.3.1.2.2. Volquete de 20 m³

	Tiempo de Ida	Tiempo de Cuadre	Tiempo de Descarga	Tiempo de Retorno	Tiempo de Ciclo
Promedio 30 datos	6.22	0.52	1.22	5.00	12.95
Desviación	0.45	0.16	0.25	0.34	0.68
Varianza	0.20	0.03	0.06	0.11	0.46
Z-(1.96)	3.84	3.84	3.84	3.84	3.84
e (error)	0.62	0.05	0.12	0.50	1.29
Tamaño de Muestra	2	38	16	2	1

Tabla 5.3.6 Tamaño de muestra para los tiempos de ciclo de acarreo de un volquete de 15 m³

5.3.1.3. Tamaño de muestra de los tiempos de arribo

Debido a que también es importante determinar la frecuencia con la cual los volquetes llegan al frente de carguío, se calculó el tamaño de muestra mínimo para los tiempos de arribo. Así como se muestra en la siguiente tabla:

	Tiempo de Arribo
Promedio 30 datos	1.06
Desviación Estándar	0.89
Varianza	0.78
Z-(1.96)	3.84
e (error)	0.11
Tamaño de Muestra	269

Tabla 5.3.7 Tamaño de muestra de los tiempos de arribo.

5.4. Análisis de datos

Luego de haber calculado el tamaño de muestra mínimo a considerar para cada uno de los tiempos. Se procederá a analizar las muestras obtenidas en campo.

Para el análisis se utilizó el complemento Input Analyzer tomando en consideración el valor del p-value y el menor error al cuadrado.

Se detallarán tan solo los pasos para el análisis del tiempo de arribo de los volquetes. Para el resto de tiempos se presentará un cuadro resumen. Las distribuciones del resto de tiempos se encuentran en los anexos.

5.4.1. Análisis de los tiempos de Arribo

Se denomina tiempo de arribo a la frecuencia con la que llega un volquete al banco 2582. Se observaron un total de 551 arribos.

Al utilizar el Input Analyzer se genera un histograma como el que se muestra a continuación que sugiere la distribución probabilística Weibull como la que mejor se ajusta a los datos.

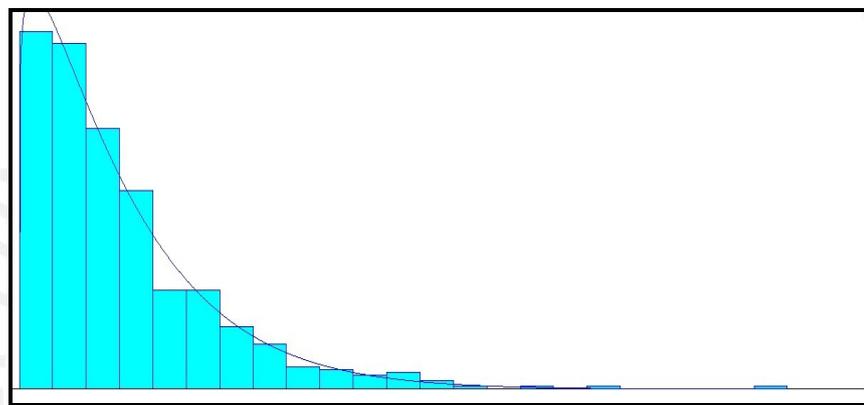


Figura 5.4.1 Histograma del intervalo de arribo de los volquetes

Para estar seguros de que este es el mejor ajuste se tiene que analizar los resultados con las pruebas de bondad de ajuste. Por tratarse de una muestra grande (datos mayores a 90) el análisis se realiza con las pruebas de KS y χ^2 . Para esto se debe tener la certeza que los valores del p-value sean mayores a 0.05.

Distribution Summary	
Distribution:	Weibull
Expression:	WEIB(2.05, 1.11)
Square Error:	0.001005
Chi Square Test	
Number of intervals	= 10
Degrees of freedom	= 7
Test Statistic	= 5.55
Corresponding p-value	= 0.595
Kolmogorov-Smirnov Test	
Test Statistic	= 0.0215
Corresponding p-value	> 0.15
Data Summary	
Number of Data Points	= 551
Min Data Value	= 0.02
Max Data Value	= 14.8
Sample Mean	= 1.99
Sample Std Dev	= 1.84
Histogram Summary	
Histogram Range	= 0 to 15
Number of Intervals	= 23

Figura 5.4.2 Reporte del análisis de las pruebas de bondad ajuste proporcionado por el Imput Analyzer.

Como se observa ambos valores están lejos de acercarse a 0.05.

Además de este análisis se tiene que corroborar que la distribución sugerida tenga el menor error al cuadrado.

Function	Sq Error
Weibull	0.001
Gamma	0.00118
Erlang	0.00425
Exponential	0.00425
Beta	0.00527
Lognormal	0.0091
Normal	0.035
Triangular	0.0698
Uniform	0.113

Figura 5.4.3 Reporte del análisis del error al cuadrado proporcionado por el Imput Analyzer

Entonces se puede observar que la distribución Weibull es la que tiene el menor error al cuadrado, por lo tanto queda demostrado que los datos se comportarán según la distribución probabilística Weibull.

5.4.2. Análisis de los tiempos del ciclo de carguío

Equipo de Carga	Tipo de Volquete	Tipo de Tiempo	N° de Datos	Distribución	Expresión	p-value KS	p-value Chi ²	Error ²
Cargador frontal	15 m ³	Cuadre	81	Lognormal	0.1 + LOGN(0.256, 0.174)	> 0.15	-	0.0219
Cargador frontal	15 m ³	Carguío	81	Weibull	1.02 + WEIB(1.75, 2.51)	> 0.15	-	0.008742
Excavadora	15 m ³	Cuadre	77	Lognormal	0.05 + LOGN(0.329, 0.192)	> 0.15	-	0.003417
Excavadora	15 m ³	Carguío	77	Lognormal	1.16 + LOGN(1.08, 0.505)	> 0.15	-	0.009354
Cargador frontal	20 m ³	Cuadre	196	Lognormal	0.1 + LOGN(0.233, 0.154)	> 0.15	0.229	0.00539
Cargador frontal	20 m ³	Carguío	196	Lognormal	1.07 + LOGN(2.07, 0.841)	> 0.15	0.294	0.004254
Excavadora	20 m ³	Cuadre	201	Triangular	TRIA(0.1, 0.206, 0.87)	> 0.15	0.0627	0.011427
Excavadora	20 m ³	Carguío	201	Gamma	1 + GAMM(0.202, 9.39)	0.123	0.0828	0.018012

Tabla 5.4.1 Resumen del análisis de los tiempos de carguío.

Como se aprecia en el cuadro, cuando la muestra es mayor a 90 datos se puede evaluar con las 2 pruebas de bondad de ajuste en caso contrario tan solo se evalúa con la prueba de Kolmogorov Smirnov.

5.4.3. Análisis de los tiempos del ciclo de acarreo

Tipo de Volquete	Tipo de Tiempo	N° de Datos	Distribución	Expresión	p-value KS	Error ²
15 m ³	Ida	62	Beta	$4 + 1.52 * \text{BETA}(2.29, 2.67)$	> 0.15	0.008534
15 m ³	Cuadre	62	Lognormal	$0.09 + \text{LOGN}(0.346, 0.159)$	> 0.15	0.023022
15 m ³	Descarga	62	Lognormal	$0.33 + \text{LOGN}(0.493, 0.263)$	> 0.15	0.058600
15 m ³	Retorno	62	Lognormal	$3.24 + \text{LOGN}(0.704, 0.297)$	> 0.15	0.004345
20 m ³	Ida	43	Weibull	$5.08 + \text{WEIB}(1.3, 3.2)$	> 0.15	0.053878
20 m ³	Cuadre	43	Beta	$0.07 + 1.13 * \text{BETA}(5.41, 7.87)$	> 0.15	0.046226
20 m ³	Descarga	43	Lognormal	$0.35 + \text{LOGN}(0.776, 0.343)$	> 0.15	0.004199
20 m ³	Retorno	43	Normal	$\text{NORM}(5.01, 0.351)$	> 0.15	0.013935

Table 5.4.2 Resumen del análisis de los tiempos de ciclo de acarreo.

En este caso, como los datos no llegan a ser mayores que 90, tan solo se evalúa con la prueba de Kolmogorov Smirnov.

5.5. Identificación de entidades, recursos, atributos y variables de estado.

5.5.1. Entidades

En este sistema las entidades vienen a ser los 2 tipos de volquetes que transportan el material estéril desde el frente de carguío al botadero de desmonte.

5.5.2. Recursos

Los equipos de carguío vienen a ser los recursos. Para nuestro caso, tenemos 2 tipos de recursos:

- Cargador Frontal
- Excavadora

En el banco 2582 trabajan 4 recursos de cada tipo.

Para el modelamiento se han denominado a los recursos de la siguiente manera:

- Cargador frontal 1
- Excavadora 1
- Cargador frontal 2
- Excavadora 2

5.5.3. Atributos

Los volquetes, es decir, nuestras entidades tienen como atributo el tipo de volquete. Para nuestro caso, los volquetes de 15 m³ son del TIPO 1 y los de 20 m³ son del Tipo 2.

5.5.4. Fila o Cola

En nuestro sistema se tienen 4 colas:

- Cola de espera de atención en el cargador 1
- Cola de espera de atención en la excavadora 1
- Cola de espera de atención en el cargador 2
- Cola de espera de atención en la excavadora 2

5.5.5. Lista de procesamiento

- Cola de espera de atención en el cargador 1 -> FIFO
- Cola de espera de atención en la excavadora 1 -> FIFO
- Cola de espera de atención en el cargador 2 -> FIFO
- Cola de espera de atención en la excavadora 2 -> FIFO

5.5.6. Actividades

- Carga
- Descarga
- Cuadre o posicionamiento
- Viaje de Ida
- Viaje de Retorno

5.5.7. Demora

- Espera del volquete en el frente de carguío para ser atendido por el recurso.

5.6. Consideración para elaborar el modelo

Para realizar el modelo se ha tomado en cuenta las siguientes consideraciones:

- Debido a que en la vida real la mina trabaja las 24 horas divididos en 2 turnos, la simulación del modelo se realizará por un periodo de 20 horas por día.
- En la simulación se está considerando que los equipos no tienen paradas debido a fallas o desperfectos y que siempre están disponibles a menos que estén transportando material.
- En la simulación solo se está modelando los trabajos que se realizan en una determinada zona (banco 2582) de la mina. En la vida real, el tajo tiene varias zonas donde se realizan los trabajos de carguío y mineral.
- Las muestras han sido tomadas en periodo seco. No bajo la influencia de la lluvia.
- Se considera también que las vías están en estado aceptable y que así se mantendrán con lo cual nos permitirá formular escenarios futuros.
- Los tiempos de acarreo incluyen posibles demoras que se generan debido al tráfico de volquetes, camionetas, etc.
- El número de volquetes con que se genera el modelo es de 19.

5.7. Diseño y desarrollo del modelo

Para el diseño y desarrollo del modelo se ha usado el software de simulación Arena 12 (Versión estudiante).

A continuación se mostrará la lógica del modelo:



Figura 5.7.1 Ciclo del sistema de carguío y acarreo

Para cada una de las etapas se ha desarrollado una secuencia de bloques.

Así como se explicaran en detalle a continuación.

5.7.1. Simulación de la llegada de los volquetes al frente de carguío.

Para simular la llegada de los volquetes al frente de carguío se hace uso del bloque **Create** donde se ingresa la tasa de llegada y el máximo número de volquetes que llegarán al banco 2582. También se utiliza el bloque **Assign**, el cual nos permitirá asignar el atributo *tipovolquete* para diferenciar los volquetes de 15 m³ y 20 m³.

Además se emplea el bloque **Station**(Banco 2582) el cual representa la entrada al frente de carguío. Por otro lado se usa otro bloque **Assign** para poder alojar la variable *tiniciocola*, la que registrará el momento en que un volquete empieza a esperar en la cola. Finalmente se emplea el bloque **PickQ** que nos permite establecer una regla de decisión cuando se tienen varias colas. Tal como se muestra en la siguiente figura.

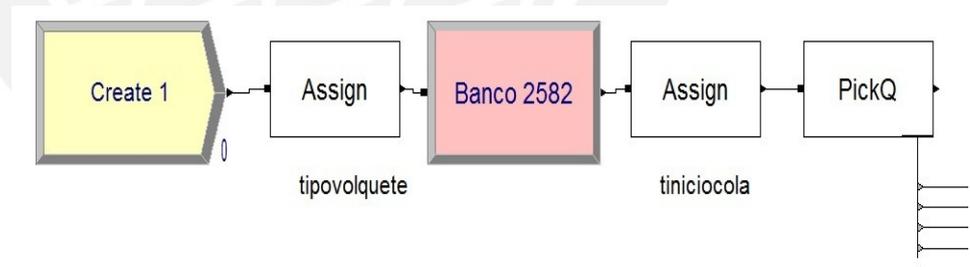


Figura 5.7.2 Secuencia de bloques para la simulación de las llegadas de los volquetes.

Para cada bloque es necesario llenar los campos como se especifican en la siguiente tabla:

BLOQUE	CAMPO/ATRIBUTO	Valor
Create	Type	Expression
	Expression	WEIB(2.05, 1.11)
	Units	Minutes
	Entities per arrival	1
	Max Arrivals	19
	First Creation	0.0
Assign	Attribute	tipovolquete
	Value	DISC(0.4737,1,1,2)
Station	Name	Banco 2582
	Station Type	Station
	Station Name	frentedecarguio
Assign	Variable	tiniciocola
	Value	tnow
PickQ	Queue Selection Rule	SNQ

Tabla 5.7.1 Campos de los bloques de la simulación de la llegada de los volquetes

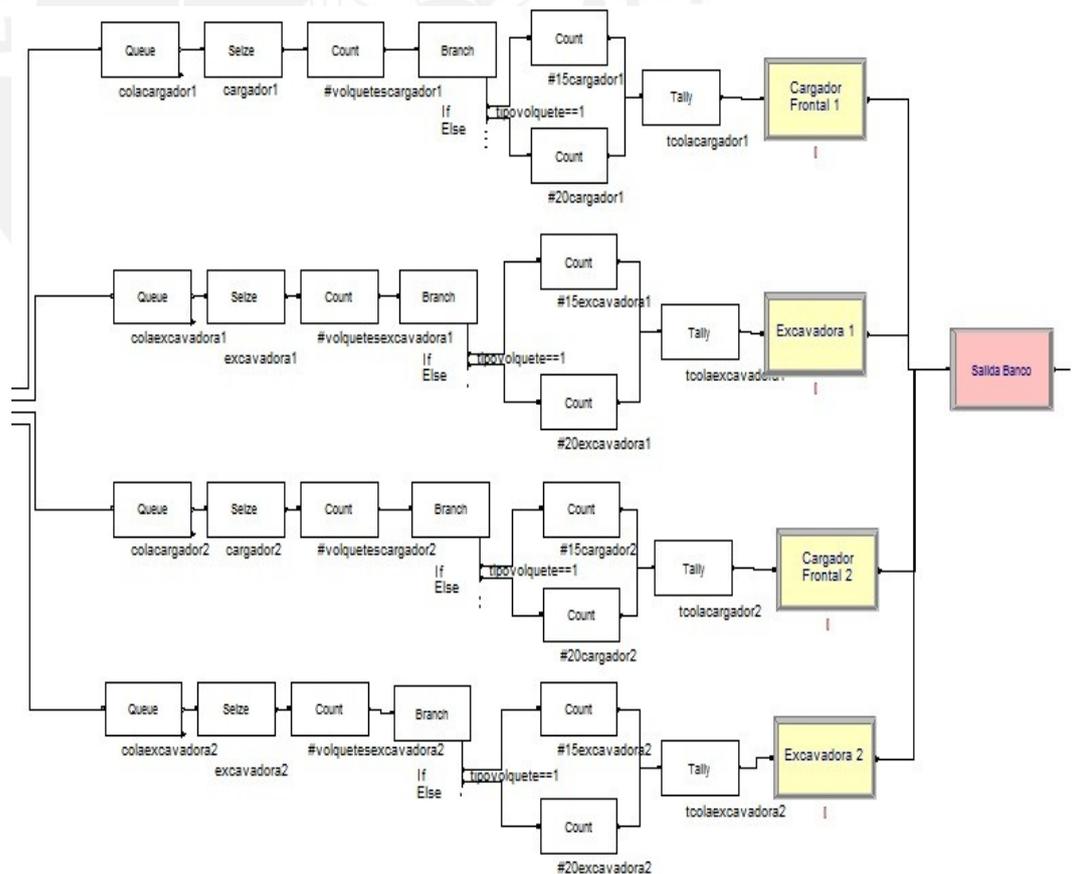
5.7.2. Simulación del ciclo de carga en los frentes de trabajo.

Para simular cada uno de los frentes de carguío se hace uso del bloque **Queue** el cual permite generar un espacio de espera para las entidades (volquetes) mientras transcurre el tiempo para ser atendidos. Seguido del bloque **Seize** el permite asignar el recurso que realizará el carguío a la entidad. Adicionalmente se utiliza el bloque **Count** que es un indicador de desempeño y permitirá contar el número de volquetes que pasen por el frente de carguío. También se usa el bloque **Branch** que permite controlar el flujo de la entidad direccionándolo por ramas. En este caso se usa el **Branch** para poder dirigir cada uno de los tipos de volquetes por 2 caminos diferentes con el objetivo de poder registrar el número de volquetes, de cada tipo, que pasa por el frente. Este registro se hace con la

ayuda de los bloques **Count**. Luego de este registro las entidades pasarán por el bloque **Tally**. El cual nos ayudará a registrar el tiempo total que estuvo un volquete en la cola del frente de carguío espero a ser atendido.

Para simular la carga que realiza un equipo de carguío se utiliza el bloque **Process** el cual aloja las distribuciones probabilísticas de los tiempos de cuadro y de carguío de los volquetes. Finalmente luego de que los volquetes han sido cargados se dirigen hacia el bloque **Station** denominado *Salida Banco*.

En la siguiente figura se presenta la secuencia de bloques utilizados para cada uno de los 4 frentes de carguío.



5.7.3 Secuencia de bloques para simular los frentes de carguío

La siguiente tabla detalla los campos del primer frente de carguío:

BLOQUE	CAMPO/ATRIBUTO	Valor
Queue	Queue ID	Colacargador1
	Priority	1
Seize	Resource ID	Colacargador1
	Number of Units	1
	Counter ID	#volquetescargador1
Count	Counter Increment	1
	Max Number of Branches	1
Branch	Branch Type	If
	Condition	tipovolquete==1
	Branch Type	Else
Count	Counter ID	#15cargador1
	Counter Increment	1
Count	Counter ID	#20cargador1
	Counter Increment	1
Tally	Tally ID	tcolacargador1
	Value	tnow-tiniciocola
	Number of Observations	1
Process	Name	Cargador Frontal 1
	Type	Standard
	Action	Delay Release
	Resource Type	Resource
	Resource Name	cargador1
	Quantity	1
	Delay Type	Expression
	Units	Minutes
Expression	$(\text{tipovolquete}==1) * (0.1 + \text{LOGN}(0.256, 0.174)) + 1.02 + \text{WEIB}(1.75, 2.51) + (\text{tipovolquete}==2) * (0.1 + \text{LOGN}(0.233, 0.154)) + 1.07 + \text{LOGN}(2.07, 0.841))$	

Tabla 5.7.2 Campos de los bloques de la simulación del primer frente de carguío.

La programación de los bloques de los 3 frentes de carguío restantes es similar teniendo en cuenta que cambiaran los nombres y la expresión del bloque **Process** cuando se trate de una excavadora.

5.7.3. Simulación de acarreo del desmonte hacia el botadero

Luego de que los volquetes salen del banco se disponen a realizar la ruta de ida hacia el botadero de desmonte. Para esto se usa el bloque **Route** (hacia botadero) el que nos permite modelar el traslado de una entidad de una estación a otra.

Así como se muestra en la figura:

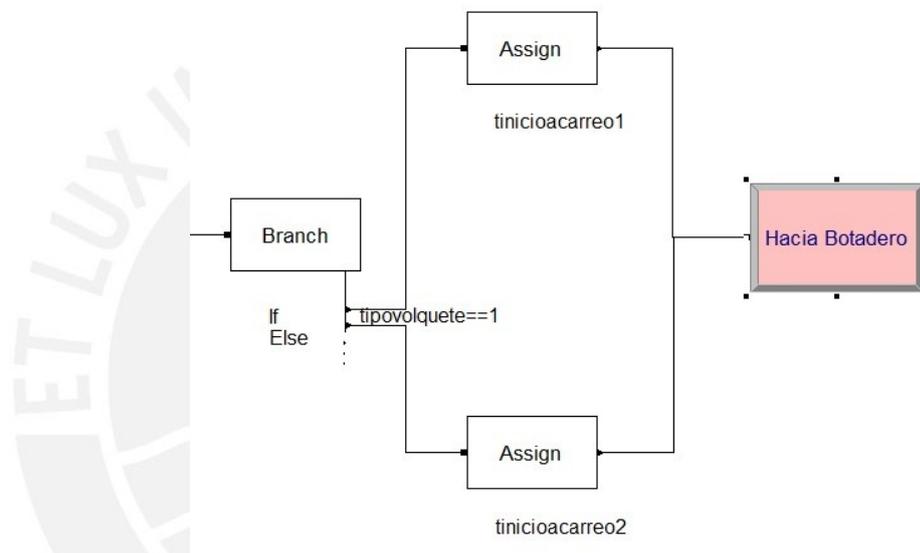


Figura 5.7.4 Simulación del acarreo hacia el botadero de desmonte

La configuración de los bloques **Branch** y **Assign** es un arreglo para poder determinar el momento exacto en que inicia el acarreo determinado tipo de volquete.

La siguiente tabla muestra los campos de la simulación de acarreo.

BLOQUE	CAMPO/ATRIBUTO	Valor
Branch	Max Number of Branches	1
	Branch Type	If
	Condition	tipovolquete==1
	Branch Type	Else
Assign	Variable	tinicioacarreo1
	Value	Tnow
Assign	Variable	tinicioacarreo2
	Value	Tnow
Route	Name	Hacia Botadero
	Route Time	$(tipovolquete==1)*(4 + 1.52 * BETA(2.29, 2.67)) + (tipovolquete==2)*(5.08 + WEIB(1.3, 3.2))$
	Units	Minutes
	Destination Type	Satation
	Satation Name	llegadabotadero

Tabla 5.7.3 Campos de la simulación de acarreo hacia el botadero.

5.7.4. Simulación de la descarga del desmonte en el botadero y del retorno al frente de carguío.

Esta simulación se realiza desde que el volquete llega al botadero de desmonte. Por esta razón se usa el bloque **Station** (Botadero de desmonte). Luego de ello se usa el bloque **Process** (Descarga) para simular los procesos de cuadro y descarga.

Adicionalmente se utiliza el bloque **Decide** el cual cumple la misma función que el bloque **Branch** y permitirá direccionar los volquetes por 2 contadores para registrar el número de viajes que realiza cada tipo de volquete.

Finalmente los volquetes se dirigen al bloque **Route** para que sean trasladados de retorno al frente de carguío y vuelvan a repetir el ciclo.

Así como se muestra en la siguiente figura:

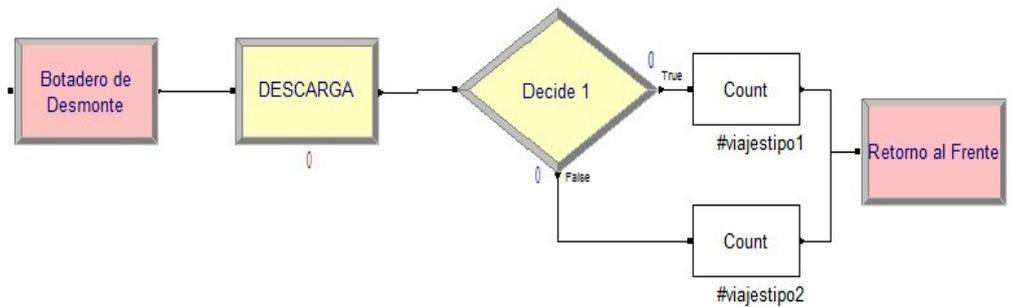


Figura 5.7.5 Simulación del proceso de descarga en el botadero y retorno al frente de carguío.

Los campos de la simulación de este proceso se muestran en la siguiente tabla:

BLOQUE	CAMPO/ATRIBUTO	VALOR
Station	Name	Botadero de Desmonte
	Station Type	Station
	Station Name	Llegadabotadero
Process	Name	DESCARGA
	Type	Standard
	Action	Seize Delay Release
	Resource Type	Resource
	Resource Name	Descargabotadero
	Quantity	1
	Delay Type	Expression
	Units	Munites
Expression	$(tipovolquete==1)*(0.09 + \text{LOGN}(0.346, 0.159)+0.33 + \text{LOGN}(0.493, 0.263))+(\text{tipovolquete}==2)*(0.07 + 1.13 * \text{BETA}(5.41, 7.87)+0.35 + \text{LOGN}(0.776, 0.343))$	
Decide	Name	Decide1
	Type	2 way by condition
	If	Attribute
	Is	==
	Value	1

Tabla 5.7.4 Campos del proceso de descarga de material

BLOQUE	CAMPO/ATRIBUTO	VALOR
Count	Counter ID	#viajestipo1
	Counter Increment	1
Count	Counter ID	#viajestipo2
	Counter Increment	1
Route	Name	Retorno al frente
	Route Time	$(tipovolquete==1)*(3.24 + \text{LOGN}(0.704, 0.297)) + (tipovolquete==2)*(\text{NORM}(5.01, 0.351))$
	Units	Minutes
	Destination Type	Satation
	Satation Name	frente

Tabla 5.7.5 Campos del proceso de retorno al frente de carguío

5.8. Verificación del modelo

Luego de haber programado cada uno de los bloques se procede a la primera corrida del software.

En esta etapa de verificación corroboramos que el flujo de las entidades sea el mismo flujo que realizan en la vida real.

Entonces se aprecia que nuestra entidad (volquete) recorre cada una de las etapas secuencialmente. Primero arriba al frente, luego espera en la cola que tiene menos entidades en espera, después pasa a ser cargado por el equipo de carguío. A continuación sale del banco 2582 y se dirige al botadero de desmonte. Una vez en el botadero descarga el material y se dispone a retornar al frente de carguío. Con lo que concluimos que se ha verificado nuestro modelo y la lógica que sigue es la adecuada.

5.9. Validación del modelo

Esta etapa es la más importante debido a que los resultados que arroje el modelo en la primera corrida deben de ser similares al sistema real. Por tal motivo para contrastar lo simulado con lo real hay que establecer indicadores de desempeño.

En este modelo se ha establecido los siguientes indicadores:

- Tiempo en cola de un volquete en el cargador 1
- Tiempo en cola de un volquete en la excavadora 1
- Número de viajes que realiza los volquetes tipo 1
- Número de viajes que realiza los volquetes tipo 2
- Tiempo de acarreo + descarga del volquete tipo 1
- Tiempo de acarreo + descarga del volquete tipo 2

Los valores promedio de estos indicadores se resumen en la siguiente tabla:

Indicador	Promedio
tcolacargador1 (min)	2.8
tcolacargador2 (min)	2.09
#viajes tipo1 ¹³	684
#viajes tipo2 ¹⁴	640
tcicloacarreo1 (min)	9.9
tcicloacarreo2 (min)	12.89

Tabla 5.9.1 Indicadores de desempeño.

¹³ Este número de viajes se ha calculado en base a 9 volquetes. Cada uno hace 38 viajes en promedio por turno

¹⁴ Este número de viajes se ha calculado en base a 10 volquetes. Cada uno hace 32 viajes en promedio por turno.

Estos indicadores se han obtenido de los datos recopilados en campo (para los tiempos) y para el promedio del número de viajes por día se recurrió a registros pasados.

El sistema simulado cae en la definición de sistema terminal con lo cual es importante determinar el número de replicas que se utilizaran para realizar las simulación.

Luego de realizar varias corridas con diferentes número de replicas se determinó que realizar corridas con 100 replicas es la que mejor se ajusta a nuestros indicadores de desempeño. Como se aprecia en la siguiente tabla:

Indicador	Promedio	Promedio Arena	Half-width	Intervalo de confianza	
tcolacargador1	2.8	2.0895	0.01554	2.07	2.11
tcolaexcavadora 1	2.09	2.0432	0.01393	2.03	2.06
#viajes tipo1	684	722.49	36.825	685.67	759.32
#viajes tipo2	640	644.55	29.106	615.44	673.66
tcicloacarreo1	9.9	9.9057	0.00392	9.90	9.91
tcicloacarreo2	12.89	12.911	0.00599	12.91	12.92

Tabla 5.9.2 Resumen de los resultados de los indicadores para 100 replicas.

Como se puede apreciar los indicadores reales en su mayoría caen dentro del intervalo de confianza calculado por el Arena. A excepción de los indicadores **tcolaexcavadora1** y **#viajes tipo 1**. Pero como se puede notar llegan a estar muy cerca del intervalo con lo que se puede aceptar como válido debido a que bastará con incrementar el ancho del intervalo para que estos valor estén dentro.

Entonces con estos resultados se puede dar como válido el modelo.

5.10. Resultados del escenario actual

En el escenario inicial se utilizan 4 equipos de carguío. Dos cargadores frontales y 2 excavadoras. El número de volquetes asignados para esta configuración es de 19. 9 son de 15 m³ y 10 de 20 m³. Luego de realizar la primera corrida en el software se obtuvieron los siguientes resultados:

	Cargador		Excavadora	
	1	2	1	2
Tiempo promedio en cola (minutos)	2.81	1.77	2.04	1.02
# atenciones Volquete 15 m³	202.02	178.58	209.98	137.35
# atenciones Volquete 20 m³	175.11	166.31	190.21	119.12
% Utilización	99.79%	91.74%	97.83%	62.53%

Tabla 5.10.1 Resultados de la corrida del escenario actual.

Si consideramos que el costo de operación de los equipos de carguío y de los de carroo son tal cual se muestran en la siguiente tabla:

	\$/hr
Cargador frontal	57.91
Excavadora	70.09
Volquete 15 m³	32.15
Volquete 20 m³	38.16

Tabla 5.10.2 Costo horario de los equipos¹⁵

¹⁵ El cálculo del costo de operación se detalla en los Anexos 6, 7,8 y 9.

Considerando que los equipos trabajaran 20 horas en un día se obtiene como resultado lo siguiente:

Equipo	Cantidad	Costo (\$)
Cargador Frontal	2	2316.4
Excavadora	2	2803.6
Volquete 15 m ³	9	5787
Volquete 20 m ³	10	7632
Total		18539

Tabla 5.10.3 Costo total por operación de equipos.

	Cargador 1	Cargador 2	Excavadora 1	Excavadora 2
Costo por Inactividad (\$)	2.48	92.19	30.41	501.22
Costo por Inactividad de los volquetes (\$)	65.08	37.51	50.26	16.08
Total	67.56	129.70	80.67	517.30
Costo Total por Inactividad (\$)				795.23

Tabla 5.10.4 Costo por inactividad de los equipos.

Además si consideramos que en cada viaje al botadero que realiza un volquete de 15 m³ transporta 25.65 toneladas y uno de 20 m³ 34.2 toneladas. Se obtienen los siguientes resultados:

	# Viajes	Tonelaje
Volquete 15 m ³	722.49	18531.87
Volquete 20 m ³	644.55	22043.61
Tonelaje Total		40575.48

Tabla 5.10.5 Tonelaje transportado en el día.

Con el cálculo del costo de operación de equipos y el tonelaje total transportado obtenemos que el movimiento (carguío y acarreo) de material tiene un costo de 0.46 \$/TM.

5.11. Escenarios alternativos

Luego de tener claro como está funcionando el sistema real y haber identificado el costo por equipos inoperativos y la utilización de los equipos de carguío. Se plantean varios escenarios alternativos con el propósito de reducir el costo incurrido debido a los tiempos muertos, incrementar la utilización y la producción diaria. A continuación se muestra un resumen de los escenarios planteados.

Escenario	C. F.	Exc.	N° Volquetes	15 (m ³)	20 (m ³)	Costo Total Equipos (\$/día)	Costo por Inoperatividad Volquetes (\$)	# Viajes 15 m ³	# Viajes 20 m ³	Tonelaje (Tn/día)	Costo x Tiem. Muerto Equi. Carguío (\$)	Costo x Tiem. Muerto TOTAL de Equipos (\$)	Costo Unitario (\$/Tn)	Reducción del Costo x Tiempo Muerto (\$)
ACTUAL	2	2	19	9	10	18,539.00	168.93	722	645	40,575	626.30	795.23	0.46	
1	2	2	24	12	12	21,994.40	294.99	851	696	45,619	68.24	363.22	0.48	432.01
2	2	2	22	12	10	20,468.00	219.25	926	612	44,663	147.04	366.29	0.46	428.93
3	2	2	22	10	12	20,708.40	219.90	744	757	44,981	154.06	373.96	0.46	421.27
4	2	2	20	10	10	19,182.00	178.78	809	628	42,235	431.26	610.04	0.45	185.19
5	2	2	22	11	11	20,588.20	220.19	848	674	44,789	150.17	370.36	0.46	424.87
6	2	2	23	11	12	21,351.40	255.92	799	729	45,430	91.43	347.35	0.47	447.88

Tabla 5.11.1 Resumen de los escenarios planteados haciendo variar el número de volquetes

En este cuadro, la columna **Costo Total de Equipos**, representa el costo de utilizar los equipos de carguío y los equipos de acarreo por un espacio de 20 horas diarias. Todo esto en función de la cantidad de volquetes a utilizar en cada uno de los escenarios.

La columnas **# viajes 15 m³**, **# viajes 20 m³** indica la cantidad de viajes que han realizado los 2 tipos de volquetes (15m³ y 20 m³) en total. Este cálculo está en función al número de volquetes que se emplearan en el escenario planteado.

En la columna **Tonelaje (Tn/día)** se indica la cantidad de toneladas de desmonte acarreadas en el día en el escenario planteado. Este cálculo está en función a la cantidad de volquetes sugeridos en el escenario.

La columna **Costo por Tiempo Muerto por Equipos de Carguío** se refiere a la cuantificación en dólares del tiempo en que los equipos de carguío no están produciendo, es decir, no están cargando a un camión (realizando pases para llenar la tolva del camión).

La columna **Costo por Tiempo Muerto Total de Equipos** indica al tiempo total en que los equipos de carguío y acarreo no están produciendo (cargando o acarreando desmonte) cuantificado en dólares.

En la columna **Costo Unitario (\$/Tn)** se indica el costo en dólares de haber transportado una tonelada de desmonte para la configuración de equipos de carguío y acarreo sugerida.

La última columna, **Reducción del costo por tiempo muerto** indica el ahorro en dólares, con respecto al escenario 1, que se logra por aplicar la configuración sugerida. Este ahorro se calcula en función a la reducción del tiempo en que los equipos están sin producir es decir si estar cargando o estar acarreado. En otras palabras es la cuantificación en dólares del incremento de la utilización de los equipos.

También se planteó cambiar la configuración del sistema con la alternativa de que los cargadores frontales atiendan tan solo a los volquetes de 15 m³ y las excavadoras a los volquetes de 20 m³ o de manera inversa. Estos escenarios se muestran en la siguiente tabla.

Escenario	C.F.	Exc.	N° Volquetes	15 (m ³)	20 (m ³)	Costo Total Equipos (\$/dia)	Costo por Inoperatividad Volquetes	# Viajes 15 m ³	# Viajes 20 m ³	Tonelaje (Tn/día)	Costo x Tiem. Muerto Equi. Carguío (\$)	Costo x Tiem. Muerto TOTAL de Equipos (\$)	COSTO UNITARIO (\$/Tn)	Reducción del Costo x Tiempo Muerto (\$)
C(15)y EX(20)	2	2	22	12	10	20468	278.37	787.77	616.22	41,281.02	472.18	750.55	0.50	44.68
C(20)yEx(15)	2	2	22	12	10	20468	260.48	875.43	582.06	42,361.23	440.78	701.26	0.48	93.97
C(20)yEx(15)	2	2	24	12	12	21994.4	318.40	865.45	647.13	44,330.64	257.58	575.99	0.50	219.24
C(20)yEx(15)	2	2	22	11	11	20588.2	258.29	840.57	626.32	42,980.76	399.59	657.88	0.48	137.35
C(15)y EX(20)	2	2	22	10	12	20708.4	267.84	737.97	692.59	42,615.51	325.13	592.98	0.49	202.25
C(15)y EX(20)	2	2	22	11	11	20588.2	263.71	773.63	664.72	42,577.03	333.86	597.57	0.48	197.66

Tabla 5.11.2 Resumen de escenarios luego del cambio de configuración.

5.12. Análisis de escenarios.

Para poder determinar el escenario óptimo entre los 12 planteados se tomó en cuenta como indicador principal el ratio $\$/Tn$. Se discriminó aquellos escenarios que tenían un valor mayor a 0.46. Por tal motivo los escenarios que en primera instancia se descartaron fueron todos los escenarios que se realizaron con el cambio de configuración (Tabla 5.11.2) y los escenarios 1 y 6 de la Tabla 5.11.1.

Luego la discriminación se hizo tomando en cuenta los indicadores $\$/Tn$, Costo por tiempo muerto total y Tonelaje. En ese orden de prioridad.

Con estas consideraciones se llegó a la conclusión que hay dos escenarios posibles. El escenario número 2 y el escenario número 4. En el primero se utilizan 12 volquetes de 15 m³ y 10 de 20 m³. Con esta configuración se logra obtener una reducción, de los costos incurridos por los tiempos muertos, de \$ 428.93 lo que representa una reducción de 53.93% en comparación con el escenario inicial. También se incrementa la producción diaria en 4087 toneladas, además de aumentar la utilización¹⁶ de los equipos de carguío. Se logró incrementar significativamente en 29.42 % la utilización de la excavadora 2 y un incremento de 6% en la utilización del cargador frontal 2. Pero se mantiene el ratio $\$/Tn$ en 0.46.

En el escenario 4 utiliza 10 volquetes de 15 m³ y 10 de 20 m³ con esta asignación de volquetes se reduce a \$ 610.04 el costo por

¹⁶ En el Anexo 10 se presenta con más detalle la utilización de los equipos de carguío.

tiempos improductivos de los equipos, lo cual significa una mejora de 23.3% con respecto al escenario actual. Se incrementa la producción en 1659.90 tn/día transportadas de desmote. También se incrementa la utilización del cargador 2 en 2.81% y la utilización de la excavadora 2 en 11.56 %. Pero lo más importante es que se logra reducir a 0.45 \$/Tn el costo de carguío y carreo de desmote.

Por esta razón y al tratarse de transporte de desmote, el cual no genera ningún beneficio económico, se elige el escenario 4 como el óptimo.



CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

Las conclusiones que se desprenden del siguiente trabajo de investigación son las siguientes:

- Las técnicas de la simulación de sistemas nos permiten representar sistemas del mundo real mediante modelos, los cuales podemos variar en busca de su optimización sin necesidad de realizar los cambios en la vida real ahorrando recursos y tiempo.
- Este trabajo de investigación desarrolla un modelo del sistema de carguío y acarreo de desmonte de una operación minera el cual puede tomarse como ejemplo para aplicarlo en otras operaciones específicas teniendo en cuenta las diferencias de cada mina como: nivel de producción, equipos de carguío, equipos de acarreo, geología, distancias, etc.
- La asignación correcta del número de equipos de acarreo para un determinado equipo de carguío ayuda mantener en un nivel óptimo la relación \$/Tn. Además de reducir los tiempos improductivos de los equipos con lo que se aumenta el porcentaje de utilización de los equipos de carguío.
- El escenario elegido incrementa la producción en 1659.90 toneladas diarias de desmonte acarreado. Esto significa un incremento de 597 564 toneladas anuales.

- Con la asignación de equipos de acarreo que plantea el escenario elegido se incrementa la utilización del cargador 2 en 2.81% y la utilización de la excavadora 2 en 11.56 %.
- El escenario óptimo planteado reduce a 0.45 \$/Tn el costo de carguío y acarreo de desmonte.
- El escenario elegido plantea la asignación de 1 volquete 15m³ adicional a la configuración inicial. Es importante mencionar que no se incurrirá en ningún costo por adquisición de este volquete adicional debido a que la operación minera cuenta con volquetes en stand-by.
- Uno de los propósitos de este trabajo de investigación es de mejorar la productividad, reducir los tiempos muertos e incrementar la utilización de los equipos de carguío haciendo uso de las técnicas de la simulación de sistemas sin la necesidad de realizar una inversión (equipos, recursos) en la optimización.
- El presente trabajo permite ajustar los parámetros de rendimiento de los equipos. Este proceso debe ser iterativo, dinámico y debe retroalimentarse periódicamente debido a la variación de las condiciones como: distancias de acarreo, condiciones climatológicas, disponibilidad mecánica, etc.
- Las variables que se utilizan en este trabajo son bastante cercanas a la realidad y pueden ser mejoradas o cambiadas para optimizar el desempeño del modelo.
- Los pasos seguidos en el desarrollo del modelo pueden aplicarse también a cualquier otro sistema de la vida real.

- La recopilación de datos y el tamaño de muestra son pieza fundamental en el desarrollo del modelo.
- La validación de los resultados iniciales es el paso crítico para poder determinar el correcto funcionamiento del modelo.
- Si bien es cierto que en la industria se ofrecen alternativas de software que realizan el mismo propósito, la ventaja de este trabajo de investigación es que se ha realizado con un software con licencia de estudiante cuyo costo de adquisición ha sido nulo.

6.2. Recomendaciones

Las recomendaciones que se plantean a raíz de esta investigación son las siguientes:

- Es fundamental entender cómo funciona el sistema en la realidad para poder esquematizarlo y luego plasmarlo en el software de simulación.
- La recopilación de la data debe de ser lo más precisa posible para poder tener la confianza que el modelo será bastante similar al sistema real. Por otro lado, es recomendable recopilar abundante data para tener datos más confiables. Mientras más datos o muestras se tengan más preciso será el modelo.
- Este trabajo de tesis ha descrito los pasos a seguir para la aplicación de simulación de sistemas a un sistema de carguío y acarreo en una operación minera considerando que los equipos tienen un 90% de disponibilidad mecánica, no se ha considerado condiciones

climatológicas adversas como lluvia o nieve y se ha supuesto que la variación de las distancias no serán considerables durante la vida de la mina. Por tal motivo, se recomienda, que para tener un nivel de certeza más elevado se realice otras investigaciones en la cual se considere la variación del tiempo de ciclo de acarreo en condiciones de lluvia o nieve, se levante una data del intervalo de tiempo en que fallan los equipos, el tiempo que duran estas fallas, etc.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- SANCHEZ, Pedro. Perú Clima Favorable para la Inversión (Diapositivas).Lima: MEM. Consulta 20 de octubre de 2010. <<http://www.minem.gob.pe> >.
- BANKS, Jerry [et al.]. Discrete – Event System Simulation (3 ed.). New Jersey, Prentice – Hall, 2001. 594p.
- KELTON, W. David, SADOWSKI Randall P. & STURROCK, David. Simulation with Arena(4 ed.). Boston, Mc Graw-Hill Higher Education, 2004.667p.
- LAW, Averill, KELTON,W. David. Simulation Modeling and Analysis (3ed.). Boston, Mc Graw-Hill Higher Education, 2000. 768p.
- CATERPILLAR, Caterpillar Performance Handbook Edition 30. Illinois, Caterpillar Inc. Illinois USA, 2000.1394p.
- STURGUL John. Mine Design Examples Using Simulation. Littleton, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2000. 366p.
- CZAPLICKI Jacek. Shovel-Truck systems: modeling, analysis and calculation. London, Taylor & Francis Group, 2009. 158p.
- KENNEDY Bruce A. Surface Mining (2 ed.). Littleton, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 1990. 1194p.
- CÓRDOVA, Manuel. Estadística aplicada. Lima, Moshera, 2006. 525p.