

**UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS**

*Fundada en 1551*

**FACULTAD DE INGENIERIA INDUSTRIAL  
E.A.P. DE INGENIERIA INDUSTRIAL**



**Tesis**

**Digitales UNMSM**

**APLICACIÓN DE LA SIMULACIÓN PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL  
ACARREO DE MINERAL**

**TESIS**

Para optar el Título Profesional de :

**INGENIERO INDUSTRIAL**

**AUTOR**

**CARLOS OMAR MAXERA BEDON**

**LIMA – PERÚ  
2005**

Agradezco al Creador y  
dedico este logro a mis queridos padres por todo  
el apoyo recibido durante mis años de estudio,  
a mi alma mater por brindarme una formación  
humanista y científica,  
a mis profesores por su comprensión así como su  
dedicación desinteresada al proporcionarme  
sus conocimientos y experiencias

# INDICE

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>4</b>
<b>SIMULACIÓN EN MINERÍA .....</b>	<b>6</b>
1.1 Objetivos de la Simulación.....	7
1.2 Métodos de Simulación.....	8
1.3 Generador de Simuladores, entornos de Simulación y Animación Gráfica .....	12
<b>LENGUAJES DE SIMULACIÓN PARA MINERÍA .....</b>	<b>13</b>
2.1 Sistemas de Simulación.....	13
2.2 Herramientas para Simulación en minería .....	14
2.3 Software de Simulación.....	17
2.3.1 Automod II .....	17
2.3.2 Slam IV / Slamsystem .....	18
2.3.3 Siman/Arena.....	18
2.3.4 GPSS/H y PROOF.....	24
<b>MODELO DE LA SIMULACIÓN.....</b>	<b>26</b>
Introducción.....	26
3.1 Ambito del estudio.....	30
3.2 Estudios relativos .....	33
3.3 El Modelo .....	33
3.3.1 Consideraciones.....	33
3.3.2 Simulación Determinística.....	34
3.3.3 Fuerzas resistivas .....	39
3.3.4 Otras consideraciones.....	42
<b>APLICACIÓN DEL MODELO .....</b>	<b>46</b>
4.1 Operaciones.....	46
4.2 Resultados de Simulación del Proceso de Acarreo Actual.....	55
4.3 Alternativa I.....	58

4.4 Alternativa II.....	59
4.5 Costos Operativos Unitarios de Alquiler de Equipos .....	62
4.6 Resumen de Resultados y Costos Totales .....	63
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>68</b>
<b>ANEXO 1: GLOSARIO DE TÉRMINOS.....</b>	<b>73</b>
<b>ANEXO 2: GRÁFICO DE LA CURVA RIMPULL .....</b>	<b>76</b>
<b>ANEXO 3: EVALUACIÓN DE LA ALTERNATIVA II, EN EL SUPUESTO DE QUE SE OPTE POR LA ADQUISICIÓN DE 6 CAMIONES DE 120 TM Y 2 PALAS DE 16.7 M3.....</b>	<b>77</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>78</b>

# INTRODUCCIÓN

Los grandes avances tecnológicos producidos en estos últimos años, ya sean en el orden de los procesos así como en nuevos equipos del sector minero; la alta competitividad del mercado que obliga adaptar al máximo las prestaciones de los productos a las expectativas de los clientes y la mayor complejidad de los problemas analíticos funcionales, generan hoy en día dificultades en orden de extraer el máximo valor del uso conjunto de estas herramientas. Es un hecho admitido que las empresas para sobrevivir en un ambiente competitivo como el de hoy, deben responder rápidamente a los cambios del entorno reevaluando permanentemente sus operaciones tanto internas como externas.

Es por ello que las Tecnologías de Simulación son actualmente complementos indispensables, ya que permiten simular hasta una mina entera, asignación de maquinarias, vehículos, secuencia de producción, manejo de materiales que pueden ser evaluados para evitar actividades costosas en tiempo y dinero; disminuir el riesgo de decisiones tempranas y explorar un campo más amplio de posibles soluciones.

La Simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a cabo experiencias con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o de evaluar nuevas estrategias, dentro de los límites impuestos por un criterio o conjunto de ellos. Este método posee propiedades útiles que permiten la experimentación de

situaciones con la manipulación de gráficos estadísticos o modelos para probar y graficar nuevas ideas, procedimientos y nuevas políticas en las operaciones. Estos modelos producen a su vez salidas en forma de datos operacionales a partir de la comparación de diferentes conjuntos de alternativas que pueden ser planteadas.

Una de las razones para aplicar Simulación en operaciones en el mundo de la minería, es la necesidad de resolver las diferentes líneas de espera y almacenaje, muy comunes en esta industria. Otro de los motivos para el uso de la Simulación es el requerimiento básico de pruebas retrospectivas; los sistemas reales con elementos estocásticos que son de difícil modelamiento matemático para su evaluación analítica, donde la Simulación resulta ser el único tipo de investigación posible que puede ser usado repetidas veces una vez que el modelo ha sido construido; generalmente son más fáciles de aplicar que los métodos analíticos; la Simulación no requiere de muchos supuestos para hacerlos manejables matemáticamente, como si los métodos analíticos.

La aceptación de un modelo por los administradores depende mucho de su actuación, antes que la comprensión lógica o la validez en aspectos del modelo mismo. La Simulación es un puente entre la teoría y la utilidad de los diseños de procedimientos.

## CAPITULO I

### Simulación En Minería

En un esfuerzo por rastrear la historia de la Simulación en minería desde la publicación del primer documento en 1961 hasta nuestros días, las contribuciones importantes que se pueden nombrar tales como, la aplicación de la Simulación, los lenguajes usados y los resultados obtenidos; sean de sumo interés para los Ingenieros de Minas. Esta importante técnica se ha desarrollado gracias al uso intensivo de la Informática y a sus aplicativos, que han coadyuvado al desarrollo y avances significativos en este campo. Así como, ser parte importante en la Ingeniería concurrente, es decir la integración de la Ingeniería de Diseño, Ingeniería de Ensayo o Experimentación y la Ingeniería de Simulación, esta integración es considerada actualmente la forma más eficaz de acortar el tiempo de desarrollo y costo de los nuevos productos, puesto que el mayor provecho sólo se consigue compartiendo conocimientos entre estos tres departamentos.

#### **Simulación frente a soluciones analíticas y funcionales**

Inicialmente el uso de las ecuaciones y sistemas de ecuaciones diferenciales han sido las herramientas mas adecuadas para modelar sistemas, para resolverlas se han reducido muchas veces a sistemas lineales, siendo el álgebra vectorial, el análisis funcional y la teoría general de operadores, herramientas útiles que con ciertas

condiciones simplificadoras se han mostrado eficaces para el estudio de las distintas ciencias (Física, Economía, Biología, Sociología etc.).

## 1.1 Objetivos de la Simulación

Existen numerosos propósitos generales para hacer uso de las Técnicas de Simulación en operaciones de minería, que pueden resumirse de la siguiente manera:

- **Minimizar actividades costosas en tiempo y dinero:** en el mundo de la minería como en cualquier otra actividad productiva, la competitividad que existe en cuanto a precios y costos de oportunidad, obliga a los investigadores a la búsqueda constante de métodos y técnicas eficaces que contribuyan a este objetivo.
- **Disminuir riesgos en la Toma de Decisiones anticipadas:** esto exige la utilización de procedimientos de Simulación altamente sofisticados y el uso de coeficientes de seguridad no sólo para cubrir la incertidumbre, sino también para cubrir la variabilidad estadística.
- **Hacer de los prototipos virtuales (modelos de Simulación) herramientas fiables:** a través de un proceso evolutivo de constante realimentación entre la realidad física y el mundo virtual.
- **Cuantificación de parámetros y valores correspondientes a cada función y modos de fallo asociados:** para ello, deben establecerse criterios de calificación adecuados, asociados a cada factor, parámetros mensurables que los caractericen; estableciendo para ello valores objetivos basados en los estudios de mercado.



- **Optimización e integración entre la Simulación, el diseño y la experimentación del producto final;** la Simulación no puede reemplazar la necesidad de realizar ensayos por el contrario se deben aprovechar al máximo las ventajas; así como, las sinergias positivas existentes entre ellas, en orden de conseguir la máxima rentabilidad conjunta. No obstante, es claro que la Simulación esta cambiando el papel de la experimentación en la línea de permitir una disminución en la cantidad de ensayos realizados, que suele ir unida a un aumento en la calidad y complejidad de los mismos.

Resumiendo lo anterior, se puede definir como objetivo específico de este informe, el hacer uso de las técnicas de Simulación para explorar una toma racional de decisiones; con la finalidad de elegir el mejor esquema de acarreo de minerales; cumpliendo con las condiciones de balance entre cantidad de mineral y desmonte, que conlleven un costo menor de disponibilidad de recursos materiales y humanos; menor cantidad de tiempo utilizado en procesos de experimentación, obteniendo una mayor optimización de todos estos recursos como resultado final.

## 1.2 Métodos de Simulación

Existen diversos métodos de Simulación y estos se dan en función al diseño del modelo (continuo, discreto, estocástico y matemático), que representa en esencia las características del sistema real, con la finalidad de comprender su comportamiento y evaluar nuevas estrategias, ellos se dividen en grupos: Simulación de Sistemas

Continuos, Discretos, Simulación de Procesos por Lotes, Simulación Combinada y Simulación de Monte Carlo.

**1.2.1 Simulación de Sistemas Continuos:** en general los modelos matemáticos de tipo dinámico representan sistemas continuos, es decir, sistemas en las que las actividades predominantes del sistema causan pequeños cambios en los atributos de sus entidades, tales modelos están definidos formalmente por ecuaciones diferenciales.

**1.2.2 Simulación de Sistemas Discretos:** el seguimiento de los cambios de estado requiere la identificación de que es lo que causa el cambio y cuando lo causa, lo que denominaremos *suceso*, las ecuaciones del modelo se convierten entonces en las ecuaciones y relaciones lógicas que determinan las condiciones en que tiene lugar la ocurrencia de un suceso.

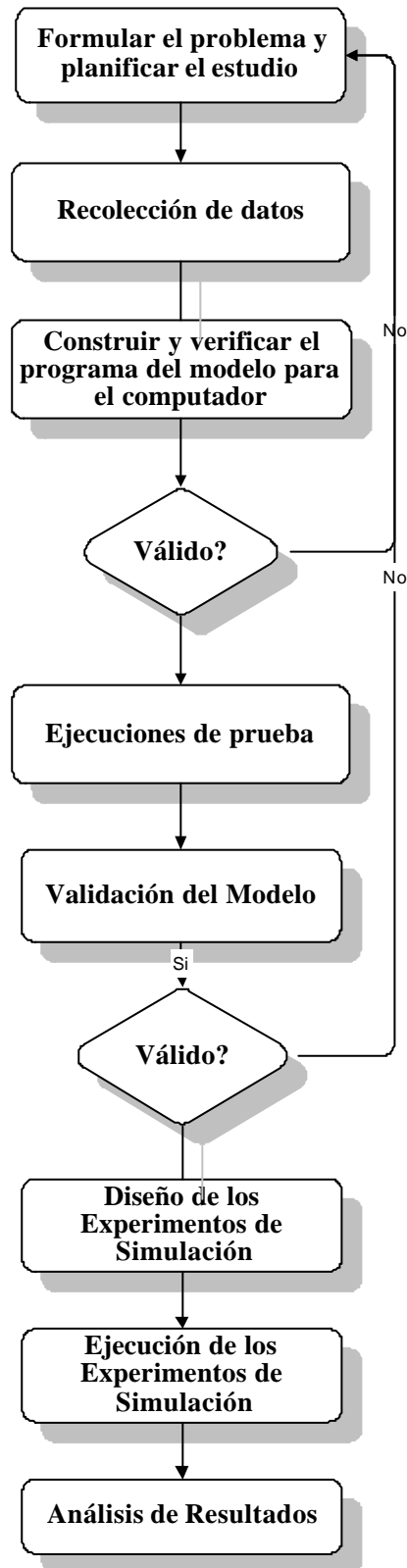
**1.2.3 Simulación de Procesos por Lotes:** no se precisa una evolución continua del tiempo, ya que las modificaciones que existen en el sistema a simular se produce cada ciertos intervalos de tiempo, siendo estos de valor muy elevado y espaciados no uniformemente, para este caso se precisa de un reloj asíncrono, cuya actuación depende de los eventos producidos en el sistema.

**1.2.4 Simulación Combinada:** contempla procesos mixtos en los que existe subprocesos de tipo continuo junto con subprocesos en lotes.



**1.2.5 Simulación de Monte Carlo:** el factor tiempo no influye significativamente admitiendo gran cantidad de variables y están consolidados como procedimientos de integración numérica, en particular cuando se trata de fenómenos reales no integrables analíticamente que utilizan la generación de números aleatorios para resolver problemas estocásticos o determinísticos.

## ESQUEMA DEL PROCESO EXPERIMENTAL DE LA SIMULACIÓN



### 1.3 Generador de Simuladores, entornos de Simulación y Animación Gráfica

Echando un vistazo al futuro, la metodología de la Simulación puso de manifiesto hace ya un tiempo una serie de limitaciones en lo que se refiere a la comunicación con el usuario (interfase hombre-máquina), al marco conceptual del proceso modelizador, a las herramientas del software y estructura de datos necesarios, para construir el modelo en el computador y organizarlos eficientemente.

Se plantean diseñar nuevos lenguajes de Simulación o rediseñar alguno de los existentes si fuese posible, incorporando al diseño de manera directa los conceptos fundamentales de la teoría de sistemas de manera que:

- Permita al modelador plantear el problema dentro del marco de la teoría de sistemas, expresando sus concepciones directamente de forma inteligible al computador, lo que equivale a realizar en un solo paso el proceso de construcción del modelo y su programación.
- Especifique directamente los modelos en términos de inputs y outputs.
- Tenga la capacidad para combinar, descomponer y recombinar modelos, es decir considerarlos como posibles componentes de *macro modelos*, de acuerdo con las recomendaciones para los procedimientos de su validación.
- Proporcione los fundamentos operacionales para proponer metodologías avanzadas en Simulación.

## CAPITULO II

# Lenguajes De Simulación Para Minería

### 2.1 Sistemas de Simulación

Generalmente pueden hacerse estudios de Simulación en minería de dos formas de sistemas de procesos, estos son: Sistemas *Discretos* y *Continuos*. La mayoría de las operaciones mineras son ejemplos de sistemas de eventos discretos. Un sistema discreto es aquel que en un intervalo de tiempo, en cualquier momento sólo un número contable de eventos pueden ocurrir, es así para el caso de una mina, pueden suceder una variedad de eventos que ocurren simultáneamente y que a su vez pueden ser contabilizados, por ejemplo: en un momento particular un camión puede llegar a tiempo a una pala, mientras otro puede estar alejándose, una pala puede estropearse o un camión puede terminar descargando en un Aplastador o Crusher, etc., es decir existen muchos eventos que tienen lugar a la vez y que pueden ser contados.

En un Sistema Continuo no es posible enumerar los eventos, como por ejemplo podría ser el flujo de aire en la mina, el flujo de aceite en una línea de la tubería, etc. Tales sistemas son gobernados por ecuaciones diferenciales que en general son no-lineales, puesto que la mayoría de los sistemas mineros puede representarse como sistemas discretos, esta revisión sólo se preocupa de dichos sistemas. En algunos casos puede ser posible cortar un proceso continuo en eventos discretos, como el flujo de

material en un banda transportadora; considerando el flujo del paso del material como un punto, como un tanto por unidad de tiempo; por ejemplo durante 1/10 de una unidad de tiempo, x unidades del material han pasado por dicho punto.

Puede ocurrir también que algún evento, como el de un camión que descarga mineral, no califique dentro de un sistema discreto, el cual deberá ser planeado ignorando el hecho que cada partícula de mineral se agrega a la cantidad entera del mineral, se asume en cambio que el nivel del mineral está variando instantáneamente en un momento específico (tan igual que el mineral en una banda transportadora), sólo que en este caso, la balanza se incrementa para que pudiera interpretarse el hecho que, después de tantas unidades de tiempo, **X** unidades acumuladas de mineral se han agregado.

## **2.2 Herramientas para Simulación en minería**

El software con que se cuenta actualmente y que puede ser usado para realizar Simulación en un sistema discreto de minería, son lenguajes específicos que un ingeniero de minas debe considerar para diseñar el modelo de Simulación en el computador.

Los programas actuales son bastante compactos y fáciles de entender para el usuario; una vez familiarizado incluso con los fundamentos del lenguaje, dichos programas tienden a ser rápidos de ejecutar y fáciles de modificar, por citar uno de esos

lenguajes, considere el ejemplo siguiente: una mina con 4 camiones, un sólo cargador y un vertedero o echadero. Una descripción de este sistema podría leerse como sigue:

1. 4 camiones se ubican en la mina para acarrear mineral.
2. Los camiones forman una cola inicialmente frente al cargador.
3. Una vez la pala está libre, el volquete se mueve hacia la posición.
4. La pala puede cargar un sólo camión.
5. La pala carga el camión.
6. Una vez cargado, el camión libera la pala.
7. El camión cargado viaja al echadero o crusher
8. Vierte la carga en el echadero
9. El camión vacío, viaja ahora a la pala
10. El camión se une a la cola y empieza a ser cargado
11. La Simulación se corre para 10 turnos de 400 minutos.
12. La Simulación ha terminado.

El programa en lenguaje GPSS que consta de bloques para simular el problema anterior se da a continuación. Las letras minúsculas en el lado derecho no son parte del código pero se dan para una comparación con la descripción del sistema dado. El código de GPSS está en mayúscula:

```
GENERATE  ,,4  
Up top QUEUE      wait  
SEIZE      shovel1  
DEPART    wait
```

---

<sup>1</sup> Shovel o front shovel, Pala, Cargador frontal o Retroexcavadora



```
ADVANCE  fn (load2)  
RELEASE  shovel  
ADVANCE  fn (to crush3)  
ADVANCE  fn (dump ore4)  
ADVANCE  fn (to shovel)  
TRANSFER , up top  
GENERATE 400*10  
TERMINATE 1
```

En las líneas anteriores de código de GPSS, se puede notar la correspondencia entre la declaración y de cómo el sistema realiza la operación y la línea de código. Por ejemplo, donde el camión viaja al aplastador es manejado por un solo bloque:

**ADVANCE fn (to crush)**

El programa puede modificarse fácilmente, para tener la ejecución de la Simulación, así con 5 camiones, se modifica el bloque GENERATE ,,4, por GENERATE ,,5 ; etc., así mismo para correr el programa y generar 20 iteraciones, se modifica el comando GENERATE 400\*10 por GENERATE 400\*20, etc.,

### Animación

Un avance mayor en la presentación de los resultados de Simulación es el desarrollo de animación, para mostrar el sistema de minería en la pantalla de la PC una especie de "dibujo animado", siendo los propósitos principales de los modelos de animación como se describen a continuación:

---

<sup>2</sup> Load, cargar

<sup>3</sup> To crush, al aplastador

<sup>4</sup> Dump ore, depósito de mineral

1. Aseguran la exactitud de la Simulación, en la pantalla se muestra una representación pictórica de la operación minera, cualquier error insidioso en el programa que no se puede compilar o no se ejecuta, se descubre fácilmente.
2. Despliegue de estadísticas como: el número de camiones en cada cola, la medida del tiempo de espera en cada cola, la cantidad de mineral, etc.; estas estadísticas cambiarán en cuanto la animación suceda. Los cuellos de botella son fáciles de encontrar durante la animación.
3. Convencer a la Alta Dirección de las bondades de la animación en Simulación.

La animación puede ser tan simple o compleja como el ingeniero de minas pueda escoger y detallar, es por tal motivo dependiente del uso extremo del modelo de Simulación. Para constatar si la Simulación es correcta, una representación gráfica del sistema señalará cualquier error en lógica que el compilador podría perder.

## **2.3 Software de Simulación**

A continuación se mencionan algunas de las propiedades o rasgos de los diferentes tipos de software más usados de Simulación en minería; o que tienen aplicaciones actualmente hacia dichos sistemas, es decir productos que permiten la Simulación de sistemas de colas, transporte y de redes, etc.

### **2.3.1 Automod II**

AUTOMOD que combina un lenguaje de programación con un paquete orientado a objetos, utilizado para modelar el movimiento en configuraciones

industriales con un lenguaje procesal de ingeniería, orientado para la definición lógica de control y flujo de material.

Los modelos son corridos en casi todas las estaciones de trabajo en plataformas como UNIX, WINDOWS, etc.

### **2.3.2 Slam IV / Slamsystem**

SLAMSYSTEM es el software de la Simulación más reciente hecho por la Pritsker Corp. utilizado durante mucho tiempo en diversas aplicaciones mineras, su más reciente versión es el SLAM IV que puede simular hasta tres tipos diferentes de modelos: redes (organigrama que muestra el flujo de entidades, constituidos por nodos y éstos a su vez estar conectados vía las actividades que definen el encaminado de dichas entidades); eventos discretos y sistemas continuos (o una combinación de cualquiera de éstos).

### **2.3.3 Siman/Arena**

SIMAN (SIMulation ANalysis) fue creado por *Dennis Pegden* en 1982 conjuntamente con el software de la animación CINEMA, cuya versión actual es SIMAN/Cinema V.

El ARENA usa una colección de módulos específicos, que configuran el producto a las necesidades particulares de cada usuario, llamadas *Plantillas de Solución de Aplicaciones* (AST).

## **1. Estructura Del Arena**

El ARENA esta construido en base al lenguaje SIMAN, cuando un modelo es creado usando ARENA este es implementado en código SIMAN que luego es compilado y corrido. El ARENA es en efecto una interfase gráfica de alto nivel para SIMAN, en donde los modelos son construidos, ubicando los iconos en un tablero de dibujo para luego unir estos iconos o bloques y definir la lógica del modelo. Además de la facilidad de crear un modelo en ARENA tiene dos ventajas resaltantes sobre SIMAN:

- La plantilla del ARENA reúne los módulos complejos de alto nivel en módulos únicos cuyos parámetros son accesibles vía los formularios de entrada de datos.
- La facilidad de generar una Simulación animada.

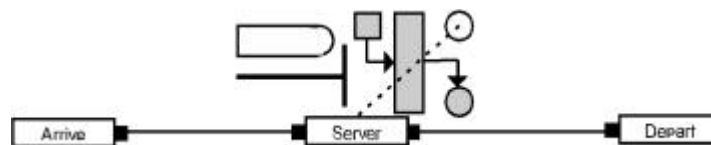
## **2. Plantillas del ARENA**

Consisten en una colección de *tableros o paneles* capaces de modelar una diversidad de sistemas. Cada tablero o panel contiene un grupo de *módulos* los cuales llevan a cabo cierta operación del modelado. Los paneles son jerárquicos por naturaleza con algunos (por ejemplo **COMMON.TPO**) módulos de alto nivel de contenido, compuestos de módulos básicos que se encuentran en otros paneles (por ejemplo **BLOCKS.TPO**).

### **2.1. La Plantilla COMMON.TPO**

En la plantilla COMMON podemos seleccionar el módulo arribar (arrive), luego colocarlo en una posición apropiada hacia la izquierda del panel

Se seleccionará entonces el módulo **SERVER** (servidor) que ira a la derecha del módulo **ARRIVE**. Estos dos módulos se conectan automáticamente. Se agregará después el módulo **DEPART** (partir). El modelo debe aparecer al igual que la Fig. 4



*Fig. 4 Sistema de colas de un solo servidor*

El bloque **ARRIVE** (Arribar) es un ejemplo de un bloque fuente; representan un punto en el modelo en que los trabajos vienen de fuera del sistema. Al igual que **DEPART**, es un ejemplo de bloques de salida dónde las entidades dejan al modelo para volver a su sistema externo.

## **2.2. Los bloques CREATE (Crear), ASSIGN (Asignar), QUEUE (Cola)**

El bloque **CREATE** (Crear), cuya función es la creación de nuevas entidades para el modelo. Para especificar totalmente la creación de entidades se necesita proporcionar cuatro parámetros de información:

1. El tiempo en que el primer lote de entidades llegará {0}
2. El número de entidades contenidas en cada lote {1}
3. El tiempo de arribo entre lotes
4. El número total de lotes que se crearán { }

La declaración **ASSIGN** (Asignar) es usada para proporcionar valores a los atributos y variables.

El bloque **QUEUE (Cola)** es donde se llevan a cabo los trabajos hasta que el o los recursos estén disponibles. El valor predefinido es primero en entrar - primero en salir (FIFO) igualmente podríamos escoger el último en llegar – primero en salir (LIFO)

### **3. Recopilación de Estadísticas**

En caso de que exista la necesidad de recolectar un rango más amplio de información de un modelo típico, existen los elementos **TALLY** (Registrar) y **DSTAT** (Abreviatura de Estadística Discreta).

**TALLY** registra una sola observación y la almacena en un archivo al momento que una entidad pasa por el elemento **TALLY**.

### **4. Funciones de Distribución**

ARENA dispone de una amplia gama de funciones de distribución para modelar los tiempos de arribo, tiempos de proceso, etc., para utilizar cualquiera de las funciones sólo es necesario ingresar el nombre (o su forma abreviada) y proporcionarle los parámetros requeridos, además de generar números aleatorios uniformemente distribuidos en el rango de 0 a 1 que, a su vez, se usan para seleccionar un valor de la distribución especificada. ARENA proporciona además *10 flujos* de números aleatorios para seleccionar, siendo el flujo predefinido de 10.

### **5. El Procesador de Salida de Datos**

Si se requiere imprimir informes de resultados para reportes y propósitos de visualización, la mejor técnica para obtener el rendimiento deseado es exportar los datos

a un archivo de texto que luego pueda ser leído por un paquete y visualizado en pantalla (por ejemplo Microsoft Excel). Para hacerlo se seleccionará del menú Archivo 'Filtro.' El cual filtra los datos y preparará una copia del archivo para exportarlo con la "extensión .FLT."

## **6. El comando BRANCH (Rama)**

La toma de decisiones es un proceso común en todas las actividades humanas. Muchas decisiones pueden representarse en el formato **IF - THEN - ELSE**. Por ejemplo "Si el semáforo está en rojo detén el automóvil sino avanza" o "Si el sobregiro bancario excede los 100,000 la compañía debe dejar de comercializar". Igualmente muchos sistemas ya sean naturales o hechos por el hombre están sujetos a la influencia de variabilidad estocástica y las decisiones son hechas, en base a la probabilidad. Por ejemplo: "el 30% de todos los clientes pagarán con tarjeta de crédito" o "el 5% de todos los componentes producidos tendrán las fallas y el 1% de todos los componentes tendrán que ser desechados". En ARENA esta función la cumple el bloque **BRANCH** (Rama).

## **7. Cambio de Capacidad del Recurso**

Un requerimiento muy común es el cambio de capacidad de un recurso durante la Simulación.

Existen dos maneras simples en ARENA para modificar la capacidad de los recursos usando el elemento **SCHEDULES** (Programar), o el bloque **ALTER** (Modificar). El elemento **SCHEDULES** consiste en un identificador del programa y una lista de pares numéricos que definen el programa.

El bloque **ALTER** (Modificar), normalmente se emplea para hacer un solo cambio en la capacidad del recurso a algún punto del modelo.

## 8. Atributos

Para construir cualquier hoja de cálculo del modelo es requerido el uso elemental de los atributos de entidad.

Los atributos son parámetros que acompañan a las entidades a medida que estas se desplazan en el modelo, en ARENA existen dos tipos:

- *Atributos para Propósitos Generales:*
- Atributos del Sistema:

## 9. Variables

Las variables se declaran independientemente de las entidades y se puede acceder por cualquier entidad en cualquier punto en el modelo. Se catalogan en dos tipos:

- *Variables de Propósito General:* Declarados por el usuario para cualquier propósito y son una manera conveniente de guardar cantidades del modelo que pueden usarse en alguna fase en una declaración de decisión.
- *Variables del Sistema:* Existe una colección muy grande de variables del sistema en ARENA usados para el seguimiento de muchas actividades específicas y generales que tienen lugar durante la ejecución del modelo.



### 2.3.4 GPSS/H y PROOF

GPSS (*General Purpose System Simulation*) o Sistema de Simulación para Propósitos Generales, es uno de los software más utilizados en Simulación de sistemas discretos. Fue desarrollado por Geoffrey Gordon a comienzos de 1960 para la IBM y se hizo "archivo abierto" para que un número grande de versiones se desarrollaran a partir de él y que incluyen el GPSS II, GPSS/R, GPSS/360, GPSS V, GPSS/PC, GPSS/H, por citar algunas.

La versión actual de GPSS, que en su mayoría es usada para Simulación de Sistemas de Minería –más que cualquier otro lenguaje de Simulación– es el GPSS/H, el cual continúa siendo utilizado con éxito. Las razones principales de su eficacia son:

1. Los libros de texto de excelente edición que están disponibles.
2. Se ha usado con éxito para una variedad de situaciones mineras.
3. Es un lenguaje, no un paquete. Esto significa que su programación comparada con la de otro software, es más flexible en su aprendizaje.
4. El excelente soporte técnico que brinda la compañía.

GPSS/H usa el concepto de "transacciones", o entidades dinámicas, que se mueven a través del sistema a ser estudiado; como camiones o barcasas. El ejemplo corto dado al principio de este trabajo (Pág. 14), tiene a los camiones como "transacciones" que se mueven de bloque a bloque; de la misma manera como un camión se instalaría en una mina.

El paquete PROOF, es la animación que se utiliza conjuntamente con el GPSS/H, aunque puede usarse con cualquier otro software de Simulación que pueda crear un archivo en código ASCII. PROOF es un juego natural de instrucciones que tienen una estructura muy simple. A continuación se dan algunas líneas de código de PROOF:

```
TIME 100.00  
CREATE camion 153  
PLACE 153 ON p1  
TIME 200.00  
SET 153 COLOR blue  
PLACE 153 ON p2  
TIME 243.00  
DESTROY 153
```

Esto da como resultado un objeto (camión) que puede ser creado *100* veces; puesto en un camino *p1* a partir de un tiempo *200* y movilizado a otro camino *p2* hasta un tiempo *243*, tiempo en que termina su accionar.

Para esto se necesita dibujar un esquema que usa órdenes de tipo CAD que hacen que sea más fácil de crear, a continuación en la próxima etapa se crea un archivo de extensión .ATF (normalmente modificando el programa GPSS/H original) el cual maneja los objetos del esquema, el ejemplo del camión dado anteriormente es semejante a un archivo de ATF.

## CAPITULO III

### Modelo de la Simulación

#### Introducción

El presente trabajo está enfocado a desarrollar un modelo de Simulación que nos permita determinar la mejor alternativa de acarreo de mineral (carbón) y de material de desecho en una mina de Tajo Abierto. Dicha alternativa tendrá entre sus objetivos principales:

- Lograr las metas de producción de acarreo tanto de mineral y desecho.
- Ahorro por la disminución en los costos en Alquiler de maquinaria y equipos.
- Determinar los equipos para obtener una optimización en el match pala-camión.
- Disminución de tiempos ociosos en los equipos (camiones y palas eléctricas).

Los métodos específicos de explotación para las minas de Tajo Abierto las diferencian de otros tipos como las subterráneas y minas placer. El método a emplear depende del tipo, tamaño y profundidad del yacimiento mineral.

Los grandes avances en nuevas tecnologías y el desarrollo de maquinaria pesada más potente y moderna que permiten el movimiento de enormes cantidades de

materiales estériles y *mena*<sup>5</sup> dan como resultado que hoy en día las minas de tajo abierto sean las menos costosas y las preferidas por las compañías mineras para su explotación.

Los métodos para este tipo de minería empiezan con la remoción de vegetación y suelo, luego se dinamita extensamente, se remueven los materiales estériles (roca y materiales que se encuentran por encima de la mena) hasta llegar al yacimiento deseado. La remoción de materiales estériles y mena se hace con palas eléctricas y cargadores de tipo oruga, los materiales se cargan en camiones-volquetes para ser sacados del tajo.

A medida que la *mena* se encuentra más cerca de la superficie esta es extraída y se van construyendo anchas gradas en las paredes de la mina para permitir el acceso a la mena que se encuentra a mayor profundidad. Estas gradas proporcionan caminos para los vehículos de la mina.

La mena se descarga a una máquina para su trituración primaria, el material triturado es almacenado en rumas o montones sobre el suelo antes de ser enviado a la planta de chancado donde se separan los materiales estériles y se concentran los minerales de interés.

---

<sup>5</sup>mena, mezcla de minerales de los cuales se puede extraer uno o mas minerales con beneficio económico



Toma aérea de una mina a cielo abierto

### Posibles efectos y puntos importantes sobre las minas a cielo abierto

- **Perturbación de la tierra:** hoy en día en operaciones de cielo abierto son sacrificados varios kilómetros cuadrados por la socavación, colocación de materiales estériles extraídos, además de las grandes áreas perturbadas por los caminos y tendidos eléctricos, que dejan cicatrices permanentes en el paisaje.
- **Creación de grandes cantidades de material estéril:** Este tipo de mina produce casi cincuenta veces más material estéril que las minas subterráneas.
- **Los materiales estériles pueden causar contaminación del agua:** Los materiales estériles generalmente contienen pequeñas cantidades de metales que con el tiempo se separan de la roca y pueden contaminar fuentes de agua.
- **La inestabilidad de la pendiente/inclinaciones puede ser peligrosa:** El problema de la estabilidad de un declive afecta las paredes de una socavación.

Errores de cálculo puede causar desmoronamiento de las paredes, poniendo en peligro la vida de los trabajadores.

### **Carbón Mineral**

El elemento central de este proyecto de simulación, tiene como protagonista principal al carbón mineral y los desechos generados de su explotación.

El carbón mineral es un fósil con características particulares dependiendo del tipo y la parte del vegetal que los originó, las condiciones que prevalecieron durante su formación y del tipo de rocas asociadas. Está formado por carbono fijo, materias volátiles (hidrocarburos), cenizas (minerales no combustibles), y humedad en cantidades variables que determinan su grado.

Esto permite clasificarlos como de alto grado: los bituminosos y las antracitas con gran porcentaje de carbono y las de bajo grado: los sub-bituminosos, los lignitos y las turbas.

Las antracitas, calidad de la mayor parte de los carbones peruanos tienen como características, carbón fijo del 98% y 2% de materia volátil. Las *meta-antracitas* de 92% de carbón fijo y 8% de material volátil.

Se conoce que algunos de los yacimientos de antracita que mejores posibilidades ofrecen para una explotación industrial en el Perú son:

- Cuenca del Santa (Ancash),
- Cuenca del Alto Chicama (La Libertad)
- Cuenca de Oyón (Lima)

Actualmente la explotación de carbón en el país es artesanal y de pequeña escala. Históricamente en la década del '50 tuvo su mayor auge, llegándose a exportar a Francia y Argentina.

Dada la pequeña producción actual de las minas conocidas por falta de mercado e inversión para incrementarla, sería necesario alentar la formación de centros de acopio de carbón, para reunir la producción de varias minas y así poder sustentar con el recurso proyectos que requiere el país, sin perder de vista que el precio del carbón está en función del costo del transporte lo que indica su utilización cercana al yacimiento.

Otro de los objetivos que podemos mencionar es incentivar a los *empresarios e investigadores* a encontrar soluciones a problemas futuros ya sea por la carencia de recursos energéticos o por sus elevados costos, como es el caso del petróleo y el gas, que podrían ser sustituidos en algunas industrias por el uso del carbón mineral.

Así calificaríamos proyectos de generación de vapor y electricidad para uso agroindustrial, de producción de hierro esponja usando carbón como reductor de gran interés siderúrgico y valor de exportación, de producción de amoníaco que a su vez es utilizado en la fabricación de fertilizantes y de metanol, materia prima de productos químicos y fibras sintéticas.

### **3.1 Ambito del estudio**

Uno de los principales problemas para el planeamiento de operaciones mineras a cielo abierto u Open Pit Mines, se circunscribe a una selección óptima en la combinación de volquetes (Match Pala-Camión) para así minimizar el costo de transportar cantidades de

material desde las labores de la mina hacia su destino. Las distancias desde los diferentes puntos, el avance en la mina, así como políticas de secuenciación y las especificaciones que pueden variar en la vida real de una mina.



#### **Operación de Carga de Material de desecho al Camión Volquete**

Como resultado, se dan muchas alternativas disponibles en las llegadas de los diferentes equipos.

Es necesario responder a varias preguntas para tomar la decisión más adecuada con respecto al siguiente caso; en donde se incluyen:

1. ¿Qué tamaño de volquetes deben operar para hacer más eficiente el sistema?
2. ¿Cuántos volquetes son requeridos para minimizar los costos por tiempo de espera frente a una pala?



3. ¿Qué cambios físicos en la configuración, son garantías para incrementar la producción?
4. ¿Cuál será la producción total y los costos unitarios operativos, de una combinación de volquetes y palas?<sup>6</sup>
5. ¿En qué momento serán requeridos un nuevo camión o pala?, ¿Cómo deben operar estos más eficientemente?

Tradicionalmente los estudios de tiempos y movimientos son aplicados para responder a éstas preguntas; sin embargo este propósito no es el adecuado porque examinando los ciclos elementales, existen variaciones. Claramente se observa que los costos y la productividad del sistema **load-haul** (carga-arrastre) son estocásticos; esto es, la operación del sistema varía con el tiempo; y en consecuencia las razones de costos y la productividad cambian.

Una ayuda para la gestión de la mina, se desarrolla en éste capítulo; mediante un modelo de Simulación, teniendo como objetivo principal construir un programa informático, con el fin de aplicarlo a las operaciones de acarreo de mineral y material de desecho en una mina de Tajo Abierto.

Para la realización de este modelo, se plantean alternativas identificadas, para predecir el rendimiento e incrementar la producción, ambos al mismo tiempo; introduciendo el concepto de movimiento de los camiones-volquetes (*truck movement*).

---

<sup>6</sup> Pala Eléctrica o Excavadora

## 3.2 Estudios relativos

Los modelos de Simulación disponibles en la industria minera, se encuentran catalogados por los siguientes objetivos:

1. Predecir la productividad para sistemas existentes.
2. Identificar y determinar el efecto de cuello de botella en el sistema.
3. Cambiar o alterar un sistema existente para incrementar la productividad.
4. Seleccionar equipos para completar una nueva operación.

## 3.3 El Modelo

El presente modelo simula, un sistema complejo de transporte de materiales, desde las labores de la mina hacia sus destinos; siendo fácilmente adaptable a una variedad de configuraciones de minas.

### 3.3.1 Consideraciones

Básicamente el modelo, haciendo uso de un aplicativo informático, mueve los camiones entre sus puntos asignados de carga hacia los puntos de descarga sobre rutas predeterminadas (trazos o facilidades de acceso).

Los volquetes son dirigidos a canchas (crushers<sup>7</sup> y/o stock piles<sup>8</sup>) donde se encuentra el mineral que está empezando a ser sacado de la mina; enviándose a los puntos de descarga (dumps), cada pala tiene un cierto número de camiones asignados y dos rutas asociadas: una para el mineral y otra para el desecho. Así si consideramos

---

<sup>7</sup> Aplastador

<sup>8</sup> Reserva de existencias

asignar hasta 10 camiones como máximo a cada pala; y teniendo también como máximo hasta 10 palas, entonces en el sistema se están moviéndose hasta 100 volquetes.

Para la aplicación del modelo, es necesaria una considerable cantidad de datos.

Inicialmente una información general incluye:

1. Tiempo de operación por turno.
2. Tipo de material (mineral o desecho) a ser cargado.
3. El ratio del mineral con respecto al total de material de minería.

Los datos requeridos para las palas son el número, tipo y los tiempos del ciclo de carga. Para los camiones son el número y tipo de camión, características del desempeño del equipo, peso del vehículo vacío, capacidad de la tolva (*payloader*), velocidad y aceleración máxima del vehículo; así como las tasas de desaceleración. También es importante considerar las características del perfil del sistema (*system profile*), como las distribuciones del tiempo de servicio.

Los procesos de carga y descarga, son considerados como aplicación de los métodos estocásticos. La Simulación aplica el concepto determinístico, cuando se refiere a la travesía del vehículo, porque hace uso de los conceptos de la mecánica del movimiento de los cuerpos (*simulate vehicular movement*).

### **3.3.2 Simulación Determinística**

El movimiento es generalizado por la linealización a través de pequeños intervalos de incremento de tiempo, es así que para un pequeño intervalo de tiempo, la suma de las

fuerzas y aceleración se puede considerar constante. A partir de las fórmulas del movimiento rectilíneo, se tiene lo siguiente:

$$v_i = v_o + at$$

$$s_1 = s_0 + v_o t + 1/2 at^2$$

$$v_1^2 = v_0^2 + 2as_1 - 2as_0$$

Donde:

$V =$  *velocidad*

$T =$  *tiempo*

$S =$  *distancia*

$a =$  *Aceleración*

Las relaciones arriba mencionadas, sugieren un procedimiento iterativo para usarse en la modelación. Para un pequeño intervalo de tiempo, consideramos la aceleración constante y determinamos una velocidad terminal, la cual permite calcular la característica **rimpull**, desde las curvas de desempeño; este parámetro fija una nueva tasa de aceleración para el siguiente incremento de tiempo y así poder seguir el proceso iterativo. En el ANEXO 1, se presenta un ábaco de la curva de desempeño de los camiones suplidos por los fabricantes de esta clase de vehículos. Estas curvas, se refieren a la velocidad vehicular y rimpull; es decir la aceleración.

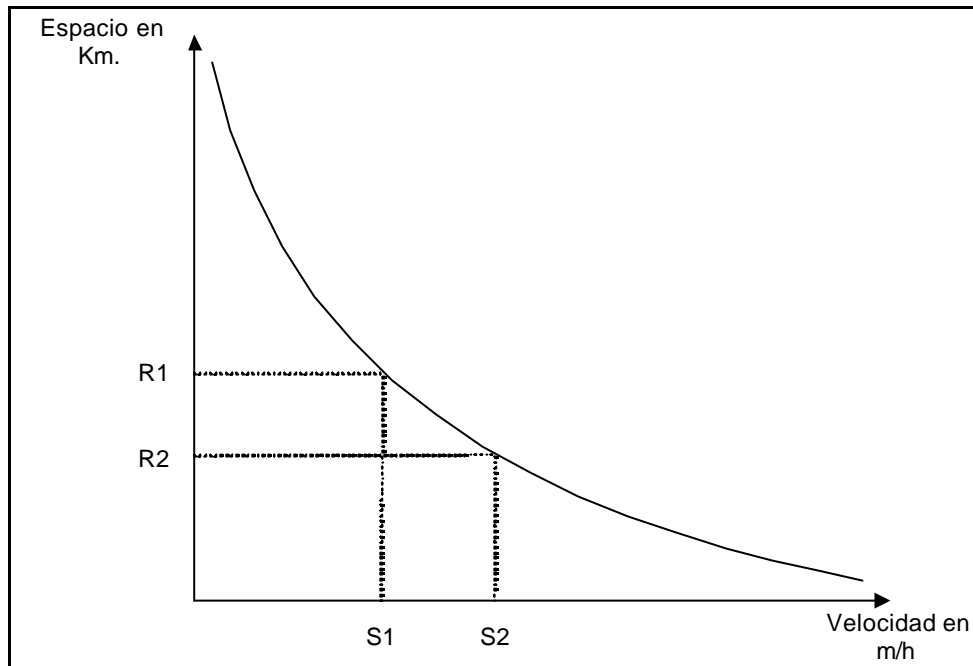


Figura 3.1: Esquema de la curva

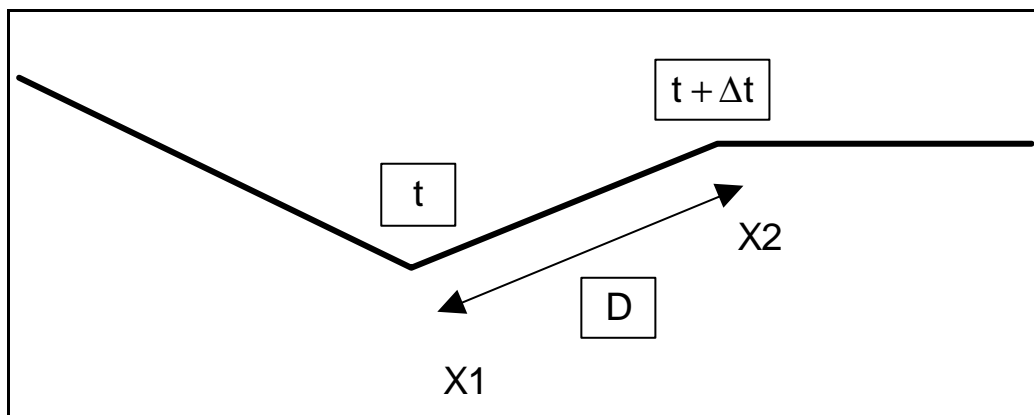


Figura 3.2: Esquema del perfil de acceso

Las distancias recorridas son continuamente registradas para proveer la información actual de la posición del vehículo en el sistema. Al no haber cambios en el perfil del sistema (en algún tramo de las facilidades de acceso), existe una velocidad máxima que resulta ser la velocidad crítica, no pudiendo exceder este límite; es decir no

existe mas potencia para acelerar. Cuando el perfil cambia, un nuevo juego de fuerzas se están cumpliendo y una nueva tasa de aceleración, ya sea positiva o negativa. La aplicación de estos conceptos se muestra a continuación.

El peso total de un camión es igual a:

$$W_t = W_o + W_{c,con}$$
$$W_c = \bar{w}_c + R_{N,} \cdot S$$

Donde:

$W_T$  = Peso total del camión, en toneladas.

$W_o$  = Peso de la tara del camión, en toneladas

$W_c$  = Peso del mineral o desecho cargado, en toneladas

$\bar{w}_c$  = Peso medio del mineral (mineral o desecho) cargado, en toneladas

$\sigma_c$  = Desviación estándar del mineral cargado, en toneladas

$R_N$  = Random normal number

En las figuras 3.1 y 3.2, se muestra el cálculo a partir de la curva rimpull-speed, y cómo se evalúa para cada tramo entre  $X_1$  y  $X_2$ , con una velocidad  $S_1$ . En el tiempo  $t_1$ , a una velocidad  $S_1$ , en un camino con una resistencia al rodamiento  $K$  y una resistencia por gradiente  $G$  (en porcentaje) para el tramo  $X_2-X_1$ . Siendo  $g$  la aceleración debido a la gravedad y la actual aceleración del camión se asumen constante para el intervalo  $\Delta t$ , entonces en  $X_1$  el rimpull disponible será  $R_1$  Kg., y la resistencia al movimiento:

$$(G + K) * 20 * W_t \text{ en Kg.}$$

De aquí, la fuerza de la aceleración es igual a:

$$(R_1 - (G + K) * 20 * W_r). \text{ en Kg.}$$

Mientras que la aceleración, es:

$$A = \frac{R_1 - (G + K) * 20 * W_r}{(W_r * 2000) / g}$$

Finalmente, si la velocidad en  $t + \Delta t$ , es  $S_2$  y la distancia atravesada en el tiempo  $\Delta t$  es

D, entonces:

$$s_2 = s_1 + A * \Delta t$$

y

$$D_2 = s_1 * t + \frac{1}{2} A * (\Delta t)^2$$

La nueva velocidad  $S_2$  determina un nuevo rimpull en  $X'$ , que a su vez determina una nueva aceleración para el siguiente intervalo.

La utilización óptima de un camión, depende de cómo operan en la mina los conceptos de disponibilidad y utilización de la potencia. Cuando un camión se encuentra atravesando un acceso, con una gradiente; el problema inicial es determinar la cantidad de potencia requerida para atravesar el segmento; y segundo la selección de equipos con sus características rimpull que satisfacen esta condición. Los factores que envuelven el cómputo de la potencia utilizada, son referidos como fuerza resistiva.

### 3.3.3 Fuerzas resistivas

Un vehículo posee dos tipos de fuerzas resistivas: rodamiento y resistencia a la gradiente. La resistencia por rodamiento, puede ser definida como una fuerza de retardo por la superficie del camino, producto de las llantas del camión. Aquí se incluyen la fricción en las ruedas, la flexión y la penetración de las llantas; expresadas en (pounds/pull) libras de arrastre por TM. de peso del vehículo o como un porcentaje equivalente de la gradiente. Una unidad porcentual de gradiente es considerado equivalente a una fuerza de 20 libras por TM. de peso del vehículo. Vea la tabla 3.1.

**Tabla 3.1: Factores típicos resistivos para una llanta**

Descripción del Camino	lb./ Ton.	Porcentaje
Hard, smoth, stabilized, withouth penetration under load	40	2
Firm, smooth, flexing, sligthy y under load	65	3.25
Ruttetd, dirt, flexing condiderably under load	100	5
Ruttetd, dirt, no stabilization, somewhat soft under load	150	7.5
Soft, ruttetd mud or sand, deep penetration under load	200-400	10-20

La segunda es el grado de la resistencia a la gradiente; que es la fuerza gravitatoria que se debe al movimiento del vehículo, sobre una inclinación. Esto puede ser expresado también como libras por TM. (pounds per TM.) del peso del vehículo como su equivalente de gradiente; y es un prefijado con un signo mas o menos, para identificar la dirección de la pendiente. Cuando la gradiente es hacia arriba, este efecto



es una fuerza de retardo; en el caso de dirección descendiente, la gradiente es una fuerza de ayuda y ésta es comúnmente denominada gradiente de asistencia (G. A.). Nuevamente, un valor común de 20 lb. por TM. es equivalente a un porcentaje de gradiente usado. Para calcular la resistencia al gradiente (grade), se hace uso de la siguiente fórmula:

$$GR = W_T \times 20 \text{ lb.} / TM. \times \text{unidad de \% gradiente}$$

La resistencia al rodamiento y la resistencia a la gradiente, son adicionadas algebraicamente al rimpull del camión, a fin de obtener la fuerza resultante de tipo halar (pull). El control del requerimiento de potencia, para una desempeño aceptable es una combinación de ambas resistencias: rodamiento y gradiente (rolling y grade).

La fuerza es necesaria para vencer a la resistencia y proveer aceleración; donde el total de resistencia al movimiento del vehículo, es tomada como la suma de la resistencia de arrastre y de rodamiento. Gráficamente las consideraciones de la potencia, para vencer las fuerzas de resistencia son presentadas en la figura 3.3.

**Tabla 3.2: Coeficientes de factores de tracción**

<b>Materiales</b>	<b>Llantas de caucho</b>
Concreto	0.90
Arcilla seca (Clay loam , Dry)	0.55
Arcilla mojada (Clay loam , wet)	0.45
Arcilla afirmada (Rutted clay loam )	0.40
Arena seca (Dry Sand)	0.20
Arena mojada (Wet sand)	0.40
Brea (Quarry pit)	0.65
Grava suelta (Gravel road loose not hard)	0.36
Nieve compacta (Packed snow)	0.20
Hielo (Ice)	0.12
Suelo firme (Firm earth)	0.55
Suelo blando (Loose earth)	0.45
Carbón apilado (Coal stock piled)	0.45

El área de potencia utilizable, se encuentra limitada por la aplicación del factor de tracción, el que aparece superpuesto en la figura. Este factor es referido como el coeficiente de tracción, y se refiere a la habilidad de las ruedas del camión a vencer la superficie del camino o acceso. En la tabla 3.2, se presenta los valores típicos de coeficientes de tracción, en varias condiciones. Así por ejemplo para el caso de hielo, con valor de 12; significa que se requiere exceder del 12 por ciento del peso del vehículo dado en libras (pounds pull). La limitación a la tracción, puede ser expresada como:

$$\text{TRACL} = \text{CT} \times W_0$$

Donde:

*TRACL = Limitación a la tracción*

*CT = Coeficiente de tracción*

*W<sub>0</sub> = Peso del vehículo*

### 3.3.4 Otras consideraciones

La parte estocástica del modelo, se refiere a las variables aleatorias referidas a las operaciones de carga (load) y descarga (dump); desde sus respectivas distribuciones de probabilidad. Se pueden definir para cada binomio pala-camión, su distribución particular de probabilidades.

El simulador ha sido diseñado para aceptar, tiempos de carga con variable normal; con una media y una desviación estándar, por su parte, el tiempo de descarga se considera distribuido exponencialmente con una media.

El modelo diseñado con el lenguaje Visual Basic, desde su entrada estándar definida en sus parámetros y variables, ejecuta la Simulación ayudándose de expresiones, para obtener un reporte de estadísticas en el turno de producción, sobre colas, utilización de los equipos, etc.

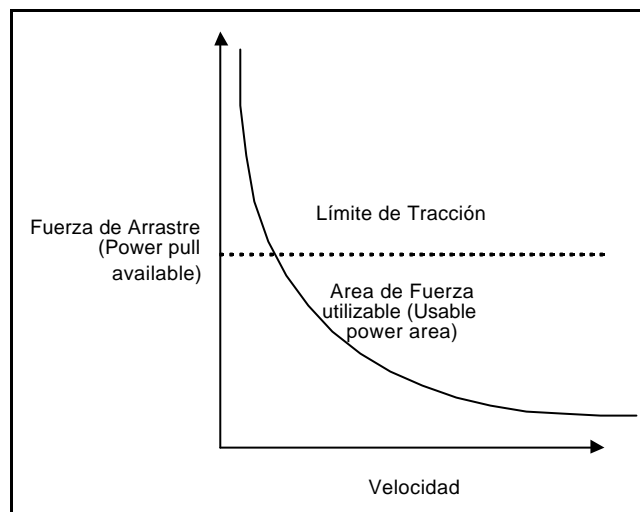


Figura 3.3: Límites de Tracción

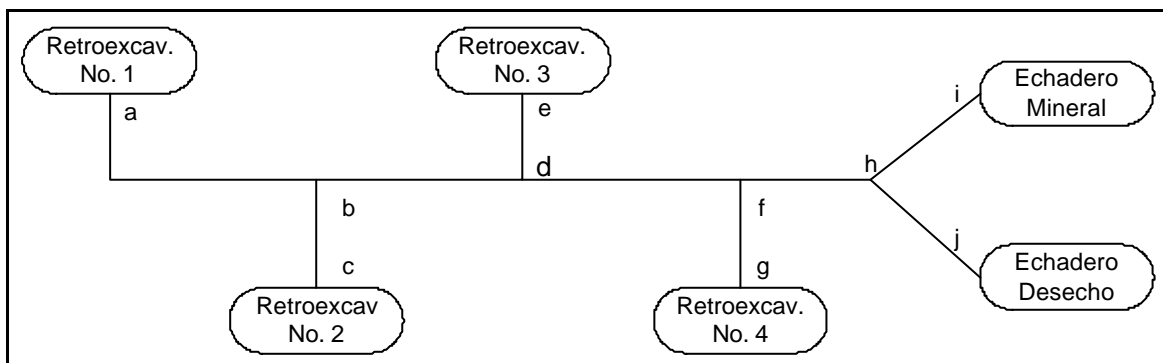


Figura 3.4: Esquema de 4 palas eléctricas

**Ingresos:**

Ida			Vuelta	
Segmento	Tipo		Segmento	Tipo
a -> b	1		i -> h	7
c -> b	1		j -> h	7
e -> d	1		h -> f	8
g -> f	1		f -> d	9
b -> d	2		d -> b	10
d -> f	3		f -> g	11
f -> h	4		d -> e	11
h -> i	5		b -> c	11
h -> j	5		b -> a	11
DESCARGA	6		CARGA	12

La información del reporte final, incluye:

1. El número de cargas y toneladas de mineral y desecho, llevados por cada camión desde cada pala.
2. La utilización de cada pala.
3. El tiempo promedio de espera frente a cada pala.
4. El tiempo total de espera frente a cada pala.

Definiendo la variable TYPE (i,j), usada como identificador de la siguiente operación desarrollada por el camión j; existiendo a su vez tres grandes operaciones : loading o carga, traveling o travesía y descarga o dumping. Para el caso de travesía, se deberá definir la ubicación exacta del camión, para efectos de animación y monitoreo.

Dentro de las facilidades de acceso, se deberá incluir el número de las localizaciones, siendo igual a la suma de los segmentos de travesía más los puntos de carga y descarga. Esta suma es dependiente al número de palas y sitios de descarga; de acuerdo a la siguiente relación matemática:

$$(2 \times N 1) + 4$$

Donde:

N 1 = número de palas

En la figura 3.4, se presenta un sistema de 4 palas; en este caso existen  $(2 \times N1) + 4 = 2(4) + 4 = 12$  tipos. Por ejemplo para  $TYPE (2, 3) = 1$ , significa que el camión 3 desde la pala 2, se mueve de *c* a *b*.

## CAPITULO IV

### Aplicación del Modelo

La aplicación del modelo de Simulación a una mina de carbón, con operaciones de superficie cielo abierto u open pit y operaciones de subsuelo, consiste en suponer la actual producción con las observaciones y datos tomados con los equipos existentes y es a partir de esa comprobación que se crea un modelo con alternativas capaces de optimizar los requerimientos deseados.

#### 4.1 Operaciones

Las operaciones de mina de superficie, son realizadas en un tajo o área, el cual se extiende en una longitud de 2.5 Km. Esta concentra actualmente toda la producción de la mina.

Frente al Tajo, equipos buldózer limpian la superficie para proveer un nivel de área de trabajo a las perforadoras 40-R y 45-R. El mineral es removido usando explosivos ANFO. Dos palas de 4.6 m<sup>3</sup> (6 yd<sup>3</sup>) y 6.9 m<sup>3</sup> (9yd<sup>3</sup>) de capacidad de cubeta, cargan los camiones de 55 TM. y 65 TM. respectivamente, existe además una dragalina 2400, que se utiliza para la labor de apilado (stockpile) de carbón; material que es utilizado por un cargador frontal de 3.8 m<sup>3</sup> (5yd<sup>3</sup>) de cubeta (tractor pala) Michigan 275-A, cargando a los camiones de 55 TM. y 65 TM.

Una facilidad de acceso, permite el transporte de los camiones; los cuales son continuamente limpiados. La necesidad de contar con viajes sin interrupciones de los camiones hacia las palas y áreas de descarga, han generado que el camino privado de la mina tenga la longitud de 1.4 millas. El camino principal tiene un ancho de 60 pies y una gradiente máxima de 4 a 5 por ciento .Ver tabla 4.1.



**Hitachi Euclid EX650 – 65Ton**

Las gradientes, son todas menores de 10%; con 3% de resistencia de rodamiento asignada a la sección de la mina y 2% de resistencia de rodamiento para la ruta al echadero (dump). Una velocidad máxima de 14.7 m/s. es aplicada con una tasa aceleración o desaceleración máxima de 0.70 pies/s.<sup>2</sup> y -1.0 pies/s.<sup>2</sup> respectivamente. El tiempo de operación diario es de 6 horas





**Camión en ruta al Echadero de Mineral**

Las características de los equipos y perfiles del sistema se muestran en la tabla 4.1.

**Tabla 4.1: Características de los equipos**

**A) Configuración del sistema**

Número de áreas de mina .....	1
Número de plantas de limpieza .....	1
Número de áreas de desmonte .....	1
Número de palas eléctricas .....	2
Número de cargadores .....	1
Número de camiones desecho 12 y carbón 3, total	15

### B) Palas Eléctricas y Cargador

	No 1	No2	Cargador
Modelo de palas	190B	RH 170	275A
Capacidad de cubeta (m3)	6.9	4.6	3.8



**Pala Eléctrica O & K de 4.6 m<sup>3</sup>**

## C) Camiones

### c1. Tipo de camiones

	Tipo 1	Tipo 2
Capacidad Tolva (TM.)	65	55
Peso vacío (TM.)	37.45	35
Nº de vehículos	6	9



Camión Rígido Komatsu – 55 TM

## **C2.. Asignación de camiones**

- Número de estaciones de carga en el sistema:
  - Para cuerpos mineralizados: 3 (2 Palas y 1 Cargador)
  - Procesamiento en planta: 1
- Número de camiones asignados a palas y cargadores
  - Número de camiones:       Pala 1..... 5
  - Pala 2..... 7
  - Cargador..... 3



**Carga de Mineral**

### 3. Condiciones de la ruta

Sección	Gradiente %	Resistencia %	Distancia m	Veloc. lim. m/s	Coef. Tracción
a-d	0	3	122	14.7	.45
d-a	0	3	122	14.7	.45
d-e	10	3	122	14.7	.45
e-d	-10	3	122	14.7	.45
b-d	0	3	152	14.7	.45
d-b	0	3	152	14.7	.45
c-e	0	3	61	14.7	.45
e-c	0	3	61	14.7	.45
e-f	10	3	61	14.7	.45
f-e	-10	3	61	14.7	.45
f-g	0	3	182	14.7	.45
g-f	0	3	182	14.7	.45
f-h	-10	3	61	14.7	.45
	-2	2	289	22.07	.45
	6	2	76	22.07	.45
	5	2	122	29.4	.45
	0	2	137	14.7	.45
	-10	2	122	14.7	.45
	0	2	730	22.07	.45
	-1	2	657	22.07	.45
h-f	1	2	657	22.07	.45
	0	2	730	22.07	.45
	10	2	122	14.07	.45
	0	2	137	14.07	.45
	-5	2	122	29.4	.45
	-6	2	76	22.07	.45
	2	2	289	22.07	.45
	10	3	61	14.07	.45

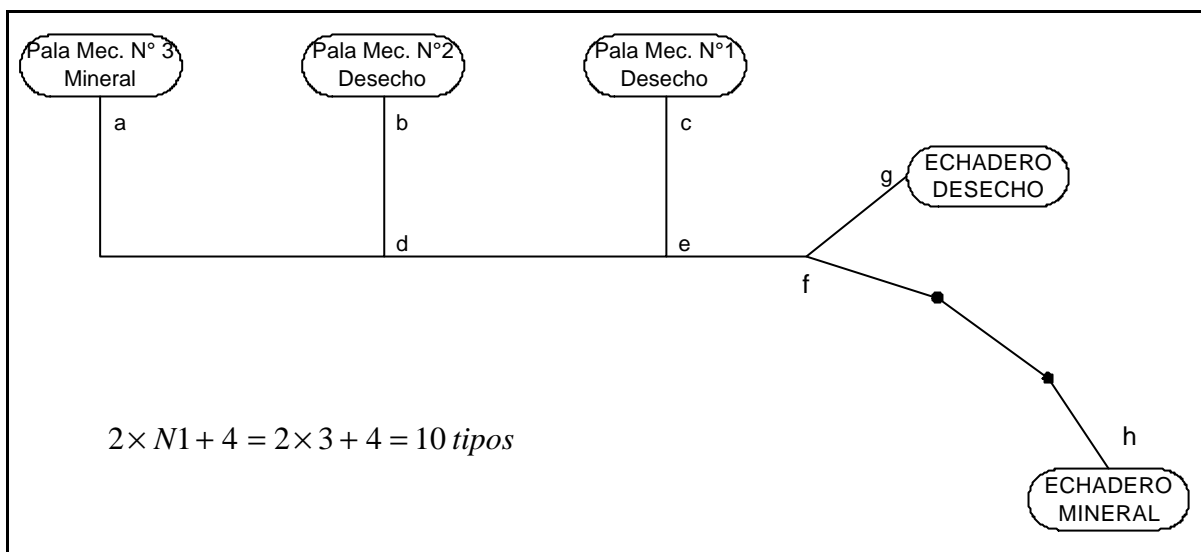


Figura 4.1: Configuración del sistema de minería

Ida		Vuelta	
<u>Segmento</u>	<u>Tipo</u>	<u>Segmento</u>	<u>Tipo</u>
a → d	1	g → f	6
b → d	1	h → f	6
c → e	1	f → e	7
d → e	2	e → d	8
e → f	3	e → c	8
f → g	4	d → b	9
f → h	4	d → a	9
DESCARGA	5	CARGA	10

En adición a los datos estáticos y cinéticos para las características del equipo y los perfiles de la mina; la aplicación del modelo envuelve la recopilación sustancial de información estadística. Los datos referentes a las variables aleatorias de carga y

descarga, fueron recolectados directamente mediante un estudio de tiempos, determinándose el tiempo promedio de descarga con una media de 50 s. por camión de cualquier tipo; los tiempos de carga por cada tipo de camión se resumen en la tabla 4.2

En la Simulación se obtiene la siguiente información:

1. Estadísticas de producción:
  - a. Número de turnos.
  - b. Tipos de camión en cada estación de carga.
  - c. Tipo de pala asignado a cada proceso.
  - d. Número de camiones asignados a cada pala.
  - e. Número de carguíos (mineral y desecho) o franjas realizadas en cada ruta por cada camión.
  - f. Toneladas de carguíos (mineral y desecho) por turno transportados por cada camión.
2. Colas en los carguíos:
  - a. Tipo de pala asignada a cada proceso.
  - b. Tiempo de ocio para cada pala.
  - c. Time de espera total de los camiones frente en cada pala.
3. Colas en rutas y descarga:
  - a. Tipo de pala, en cada proceso.
  - b. Localización de cada sección usadas en el monitoreo.
  - c. Tiempo de espera de los camiones durante las operaciones.

4. Total de turnos:
  - a. Total de producción para el sistema (mineral y desecho).
  - b. Total de tiempo de espera de los palas por turno.
  - c. Total de tiempo de espera.
  
5. Tiempos esperados en travesía:
  - a. Tiempo esperado de travesía desde la carga en mina hasta los echaderos o stock piles.
  - b. Tiempo esperado de travesía vacío de los stock-piles a la mina.

## **4.2 Resultados de Simulación del Proceso de Acarreo Actual**

Los datos de entrada sirvieron para una Simulación de un turno de duración de 6 horas ó 360 minutos. Los resultados de la Simulación se resumen en la tabla 4.3. Estos resultados muestran que para un turno de producción de 3,090 TM. de carbón y 19,975 TM. de desecho; éstos se aproximan a los del sistema en operación. La actual producción de carbón se encuentra en un rango de 3,000 a 3,600 TM. y 20,000 TM. de desecho.



**Tabla 4.2: Tiempos promedios de carga de las palas**

Tipo de Cargador	Tipo de Camión	Tiempo medio de carga (min.)	Desv. Std.
1 (6.9 m3)	1 (65 Ton.)	1.960	1.082
	2 (55 Ton.)	1.663	0.916
2 (4.6 m3)	1 (65 Ton.)	2.700	0.480
	2 (55 Ton.)	2.290	0.407
3 (3.8 m3)	1 (65 Ton.)	4.875	1.625
	2 (55 Ton.)	4.125	1.350

**Tabla 4.3: Desempeño del Acarreo Actual**

Capacidad Camión (TM.)	Tipo Pala	Tipo de Camión	Cargas de Mineral	Cargas de desecho	TM. de mineral	TM. de desecho
65	1	1	0	30	0	1,950
55	1	2	0	29	0	1,595
55	1	3	0	29	0	1,595
55	1	4	0	29	0	1,595
55	1	5	0	29	0	1,595
65	2	1	0	30	0	1,950
55	2	2	0	29	0	1,595
65	2	3	0	29	0	1,885
55	2	4	0	29	0	1,595
55	2	5	0	28	0	1,540
55	2	6	0	28	0	1,540
55	2	7	0	28	0	1,540
Euclid 65	3	1	17	0	1,105	0
Euclid 65	3	2	17	0	1,105	0
Mack 55	3	3	16	0	880	0
				Totales	3,090	19,975

No. De camiones	Ton. turno / pala	Tiempo de espera pala (min)	Tiempo de espera camiones (min)
12	Desecho	16.95	1,292.65
	19,975		
3	carbón	120.13	54.57
	3,090		

Los datos de entrada aplicados a la Simulación, están acordes a la producción diaria establecida por la compañía; siendo esta de un promedio de 3,000 TM. de carbón y de 20,000 TM. de desecho; lo cual implica un ratio para el carbón de 1:6.66. Este ratio se encuentra lejos del valor esperado que es 1:11. En orden de mantener los niveles de requerimientos de producción del desecho removido, se aplican varias alternativas para obtener el ratio adecuado, a la par que se evalúen los equipos que satisfacen esta condición.

La optimización de la productividad pala-camión, está acompañada por la minimización de los tiempos de espera de los camiones y la minimización de los tiempos de ocio de los palas.

Dados los requerimientos para la producción de carbón y desecho removido por turno, se establece en **3,050 y 34,500 TM.** respectivamente. A continuación se muestran las alternativas aplicadas para alcanzar estas expectativas:

### 4.3 Alternativa I

Se mantienen las mismas palas asignadas al mineral y desecho. Nueve (09) camiones de 95 TM. son asignados al desecho, con la finalidad de reemplazar los 9 originales de 55 TM. y los 3 de 65 TM. utilizados también para este propósito, se mantienen los mismos camiones para el mineral. El resultado de la producción de carbón y desecho, es de 3,090 y 20,242 TM. respectivamente; consiguiendo un ratio de 1:6.74. Los resultados se muestran en el siguiente cuadro.

**Tabla 4.4: Reporte de Estadísticas de Acarreo**

Capacidad Camión TM.	Tipo Pala	Nº de Camión	Cargas de Mineral	Cargas de desecho	TM. de mineral	TM. de desecho
95	1	1	0	22	0	2,090
95	1	2	0	22	0	2,090
95	1	3	0	21	0	1,995
95	1	4	0	21	0	1,995
95	2	1	0	27	0	2,488
95	2	2	0	26	0	2,396
95	2	3	0	26	0	2,396
95	2	4	0	26	0	2,396
95	2	5	0	26	0	2,396
Euclid 65	3	1	17	0	1105	0
Euclid 65	3	2	17	0	1105	0
Euclid 55	3	3	16	0	880	0
				Totales	3,090	20,242

La pala 1 carga los camiones de 95 TM al 99%

La pala 2 carga los camiones de 95 TM al 96% ver Tabla (4.6)

### Colas en puntos de carga

N° pala	Tiempo ocio	Tiempo de espera
	Pala	Camión
1	27.36	754.32
2	16.8	982.8
3	111.63	54.57

#### 4.4 Alternativa II

Esta alternativa que es producto de las evaluaciones anteriores, y con la ayuda de los rendimientos pala camión, se determina realizar la simulación con 6 camiones de 120 TM. y dos palas con capacidad de 22 yd<sup>3</sup> (16.7 m<sup>3</sup>) para la carga del desecho, esta combinación de PALA-CAMION ofrece el mejor match de *pases*, obteniendo un rendimiento del 95% en el llenado del camión, ver *tabla 4.6*, y para el acarreo del mineral se utilizarán solamente 2 camiones de 65 TM que cumplen con los requerimientos. El resultado de la producción de carbón y desecho, es de 3,120 y 34,428 TM respectivamente. A continuación se presenta el detalle de los resultados.

**Tabla 4.5: Reporte de Estadísticas de Acarreo**

Capacidad Camión (TM.)	Tipo Pala	Tipo de Camión	Cargas de Mineral	Cargas de desecho	TM. de mineral	TM. de desecho
120	1	1	0	52	0	5,928
120	1	2	0	51	0	5,814
120	1	3	0	48	0	5,472
120	2	1	0	51	0	5,814
120	2	2	0	51	0	5,814
120	2	3	0	49	0	5,586
Euclid 65	3	1	24	0	1,560	0
Euclid 65	3	2	24	0	1,560	0
				Totales	3,120	34,428

Las palas 1 y 2 cargan los camiones de 120 TM al 95% ver Tabla (4.6)

### Colas en puntos de carga

Nº pala	Tiempo ocio Pala	Tiempo de espera Camión Total
1	30.72	207.36
2	18.96	182.28
3	7.25	28.50

**Tabla 4.6: Factores de llenado (Match) de Diferentes Capacidades de Palas vs. Camiones**

CAPACIDAD DE LA PALA					CAPACIDAD DE CAMIONES EN TONELADAS METRICAS											
yd3	m3	TM/pase	TM/hora	tiempo de ciclo (min.)	55			65			95			120		
					Pases	Cant. de TM	% de llenado	Pases	Cant. de TM	% de llenado	Pases	Cant. de TM	% de llenado	Pases	Cant. de TM	% de llenado
<b>6</b>	<b>3.91</b>	<b>7.82</b>	<b>1,117.14</b>	<b>0.33</b>	<b>7</b>	<b>54.74</b>	<b>100%</b>	<b>8</b>	<b>62.56</b>	<b>96%</b>	<b>12</b>	<b>93.84</b>	<b>99%</b>	<b>15</b>	<b>117.3</b>	<b>98%</b>
7	4.51	9.01	1,287.14	0.33	6	54.06	98%	7	63.07	97%	11	99.11	104%	13	117.1	98%
8	5.19	10.37	1,481.43	0.33	5	51.85	94%	6	62.22	96%	9	93.33	98%	12	124.4	104%
<b>9</b>	<b>5.78</b>	<b>11.56</b>	<b>1,651.43</b>	<b>0.33</b>	<b>5</b>	<b>57.8</b>	<b>105%</b>	<b>6</b>	<b>69.36</b>	<b>107%</b>	<b>8</b>	<b>92.48</b>	<b>97%</b>	<b>10</b>	<b>115.6</b>	<b>96%</b>
10	6.46	12.92	1,336.55	0.35	4	51.68	94%	5	64.6	99%	7	90.44	95%	9	116.3	97%
11	7.14	14.28	1,477.24	0.38	4	57.12	104%	5	71.4	110%	7	99.96	105%	8	114.2	95%
12	7.74	15.47	1,600.34	0.38	4	61.88	113%	4	61.88	95%	6	92.82	98%	8	123.8	103%
13	8.42	16.83	1,741.03	0.42	3	50.49	92%	4	67.32	104%	6	100.98	106%	7	117.8	98%
14	9.01	18.02	1,864.14	0.43	3	54.06	98%	4	72.08	111%	5	90.1	95%	7	126.1	105%
15	9.69	19.38	2,004.83	0.43	3	58.14	106%	3	58.14	89%	5	96.9	102%	6	116.3	97%
16	10.37	20.74	2,145.52	0.45	3	62.22	113%	3	62.22	96%	5	103.7	109%	6	124.4	104%
17	10.97	21.93	2,268.62	0.49	3	65.79	120%	3	65.79	101%	4	87.72	92%	5	109.7	91%
18	11.65	23.29	2,409.31	0.52	2	46.58	85%	3	69.87	107%	4	93.16	98%	5	116.5	97%
19	12.24	24.48	2,532.41	0.52	2	48.96	89%	3	73.44	113%	4	97.92	103%	5	122.4	102%
20	12.92	25.84	2,673.10	0.55	2	51.68	94%	3	77.52	119%	4	103.36	109%	5	129.2	108%
21	13.60	27.20	2,813.79	0.55	2	54.4	99%	2	54.4	84%	3	81.6	86%	4	108.8	91%
<b>22</b>	<b>14.20</b>	<b>28.39</b>	<b>2,936.90</b>	<b>0.58</b>	<b>2</b>	<b>56.78</b>	<b>103%</b>	<b>2</b>	<b>56.78</b>	<b>87%</b>	<b>3</b>	<b>85.17</b>	<b>90%</b>	<b>4</b>	<b>113.6</b>	<b>95%</b>

Fuente: Fabricantes de distintos tipos de Excavadoras y Palas Eléctricas(Komatsu, Caterpillar, Hitachi)

Tiempo de ciclo = Tiempo que dura un pase de Pala                      25.2 seg.      0.42 min  
 Cant. De TM = Pases x TM/pase    7 x 7.76      54.32 TM  
 Porcentaje de llenado = Cant. De TM / Capacidad del Camion      54.32/55.00      99%

## 4.5 Costos Operativos Unitarios de Alquiler de Equipos

En el siguiente cuadro se observan los costos de alquiler de las Palas Eléctricas de 4.6 m<sup>3</sup>, 6.9 m<sup>3</sup> y de 16.7 m<sup>3</sup> (alternativa 2) para la remoción de desecho y el cargador de 3.8 m<sup>3</sup>, Así también el costo de los camiones de 65 TM., 55 TM., de 95 TM. Y 120 TM. y su consumo de combustible.

### 4.5.1 Costo por Alquiler de Equipos

<b>Precios de Alquiler de Maquinaria y Equipos por Hora en US. Dolares</b>				
<b>Palas Eléctricas</b>				
<b>Capacidad cubeta m3</b>	3.8	4.6	6.9	16.7
<b>Costo Alquiler</b>	85.12	101.2	144.4	216.5
<b>Camiones</b>				
<b>Capacidad Tolva TM.</b>	55	65	95	120
<b>Costo Alquiler</b>	69.96	82.68	110.5	130.65

### 4.5.2 Costo por Consumo de Combustible

<b>Rendimientos Aproximados de Camiones en Km/gal.</b>				
<b>Capacidad Tolva TM.</b>	55	65	95	120
	6	5.5	3.5	3

<b>Consumo de Combustible para Turno de 6 horas</b>						
<b>Capacidad Tolva TM.</b>	<b>Mineral</b>			<b>Desecho</b>		
	<b>Nº Camiones</b>	<b>Recorrido en km</b>	<b>Cantidad Galones</b>	<b>Nº Camiones</b>	<b>Recorrido en km</b>	<b>Cantidad Galones</b>
55	2	170	28.33	9	432	72.00
65	1	80	14.55	3	144	26.18
95				9	360	102.86
120				6	480	160.00

## 4.6 Resumen de Resultados y Costos Totales

### 4.6.1 Resumen de Resultados

	Capacidad de la Pala (m3)		Carbón		Desecho		Producción (TM.)	
	Desecho	Carbón	Nº camiones	Capacidad Camión(TM.)	Nº camiones	Capacidad Camión(TM)	Carbón	Desecho
Actual	6.9	3.8	1	55	9	55	3,090	19,975
	4.6		2	65	3	65		
I	6.9	3.8	1	55	9	95	3,090	20,242
	4.6		2	65				
II	16.7	3.8	2	65	6	120	3,120	34,428



#### 4.6.2 Resumen de Costos Totales para turno de 6 horas en US Dólares

Mineral	Actual				Alternativa I				Alternativa II			
	Capac	Cant.	Costo	Total US\$	Capac	Cant.	Costo	Total US\$	Capac	Cant.	Costo	Total US\$
Camiones (TM.)	65	2	496.08	992.16	65	2	496.08	992.16	65	2	496.08	992.16
	55	1	419.76	419.76	55	1	419.76	419.76				
Palas Eléctricas (m3)	3.8	1	510.72	510.72	3.8	1	510.72	510.72	3.8	1	510.72	510.72
Cons. Combustible/turno (galones)		42.9	3.03	130.00		42.9	3.03	130.00		14.6	3.03	44.09
Mano de Obra		4	51.00	204.00		4	51.00	204.00		3	51.00	153.00
Costo Total Acarreo Mineral				<b>2,256.64</b>				<b>2,256.64</b>				<b>1,699.97</b>
Costo TM Acarreo Mineral (US\$)		3090		<b>0.73</b>		3090		<b>0.73</b>		3120		<b>0.54</b>
<b>Desecho</b>												
Camiones (TM.)	65	9	496.08	4,464.72	95	9	725.04	6,525.36	120	6	915.84	5,495.04
	55	3	419.76	1,259.28								
Palas Eléctricas (m3)	4.6	1	607.20	607.20	4.6	1	607.20	607.20	16.7	2	1299.00	2,598.00
	6.9	1	866.40	866.40	6.9	1	866.40	866.40				0.00
Cons. Combustible/turno (galones)		98.18	3.03	297.49		102.9	3.03	311.67		160	3.03	484.80
Mano de Obra		14	51.00	714.00		11	51.00	561.00		8	51.00	408.00
Costo Total Acarreo de Desecho				<b>8,209.09</b>				<b>8,871.63</b>				<b>8,985.84</b>
Costo TM Acarreo Desecho (US\$)		19975		<b>0.41</b>		20242		<b>0.44</b>		34428		<b>0.26</b>
Costos Total por turno de 6 hr				<b>10,465.73</b>				<b>11,128.27</b>				<b>10,685.81</b>

- \* Costo Total de Alquiler de Camiones = Costo Alquiler por Hora (según capac.) x 6 (Turno) x Número de camiones
- \* Costo Total de Alquiler de Palas Eléctricas = Costo Alquiler por Hora (según capac.) x 6 (Turno) x Número de Palas
- \* Consumo de Combustible =  $2 \times \text{Número de vueltas} \times \text{Distancia de pala a echaderos} \times \text{Numero de camiones} \times 3.03$  (Precio del Galón de combustible)  
Rendimiento de camiones en Km./gal
- \* Costo de Mano de Obra = Número de Operadores de maquinaria x 8.50/hora x 6

## CAPITULO V

### Conclusiones

Las perspectivas de la Minería Peruana son muy amplias, debido a que gran parte del territorio nacional aún no ha sido debidamente explotado, pese a tener rangos mundiales de primer orden en la producción de oro, plata, zinc y cobre.

Haciendo referencia del estado de abandono de la explotación del carbón, y por ser este un recurso energético que no debemos desdeñar por sus aplicaciones en diversas industrias; es que ha sido esta, la principal motivación de la realización de este informe.

Cabe resaltar además, para que su explotación sea rentable es preciso la aplicación de modernas técnicas de optimización en transporte, debido a que el precio del carbón se encuentra en función de este.

Respecto al cobre por citar un ejemplo a imitar, en la década de los 70 la producción de Chile y del Perú eran muy similares, actualmente Chile aventaja largamente al Perú, debido a las grandes inversiones realizadas por el vecino país en el empleo de modernas tecnologías y continuos avances en el campo de la investigación minera.

La minería Peruana por la importancia que tiene como sector generador de divisas, debe ser la gran palanca del desarrollo futuro de la nación. Empresarios y profesionales tenemos la obligación de contribuir a este desarrollo.

Para el logro de estos objetivos, la Industria minera tendrá que utilizar los grandes adelantos en tecnología informática que tiene a su alcance, realizar inversiones en la adquisición de equipos y maquinaria de última generación, minimización de costos y tiempos, como consecuencia de la gran competitividad de precios; el creciente nivel de exigencia de los clientes, la necesidad de innovar y mejorar continuamente, la prevención de riesgos, que pueden ocasionar enormes pérdidas a las empresas, así mismo la conservación del medio ambiente que es una de las principales preocupaciones que afronta la mayor parte de industrias, todo esto nos obliga que, para poder prevalecer en los próximos años, va a ser preciso que las empresas actuales sean cada vez más eficientes.

Las empresas que no tengan una visión clara de sus objetivos o que teniéndolos no los persigan en los debidos términos de costo-eficiencia serán aquellas que con toda seguridad se vean fagocitadas por sus competidores.

Por ello la eficiencia es un concepto ligado a cumplir los objetivos tratando que la relación de los costes sobre la producción obtenida sea la menor posible. Para lograr estos objetivos hoy en día se requiere el uso de Tecnologías de punta, ya sean éstas de orden informático, productivo y de investigación, etc.

Nuestro modelo de Simulación, plantea la metodología de la Simulación discreta; en donde se incluye el factor de rozamiento del vehículo, como además las leyes del movimiento rectilíneo de un cuerpo.

Este modelo incluye un híbrido entre el proceso determinístico del movimiento de un volquete, y los procesos aleatorios de carga y descarga del mineral y material de desecho en sus respectivos echaderos.

De los resultados obtenidos de las alternativas planteadas se concluye lo siguiente:

- Teniendo como base la producción actual y los datos estadísticos del acarreo del mineral y el de desechos, se ha elaborado un modelo de simulación que reproduce el movimiento de los camiones, el número de vueltas que estos realizan en sus operaciones de carga, descarga, retorno y sus tiempos de espera frente a las palas eléctricas, teniendo como restricciones el turno de 6 horas y los costos operativos incurridos, que serán utilizados como parámetros en las siguientes alternativas de solución (*ver Tabla 4.3*)
- **En la Primera alternativa de solución**, se remueven un total de 3,090 TM. de mineral y 20,242 TM. de desecho a un costo operativo de \$0.62 y \$0.39 por Tonelada respectivamente, empleando las mismas palas pero reemplazando los camiones por otros de mayor tonelaje, los resultados que nos muestra la simulación saltan a la vista, ya que no se alcanza la meta del acarreo de desecho, los costos siguen siendo casi los mismos, igualmente la productividad pala-camión es deficiente, analizando los

resultados de los tiempos de espera de los camiones nos permiten obtener otra alternativa que se ajuste a los requerimientos de producción de acarreo y también tomar la decisión de alquilar palas de mayor capacidad. (*ver Tabla 4.4*)

- \* **Para la Segunda alternativa** el volumen de mineral transportado es de 3,120 TM. y 34,428 TM. de desecho a un costo operativo de \$0.54 y \$0.26 por Tonelada respectivamente, por la utilización de dos palas eléctricas de mayor capacidad (16.7 m<sup>3</sup>) así como camiones de mayor tonelaje (120 TM), lo que genera también un aumento en la productividad y eficiencia en el match pala-camión. Esta alternativa resulta ser la más ventajosa para la empresa puesto que: los niveles de producción, así como los costos por tonelada de mineral y desecho removido alcanzan las metas esperadas diarias a un menor precio, dentro del límite de un turno de 6 horas. (*Ver Tabla 4.5*)

El siguiente cuadro comparativo demuestra que los resultados obtenidos por la Segunda Alternativa para una operatividad de 30 días y con los costos actuales *de \$0.62 y \$0.39*, se produce un ahorro significativo que justifica la metodología empleada para este propósito cual es la simulación de eventos discretos:

### Cuadro Comparativo de Costos por Tonelada Métrica

Tipo	Requerimientos de Producción		Actual		Alternativa Económica		Diferencia
	Producción diaria TM.	Producción mensual TM.	Costo Por TM (\$)	Total \$	Costo Por TM (\$)	Total \$	
Mineral	3,050	91,500	0.62	56,730.00	0.54	49,410.00	7,320.00
Desecho	34,500	1,035,000	0.39	403,650.00	0.26	269,100.00	134,550.00
					Ahorro Mensual		<b>141,870.00</b>

y consecuentemente, la importancia de utilizar estas técnicas para realizar diseños de respuesta rápida, minimización de tiempos y costos y previsión de riesgos operativos en la toma de decisiones para la consecución de los objetivos de producción.

# ANEXOS

## ANEXO 1: Glosario de Términos

**WAIT**, espera

**LOAD**, Carga de mineral o desecho

**DUMP**, Echadero, Depósito de mineral o desecho

**QUEUE**, Cola, camiones en fila

**DELAY**, Demora, retraso en la cola

**LINKING TOOL**, Herramienta de relación

**SEIZE**, Tomar

**ROUTE**, Ruta, vía

**RELEASE**, Dejar la pala

**LABEL**, etiqueta

**SERVER MODULE**, Módulo servidor

**SCHEDULE**, Horario

**ARRIVE**, Arribar a una Pala

**DEPART**, Dejar o partir

**ASSIGN**, Asignar

**DISPOSE**, Disponer

**REPLICATE**, Replicar

**TRACE**, Rastrear

**DEBUG**, Depurar de errores

**TALLY**, Vincular

**DBSTAT**, Abrev. de Estadística Discreta

**BRANCH**, Rama, ramificación

**ALTER**, Modificar

**LSA**, Atributos Lógicos Estándar



**GENERATE**, Generar un bloque o transacción

**STOCK PILES**, Reserva de existencias de mineral

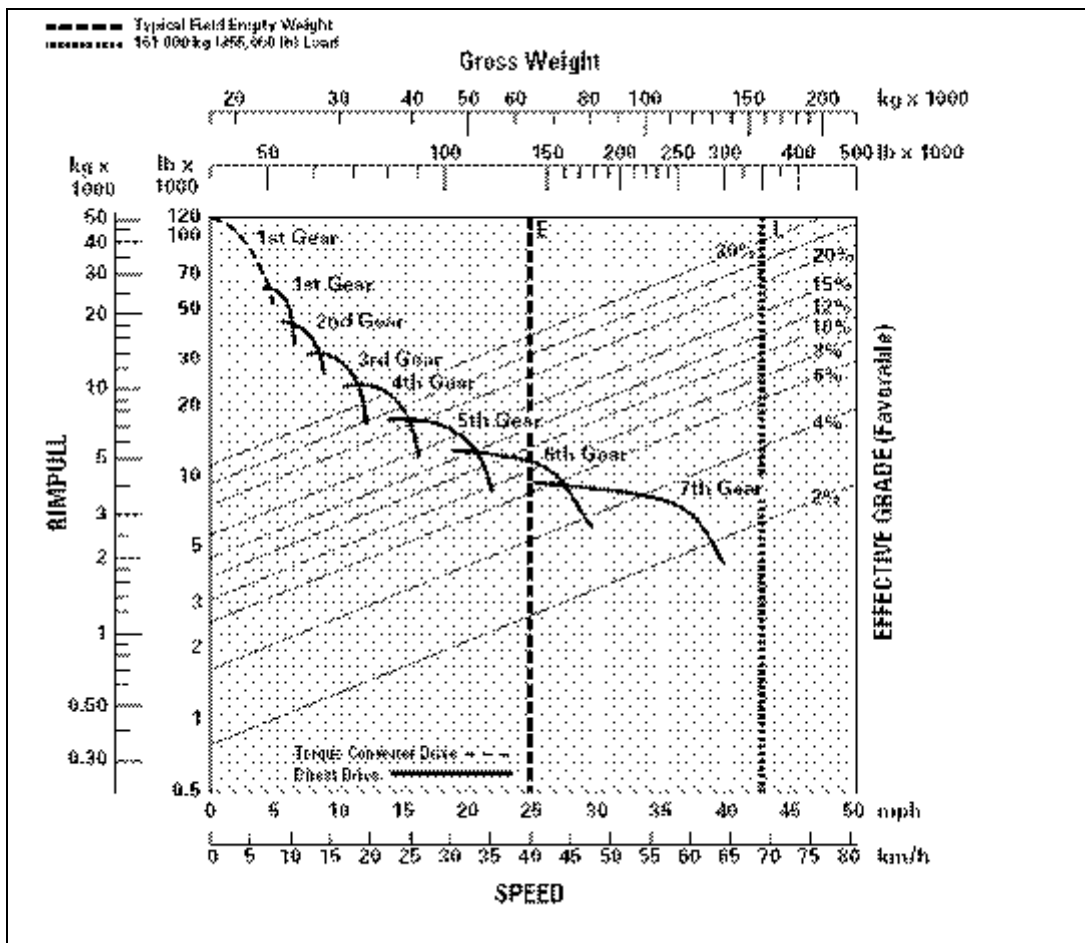
**LOAD-HAUL**, Sistema Carga- Arrastre

**RIMPULL**, Parámetro de aceleración para un vehículo; es una consecuencia de factores como el rozamiento.

**OPEN PIT**, tajo abierto o minería a cielo abierto(o minería de superficie).



## Anexo 2: Gráfico de la Curva Rimpull



## **Anexo 3: Evaluación de la Alternativa II, en el Supuesto de que se opte por la Adquisición de 6 camiones de 120 TM y 2 Palas de 16.7 m<sup>3</sup>**

De la Alternativa II se desprende realizar una Evaluación de costos y gastos por la Adquisición de estos equipos mediante un financiamiento tipo Leasing, las cuotas mensuales incluyen amortización de la deuda, intereses, y pago de IGV en un horizonte de 5 años (60 meses). En los cuadros se muestran los resultados de ambas opciones, una de ellas correspondiente al Alquiler de dichos equipos, costos de Alquiler, Costos Operativos (Combustible, Mano de Obra) para un período de 5 años.

Así mismo en el siguiente cuadro se detallan los costos de Adquisición, y costos Operativos que incluyen Combustible, Lubricantes, Mano de Obra, Mantenimiento y Reposición de Neumáticos, para el mismo período.

Ambos resultados son comparados para obtener conclusiones que deben ser analizadas para una toma de decisiones que convengan más la empresa, tomando en consideración los siguientes aspectos:

- \* Los Equipos mediante la opción de alquiler pueden ser reemplazados por otros de mayor capacidad o tecnología según convenga por la cantidad de remoción de material de desecho (Aumento o Disminución).
- \* Periodo de Explotación del Yacimiento de acuerdo a sus reservas probadas.
- \* Vida útil de los equipos adquiridos dentro de la duración del período de explotación, y
- \* Capacidad de financiamiento de la Empresa para cubrir los desembolsos iniciales (cuota inicial, gastos de comisión por Opción de Compra).

En el siguiente cuadro se muestra el Resumen de costos totales para el final del período:

Descripción	Opción Compra	Opción Alquiler	Diferencia
<b>Adquisición</b>			
6 Camiones - Total	16,664,037.96	9,891,072.00	6,772,965.96
2 Palas - Total	6,409,245.36	4,676,400.00	1,732,845.36
<b>Sub Total US\$</b>	<b>23,073,283.32</b>	<b>14,567,472.00</b>	<b>8,505,811.32</b>
<b>Costos Operativos</b>			
Consumo (Combustible, Lubr.)	959,904.00	872,640.00	87,264.00
Mantenimiento	3,198,744.00	0.00	3,198,744.00
Neumáticos	430,557.12	0.00	430,557.12
Mano de obra	734,400.00	734,400.00	0.00
<b>Sub Total US\$</b>	<b>5,323,605.12</b>	<b>1,607,040.00</b>	<b>3,716,565.12</b>
<b>Totales US\$</b>	<b>28,396,888.44</b>	<b>16,174,512.00</b>	<b>12,222,376.44</b>

Se concluye entonces y debido también a las consideraciones anteriores que, la Opción de Alquiler se muestra como la más ventajosa para la empresa debido al ahorro de US\$12,222,376.44.

LEASING :

**(REVISAR EN FORMATO IMPRESO)**

**COSTOS OPERATIVOS Y DE ALQUILER DE 2 PALAS 16.7 M3 Y 6 CAMIONES 120 TM  
HORIZONTE 5 AÑOS EN US\$ DOLARES**

<b>ALQUILER CAMION 120 TM</b>	
<b>COSTO ALQUILER/HORA</b>	152.64
<b>COSTO MENSUAL:</b>	<b>27,475.20</b>
<b>TOTAL UNIDADES:</b>	6

<b>ALQUILER PALA 16.7 M3</b>	
<b>COSTO ALQUILER/HORA</b>	216.50
<b>COSTO MENSUAL</b>	<b>38,970.00</b>
<b>TOTAL UNIDADES:</b>	2

<b>AÑOS</b>	<b>PERIODOS</b>						<b>Total</b>
	0	1	2	3	4	5	
<b>Alquiler</b>							
Palas (2)	0.00	935,280.00	935,280.00	935,280.00	935,280.00	935,280.00	4,676,400.00
Camiones (6)	0.00	1,978,214.40	1,978,214.40	1,978,214.40	1,978,214.40	1,978,214.40	9,891,072.00
<b>Sub Total</b>	<b>0.00</b>	<b>2,913,494.40</b>	<b>2,913,494.40</b>	<b>2,913,494.40</b>	<b>2,913,494.40</b>	<b>2,913,494.40</b>	<b>14,567,472.00</b>
<b>Costos Operativos</b>							
Consumo Combustible	0.00	174,528.00	174,528.00	174,528.00	174,528.00	174,528.00	872,640.00
Mantenimiento	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Neumáticos	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mano de obra	0.00	146,880.00	146,880.00	146,880.00	146,880.00	146,880.00	734,400.00
<b>Sub Total</b>	<b>0.00</b>	<b>321,408.00</b>	<b>321,408.00</b>	<b>321,408.00</b>	<b>321,408.00</b>	<b>321,408.00</b>	<b>1,607,040.00</b>
<b>Totales</b>	<b>0.00</b>	<b>3,234,902.40</b>	<b>3,234,902.40</b>	<b>3,234,902.40</b>	<b>3,234,902.40</b>	<b>3,234,902.40</b>	<b>16,174,512.00</b>

\* El costo de alquiler incluye los costos de Lubricantes, Neumáticos y Mantenimiento

\* Turno Operativo diario de 6 horas

\* El costo de alquiler incluye IGV

**COSTOS OPERATIVOS Y DE ADQUISICION DE EQUIPOS - 2 PALAS 16.7 m3 Y 6 CAMIONES 120 TM  
HORIZONTE 5 AÑOS (EN US\$ DOLARES)**

ADQUISICION DE 6 CAMIONES 120 TM	
VALOR DEL BIEN:	10,920,000.00
IGV 19%:	2,074,800.00
PRECIO DEL BIEN:	12,994,800.00
TASA ANUAL LEASING:	14%
CUOTA INICIAL 20%	2,598,960.00
PLAZO:	60 MESES
CUOTA MENSUAL:	<b>226,187.93</b>

ADQUISICION DE 2 PALAS DE 16.7 M3	
VALOR DEL BIEN:	4,200,000.00
IGV 19%:	798,000.00
PRECIO DEL BIEN:	4,998,000.00
TASA ANUAL LEASING:	14%
CUOTA INICIAL 20%	999,600.00
PLAZO:	60 MESES
CUOTA MENSUAL:	<b>86,995.36</b>

AÑOS	PERIODOS						Total
	0	1	2	3	4	5	
<b>Adquisición</b>							
Amortización	2,598,960.00	1,258,836.44	1,435,073.55	1,635,983.84	1,865,021.58	2,126,124.60	10,920,000.01
Intereses	0.00	1,022,050.20	845,813.10	644,902.81	415,865.07	154,762.05	3,083,393.23
IGV	493,802.40	433,368.46	433,368.46	433,368.46	433,368.46	433,368.46	2,660,644.72
<b>6 Camiones - Total</b>	<b>3,092,762.40</b>	<b>2,714,255.11</b>	<b>2,714,255.11</b>	<b>2,714,255.11</b>	<b>2,714,255.11</b>	<b>2,714,255.11</b>	<b>16,664,037.96</b>
Amortización	999,600.00	484,167.86	551,951.36	629,224.55	717,315.99	817,740.23	4,200,000.00
Interes	0.00	393,096.23	325,312.73	248,039.54	159,948.10	59,523.86	1,185,920.47
IGV	189,924.00	166,680.18	166,680.18	166,680.18	166,680.18	166,680.18	1,023,324.89
<b>2 Palas - Total</b>	<b>1,189,524.00</b>	<b>1,043,944.27</b>	<b>1,043,944.27</b>	<b>1,043,944.27</b>	<b>1,043,944.27</b>	<b>1,043,944.27</b>	<b>6,409,245.36</b>
<b>Sub Total</b>	<b>4,282,286.40</b>	<b>3,758,199.38</b>	<b>3,758,199.38</b>	<b>3,758,199.38</b>	<b>3,758,199.38</b>	<b>3,758,199.38</b>	<b>23,073,283.32</b>
<b>Costos Operativos</b>							
Consumo (Combustible, Lubr.)	0.00	191,980.80	191,980.80	191,980.80	191,980.80	191,980.80	959,904.00
Mantenimiento	0.00	639,748.80	639,748.80	639,748.80	639,748.80	639,748.80	3,198,744.00
Neumáticos	0.00	0.00	0.00	430,557.12	0.00	0.00	430,557.12
Mano de obra	0.00	146,880.00	146,880.00	146,880.00	146,880.00	146,880.00	734,400.00
<b>Sub Total</b>	<b>0.00</b>	<b>978,609.60</b>	<b>978,609.60</b>	<b>1,409,166.72</b>	<b>978,609.60</b>	<b>978,609.60</b>	<b>5,323,605.12</b>
<b>Totales</b>	<b>4,282,286.40</b>	<b>4,736,808.98</b>	<b>4,736,808.98</b>	<b>5,167,366.10</b>	<b>4,736,808.98</b>	<b>4,736,808.98</b>	<b>28,396,888.44</b>

- \* La vida útil de un camión minero y de una pala eléctrica son 40,000 horas para ambos (Tabla 1)
- \* El valor residual del equipo al final de su vida útil se da entre el 15 Y 20%
- \* La duración de los neumáticos es de 5,000 horas o 80,000 Km. (se debe hacer el cambio aprox. A los 2 años y medio de uso)
- \* El costo de un neumático marca Michelin tipo 33.00R51, especificado para el camión de 120 Toneladas es de US\$ 11,959.92
- \* Se necesitan 6 neumáticos por camión
- \* Costo Aproximado de lubricantes 10% del costo horario por consumo combustible (Tabla 2)
- \* Costo de Mant/hora =  $(\text{Precio de Adquisición} - \text{Precio de Neumáticos} \times \text{Factor de Reparación}^*)$  (Tabla 3)

Horas de vida x 100

**TABLA 1 - VIDA UTIL DE LOS EQUIPOS - horas**

EQUIPO	CONDICIONES DE TRABAJO		
	Buenas	Medias	Duras
Palas	40,000	30,000	20,000
Volquetes	40,000	30,000	20,000

Fuente: Manual de arranque, carga y transporte en minería a cielo abierto  
Instituto Tecnológico Geominero de España - Año 2001

**TABLA 2 - COSTO DE LUBRICANTES**

EQUIPO	Costo de Lubricantes, grasas y filtros en función del costo de combustible %
Palas	20 - 25
Volquetes	10 - 15

Fuente: Manual de arranque, carga y transporte en minería a cielo abierto  
Instituto Tecnológico Geominero de España - Año 2001

**TABLA 3 - FACTOR DE COSTO DE MANTENIMIENTO**

EQUIPO	CONDICIONES DE TRABAJO		
	Buenas	Medias	Duras
Palas	60	62	65
Volquetes	85	90	100

Fuente: Manual de arranque, carga y transporte en minería a cielo abierto  
Instituto Tecnológico Geominero de España - Año 2001

## BIBLIOGRAFÍA

- SIMULACION DE SISTEMAS DISCRETOS

Jaime Barceló. Publicaciones de Ingeniería de Sistemas. ISDEFE 1996 (España)

- SOFTWARE DE SIMULACIÓN

Xavier Pi. Josep Casanovas. Facultad de Informática de la U.P.C. Barcelona

Revista Automática e Instrumentación. Junio 1996.

- SYSTEMS MODELING AND SIMULATION

Naim A. Kleir. Electrical Engineering and Electronics. Marcel Dekker, Inc.

- SIMULATION & ANIMATION (Manual y Referencias de GPSS/H)

Peter Lorenz catedrático de la Universidad de Magdeburg Alemania

- INTRODUCCION A SIMAN-ARENA

Pedgen Dennis C. System Modeling Corporation

- REVISTA MINERIA (Nº 310 Julio 2003 a Nº 315 Diciembre 2003)

Revista del Instituto de Ingenieros de Minas del Perú ([www.iimp.org.pe/mineria](http://www.iimp.org.pe/mineria))

- Art. “LA INDUSTRIA MINERA Y LOS DESAFIOS DE LA GLOBALIZACION”

Revista Minería Nº 310 Julio 2003

Arratia Rubén, 2001

- Art. “CARBON MINERAL: EL RECURSO QUE EL PERU DESDEÑA”

El Peruano sección Economía/Indicadores (9/10/2001)

- Art. “FACTORES QUE AFECTAN PRODUCTIVIDAD Y COSTO EN EL CARGUÍO Y TRANSPORTE”

[www.editec.cl/mchilena/dic2003/Articulo/informe.htm](http://www.editec.cl/mchilena/dic2003/Articulo/informe.htm)

- Manuales Camiones Todo Terreno Komatsu

Komatsu Modelo HD255-5 (25 Ton)

Komatsu Modelo HD465-7 (55 Ton)

Komatsu Modelo HD785-5 (91 Ton)

- Manuales Excavadoras Hidráulicas Komatsu

Komatsu Modelo PC1250-7 (8.8 yd3)

Komatsu Modelo PC1800-6 (15.7 yd3)

Komatsu Modelo PC3000-6 (19.5 yd3)

- Manuales Shovels HITACHI

Modelo Super EX1200 (8.5yd3)

Modelo EX2500 (19.6 yd3)

Modelo EX3600 (28.8 yd3)