REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

"MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DEL MINADO Y REMANIPULACIÓN DE MINERAL EN UNA MINA A TAJO ABIERTO"

Tesis Presentada por la Bachiller:

Morales Pulcha Melanie Andrea,

Para optar por el Título Profesional de:

Ingeniera de Minas.

Asesora: Ing. López Casaperalta Patricia

Arequipa – Perú

2019

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIAS FISICAS Y FORMALES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA DE MINAS

INFORME DICTAMINATORIO DE BORRADOR DE TESIS

VISTO

EL BORRADOR DE TESIS TITULADO:
"MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DEL MINADO Y REMANIPULACION DE MINERAL EN UNA MINA DE TAJO ABIERTO"

PRESENTADO POR (EL) (LOS) BACHILLER (ES):
MORALES PULCHA MELANIE ANDREA

NUESTRO DICTAMEN ES:
FAVORABLE SIN OBSERVACIONES

OBSERVACIONES:

Arequipa, _____

JURADO DICTAMINADOR
Nombre: Patricia López Carpenalta
Código: 2872

JURADO DICTAMINADOR
Nombre: Fulton Carlos REATEGUI ORDOÑEZ
Código: 3119.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Copyright © 2019 por Morales Pulcha Melanie Andrea & “MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DEL MINADO Y REMANIPULACIÓN DE MINERAL EN UNA MINA A TAJO ABIERTO”. Todos los derechos reservados.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

AGRADECIMIENTOS

Quiero empezar nombrando a Dios en este espacio, agradeciéndole la vida y la salud que me ha concedido a lo largo de ésta.

A mi madre por darme siempre lo mejor para mí en todo aspecto, pero más importante poder brindarme la oportunidad de estudiar una profesión, ella fue mi motivación y ejemplo para cumplir cada reto que fueron presentados en mi vida y si soy quien soy ahora es gracias a ella.

A mi abuelita Teresa Pulcha gran madre de todos, un ejemplo de bondad y humildad con los cuales me crió, por siempre apoyarme y nunca rendirse. Agradecer a mis tías también, Lucero y Melania que siempre estuvieron conmigo cuando más lo necesitaba.

A la Ing. Patricia López por asesorarme en el desarrollo de esta investigación, aconsejándome y guiándome con las mejores prácticas en base a su experiencia.

También quiero agradecer a todos mis profesores de la escuela de Ingeniería de Minas por sus enseñanzas y experiencias transmitidas para poder desempeñarme como profesional en el ámbito laboral.

Y por último, pero no menos importante, agradecer a todos los profesionales compañeros de trabajo y jefes que depositaron su confianza en mí en las organizaciones que estuve desarrollándome como profesional, además de compartirme sus conocimientos y experiencias.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

RESUMEN

Los costos de carguío y acarreo están sujetos a la utilización de los equipos, así como la producción que dependerá del proceso de carguío y la cantidad de camiones que tengan asignados las palas o cargadores.

El siguiente trabajo de investigación está enfocado en el contexto de una faena minera a tajo abierto en donde los procesos de carguío y acarreo serán representados mediante un modelo de simulación construido en el software Arena.

La representación del sistema en virtual, ayudará a examinar las condiciones técnicas y económicas más adecuadas, evaluando las rutas y prácticas que viene realizando la mina en el minado de mineral. El almacenamiento temporal de mineral representa un costo horario de los equipos adicional.

El trabajo de investigación trata de demostrar mediante los indicadores de desempeño la productividad de los camiones en el minado de bancos de mineral, fue necesario realizar la experimentación de varios escenarios para determinar la asignación óptima de camiones.

El modelo de simulación puede ser utilizado para otras operaciones mineras con la modificación de las variables propias de cada mina.

Palabras Clave: Simulación, experimentación, análisis de escenarios, optimización de recursos.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

ABSTRACT

The costs of loading and hauling are subject to the use of the equipment, as well as the production that will depend on the loading process and the number of trucks assigned to the shovels or loaders.

The following research work is focused on the context of an open-pit mining operation where the loading and hauling processes will be represented by a simulation model built by the Arena software.

The representation of the system in virtual will help to examine the most appropriate technical and economic conditions, evaluating the routes and practices that the mine is carrying out in the mining of ore. The temporary storage of ore represents an additional hourly cost of the equipment.

The work tries to demonstrate through the performance indicators the productivity of the trucks in the mining of mineral banks, it was necessary to carry out the experimentation of several scenarios to determine the optimal allocation of trucks.

The simulation model can be used for other mining operations with the modification of the variables of each mine.

Keywords: Simulation, experimentation, analysis of scenarios, optimization of resources.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

INTRODUCCIÓN

La industria minera ha demostrado ser la más trascendente desde sus inicios en la época de la conquista, en donde los españoles vinieron al Perú en busca del oro y demás minerales y hasta la actualidad se ha mantenido como la actividad económica de mayor relevancia.

En la actualidad se consumen más de 22 millones de toneladas de cobre en el mundo (Fuente: Commodity Market Analysis, 2018), siendo los principales consumidores los del sector tecnológico y probablemente esta cantidad se incremente en los años siguientes. Esto nos demuestra que la minería seguirá siendo la actividad económica más importante y por consecuente más competitiva en un futuro.

Es por eso que las empresas mineras cada vez más apuestan e invierten por la ciencia, la tecnología, el diseño y planeamiento en sus procesos. Entonces cada faena de extracción o proceso estarán sujetas al estudio y mejora constante aplicando ingeniería en función a la tecnología emergente y a la problemática del agotamiento de los yacimientos de mejor ley, obligándolos a la reducción de costos y mejora de sus procesos, a fin de prepararse para incrementar sus ganancias en los periodos finales de un proyecto.

Una de las técnicas que utiliza la ingeniería para la mejora de los procesos es la simulación, que nos ayuda a la representación computacional de un sistema real.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Este trabajo de investigación presenta un modelo de simulación de carguío y acarreo de una mina a cielo abierto, ya que las metodologías y prácticas recientemente utilizadas han puesto en jaque al sistema, afectando la productividad y costo donde será reflejado en el Capítulo 5.6.

Y como bien sabemos un camión más, un camión menos o la mala distribución de ellos generan tiempos improductivos en la pala tanto como para los camiones, como colas, bajas eficiencias; en conclusión, grandes pérdidas de dinero para la empresa minera.

En el presente trabajo de investigación se muestra un ejemplo de lo que se puede lograr al aplicar la técnica de simulación en la minería.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos……....iii

Resumen……....iv

Abstract……...……v

Introducción……...vi

CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA…….…..1

1.1. Descripción del Problema……...1

1.2. Formulación del problema…….….3

1.3. Justificación del problema…….……3

1.4. Objetivos……..…….……..5

1.4.1. Objetivo general…….……5

1.4.2. Objetivos específico……..……..…..5

1.5. Alcances y limitaciones…….…….....6

1.5.1. Alcances…….……....6

1.5.2. Limitaciones…….……..6

1.6. Hipótesis…….……7

1.7. Variables…….……7

1.7.1. Variables independientes…….……..……...7

1.7.2. Variables dependientes…….……....7

1.7.3. Funciones Lógicas de variables...…….……....8

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

1.8. Desarrollo metodológico……..……..…8

1.8.1. Modelos Cuantitativos Descriptivos...…….……..……...9

1.8.2. Formulación del Modelo Lógico Matemático……..……....9

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO…….....12

2.1. Teoría de Colas……..…….12

2.2. Conceptos principales de simulación……..……...……..13

2.2.1. ¿Qué es la simulación de sistemas?.....13

2.2.2. ¿Qué es la simulación de eventos discretos?.....14

2.2.3. Objetivos de la simulación de eventos discretos……15

2.3. Conceptos básicos…….16

2.4. Tipos de modelos……..18

2.4.1. Modelos físicos…….……..18

2.4.2. Modelos lógicos y/o matemáticos……..18

2.5. Tipos de simulaciones……...…19

2.5.1. Simulación estática contra dinámica……..19

2.5.2. Simulación continua contra discreta……..19

2.5.3. Simulación determinista contra estocástica…….……...19

2.6. Aleatoriedad en la simulación…….……..20

2.6.1. Variables Aleatorias…….……..20

2.6.1.1. Discretas…….……...20

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

2.6.1.2. Continuas……..……..20

2.7. Elementos de un modelo de simulación…….……...22

2.7.1. Entidades…….……...22

2.7.2. Atributos..…….……..22

2.7.3. Variables…….……23

2.7.4. Recursos…….23

2.7.5. Acumuladores estadísticos…….23

2.7.6. Reloj de simulación…….23

2.8. Software Arena ®…….24

2.8.1. Módulos usados para la simulación……..26

2.8.2. Módulos de datos……..28

2.9. Antecedentes……..30

2.9.1. Aplicación de la simulación en minería……...……..32

2.9.2. Ventajas y desventajas de la simulación……...…….32

2.9.2.1. Ventajas……...……..32

2.9.2.2. Desventajas……...…….34

CAPÍTULO III

3. DESCRIPCIÓN DE LA OPERACIÓN MINERA…….…….……36

3.1. Ubicación y Generalidad…….……..36

3.2. Geología…….……...36

3.3. Operaciones Mina…….……....38

3.3.1. Perforación y Voladura…….…….38

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

3.3.2. Carguío…….…….39

3.3.3. Acarreo…….……..…39

3.3.4. Servicios Auxiliares……...…….39

3.4. Servicios Técnicos……..……...41

CAPÍTULO IV

4. ETAPAS PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN…..….42

4.1. Formulación del problema……...…….44

4.2. Comprensión del sistema a estudiar……...……...45

4.3. Recolección de datos……...……..46

4.3.1. Métodos para la recolección de datos……...……..47

4.3.1.1. Calcular la distribución probabilística……...……....48

4.3.1.2. Evaluación de la bondad de ajuste……..…….….48

4.4. Construcción de modelo……...…….49

4.5. Verificación y validación del modelo……..…….50

4.6. Experimentación de escenarios…….……...51

4.7. Análisis de resultados……..…….52

CAPÍTULO V

5. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO A SIMULAR E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS…….53

5.1. Formulación del problema…….…53

5.2. Descripción del sistema a modelar…….…….....54

5.2.1. Tonelaje de mineral a minar del banco 3980 Alexa……...……55

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

5.2.2. Tiempos del ciclo de carguío……..55

5.2.3. Diagrama de destinos del caso de estudio……...56

5.2.4. Descripción de equipos……...57

5.3. Recolección de datos…….……57

5.3.1. Análisis de datos de tiempo de viaje lleno (SP-Chancadora)…….59

5.4. Construcción del Modelo a ser simulado en Arena……...63

5.4.1. Identificación de partes para el modelo……..63

5.4.2. Consideraciones para la construcción del modelo……..64

5.4.3. Diseño y construcción del modelo……..……...…….....65

5.4.4. Modelo de Simulación de Carguío y Acarreo……70

5.5. Verificación y validación del modelo ……...71

5.5.1. Verificación……71

5.5.2. Validación……...71

5.5.2.1. Escenario actual……72

5.5.2.2. Escenarios alternativos……..73

5.5.2.3. Experimentación y Análisis de escenarios para el cálculo de cantidad de camiones.....77

5.6. Análisis de resultados……83

CAPÍTULO VI .

6. Conclusiones……86

CAPÍTULO VII

7. Recomendaciones……88

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Cuadro de distribuciones de los tiempos ruta Banco 3980-SP……...61

Tabla 2. Cuadro de distribuciones de los tiempos rutas Banco SP-Chancadora……...62

Tabla 3. Cuadro de distribuciones de los tiempos ruta Banco 3980-Chancadora…….62

Tabla 4. Escenarios ruta Banco 3980-Stockpile……...74

Tabla 5. Escenarios ruta StockPile-Chancadora……...75

Tabla 6. Escenarios ruta Banco 3980-Chancadora……...75

Tabla 7. Cuadro Resumen con número de camiones por ruta……..83

Tabla 8. Costo horario de equipos……....84

Tabla 9. Cuadro de costos según ruta de remanejo……..84

Tabla 10. Cuadro de costos según ruta directa…….....85

Tabla 11. Cuadro comparativo de costos de minado……85

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa Geológico del yacimiento Alto Chicama……..…11

Figura 2. Mapa Geológico del yacimiento Alto Chicama……..…37

Figura 3. Etapas para el desarrollo de un modelo de simulación……..……43

Figura 4. Diagrama del Ciclo de carguío……..55

Figura 5. Diagrama del contexto a estudiar……..56

Figura 6. Histograma del tiempo de viaje lleno (SP-Chancadora)……...59

Figura 7. Reporte de análisis de pruebas de bondad, brindadas por Input Analyzer……60

Figura 8. Reporte de análisis del error cuadrado proporcionado por Input Analyzer……...61

Figura 9. Módulo Create……...66

Figura 10. Módulo Process……..…….67

Figura 11. Módulo Assign……68

Figura 12. Módulo Delay……68

Figura 13. Módulo Pickup……69

Figura 14. Módulo Dropoff……...69

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Figura 15. Modelo de Simulación de Carguío y Acarreo…….70

Figura 16. Template de análisis de escenarios con Process Analyzer……..……73

Figura 17. Grafico comparativo de variables en Ruta Banco 3980 – Stock Pile……..…77

Figura 18. Representación gráfica de cola en Pala con 4 Camiones…….78

Figura 19. Gráfico comparativo de variables en ruta Stock Pile – Chancadora…….……..79

Figura 20. Representación gráfica de cola en Pala con 7 Camiones…….80

Figura 21. Gráfico comparativo de variables en Ruta Banco 3980 – Chancadora……...81

Figura 22. Representación gráfica de cola en Pala con 9 camiones…….82

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Capítulo I

1. Planteamiento del Problema

1.1. Descripción del problema

En estos últimos años las diferentes empresas mineras buscan soluciones rápidas y eficaces para la toma de decisiones. Cuando se presenta un problema sin soluciones previstas las operaciones mineras pueden resultar afectadas generándonos pérdida de dinero y sobre todo de tiempo, es por eso que como técnica considerada dentro del proceso de automatización de la minería moderna utilizaremos la simulación, ésta nos permitirá desarrollar un modelo para ser aplicado en las operaciones de transporte de mineral a tajo abierto. Las tecnologías de simulación son actualmente técnicas indispensables, ya que nos permiten simular asignación de equipos, secuencia de producción y manejo de materiales que pueden ser evaluados previamente a fin de evitar actividades costosas en tiempo y dinero, disminuir el riesgo de decisiones tempranas y explorar un campo más amplio de posibles soluciones.

La problemática que se investiga nace en el contexto de una mina de oro a tajo abierto en sus últimos años de vida, donde la escasez de mineral va aumentando y la profundidad del tajo va llegando a la zona transicional de óxidos a sulfuros. La mina también presenta diferentes tipos de minerales, los cuáles son clasificados de acuerdo a su grado de pureza debido a los contaminantes presentes en el yacimiento.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

La caracterización y clasificación de minerales transicionales hasta el año 2018 consideraba parámetros Geometalúrgicos que imposibilitaba el envío de mineral transicional al Leach Pad restringiendo la clasificación de mineral.

Una vez realizada la evaluación y estimación de polígonos incluida una prueba metalúrgica, se tomaba una decisión en función de la evaluación económica y se definía el destino del mineral.

Este proceso por razones operativas incluía el remanejo del mineral en stocks transitorios donde el mineral era “Stockeado” hasta obtener los resultados de la prueba de extracción.

Podemos resumir la problemática en lo siguiente:

- Escasa utilización de herramientas virtuales que ayuden a la toma de decisiones sin perjudicar las operaciones en tiempo real.
- Nula información de parámetros geometalúrgicos en minerales transitorios.
- El costo horario de los equipos de carguío como de transporte reflejan un costo adicional producto de la remanipulación de los stocks de mineral transicional.
- La oportunidad de disponibilidad de equipos que se abandonará debido al uso de éstos por la remanipulación.

Por lo tanto, a raíz de esta problemática nace la idea de realizar un modelo de simulación que nos ayudará con el análisis de los diversos factores que influyen con el remanejo en los stocks temporales presentes en una mina a tajo abierto.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

1.2. Formulación del Problema

Entonces formulamos la problemática de cuán perjudicial puede resultar a la empresa minera realizar remanipuleo de mineral, ya sean diversos e innumerables los factores por el cuál se toma esta decisión. Es por eso que se propone utilizar la simulación como una herramienta para la evaluación de costos, tiempos y asignación de equipos en base a la teoría de colas, que ayudará a optimizar los procesos de carguío y acarreo.

1.3. Justificación del Problema

Se justifica la presente investigación en las siguientes razones:

- Los costos de carguío y acarreo representan la gran parte del costo total de minado siendo alrededor del 60%, de acuerdo a los costos operativos que posee cada mina como parte del Budged. Es por eso que el estudio y modelo a aplicarse en este trabajo de investigación nos ayudará a la toma de decisiones acerca del minado de los bancos y/o stocks temporales de mineral transitorios, sin generar pérdidas costosas en tiempo y dinero.

- Los supervisores de operaciones presentan poca disponibilidad y alcance de herramientas virtuales en simulación que les ayude a una mejor toma de decisiones a corto plazo con respecto al minado de sus frentes y/o stocks.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

- Los criterios de despacho de camiones en minería se basan principalmente en productividad y no se tiene en cuenta que tan productivos o costosos serían éstos de minar bancos o frentes directamente hacia chancadora o almacenarlos en stocks temporales como se viene haciendo en el contexto del estudio.

Se justifica realizar este proyecto de investigación por que se pretende orientar y tener una mejor visión de la productividad de los recursos a utilizarse para el remanipuleo a fin evitar pérdidas en dinero y tiempo. Además, el estudio y modelo podría servir de guía para posteriores estudios, pudiendo determinar las ubicaciones de los stocks temporales respecto a sus leyes y distancias entre dicho punto y chancadora.

Se justifica además porque tiene una relevancia económica que pretende dar una solución rápida y práctica al decidir si almacenar el mineral temporalmente resultará económico como se mostrará en los resultados finales de este estudio (Capítulo 5.6).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

El propósito principal de este trabajo es desarrollar un modelo de simulación que sirva de guía para analizar el efecto de la productividad y costo en los procesos de carguío y acarreo de mineral en frentes y/o stocks con destino chancadora. Y como resultado final, la toma de una decisión más óptima, minimizando los recursos en equipos a utilizarse.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Simular diferentes escenarios a fin de encontrar el numero óptimo de camiones a utilizar para cada ruta (directa y remanejo)
- Hallar el costo total de carguío y acarreo para cada alternativa de minado.
- Analizar los resultados e identificar los afectos que genera el doble manejo de mineral en la operación.
- Identificar los beneficios que trae la simulación como herramienta utilizada para este trabajo de investigación.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

1.5. Alcances y Limitaciones

1.5.1. Alcances

A toda supervisión de operaciones, planeamiento o jefaturas que necesiten de una decisión futura de forma rápida ante una situación atípica en el minado de sus proyectos en una mina a tajo abierto.

Las personas encargadas de la toma de decisiones, generalmente se basan en la experiencia y la intuición. La simulación se muestra como una herramienta de apoyo con sustento estadístico, que auxilie a los encargados a la toma de decisiones más confiables debido al desarrollo de un modelo.

1.5.2. Limitaciones

Las limitaciones que presenta este trabajo de investigación será que el software utilizado Arena v.14.70, se encuentra en su versión estudiantil que es ofrecido gratuitamente por Rockwell Automation® en su página de internet.

Si deseamos un análisis de mayor capacidad de procesamiento de datos se puede adquirir la licencia.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

1.6. Hipótesis

Dado que el remanejo de mineral representa una práctica improductiva, es posible que mediante el modelamiento y la simulación aplicando la teoría de colas se optimizará el uso de los recursos en el proceso de minado demostrando que el remanejo del mineral aborda un costo adicional en la operación.

1.7. Variables

1.7.1. Variables independientes:

- Tiempo de Carguío
- Tiempo de Acarreo
- Tiempo de Descarga
- Tonelaje de mineral por minar.

1.7.2. Variables dependientes:

- Costo de Carguío
- Costo de Acarreo
- Tiempo de cola en Pala
- Tiempo de cola en Chancadora
- Tiempo Total de Minado (hrs.)

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

1.7.3. Funciones lógicas de variables

- $C_{carguío} = f(T_{carguío})$
- $C_{acarreo} = f(T_{acarreo})$
- $T.cola_{pala} = f(T_{carguío}), f(T_{acarreo})$
- $T.cola_{chancadora} = f(T_{descarga}), f(T_{acarreo})$
- $T_{.minado} = f(ton.), f(T_{carguío}), f(T_{acarreo}), f(T_{descarga})$

1.8. Desarrollo Metodológico:

El siguiente trabajo de investigación estará desarrollado de la siguiente manera:

- Tipo de investigación: Experimental Aplicativa.
- Enfoque de investigación: Análisis Cuantitativo.
- Tipo de Hipótesis de Investigación: De Causalidad, con dos variables (independientes y dependientes).

La metodología es un conjunto definido y ordenado de procedimientos encaminados a resolver un problema en particular. Ruth Carrasco Gallego (2007) cita cuatro técnicas de investigación más habituales, en investigación de operaciones, los cuales son: estudio de casos, investigación-acción, investigación mediante encuestas y modelos cuantitativos, siendo estos últimos el objeto de estudio de este trabajo.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

1.8.1. Modelos Cuantitativos Descriptivos

Se caracterizan y llegan a comprender y explicar la estructura de un determinado fenómeno. Su interés reside en que, al entender las causas que motivan un determinado fenómeno, permiten anticipar su comportamiento futuro.

Con los modelos descriptivos también es posible elegir la solución más conveniente entre un conjunto de alternativas. Sin embargo, en lugar de ser el propio modelo quien apunta la elección en función de los criterios considerados, con los modelos descriptivos el decisor puede advertir las consecuencias de sus políticas y elegir en función de las predicciones realizadas la alternativa más adecuada.

En la categoría de modelos descriptivos se incluyen las técnicas de previsión de la demanda, los modelos de dinámica de sistemas, los modelos de **teoría de colas** y la **simulación de eventos discretos.**

1.8.2. Formulación del Modelo Lógico Matemático

En este trabajo la productividad de camiones, está definido por la reducción del tiempo de espera de camiones tanto en equipos de carguío como en la chancadora, mediante la óptima asignación de camiones a frentes de minado y descarga (stock), aplicando la teoría de colas en eventos discretos y simulando diferentes escenarios para encontrar la mejor solución. El caso más representativo del tiempo de espera de

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

los camiones en los frentes de minado es el que se muestra a continuación con su respectiva formulación matemática.

Cuando el camión (c) llega al frente de carguío, antes de que el camion0 (c_0) sea liberado por la pala.

$$HLLc = TNOW + Tvv \ldots\ldots (1)$$

$$HLc = HLLc + TCc \ldots\ldots\ldots (2)$$

$$TFc = HLc_0 - HLLc \ldots\ldots\ldots (3)$$

Tiempo de Ciclo

$$TClc = Tvv + TFc + TS + TCc + Tvll + TD$$

Donde:

TNOW: Hora del camión actual antes de ser despachado al frente

HLLc: Hora que el camión llega al frente

HLc: Hora de liberación del camión

Tvv: Tiempo de viaje vacío del camión

TFc: Tiempo en Fila del camión

TS: Tiempo de Spot (cuadrado) del camión en el frente

TCc: Tiempo de carguío del camión

Tvll: Tiempo de viaje lleno del camión del frente al destino

TD: Tiempo de descarga en el destino

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

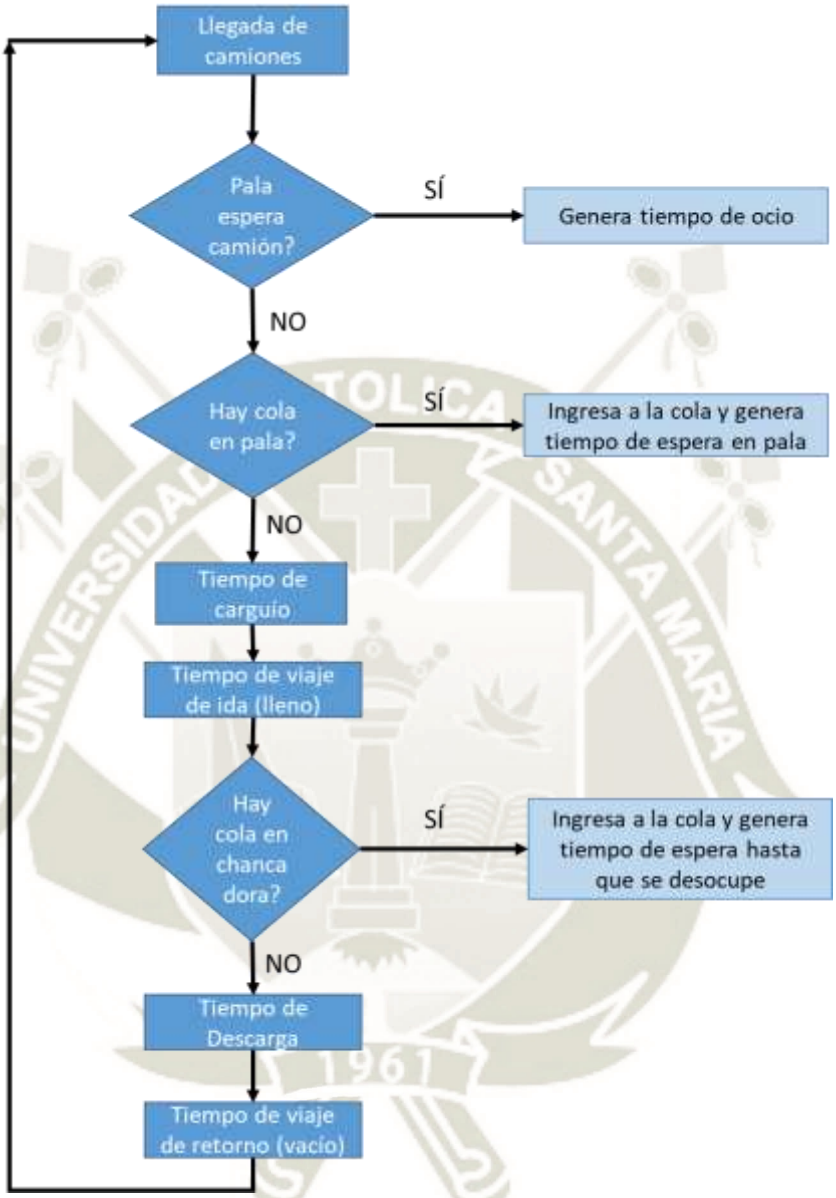


Figura 1. Diagrama de Flujo del Modelo Matemático de las Operaciones Unitarias de Carguío – Acarreo

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Capítulo II

2. Marco Teórico

2.1. Teoría de Colas

Como dice Kelton y Sadowski (2008), ya que existe una cola, ¿Por qué no usar una teoría de colas? Ha estado a nuestro alrededor durante casi un siglo y muchas personas muy brillantes han trabajo duro para desarrollarla. Esta teoría estudia factores como el tiempo de espera medio en las colas o la capacidad de trabajo del sistema sin que llegue a colapsar. Se forman debido a un desequilibrio temporal entre la demanda del servicio y la capacidad del sistema para suministrarlo.

La mayoría de las mediciones de desempeño de los resultados se pueden expresar como formulas sencillas. Por ejemplo, el tiempo de espera promedio en la cola (esperado de una ejecución larga) es:

$$\frac{{\mu_S}^2}{\mu_A - \mu_S}$$

Solo donde μ_A es el valor esperado de la distribución del tiempo entre llegadas y μ_S es el valor esperado de la distribución del tiempo del servicio (suponiendo que $\mu_A > \mu_S$ para que la cola no estalle).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

2.2. Conceptos Principales de Simulación

2.2.1. ¿Qué es la Simulación de Sistemas?

Una definición más práctica es aquella por Kelton, Sadowsky & Sturrock (2008) la simulación se refiere a un gran conjunto de métodos y aplicaciones que buscan imitar el comportamiento de sistemas reales, generalmente en una computadora y con un software apropiado**.**

También podemos citar a Law & Kelton (2018) que considera la simulación como una técnica que utiliza computadores, para imitar las operaciones de varios tipos de procesos.

Según Shannon (1975), el 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.

De acuerdo a Pinto Ricardo, L (2002) La programación matemática resuelve un gran número de problemas de una mina, pero a medida que tales problemas crecen, muchas veces surgen variables cuyo comportamiento no es determinístico y si aleatorio. En este caso la simulación se presenta como una herramienta poderosa en el estudio de estos sistemas para la resolución de problemas de interés.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Actualmente, con la evolución fantástica de los computadores en hacerlas más rápidas para el procesamiento de datos y tener mayor accesibilidad en los precios de éstas, la simulación se tornó como una herramienta bastante popular, su uso está creciendo substancialmente en los últimos años. Una de las causas de este crecimiento reside en el hecho de que con el uso de la simulación podemos crear modelos más realistas, lo que compensa con su menor precisión, comparada con los métodos determinísticos. Según Saliby (1988), dice que es preferible tener soluciones aproximadas para problemas más realistas, que tener soluciones exactas para problemas aproximados. También la simulación contribuye a la facilidad con la cual podemos responder vía simulación preguntas del tipo ¿y si cambiamos tal escenario cual sería el efecto sobre el modelo?

Entonces podemos resumir el concepto de simulación como una técnica que nos permita imitar, representar y recrear el funcionamiento de un sistema real a través de un computador, pudiendo experimentar el sistema con diferentes escenarios y/o alternativas de mejora a fin de elegir y tomar una decisión óptima.

2.2.2. ¿Qué es la simulación de eventos discretos?

Es la simulación de una secuencia de eventos que ocurren en el tiempo, asumiendo que nada importante ocurre entre esos eventos. Los sistemas de colas,

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

los sistemas de manufactura, los sistemas de inventarios; son sistemas de eventos discretos.

2.2.3. Objetivos de la simulación de eventos discretos

- Analizar sistemas tales como organizaciones, sistemas sociales, económicos, industriales, etc. A fin de comprender su comportamiento y buscar solución a sus problemas.
- Buscar una solución a problemas que no son resueltos por otros métodos matemáticos.
- El estudio de problemas complejos en condiciones experimentales sobre modelos que los representan sin afectar el funcionamiento del sistema.
- Proporcionar los fundamentos de una herramienta de estudio y solucionar problemas de diversas complejidades.
- Para verificar soluciones analíticas.
- Para determinar cuáles son las variables más importantes de un sistema.
- Para estudiar las relaciones más trascendentales entre los componentes de un sistema complejo.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

2.3. Conceptos Básicos

Según Kelton (2008) define lo siguiente:

a) Sistema: Es un conjunto de elementos que actúan interrelacionadamente con la finalidad de desarrollar funciones y actividades orientadas a alcanzar uno o más objetivos.

b) Relaciones: Define la estructura del sistema de acuerdo a los componentes que tiene y a sus atributos. Las relaciones son intercambios de informaciones entre los componentes de un sistema. Sobre la base de estas relaciones se elabora el modelo.

c) Estado de un Sistema: En cualquier instante que observemos un sistema, éste estará en una situación particular a la cual conocemos como estado. El estado del sistema queda definido por los valores que tiene sus características o atributos en el momento que lo observemos.

d) Modelo: Un modelo es una representación de un sistema de acuerdo al objetivo del estudio que sobre el sistema se desea realizar.

El modelo para simular es un modelo simbólico y de estos es un modelo matemático y lógico.

De acuerdo a la naturaleza de las variables y funciones que intervienen en la representación del sistema, estos modelos pueden ser:

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

- Discreto o continuo
- Estático o dinámico
- Determinístico o estocástico
- Analítico o numérico

e) Simulación: La simulación es un proceso que utiliza el modelo, el modelo usado es un modelo de simulación.

Un modelo de simulación no tiene una estructura definida como los modelos de optimización, cada modelo responde a una lógica del proceso del sistema.

f) Eventos: Son hechos que producen cambios de estado en el sistema, por ejemplo:

- Cuando arriba una entidad al sistema.
- Cuando finaliza la atención de una entidad.
- Cuando finaliza la simulación.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

2.4. Tipos de Modelo

2.4.1. Modelos Físicos

Es una réplica física o un modelo a escala del sistema, a veces llamado modelo icónico. Por ejemplo, los simuladores de vuelo para entrenar pilotos, modelos de escritorio en versiones miniatura como maquetas de edificaciones, simuladores físicos para entrenar operadores de camiones y/o palas, etc. Aunque los modelos icónicos han demostrado ser útiles en muchas áreas, no se considerarán en este estudio.

2.4.2. Modelos Lógicos y/o Matemáticos

Este tipo de modelo es un conjunto de aproximaciones y suposiciones estructurales y cuantitativas, acerca de la forma en que funciona o funcionará el sistema.

Por lo general, un modelo lógico se representa en un programa por computadora que se ejecuta para plantear preguntas acerca de comportamiento del modelo; si el modelo es una representación validada del sistema, también se deseará saber sobre el comportamiento del mismo. Puesto que se está tratando con un simple programa de computadora más que con el sistema real, por lo general es fácil barato y rápido obtener respuestas a muchas preguntas acerca del modelo.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

2.5. Tipos de Simulaciones

Una forma útil de clasificar modelos de simulación es a través de estas tres dimensiones, Kelton (2008).

2.5.1. Simulación Estática contra Dinámica.

El tiempo no desempeña un papel natural en los modelos estáticos, pero sí en los dinámicos.

2.5.2. Simulación Continua contra Discreta.

En un modelo continuo el estado del sistema puede cambiar continuamente en el tiempo; un ejemplo es el nivel de una presa conforme entra y sale el agua, y conforme suceden la precipitación y la evaporación. Sin embargo, en un modelo discreto el cambio puede ocurrir solo en puntos separados en el tiempo, tal como un sistema de fabricación con partes que llegan y se van en tiempos específicos, maquinas que se apagan y encienden en momentos específicos y descansos para los trabajadores, esto quiere decir que el sistema a medida que transcurre tiempo se verá sometido a algunos cambios.

2.5.3. Simulación Determinista contra Estocástica

Los modelos que no tienen entradas aleatorias son deterministas, la operación de una agenda de citas con tiempos de servicio fijos es un ejemplo. En cambio, los

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

modelos estocásticos, operan con entradas aleatorias, como un banco con clientes que llegan de forma aleatoria y que requieren tiempos de servicio variados.

2.6. Aleatoriedad en la Simulación

En términos estadísticos, lo que se obtiene de una corrida simple de una simulación es una *muestra de tamaño uno,* que no sirve de mucho. Podría ser muy imprudente poner mucha fé en él, y más aún tomar decisiones importantes basadas solo en ello. No podemos concluir que los todos los datos sean los mismos como entras y salidas de un sistema.

2.6.1. Variables Aleatorias

Una variable aleatoria es un numero cuyo valor se determina por el resultado de un experimento, así que se puede pensar en ella como en la cuantificación de un experimento. Técnicamente una variable aleatoria es una función definida del espacio muestral para los números reales. Una forma razonable de pensar en una variable aleatoria es que se trata de un número cuyo valor no se sabe de seguro antes de hacer el experimento, pero que, por lo general, se sabrá algo cerca de él.

El comportamiento probabilístico de una variable aleatoria se describe por su *distribución de probabilidad*. Las variables aleatorias se presentan en sus dos formas básicas (discretas y continuas).

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

2.6.1.1. Discretas

Se dice que una variable aleatoria es discreta si se toma un numero finito o el conjunto de posibles valores es numerable dentro de un intervalo. Por ejemplo, el número de componentes de una manada de lobos, puede ser 4 ó 5 ó 6 individuos, pero nunca 5.75 ó 5.87.

Densidad:

Se denomina densidad discreta a la probabilidad de que una variable aleatoria discreta X tome un valor numérico determinado (x). Se representa: ***f(x)*** = ***P[X=x]***

2.6.1.2. Continuas

Una variable aleatoria continua puede tomar cualquier valor real en un rango. El rango puede ser limitado o no en cualquiera de ambos extremos. No importa que tan estrecho sea el rango, una variable aleatoria continua siempre puede tomar números infinitos. Por ejemplos, Estatura de una persona elegida al azar en una población, los tiempos de arribo o viaje de los camiones, etc.

Densidad:

Diremos que una variable aleatoria X continua tiene una distribución absolutamente continua si existe una función real f, positiva e integrable en el conjunto de números reales, tal que la función de distribución F de X se puede expresar como: $F(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx$.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

2.7. Elementos de un modelo de simulación

Según Sturrock (2008) tenemos las siguientes definiciones:

2.7.1. Entidades

Es el elemento más importante del sistema, las entidades son objetos *dinámicos,* son creados al inicio, se mueven transcurriendo el tiempo dentro del sistema (camiones), pueden ser protagonistas de las colas y por último son desechados. Las entidades presentan atributos propios, pudiendo ser atendidos en servicio por un recurso.

2.7.2. Atributos

Son propiedades que poseen las entidades del sistema, los atributos describen a las entidades.

Ejemplo:

Sistema: Minado de un frente

Entidad: Camión

Atributos: Capacidad, prioridad, tiempo de viaje, tiempo entre arribos, densidad de material, etc.

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

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

2.7.3. Variables

Son elementos del sistema que toman diversos valores en el tiempo, sin importar cuantos o que tipos de entidades haya alrededor. Se puede tener muchas variables diferentes en un modelo, pero cada una es única.

2.7.4. Recursos

Los recursos representan las cosas, como personal, equipo (pala), una entidad se aprovecha de un recurso cuando está disponible brindando un servicio después son liberados cuando termina.

2.7.5. Acumuladores estadísticos

Para poder realizar un análisis de resultados, debemos obtener las mediciones de desempeño, es por eso que usamos acumuladores estadísticos conforme progrese la simulación. Algunos pueden ser, tiempo de espera en cola, utilización del recurso, tiempo de simulación, etc.

2.7.6. Reloj de simulación

Es una variable que recoge el tiempo actual de simulación, el reloj de simulación no se encarga de todos los valores ni fluye de manera continua, más bien va del tiempo de un evento al tiempo del siguiente evento programado.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

El reloj de simulación y el calendario de eventos en la simulación manual son piezas importantes de cualquier simulación dinámica, asi que Arena mantiene su rastro con la variable llamada “TNOW”.

2.8. Software Arena®

Para este estudio de simulación el software a utilizar será Arena. ¿Pero que es Arena? Arena es un simulador de eventos discretos para la optimización de procesos complejos, comprendido de una serie de módulos y herramientas que nos permiten crear y programar un modelo en representación de un sistema real en una computadora, permitiendo analizar rápidamente el comportamiento de un proceso a lo largo del tiempo.

Otra virtud de Arena es que, partiendo de un modelo diseñado nos permite realizar y procesar diferentes tipos de escenarios para buscar la solución de un problema o para implementar una mejora al sistema, permitiendo encontrar el mejor escenario minimizando el riesgo de una futura inversión.

Arena es una aplicación del sistema operativo Windows de Microsoft, así que su apariencia y percepción resultaran familiares y junto con su instalación encontramos un paquete con diferentes softwares de apoyo como el Input Analyzer, para el procesamiento estadístico de datos de entrada, adecuándolos a las diferentes distribuciones

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

probabilísticas como: Beta, Continua, Discreta, Erlang, Exponencial, Gamma, Jhohnson, Lognormal, Normal, Poisson, Triangular, Uniforme,Weibull, otro software dentro del paquete es el Output Analyzer que nos permite el análisis estadístico de comparación de medias y secuencia común para diferentes escenarios con bastantes réplicas grabados en un (.dat), por ultimo un software adicional y que lo usaremos para el análisis de los resultados de este estudio es el Process Analyzer, presenta herramientas bastante útiles y versátiles para la comparación de diferentes escenarios con variables sujetas a una modificación directa, el archivo es grabado con extensión (.p).

El proceso de modelamiento, se realiza semejante a la construcción de un flujograma, que va siendo construido a través de formas geométricas, que representan procedimientos, decisiones, inicio y termino de un proceso.

Arena comprende todos los recursos para el modelado, animación, análisis estadístico y análisis de resultado.

Una ventaja adicional de éste software es que utiliza una interfase gráfica y muy amigable para el usuario y/o analista, que automatiza el proceso a través del uso del “Mouse”, reduciendo la necesidad del teclado haciéndola más fácil y rápida su programación.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

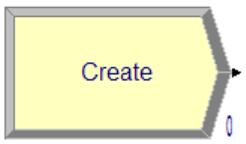
2.8.1. Módulos usados para la simulación

Conceptos basados según Kelton, Sturrock y Sadowski (2008):

Con el objetivo de construir correctamente un modelo para simularlo, es recomendable elaborar gráficamente (Diagrama de Flujo) el proceso a simular, de esta forma podemos ver si hay una adecuada comprensión del sistema, para ello necesitaremos un conjunto de símbolos y reglas para su utilización.

Proceso: Un proceso está formado por un conjunto de actividades que se pueden ejecutar en secuencia o en simultáneo sobre las entidades. Las actividades pueden requerir o no unidades de recurso. Si una actividad requiere de algún o algunos recursos entonces la disponibilidad de las mismas y su demanda pueden determinar que las entidades esperen por ellas en una cola o línea de espera.

a) Create: Es el punto inicial para que las entidades ingresen al modelo de simulación.



Parámetros: TEA, tiempo entre arribos; PA, primer arribo; MA, máximo arribo; EA, entidades por arribo. *Ej:* Las entidades llegan con un tiempo entre arribo que responde a una distribución exponencial con media de 4 minutos.

TEA: expo(4) min

PA: 0 min, valor por defecto

MA: infinito, valor por defecto

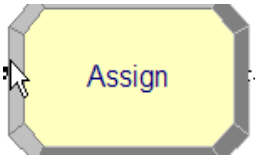
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

EA: 1 entidad, valor por defecto

b) Assing: Este símbolo es usado para asignar nuevos valores a variables y atributos. Se pueden realizar múltiples asignaciones. *Ej:* Los clientes llegan y pueden ser tipo 1 (40%) y clientes tipo 2 (60%), se desea guardar su hora de llegada y contar las entidades que llegan.

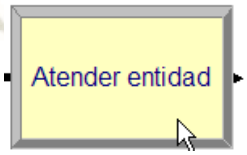


Harribo= tnow, es un atributo

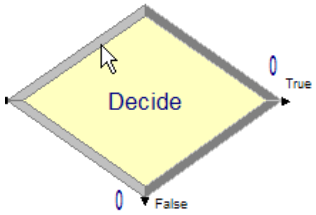
Tipo= Disc(0.4,1,1.0,2), atributo

Total= Total +1 , variable

c) Process: Es el símbolo principal en el proceso de la simulación, tiene como función representar cualquier acción que lleve tiempo de ser cumplida. Se debe definir la acción lógica del proceso con recurso reusable: Seize-Delay-Release, con recurso no reusable: Seize-Delay, sin recurso: Delay, liberar recurso tomado anteriormente: Delay-Release.



d) Decide: Este símbolo permite en el sistema elaborar un proceso de decisión. Esta decisión puede elaborarse a base de uno o más condiciones o basado en uno o más probabilidades.



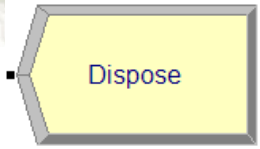
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

e) **Record:** Este módulo se usa para acumular y reportar estadísticas del modelo de simulación. Se dispone de varios tipos de estadísticas observables, incluyendo el tiempo entre salidas, estadísticas de entidad (tiempo, costos, etc.), observaciones generales y estadísticas de intervalo.

f) **Dispose:** Este símbolo es usado como punto final por las entidades en un modelo de simulación. Debe ser incluido siempre en el modelo para que la corrida de simulación funcione correctamente y no genere algún tipo de error.



2.8.2. Módulos de datos

No son colocados en el área de trabajo o donde se construye el diagrama, estos están presentes en el listado de herramientas y módulos, donde pueden ser editados, excluidos o introducidas nuevas informaciones, presentan una lista despegable con diferentes opciones y formas de programación, además se pueden construir expresiones para posibles respuestas en búsqueda de una solución.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE TESIS UCSM

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

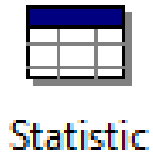
a) **Módulo Queue:**

Este módulo de datos se usa para modificar la regla para una cola en el sistema. La regla de la cola por defecto es First In, First Out a no ser que sea otra la definición en este módulo.

Posibles usos

- Cola de trabajos esperando un recurso en un módulo "Process".
- Área de almacenamiento de documentos que esperan ser cotejados siendo entidades las almacenadas en un modulo "Hold" o en un módulo "Batch" o "Match".

b) Módulo Statistic



Sirve para la construcción de reportes estadísticos como incógnitas o indicadores que deseamos conocer para el análisis de nuestro sistema y solución al problema. También es necesario programarlo para el análisis estadístico en el software Output Analyzer.

c) Módulo Variable

Este módulo de datos se utiliza para definir una dimensión de la variable y su valor(es) inicial(es). Las variables se pueden referenciar en otros módulos, se les puede reasignar un valor nuevo y se pueden emplear en cualquier expresión.

Posibles usos

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

- Número de documentos procesados por hora.
- Número serie a asignar a partes para una identificación única.
- Espacio disponible en un servidor.

2.9. Antecedentes

2.9.1. Aplicación de la Simulación en Minería

La simulación por computador se ha desarrollado más en los años 40 y 50 debido a que las capacidades y sofisticación han aumentado.

Anteriormente las compañías aeroespaciales y las de acero eran las únicas que poseían el privilegio de trabajar con la simulación, hablando de los años 50 y 60, pero poco después en la década de los 70 e inicios de los 80 las computadoras se hicieron más rápidas y baratas y el valor de la simulación empezó a ser descubierto por otras industrias entre ellas, la automotriz y la minera.

A medida que pasan los años la competitividad en la industria de la minería va aumentando, es por eso que la necesidad de eficiencia con los costos, transporte, impuestos y costo de materiales se ha vuelto un punto importante para las empresas. Una empresa exitosa debe asegurarse de que los costos asociados con el tiempo, los equipos y las inversiones están siendo considerados y optimizados.

En su esencia, la simulación en minería es una barata y libre de riesgo manera de probar cualquier cosa, desde simples modificaciones para completar rediseños,

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

pero siempre con el objetivo de cumplir con las metas de producción al menor costo posible. Además, a diferencia de un análisis y predicción basados en una hoja de cálculo, la simulación nos brinda los medios para ajustar parámetros y volver a simular de una manera rápida y eficiente ahorrando valioso tiempo.

En Europa se dieron los primeros estudios de simulación en minería y estos fueron del transporte en minas subterráneas (Segundo Paganiotou 1999, citado por Rodríguez, 2006). La mayoría de los primeros modelos eran implementados utilizando el lenguaje FORTRAN y, consecuentemente, resultaban en modelos difíciles de aplicar a diferentes situaciones encontradas en las minas.

Grados Ramírez, Luis (2009) Simuló el acarreo en minería subterránea utilizando el lenguaje GPSS/H con el objetivo de escoger el número correcto de volquetes asignados a un scooptram y también el tamaño más favorable del equipo.

Sánchez Ortiz, O. (2005) desenvolvió un modelo para determinar la mejor selección de equipos (pala, transportador) tanto en tamaños como en marcas, basado en una simulación determinística y otra probabilística.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

2.9.2. Ventajas y desventajas de la simulación

2.9.2.1.Ventajas

- La simulación nos permite analizar grandes problemas complejos para los que no están disponibles resultados analíticos, de hecho, la mayoría de problemas del mundo real encajan en esta categoría. La simulación proporciona una alternativa práctica.

- Es una herramienta ideal para cambiar e implementar alguna mejora dentro de un sistema, permitiendo ahorrar recursos, grandes inversiones, personal, equipos, etc.

- Permite identificar las variables con mayor impacto al ser modificadas, creando varios escenarios para luego escoger el más óptimo.

- Permite el análisis de sensibilidad.

- Auxilia el proceso de innovación ya que permite al experimentador observar y jugar con el sistema.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

- Generalmente es más barato mejorar el sistema vía simulación que hacerlo en el sistema real.

- Brinda métodos más simples y rápidos de solución que un análisis matemático complejo y sofisticado tanto como para usarlas, como para comprenderlas. La simulación puede requerir pocas o ningunas matemáticas complejas, por lo tanto, puede ser intuitivamente más comprensible.

- No es necesario interrumpir las operaciones de la compañía.

- Preguntas del tipo "¿qué pasa si?" pueden ser resueltas rápidamente sin riesgos económicos.

- La simulación permite control total sobre el tiempo, debido a que podemos comprimir o acelerar procesos para una planificación.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

2.9.2.2. Desventajas

- Un mal diseño de modelo puede resultar bastante costoso debido a que, si probamos el modelo diseñado en el sistema real y no refleja los resultados esperados, será una perdida para la empresa. Es por eso que los desarrollos de modelos de simulación resultan ser largos y complicados, además requiere de recursos humanos muy capacitados.

- Las salidas de datos en la simulación y las respuestas son a veces de difícil interpretación, porque los resultados son arrojados en un formato propio del software, donde encontraremos diversos indicadores confusos que son generados automáticamente por él.

- Los resultados obtenidos de una simulación se basan en números aleatorios, cuyos valores corresponden sólo a resultados posibles. Por lo tanto, los valores finales reportados son estimaciones de los valores reales que se está buscando.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

- Para que las estimaciones sean más exactas y para minimizar la probabilidad de tomar una mala decisión, se debería realizar un gran número de ensayos en cada simulación y/o repetir toda la simulación un gran número de veces. Para problemas más complejos, un gran número de repeticiones puede requerir cantidades significativas de tiempo de cómputo.

- Los resultados de simulación son numéricos; por tanto, surge el peligro de atribuir a los números un grado mayor de validez y precisión.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Capítulo III

3. Descripción de la Operación Minera

3.1. Ubicación y Generalidad

La operación donde se lleva a cabo este estudio de investigación se encuentra en la sierra norteña del país, ubicada en el departamento de La Libertad, provincia de Quiruvilca a una altura de entre 3700 y 4200 m.s.n.m.

La explotación del yacimiento se realiza mediante el método de minado a tajo abierto, siendo un deposito aurífero.

3.2. Geología

El yacimiento está dominado por el mesozoico, con rocas pelíticas y silicatadas pertenecientes a las formaciones Chicama y Chimú, respectivamente Reyes (1980).

Estas rocas mesozoicas son empujadas y dobladas en NW golpeando pliegues en el este y están débilmente metamorfoseadas a pizarra y cuarcita.

Rocas volcánicas del bajo nivel asignadas a El Grupo Calipuy se depositó de manera inconforme sobre los estratos mesozoicos plegados. La mineralización de oro es alojada por la formación silicatada de Chimú y los estratos volcánicos suprayacentes.

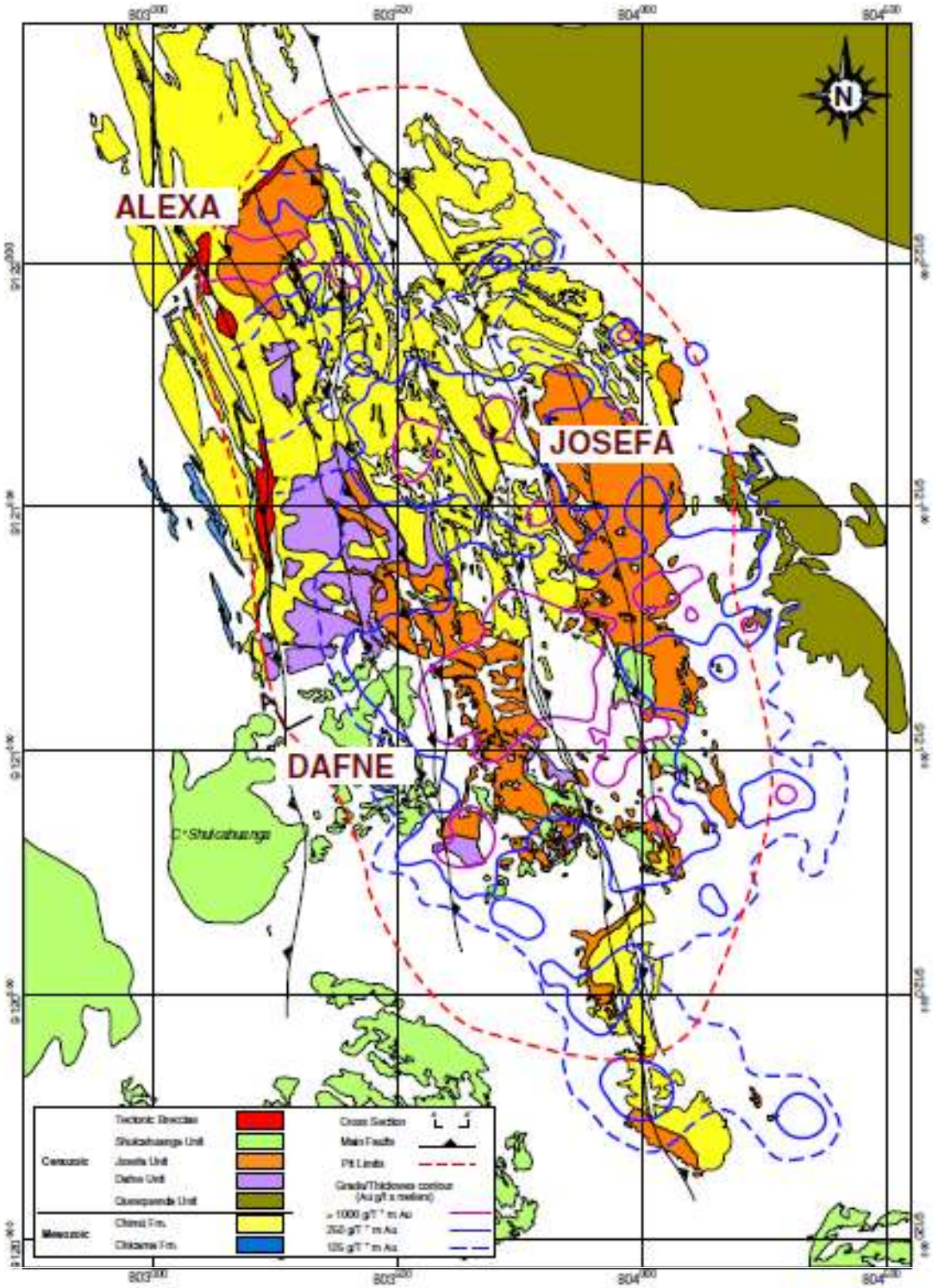
El yacimiento de Alto Chicama, se configura de acuerdo a tres sectores:

- Dafne
- Alexa
- Josefa

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA



Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

3.3. Operaciones Mina

Debido a las características del yacimiento el minado es por el método a tajo abierto con bancos de 10 m. de altura, con rampas de 30 m de ancho. Los bancos son minados por equipos gigantes como palas, cargadores y camiones, se tiene una chancadora primaria tipo cónica, una chancadora secundaria, una pila de lixiviación e instalaciones de procesamiento metalúrgico, siendo el producto final las Barras Dore que son lingotes de una aleación semi-pura de oro y plata.

3.3.1. Perforación y Voladura

Se realiza dos tipos de perforación primaria y secundaria. Para la perforación primaria se utilizan 4 perforadoras rotopercutivas, 3 Reedrill SKS-12 y 1 Caterpillar MD6420 que perforan taladros de producción de 9 7/8” de diámetro y taladros buffer de 7 7/8”.

La perforación secundaria es realizada por 1 perforadora Sandvik Tamrock Ranger 700 de 3 ½”, una Atlas Copco FlexiRoc y otra Sandvik DP1500i que perfora desde 4” a 6” de diámetro.

En el proceso de voladura se utiliza HA gasificada en sus variadas mezclas pero la más utilizada es HA65/35, junto a todos los accesorios de voladura que componen una voladura electrónica que son servidas por la empresa ORICA.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

3.3.2. Carguío

La operación cuenta con dos palas hidráulicas PC4000 de Komatsu, estas minan bancos de 10 m. de altura junto a los 3 cargadores gigantes WA1200 también de la marca Komatsu. El procedimiento de minado solo es de un camión por ciclo, por seguridad está prohibido el minado de frentes en matrimonio.

3.3.3. Acarreo

El transporte del mineral y desmonte volado se llevó a cabo inicialmente con una flota de 25 camiones pero que actualmente debido al cierre progresivo en que se encuentra la mina la flota fué reducida a 17 camiones Komatsu 730E con capacidad de carga de 185 TM. Estos camiones tienen como rutas desde el fondo del tajo hacia chancadora primaria pasando por una rampa principal que es uno de los accesos al tajo y las otras hacia botaderos y/o stocks, además del transporte del mineral conminutado de chancadora secundaria hacia la pila de lixiviación.

3.3.4. Servicios Auxiliares

Para el mantenimiento de las vías, el acomodo de material volado, limpieza y habilitación de plataformas de perforación, regado de vías y los diversos trabajos auxiliares que requiere la operación está a cargo de los siguientes equipos:

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

- 1 Cargador WA500, el cual realiza conformaciones de berma, levantamiento de materiales especiales.
- 3 Motoniveladoras Komatsu GD-825A, para el mantenimiento de vías y limpieza de accesos y plataformas.
- 6 Tractores sobre orugas Komatsu D-375-A utilizados para limpieza y acomodo de material volado y en zonas de descarga botaderos o stocks.
- 2 Excavadoras Komatsu PC-300, para limpieza de crestas, retiro de turba y otros materiales especiales.
- 1 Retroexcavadora Komatsu WB-140 para el mantenimiento de cunetas y drenajes en general.
- 1 Rodillo Dynapac CA25 para la compactación en las vías.
- 3 Camiones cisterna Volvo FH12 de capacidad 5000 galones, encargados del regadío de vías auxiliares y abastecimiento de agua a las perforadoras.
- 2 cisternas adaptadas de camiones CAT con capacidad de 30000 galones, estas de mayor capacidad son utilizadas para el regadío de las vías dentro del tajo y los haul route.

Todos los equipos son monitoreados por el Sistema Dispatch,

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

3.4. Servicios Técnicos

Es el área de ingeniería que guía y da soporte al área de operaciones, está compuesta por los siguientes departamentos:

- Planeamiento de minado a Corto Plazo y Largo Plazo
- Geología de exploración (Minex)
- Geología de Mina (Ore Control)
- Topografía
- Geotécnica e Hidrología

El planeamiento de minado se basa en la información del modelo de bloques definido por Geología. El modelo se realizó en base a la información de las perforaciones en la etapa de exploraciones.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Capítulo IV

4. Etapas para el desarrollo de un modelo de simulación.

Todo analista que requiera de buscar una solución o una mejora en su proceso deberá de entender bien el sistema que desea estudiar y seguir las actividades esenciales que necesita para la construcción de un modelo de simulación.

Debemos tener en cuenta si al final obtenemos resultados, objetivos y problemas resueltos, no siempre es catalogado como exitoso. En la mayor parte de las situaciones, la declaración final de éxito o fracaso la hará el nivel más alto de la gerencia que pague la cuenta, y sea de su agrado o no, ahí se tendrá un contexto diferente de ver los problemas y objetivos.

Así que los pasos y actividades a desarrollar para la construcción de un modelo se simulación son los siguientes:

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

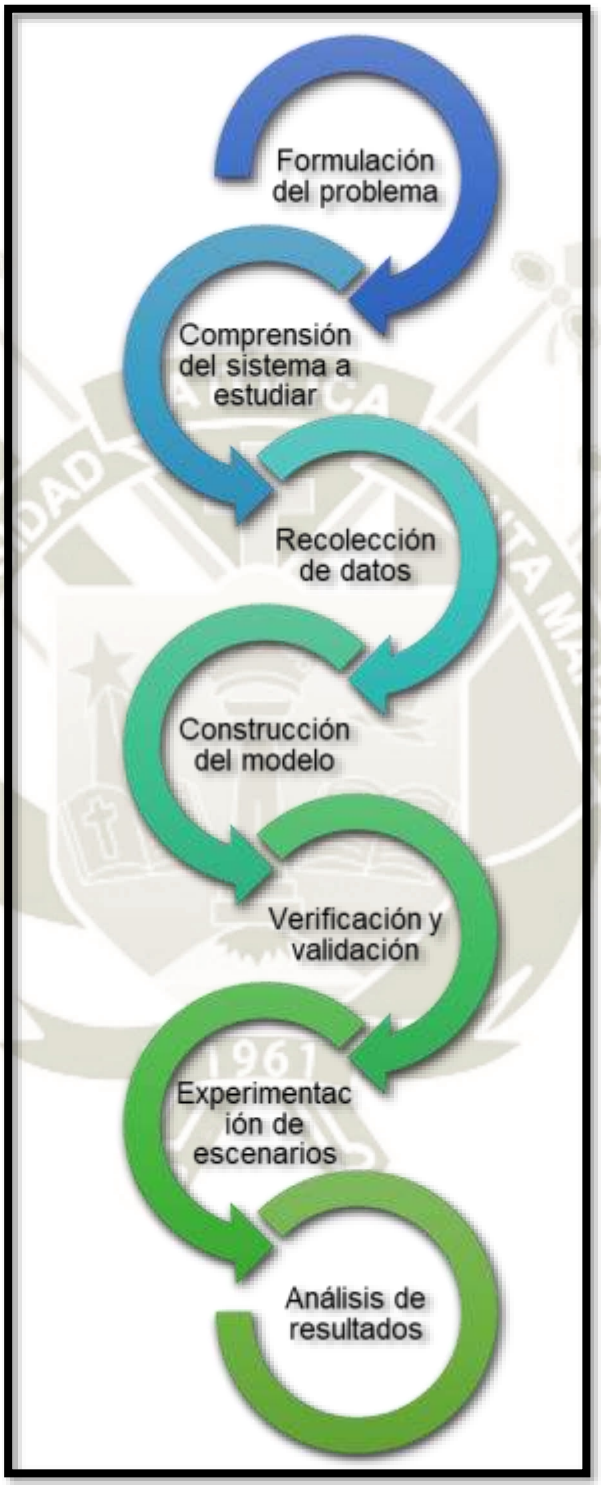


Figura 3. Etapas para el desarrollo de un modelo de simulación

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

4.1. Formulación del problema

Como primer paso de cualquier tarea de resolución es identificar el problema que presenta nuestro sistema o proceso, seguidamente formularlo para tener bien en claro nuestros límites, variables, inputs, etc. del sistema.

Los problemas generalmente se presentan con una serie de preguntas: ¿Lo puedo simular?, ¿Obtendré los indicadores esperados?, ¿Funcionará el modelo?, ¿Qué datos y recursos necesito para el desarrollo del modelo? ¿Qué software usaré?

Es por eso que el analista debe tener claro las solicitudes del cliente que le requiera de ser atendidas o solucionadas mediante una simulación.

Habiendo definido algunas fronteras iniciales, debemos pasar a establecer nuestros indicadores de desempeño que usaremos para llegar al éxito del estudio. En caso de una operación minera, por ejemplo, se podría establecer medidas de desempeño como la utilización de los equipos, tiempo de espera en colas, toneladas minadas por hora, hasta incluso costos de las diferentes etapas dentro de un ciclo de minado, etc.

Una buena práctica como analista es definir qué caso de estudio será modelado y simulado, puede ser el mejoramiento de un proceso o sistema ya definido o por el contrario se trata de simular un nuevo sistema que se desea implementar, en este último caso, se deberá tener en cuenta que no contaremos con datos ni estadísticas iniciales

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

para poder identificar los cambios ya sean en un contexto optimista o pesimista. Es por eso que se deberán establecer los límites y condiciones antes de iniciar el estudio.

4.2. Comprensión del sistema a estudiar

Esta etapa es bastante importante ya que, si el analista es una persona externa a la compañía que desee solucionar un problema o mejorarlo en su sistema, ésta no estará familiarizada con cada uno de los procedimientos relacionados al tipo de industria de la empresa. Es por eso que el cliente deberá de brindar el mayor soporte y asesoría con respecto a cómo es el funcionamiento del sistema, y qué es lo que espera mejorar o solucionar, la comunicación entre el analista y el cliente deberá ser continua y clara.

Además, como una buena práctica y recomendación es que todas las áreas que pertenecen al sistema deberán verse involucradas y comprometidas para que este estudio sea resuelto de la mejor manera, atendiendo todas las solicitudes necesarias por parte de cada uno.

Ahora bien, después de conocer y entender bien el sistema se deberá realizar un diagrama de flujo del proceso o un bosquejo aproximado al sistema potencial. Esto se debería desarrollar junto con el cliente para así evitar los malos entendidos y haya un total acuerdo en las especificaciones del sistema.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

En esta etapa se deberá ser muy minucioso y específico con respecto a los objetivos de la simulación, entras y salidas del modelo, exactitud en la animación y el enfoque del modelado.

4.3. Recolección de datos

Este proceso debe de ser desarrollado con bastante cuidado, ya que los datos a ingresar al modelo de simulación tienen que ser los correctos, representando lo que está pasando en el sistema real.

Si los datos no están correctamente tomados será difícil llegar a un modelo validado y verificado con respecto al sistema real. Por eso es común mencionar: “Si entra basura, sale basura”.

Primero se debe de definir cuáles son las variables de entrada para nuestro modelo de simulación, preferiblemente tomados del sistema a modelar, identificar que datos son los necesarios para acercarnos lo más posible a la realidad del sistema a mejorar.

En modelos de simulación los datos más comunes a recaudar son:

- Tiempo entre llegadas
- Tiempo de procesamiento
- Tiempo de carga y descarga
- Tiempo de almuerzos
- Tiempo de viajes

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

- Cantidad de piezas
- Capacidad de stock
- Tiempo entre fallas
- Número de empleados
- Porcentajes de piezas con errores o fallas, etc.

4.3.1. Métodos para la recolección de datos

Si la operación existe los datos a recolectar deberán ser los datos históricos que ya se tienen del sistema, que pueden ser consultados de reportes de producción, ventas, registros contables, órdenes de compra, servidores, del área de contabilidad o mejora continua y todo tipo de información que se tenga disponible para soportar el modelo.

Ahora en caso que no se tenga datos previos como ocurre en los sistemas nuevos a implementar, estos deberán ser consultados por expertos, o a sistema existentes pero muy similares, a datos de ingeniería, como información proporcionada por los proveedores de un producto (duración del producto, factor de uso, etc.). Esto permitirá definir un punto de entrada.

Para calcular 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:

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

$$n = \frac{z^2\sigma^2}{e^2}$$

La regla general es que mientras más grande sea el tamaño de la muestra, más estadísticamente significativa será esta, lo que significa que hay menos probabilidades de que los resultados sean una coincidencia.

4.3.1.1. Calcular la distribución probabilística

Después de haber recolectado todos los datos necesarios para la construcción de nuestro modelo de sistema, deberán ser procesados y ajustados estadísticamente de acuerdo a histogramas y distribuciones probabilísticas los cuales ayudarán a la generación de la aleatoriedad dentro del software.

4.3.1.2. Evaluación de la bondad de ajuste

Una vez tengamos la serie de distribución de donde poder elegir la que mejor se acomode a nuestros datos se realizan pruebas de bondad de ajuste. Input Analyzer cuenta con dos test de bondad de ajuste la de Chi-cuadrado y la de Kolmogorov-Smirnov, el software permite el ajuste de los datos tomados a una distribución determinada. Este estadístico resume la discrepancia entre el histograma y la curva de la distribución.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

El indicador que nos ayudará a analizar si los datos se ajustan a la distribución escogida será el p-value de los tets.

Si el p-value es inferior a 0.05 se considera que el estadístico está ya en zonas de muy poca probabilidad, y por tanto concluimos que el ajuste no es satisfactorio. Por el contrario, si el p-value es mayor de 0.05 consideramos que el ajuste es suficientemente bueno, y que la distribución elegida puede usarse como modelo para la población.

4.4. Construcción de modelo

En esta etapa empezaremos a modelar de acuerdo a nuestros conocimientos y comprensión previa del sistema real, modelando lo más cercano posible a la realidad de acuerdo a la sintaxis de Arena.

Como recomendación se debería realizar un bosquejo general teniendo en cuenta la lógica secuencial del proceso real, sin olvidar las relaciones entre sus componentes.

Previamente a la construcción del modelo habría que definir y tomar en cuenta:

- Elementos estáticos.
- Elementos dinámicos.
- Los arribos.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

- Definir supuestos.
- La secuencia lógica.
- Indicadores de desempeño

Cabe resaltar que el proceso de programación de un modelo de sistema no será netamente idéntico a otro, ya que cada analista tiene diferentes formas y/o maneras de programar de acuerdo a su lógica y razonamiento propio.

4.5. Verificación y validación del modelo

Una vez que tengamos funcionando correctamente nuestro modelo es momento de verificarlo y validarlo. Entonces como verificación definimos que es la tarea de asegurar que el modelo se comporta como se planeó inicialmente.

Una herramienta que nos puede servir de mucha ayuda es corriendo la animación, esto nos permite observar todas las actividades y eventos que suceden dentro del sistema.

También la modificación de los componentes de la simulación puede ayudarnos a identificar cómo se comportan los resultados en diferentes situaciones. Es importante hacernos la pregunta: ¿tienen sentido los resultados?

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

La validación es la tarea de asegurar que el modelo se comporta de la misma forma que el sistema real. Se debería realizar la comparación de resultados arrojados del sistema con los resultados históricos del sistema real.

Para evitar resultados defectuosos no se debe de olvidar considerar todas las circunstancias que puedan existir dentro del sistema real.

Una vez llegado hasta aquí y vemos que todo parece estar bien, si confiamos en que el modelo funciona correctamente estamos listos para usarlo y poder responder algunas preguntas.

4.6. Experimentación de escenarios

La experimentación es básica para llegar a cumplir el objetivo de mejorar el desempeño de nuestros indicadores previamente establecidos.

Es aquí donde el análisis de sensibilidad es punto clave para comprar los diferentes escenarios optimistas y pesimistas buscando un punto de quiebre óptimo.

Dentro de la experimentación es necesario considerar la cantidad de simulaciones que se han completado y analizado, la longitud de corrida de simulación, el número de veces que se repetirá cada corrida y si es necesario realizar réplicas (nuevas corridas de simulación) para corroborar la semejanza del comportamiento del modelo al sistema real.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Primero se debe establecer las posibles alternativas de comportamiento o escenarios del sistema, teniendo en cuenta lo siguiente:

- Si se debe realizar cambios a los parámetros o comportamiento de las variables
- Adición o reducción de variables o elementos que constituyen el sistema
- Modificaciones a las lógicas de funcionamiento del sistema
- O cualquier otro cambio que se considere pertinente evaluar

4.7. Análisis de resultados

Aquí se debe de trabajar con los resultados obtenidos de la experimentación. Utilizar el juicio crítico de acuerdo al comportamiento del sistema, si los resultados obtenidos nos ayudaron a resolver el problema inicial, como se comportó el sistema en los experimentos realizados y que aportes fueron hechos al transcurrir la simulación. Todo en conjunto llegará al establecimiento de conclusiones y recomendaciones, según la interpretación del analista dejando en claro qué es relevante para la toma de decisiones próxima.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Capítulo V

5. Construcción del modelo a simular e interpretación de resultados.

5.1. Formulación del problema

Como se mencionó al inicio, este estudio tiene como objetivo desarrollar un modelo de simulación en representación al ciclo de minado en una operación minera a tajo abierto, en donde la problemática presentada es el constante remanejo del mineral acumulado en stocks temporales. El objetivo como analista de procesos es verificar si estamos siendo productivos o no al realizar dicha operación.

En la mina, el movimiento de material se hace para mineral tanto como para desmonte, pero en este caso se escoge simular el minado de mineral cuyo destindo final es chancadora, el cual incluye los procedimientos de carguío y acarreo, debido a que la problemática está enfocada al remanejo de mineral existente.

Entonces simularemos y analizaremos las siguientes rutas, del banco 3980 de la zona Alexa hacia el stock temporal SP-4000-001, finalmente hacia la chancadora, esta es la ruta de remanejo.

Y por último la ruta directa del banco 3980 hacia chancadora. Este será un caso problema que servirá de ejemplo y guía para analizar los efectos que se producen en la operación.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Pero previamente a esto, luego de construir y validar nuestro modelo, se tendrá que determinar la cantidad de camiones óptima de cada frente para evitar demoras y tiempos en cola, a fin de tratar de programar la simulación de manera que los equipos de carguío y acarreo sean lo suficientemente productivos, semejante a un despacho eficiente de camiones de los que suceden y deben mantener en la operación del sistema real.

Producto de este remanejo, se pudo detectar oportunidades de mejora siendo el caso de un ahorro en los costos horarios de los equipos, además de un costo de oportunidad debido al usaje de los equipos que están realizando la misma operación a un mismo destino de forma repetitiva, pudiendo ser utilizados o designados a trabajos de mayor importancia para la continuación del desarrollo de la mina o para simplemente cumplir con las metas de producción.

Entonces seguiremos los pasos anteriormente mencionados en el flujograma de la (*Figura 2.),* para lograr la construcción de nuestro modelo y nos pueda ayudar a resolver dichos problemas.

5.2. Descripción del sistema a modelar

A continuación, haremos una descripción detallada del sistema a simular, para esto necesitaremos identificar y conocer una serie de datos los cuales conforman el sistema.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Debemos tener en cuenta que el software a utilizar (Arena) simula en base a tiempos, así que el tiempo que dure todo el sistema está relacionado al minado de mineral de un banco determinado con una cantidad estima de tonelaje entregada por geología.

5.2.1. Tonelaje de mineral a minar del banco 3980 Alexa: 10 000 TM

5.2.2. Tiempos del ciclo de carguío

- Tiempo de cuadrado
- Tiempo de carguío
- Tiempo de viaje lleno
- Tiempo de descarga
- Tiempo de viaje vacío

Figura 4. Diagrama del Ciclo de carguío

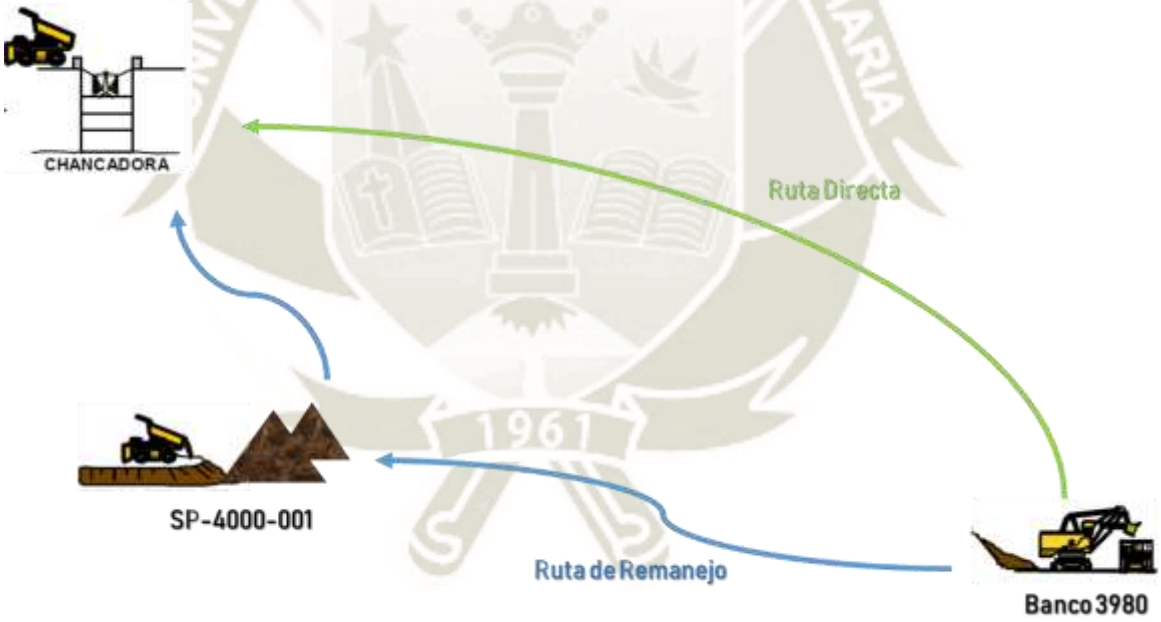
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

5.2.3. Diagrama de destinos del caso de estudio

Como ya lo mencionamos el objetivo de este trabajo es evaluar si realmente es productivo el remanejo que se realiza en el minado de mineral evaluando los tiempos del sistema mediante la simulación para optimizar el uso de los equipos y también desarrollar una evaluación en los costos. Es por eso que haremos las comparaciones de las dos maneras o rutas de minado con destino final la chancadora.



Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

5.2.4. Descripción de equipos

Los equipos que conforman el sistema son: los camiones Komatsu 730E y pala hidráulica PC4000 de la misma marca, por consecuente los tiempos recolectados de campo deberán pertenecer a dichos equipos.

La capacidad de tolva del camión es de 185 TM y su objetivo de minado son 10 000 TM, el modelo de simulación tiene que representar una semejanza con el sistema real de minado, incluyendo las toneladas cargadas como variables continuas.

5.3. Recolección de datos

Los datos fueron recogidos de la base de datos del sistema Dispatch de Modular Mining, donde se encuentra mucha información sobre datos operacionales siendo exportada a hojas Excel (Anexo1). El registro de los datos del sistema Dispatch es de manera automática y continua.

Los datos operacionales registrados y almacenados en el sistema dependerán de la experticia del operador y del despachador al registrar claramente los estados de los equipos.

Los datos obtenidos del ciclo de carguío fueron los siguientes:

- Tiempo de spot o el tiempo en que demora el camión en acomodarse y maniobrar para recibir la carga por la pala.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

- Tiempo de carguío, tiempo que demora la pala en cargar la tolva del camión.
- Tiempo de ida lleno hacia a los destinos por evaluar (Bano3980-SP),(SP-Chancadora) Y (Banco3980-Chancadora).
- Tiempo de cuadre y descarga en chancadora, transcurrido desde que se posiciona, levanta la tolva para descargar, cae la carga y el tiempo en que retrae la tolva para iniciar el retorno.
- Tiempo de regreso vacío, tiempo de viaje que transcurre para que el camión retorne al frente de carguío y de igual manera con respecto a los destinos por evaluar.

Por otro lado, se obtuvo y procesó una data de 200 muestras para cada tiempo de cada ruta, realizando un previo filtrado por errores incongruentes del sistema Dispatch. Éstas fueron analizadas estadísticamente mediante el software Input Analyzer para determinar una distribución probabilística de las diversas que presenta, (Exponencial, Normal, Triangular, Beta, Uniforme, etc.) la cual nos servirá como input en el modelo de simulación. Así de esta manera estamos cumpliendo con la regla general de tener nuestro tamaño de muestra grande, más estadísticamente significativa será ésta, haciéndola más confiable.

A continuación, se detallará los pasos para el proceso de análisis de los tiempos de viaje cargado, el resto serán mostrados en un cuadro resumen.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

5.3.1 Análisis de datos de tiempo de viaje lleno (SP-Chancadora)

Las 200 muestras son introducidas al Input Analyzer, éste las procesa y nos sugiere una distribución probabilística Normal como la que mejor se ajusta a los datos.

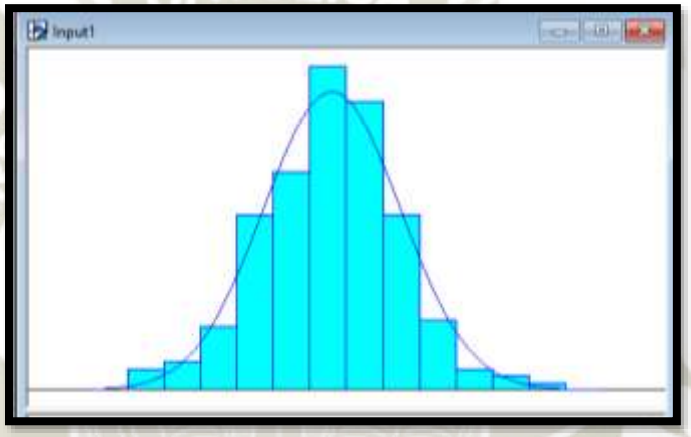


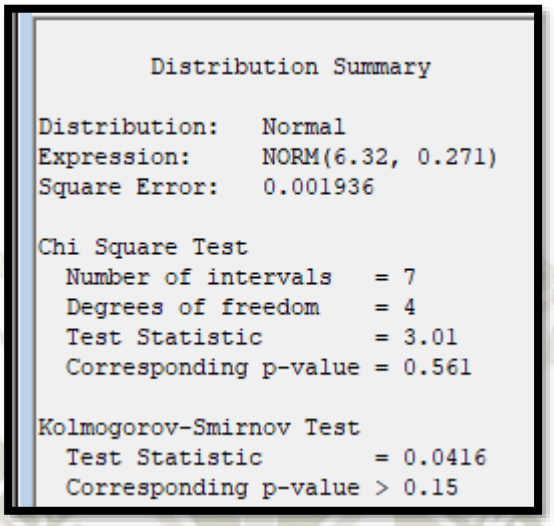
Figura 6. Histograma del tiempo de viaje lleno (SP-Chancadora). (Captura de pantalla de software Input Analyzer)

Para asegurarnos que esta distribución sea la que mejor se ajusta, debemos comprobarlo con las pruebas de test de bondad que nos proporciona Input Analyzer. Por el tamaño de la muestra, el análisis se realiza con las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y Chi-cuadraro. Para esto debemos fijarnos que los valores de p-value tienen que ser > 0.05.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA



```
        Distribution Summary

Distribution:   Normal
Expression:     NORM(6.32, 0.271)
Square Error:   0.001936

Chi Square Test
  Number of intervals   = 7
  Degrees of freedom    = 4
  Test Statistic        = 3.01
  Corresponding p-value = 0.561

Kolmogorov-Smirnov Test
  Test Statistic        = 0.0416
  Corresponding p-value > 0.15
```

Figura 7. Reporte de análisis de pruebas de bondad, brindadas por Input Analyzer.

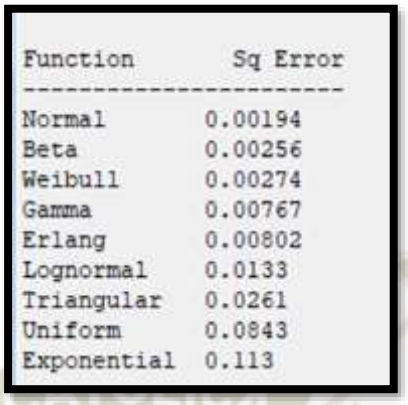
Como podemos observar los valores de p-value en ambas pruebas superan por mucho al valor de 0.05.

Además de estas pruebas es necesario verificar que la distribución probabilística recomendada tenga el menor error cuadrado.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA



Function	Sq Error
Normal	0.00194
Beta	0.00256
Weibull	0.00274
Gamma	0.00767
Erlang	0.00802
Lognormal	0.0133
Triangular	0.0261
Uniform	0.0843
Exponential	0.113

Podemos observar que la distribución Normal es la que presenta el menor error cuadrado, lo que demuestra que los datos se ajustan mejor a una distribución probabilística Normal.

A continuación, el análisis estadístico de los tiempos:

a) Para la primera ruta Banco 3980-SP.

Banco 3980-SP			
Tipo de tiempo	**N° Datos**	**Distribución**	**Expresión**
Cuadre	200	Triangular	TRIA(0.35, 1.25, 2)
Carguío	200	Beta	1.73 + 0.84 * BETA(1.8, 1.82)
Acarreo Lleno	200	Normal	NORM(2.2, 0.219)
Descarga	200	Uniforme	UNIF(1.12, 2)
Acarreo Vacío	200	Normal	NORM(1.47, 0.135)

Tabla 1. Cuadro de distribuciones de los tiempos ruta Banco 3980-SP.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

b) Para la segunda ruta SP-Chancadora.

SP-Chancadora			
Tipo de tiempo	N° Datos	Distribución	Expresión
Cuadre	200	Triangular	TRIA(0.35, 1.25, 2)
Carguío	200	Beta	1.73 + 0.84 * BETA(1.8, 1.82)
Acarreo Lleno	200	Normal	NORM(6.32, 0.271)
Descarga	200	Uniforme	UNIF(1.12, 2)
Acarreo Vacío	200	Normal	NORM(4.5, 0.188)

Tabla 2. Cuadro de distribuciones de los tiempos rutas Banco SP-Chancadora.

c) Para la tercera ruta Banco 3980-Chancadora

Banco 3980-Chancadora			
Tipo de tiempo	N° Datos	Distribución	Expresión
Cuadre	200	Triangular	TRIA(0.35, 1.25, 2)
Carguío	200	Beta	1.73 + 0.84 * BETA(1.8, 1.82)
Acarreo Lleno	200	Normal	NORM(8.53, 0.261)
Descarga	200	Uniforme	UNIF(1.12, 2)
Acarreo Vacío	200	Normal	NORM(6.37, 0.177)

Tabla 3. Cuadro de distribuciones de los tiempos ruta Banco 3980-Chancadora.

Los tiempos de cuadre, carguío y descarga se mantienen los mismos para las tres rutas ya que son minados con los mismos equipos todos, además para hacer una

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

comparación entre escenarios donde la única variable es el tiempo de viaje de acuerdo a las ubicaciones.

5.4. Construcción del modelo a ser simulado en Arena

5.4.1. Identificación de partes para el modelo

Antes del armado y modelado del sistema es necesario reconocer e identificar partes importantes de la simulación, como se describe a continuación:

a) **Entidades:** En este sistema, como entidades están considerados los camiones Komatsu 730E.

b) **Recursos:** Se tendrá como recurso a la pala que será creada dentro de un process. Como el sistema consta del minado de un banco con diferentes destinos pues existe un sólo equipo de carguío por frente.

c) **Atributos:** El tipo de camión está siendo considero como atributo, ya que son las propiedades de las entidades.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

d) Colas: En el sistema tenemos dos colas.

- Cola en Pala
- Cola en Chancadora

e) Eventos:

- Carguío
- Descarga
- Cuadrado
- Viaje ida
- Viaje de vuelta
- Arribo de camiones

f) Demora: Es el tiempo de espera de la entidad camión en ser atendido por el recurso pala.

5.4.2. Consideraciones para la construcción del modelo

- La simulación sólo está modelando un caso ejemplo del minado de un banco especifico con destino final chancadora, en donde se comparará resultados e indicadores de desempeño de un minado directo y un remanejo almacenado en un stock temporal.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

- En la mina real se realizan diversas actividades y el minado es de diferentes materiales en un turno de trabajo.

- En la simulación no se están considerando paradas o fallas imprevistas en los equipos, siempre se encuentran disponibles para el minado del mineral.

- El periodo de simulación estará ligado a lo que pasa en el sistema real, reflejando lo que tenga que demorar el minado completo de un banco con una cantidad de toneladas estimada.

- El modelo puede ajustarse para la evaluación de otros escenarios, solo modificando las variables de tonelaje, tiempos de acuerdo a los tramos de distintos destinos y cantidad de camiones.

5.4.3. Diseño y construcción del modelo

De acuerdo a la lógica del modelo previamente graficado en el punto (Capítulo 5.2.), procederemos al armado o construcción del modelo en el software Arena v.14 (versión estudiantil).

Como el sistema trata de un ciclo cerrado de carguío y acarreo de mineral de un punto hacia otro, al momento de modelar usando los diferentes módulos del

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

software deberá reflejar y verse tal cual al sistema real con la lógica descrita y comprendida.

Para cada uno de los eventos se ha desarrollado una secuencia de bloques, siendo usados los módulos básicos y módulos avanzados que vienen en el software.

A continuación, se describirán algunos módulos principales usados en esta modelo de simulación:

a) Create: Módulo del paquete básico utilizado para introducir el número de entidades (camiones), así como el tiempo entre llegadas.

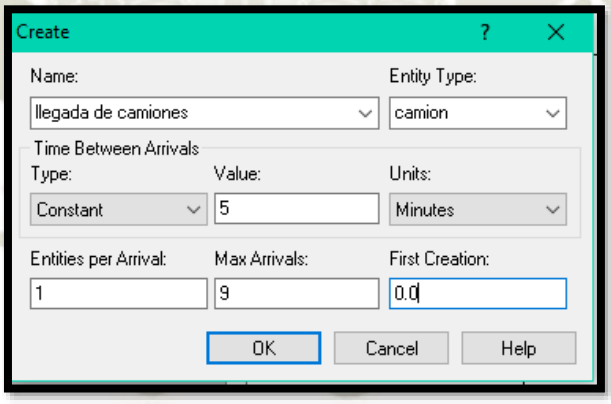


Figura 9.. Módulo Create (Captura de pantalla del software Arena)

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

b) Process: Módulo crear el recurso que brinda un servicio.

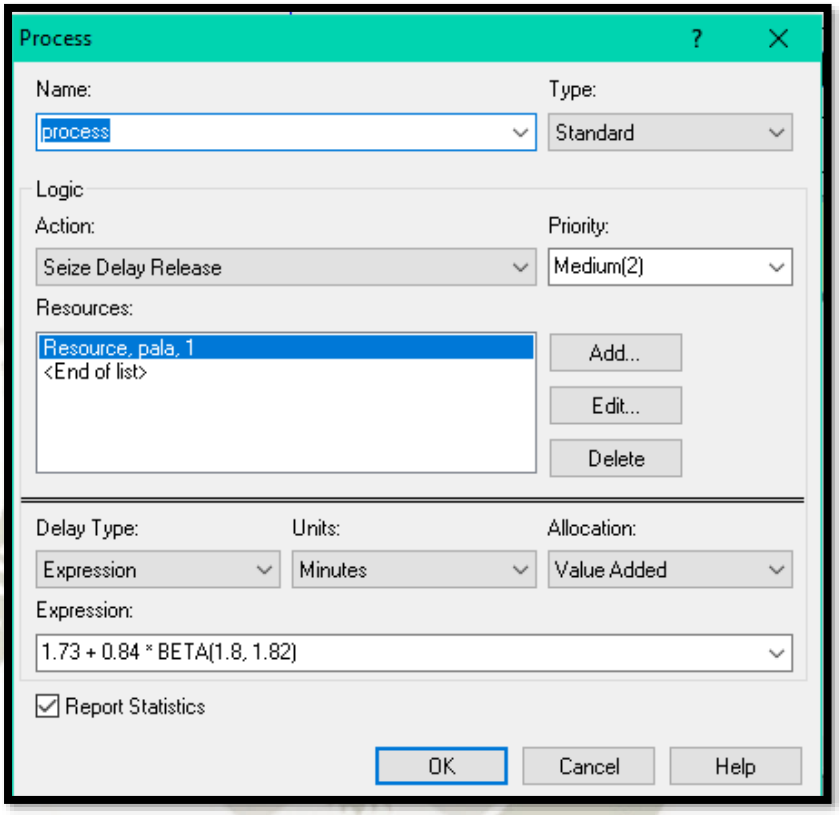


Figura 10. Módulo Process. (Captura de pantalla del software Arena)

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

c) Assign: Este módulo permite brindar atributos, variables, y modificar las propiedades en las entidades (capacidad del camión)

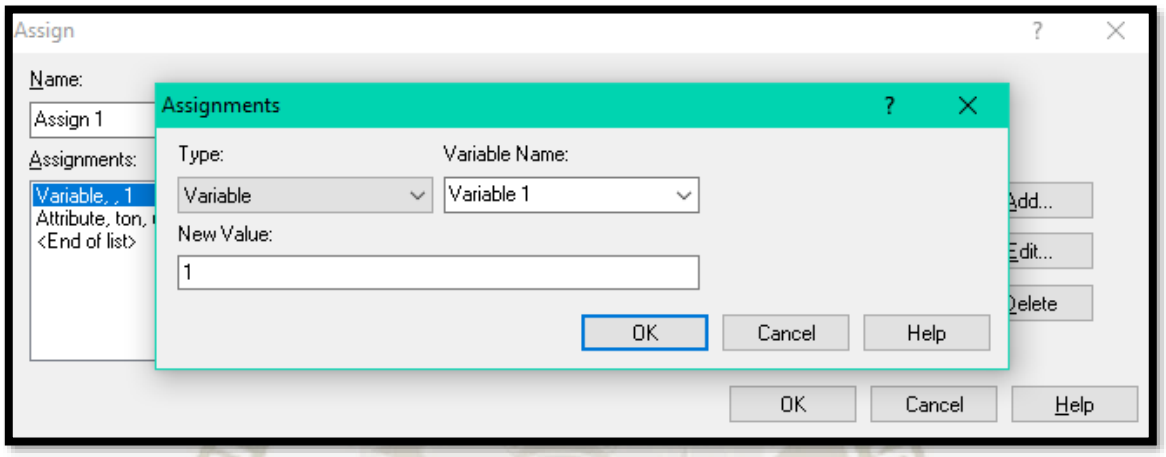


Figura 11. Módulo Assign. (Captura de pantalla del software Arena)

d) Delay: Módulo para representar la duración del tiempo de viaje vacío y lleno.

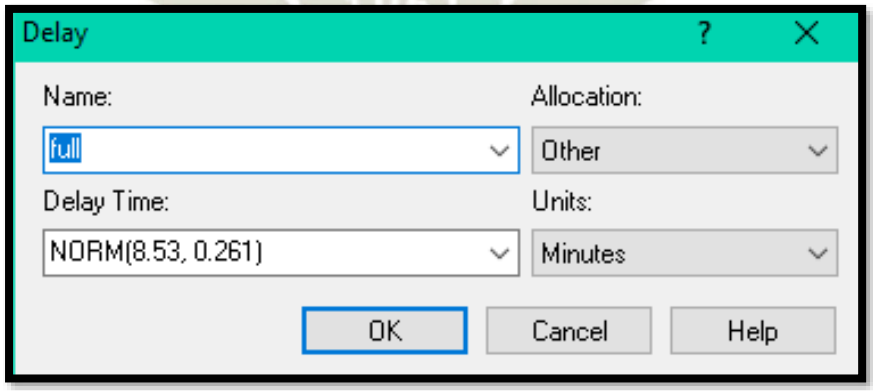


Figura 12. Módulo Delay. (Captura de pantalla del software Arena)

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

e) Pick Up: Éste módulo nos ayuda y trabaja como un sieze para los tonelajes en el modelo.

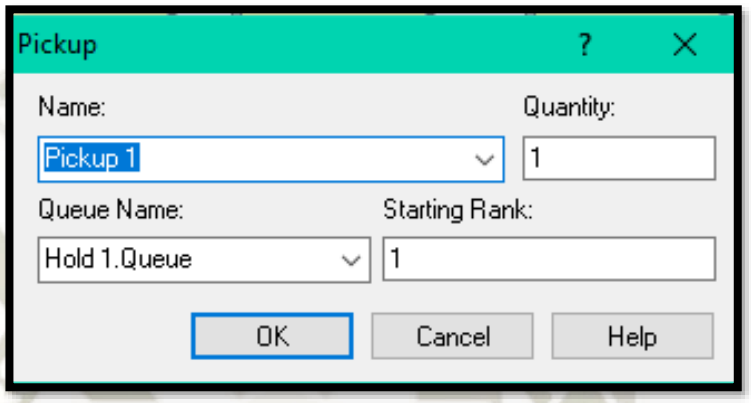


Figura 13. Módulo Pickup. (Captura de pantalla del software Arena)

f) Dropoff: Éste trabaja de la mano con el pickup ya que libera las entidades.

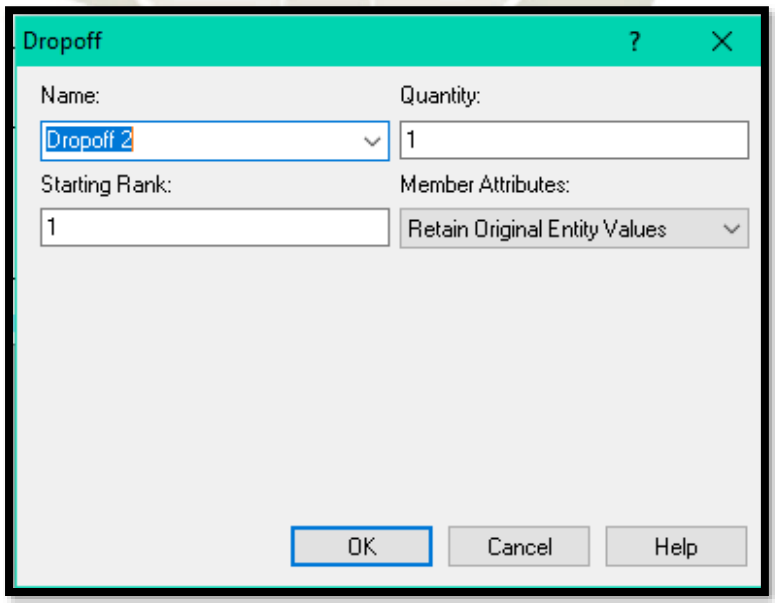


Figura 14. Módulo Dropoff. (Captura de pantalla del software Arena)

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

5.4.4. Modelo de Simulación de Carguío y Acarreo

Después de haber entendido la lógica del sistema y programar los módulos a manera de representarlo tenemos el modelo final.

En la figura de abajo podemos observar el modelo culminado, además de un contador de toneladas, un reloj con hora de inicio referencial 7:00 am. hora en que se inicia el turno y un gráfico que representa la cantidad de camiones que hay en cola de pala, todos estos van variando a medida que transcurre la simulación.

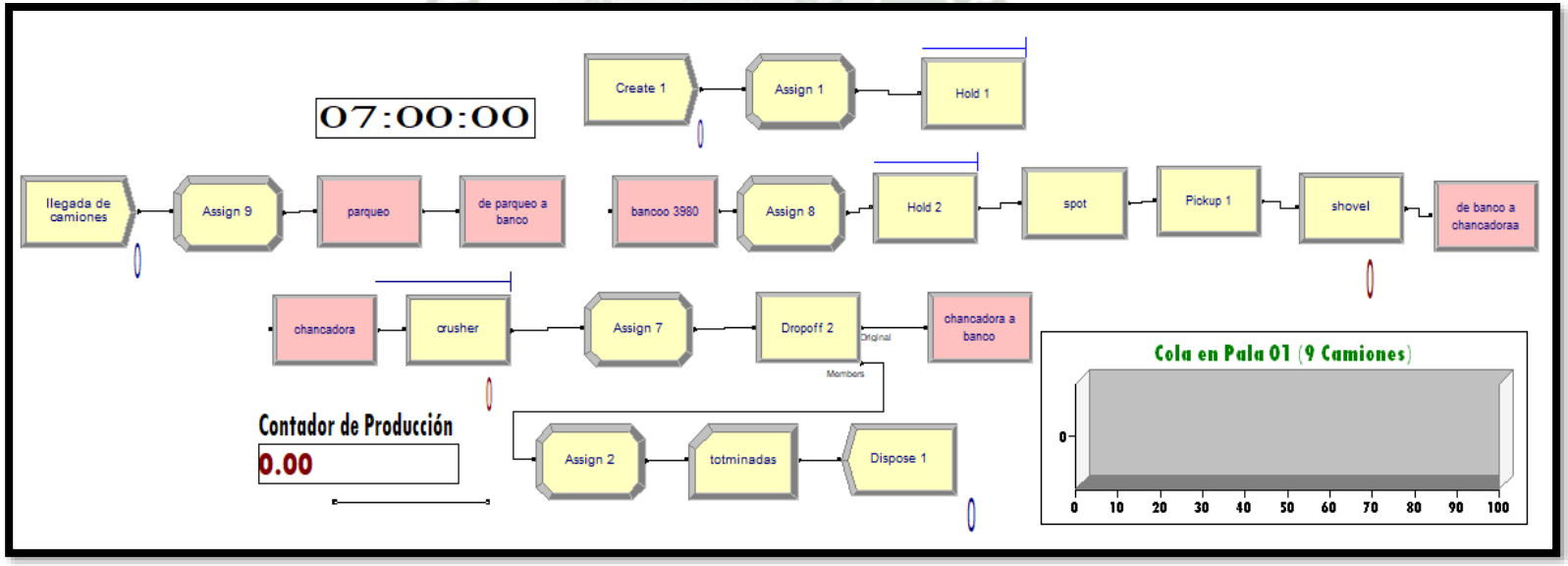


Figura 15. Modelo de Simulación de Carguío y Acarreo. (Captura de pantalla del software Arena)

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

5.5. Verificación y validación del modelo

5.5.1. Verificación

Después de la construcción y programación de los módulos procedemos a la primera corrida del modelo.

En la verificación se debe corroborar, que si el modelo consta de módulos que configurados representan a las diferentes actividades o eventos que suceden dentro de nuestro sistema real, pues al momento de hacer correr la animación la representación debe ser similar a la del sistema real.

Entonces se observa que nuestra entidad camión recorre todo el circuito de módulos correctamente, en cada uno se toma un tiempo configurado desde que llega a piso de pala, se cuadra, luego ésta empieza el carguío del camión, después el camión realiza el transporte de ida lleno, llega a la chancadora y realiza la descarga, entonces vuelve hacia la pala tomando el tiempo de viaje vacío. Con lo que concluimos que se ha verificado nuestro modelo y éste está cumpliendo la lógica correctamente.

5.5.2. Validación

Siendo ésta la etapa más importante ya que de esto depende el funcionamiento y resultados de la simulación, procederemos a validarlo

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

observando que los resultados arrojados por el modelo deberán tener sentido y lógica, acercándose a la realidad.

Es por eso que debemos establecer indicadores de desempeño que nos ayuden a la comparación y validación de resultados, siendo:

- Tiempo de duración del minado de las toneladas meta.
- Tiempo promedio de cola en pala.
- Utilización de la pala.
- Tiempo promedio de cola en chancadora.
- Utilización de chancadora.

Como nuestro objetivo inicial es decidir la cantidad de camiones que necesitaremos para el minado de cada ruta, nuestro modelo de simulación ayudará a la elección mediante una experimentación y análisis de varios escenarios guiados por los indicadores de desempeño establecidos.

5.5.2.1.Escenario actual:

La cantidad de camiones que necesita una pala en determinada ruta en el sistema real es seleccionada por el sistema dispatch en asignación dinámica y por el despachador en una asignación fija pero el criterio sigue siendo es el mismo, no deberán generar cola ni en pala ni en chancadora y tampoco la pala deberá tener tiempo de ocio, así

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

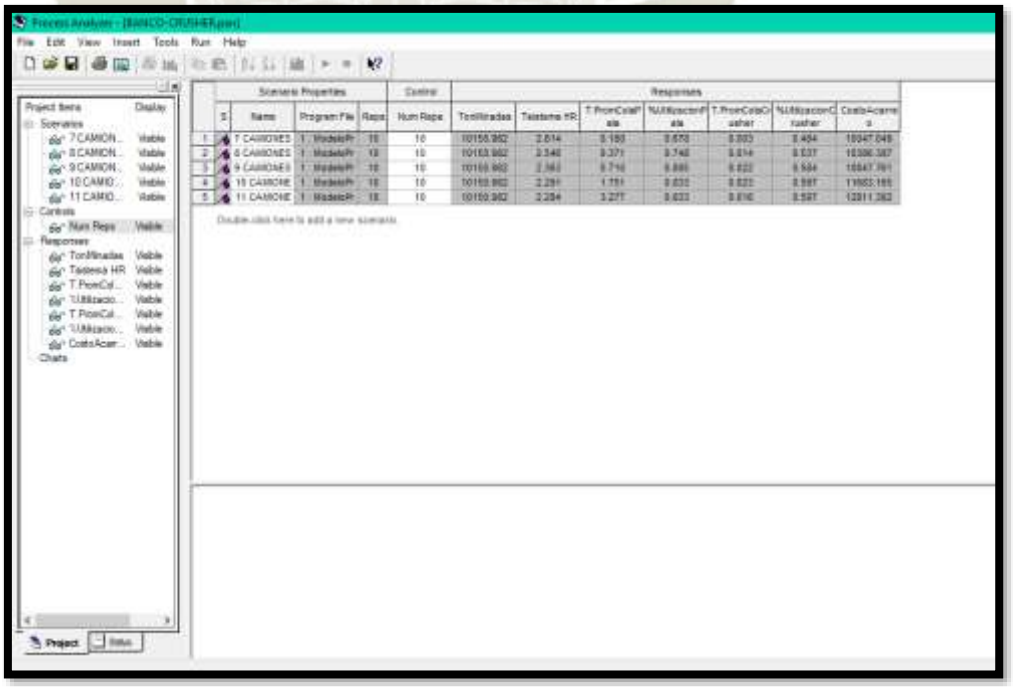
REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

tratando de hacerlos lo más productivos posible. Las rutas son únicas para cada destino.

5.5.2.2.Escenarios alternativos

Entonces procederemos a la experimentación de escenarios para cada ruta definida previamente, para esto se utilizó el software Process Analyzer construyendo los escenarios con los controles y métricas que deseamos obtener, estas fueron programadas previamente en los módulos estadísticos de la simulación.



Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

De esta manera construimos 3 cuadros comparativos de escenarios de cada ruta *(Tabla 4. 5. y 6.)*, para analizar y asignar el numero óptimo de camiones a cada una.

La toma de la decisión de escoger la cantidad de camiones optima, estará regida a las variables de salida arrojadas luego de una programación en el software. La productividad de los camiones está definida por la reducción de tiempo de espera al ser atendidos ya sea en los equipos de carguío o en zonas de descarga (stock o chancadora), además la productividad del equipo de carguío está definida en la reducción de tiempos de ocio, por lo tanto, deberá tener mayor porcentaje de utilización, es por eso que las variables son las siguientes: *el tiempo promedio en cola de pala y la utilización del equipo de carguío.*

% Utilización > y > Timepo prom. en cola

a) Ruta Banco 3980 – StockPile

Escenario	N° Camiones	Ton. Minadas	TiempoMinado Hrs.	Tiempo Prom. ColaPala	%Util.Pala	Tiempo Prom. ColaCrusher	%Util. Crusher
1	2 CAMIONES	10,150.98	3.872	0.04	49%	0.004	35%
2	3 CAMIONES	10,150.98	2.661	0.14	71%	0.007	52%
3	4 CAMIONES	10,150.98	2.135	0.51	89%	0.013	64%
4	5 CAMIONES	10,152.17	2.039	2.02	93%	0.016	67%

Tabla 4. Escenarios ruta Banco 3980-Stockpile

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

b) Ruta StockPile – Chancadora

Escenario	N° Camiones	Ton. Minadas	TiempoMinado Hrs.	Tiempo Prom. ColaPala	%Util.Pala	Tiempo Prom. ColaCrusher	%Util. Crusher
1	6 CAMIONES	10,150.98	2.594	0.25	73%	0.017	53%
2	7 CAMIONES	10,150.98	2.326	0.55	82%	0.016	60%
3	8 CAMIONES	10,152.05	2.203	1.49	86%	0.029	62%
4	9 CAMIONES	10,150.98	2.206	3.21	86%	0.019	62%
5	10 CAMIONES	10151.801	2.175	4.56	86%	0.032	64%

c) Ruta Banco 3980 – Chancadora

Escenario	N° Camiones	Ton. Minadas	TiempoMinado Hrs.	Tiempo Prom. ColaPala	%Util.Pala	Tiempo Prom. ColaCrusher	%Util. Crusher
1	7 CAMIONES	10,150.98	2.814	0.18	68%	0.003	48%
2	8 CAMIONES	10,150.98	2.546	0.37	75%	0.014	54%
3	9 CAMIONES	10,150.98	2.363	0.71	81%	0.022	58%
4	10 CAMIONES	10,150.98	2.291	1.75	83%	0.023	60%
5	11 CAMIONES	10,150.98	2.284	3.28	83%	0.016	60%

En este cuadro en la columna *Ton. Minadas* son las toneladas que fueron programadas para ser minadas, este dato fue establecido inicialmente ya que es un tonelaje estimado y proporcionado por geología para minar en un banco de mineral que en este caso fue el 3980. Como el tonelaje es una variable continua fue programada a manera que los valores fueran los más cercanos a la realidad porque el total de toneladas minadas casi nunca es un numero entero.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

La columna *Tiempo Minado (Hrs.)* representa a el tiempo total de simulación, en este caso a el tiempo total que se demora en minar las 10 000 toneladas programadas con la cantidad de equipos asignados. Este indicador nos ayudará más en la etapa de la comparación de minado por remanejo o directo.

Columna *Tiempo Prom. en Cola Pala* representa el tiempo en promedio que un camión espera por la pala en minutos. Nos ayudará a identificar si existe abundante cola en la pala.

La columna *% Utilización Pala*, representa propiamente dicho a la Utilización de la pala, nos permitirá analizar si la pala tiene tiempo de ocio o tiene un valor de utilización considerable.

Y por último como referencia la utilización y tiempo de cola en chancadora, para verificar que los camiones en su destino donde realizan la descarga tampoco esté saturado y así sean lo más productivos posible.

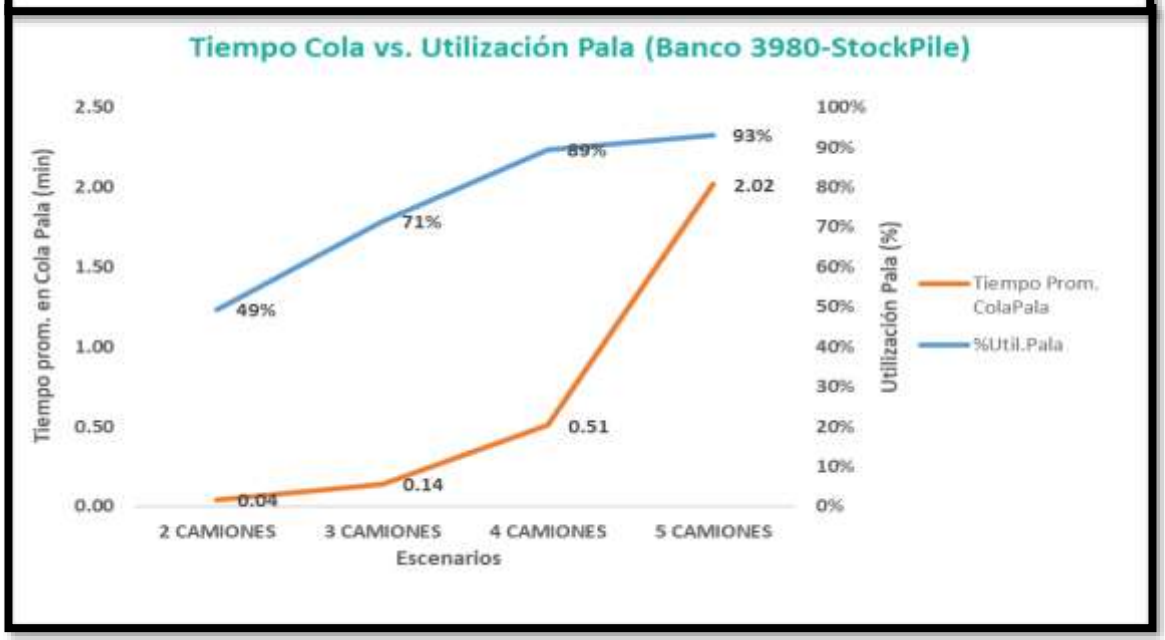
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

5.5.2.3. Experimentación y Análisis de escenarios para el cálculo de cantidad de camiones

a) Ruta Banco 3980 – Stock Pile



Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Según la gráfica comparativa de Tiempo Cola vs. Utilización Pala *(Figura 17.)*, con la cantidad mayor de camiones (5) los indicadores no reflejan ser productivos, ya que al tener más camiones la cola se incrementa en pala haciéndola en promedio 2.02 minutos.

Y en comparación con la cantidad menor de camiones (2) los indicadores de igual manera no son productivos, ya que presenta una utilización muy baja en pala de 49%.

Entonces con la ayuda gráfica visual podemos analizar que con el escenario N° 3 de 4 camiones *(Tabla 4.)* tenemos los indicadores en **equilibrio,** el tiempo en cola de pala viene a ser de 0.51 min. mientras que la utilización es considerable al 89%, teniendo un tiempo total de minado de 2.135 hrs., y sus tiempos en cola de chancadora tampoco reflejan mayoría, teniendo una utilización constante de ésta. Entonces concluimos que para la ruta de minado **Banco 3980 a Stock Pile** es **necesario 4 camiones.**

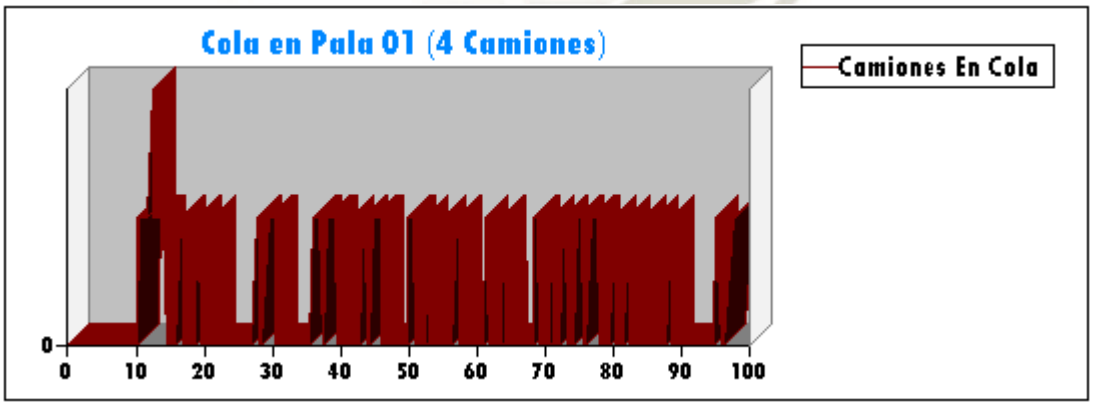


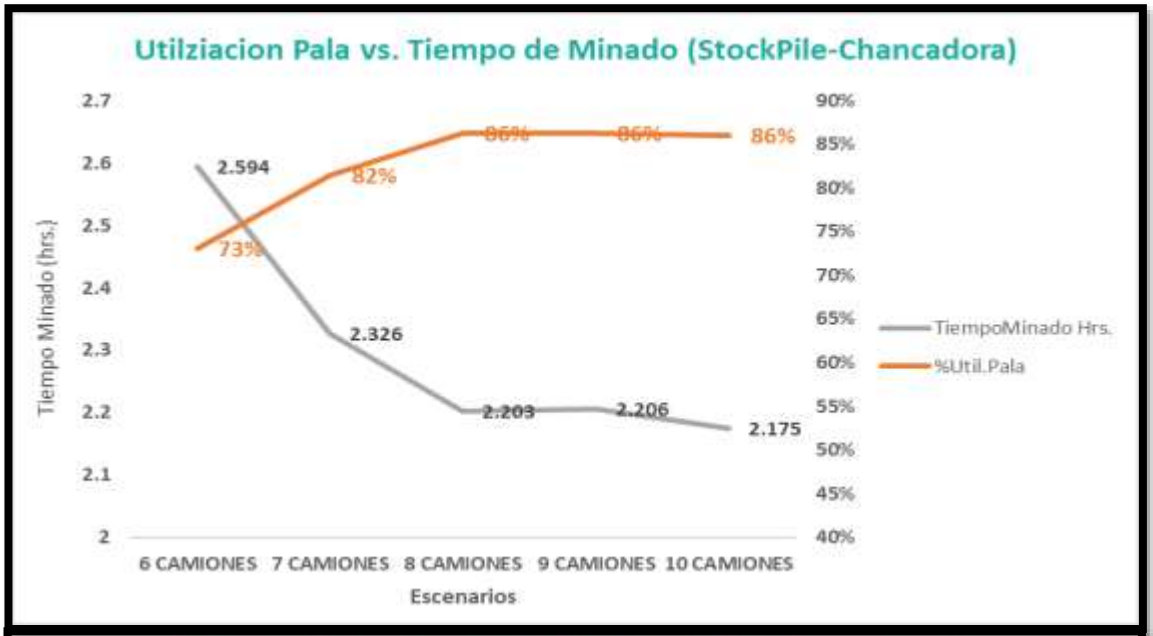
Figura 18. Representación gráfica de cola en Pala con 4 Camiones

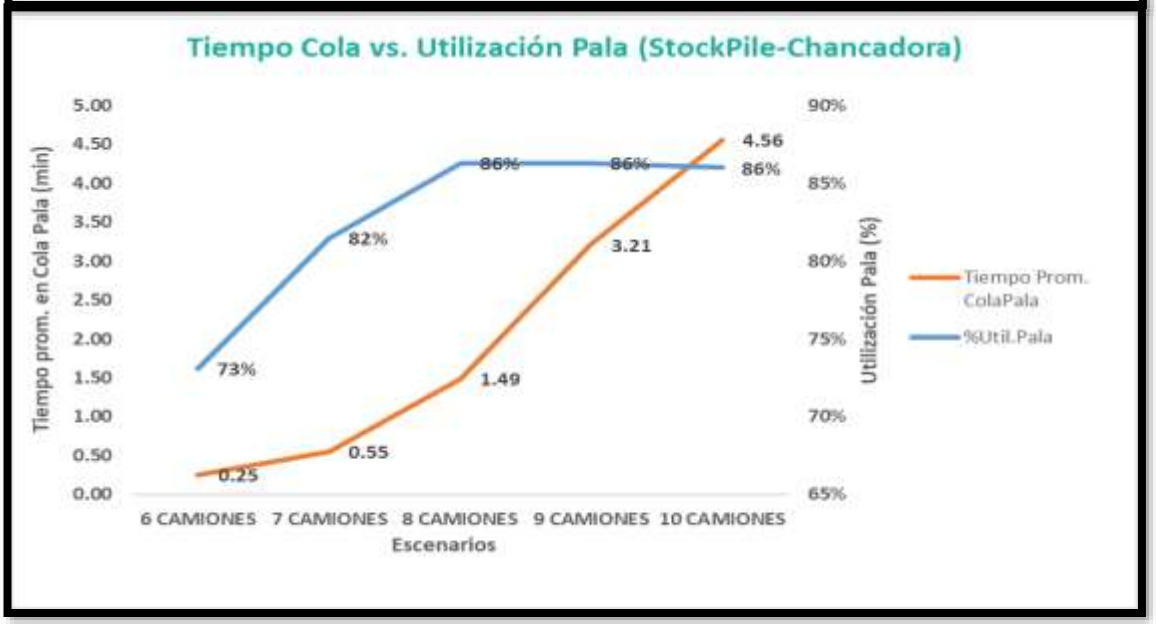
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

b) Ruta Stock Pile – Chancadora





Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Analizando la gráfica comparativa de la *(Figura 19.)* con la cantidad mayor de camiones (10) estos indicadores no reflejan ser productivos, ya que al tener más camiones la cola se incrementa en pala haciéndola en promedio 4.56 minutos.

Y en comparación con la cantidad menor de camiones (6) los indicadores de igual manera no son productivos, ya que presenta una utilización de pala baja de 73%.

Entonces con la ayuda gráfica visual podemos analizar que con el escenario N° 2 de 7 camiones tenemos los indicadores en **equilibrio**, el tiempo en cola de pala viene a ser de 0.55 min. la cual no llega a superar el minuto, mientras que la utilización es buena de 82%, teniendo un tiempo total de minado de 2.32 hrs., y sus tiempos en cola de chancadora tampoco reflejan mayoría, teniendo una utilización constante de ésta. Entonces concluimos que para la ruta de minado **Stock Pile a chancadora** es **necesario 7 camiones**.

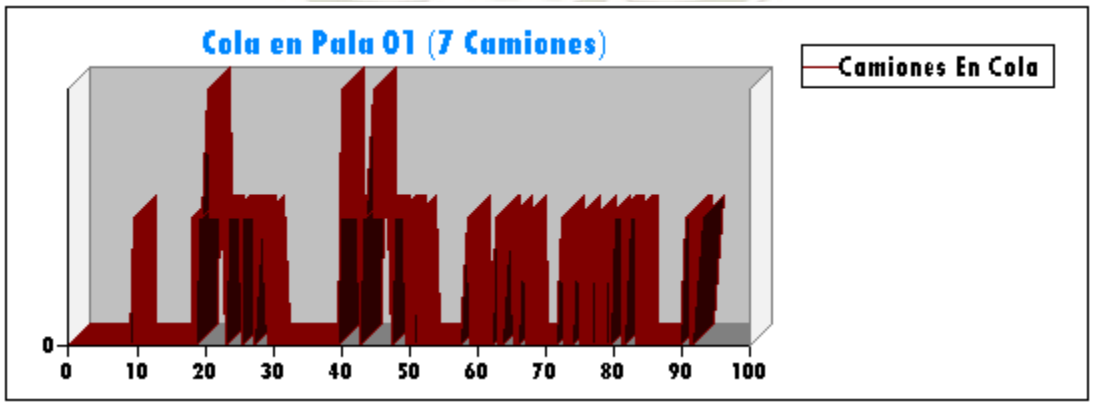


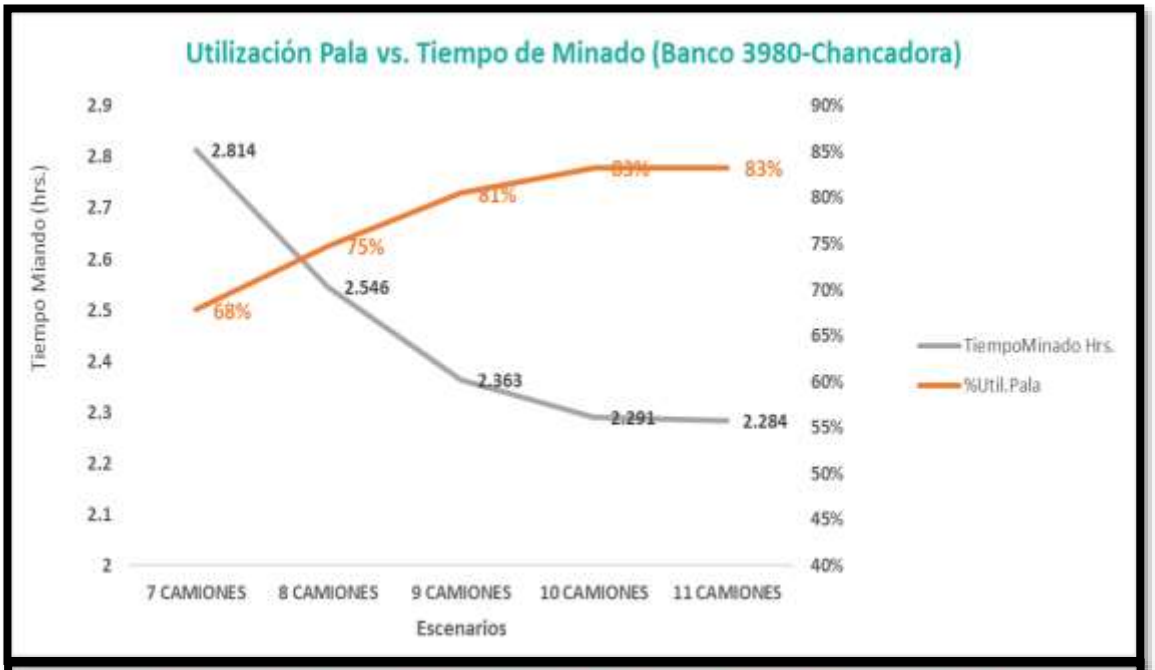
Figura 20. Representación gráfica de cola en Pala con 7 Camiones

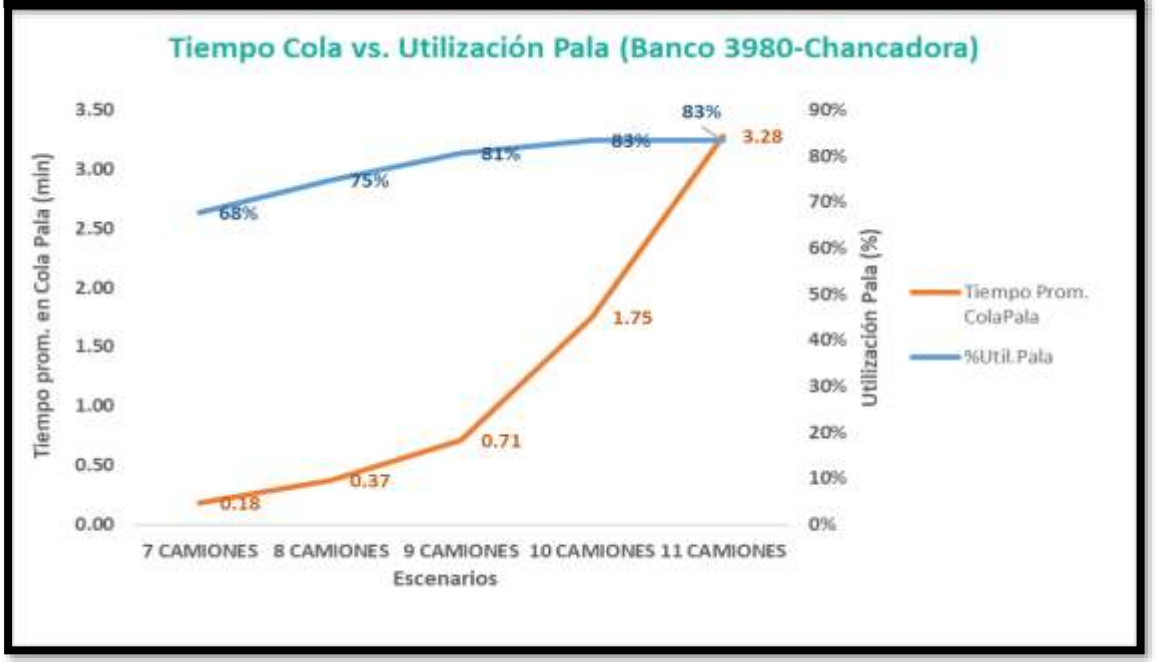
Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

c) Ruta Banco 3980 – Chancadora





Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Según la gráfica *(Figura 21.)* podemos analizar que, con la cantidad mayor de camiones (11) estos indicadores no reflejan ser productivos, ya que al tener más camiones la cola se incrementa en pala haciéndola en promedio 3.28 minutos.

Y en comparación con la cantidad menor de camiones (7) los indicadores de igual manera no son productivos, ya que presenta una utilización de pala baja del 68%.

Entonces con la ayuda gráfica visual podemos analizar que con el escenario N° 3 de 7 camiones tenemos los indicadores en **equilibrio,** el tiempo en cola de pala viene a ser de 0.71 min. mientras que la utilización es considerable al 81%, un tiempo total de minado de 2.36 hrs., y sus tiempos en cola de chancadora tampoco reflejan mayoría, teniendo una utilización constante de ésta. Entonces concluimos que para la ruta de minado **Banco 3890 a chancadora** es **necesario 9 camiones.**

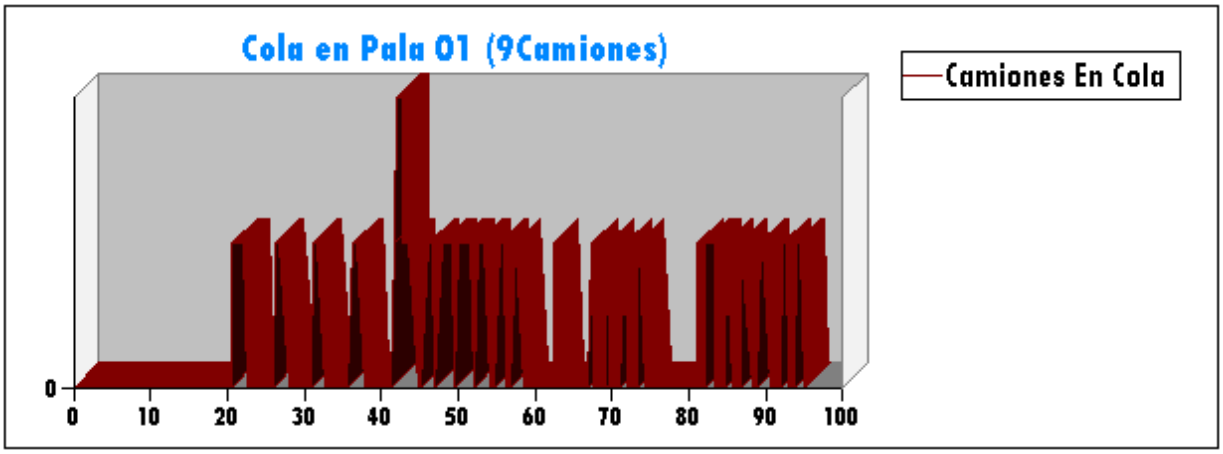


Figura 22. Representación gráfica de cola en Pala con 9 camiones.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

5.6. Análisis de resultados

Como se pudo observar y demostrar en el punto anterior, el análisis de los escenarios para la cantidad de camiones fue corroborado y validado debido a que los indicadores reflejan un igual comportamiento que el del sistema real, además en todos los escenarios la duración de minado está dentro del promedio de 2 horas para la determinada cantidad de material. Siendo los resultados finales los siguientes:

Resultados de productividad post experimentación de escenarios:

Ruta	N° Camiones	Ton. Minadas	TiempoMinado Hrs.	Tiempo Prom. ColaPala	%Util.Pala	Tiempo Prom. ColaCrusher	%Util. Crusher
Banco-SP	4 CAMIONES	10,150.98	2.135	0.51	89%	0.013	64%
SP-Chancadora	7 CAMIONES	10,150.98	2.326	0.55	82%	0.016	60%
Banco-Chancadora	9 CAMIONES	10,150.98	2.363	0.71	81%	0.022	58%

Tabla 7. Cuadro Resumen con número de camiones por ruta

Comprendiendo la ruta de Remanejo 4 y 7 camiones, y para la ruta Directa 9 camiones, los indicadores están dentro de los rangos aceptables con un tiempo promedio en cola menor al minuto y con una utilización de la pala por sobre el 80% por lo tanto son productivos, como se aprecia en la *(Tabla 7.)* además de ser verificados en la animación de la simulación.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Entonces, luego de realizar la experimentación de escenarios de cada ruta para hallar el número de camiones óptimo. Procedemos a la comparación de rutas de minado, cabe resaltar que se tendrá como indicador uno económico ($/hr) representando el costo horario total de los equipos que participan en el minado directo o en el otro caso, de remanejo. Los costos horarios de los equipos son los siguientes:

Equipo	Modelo	($/HR.)
Camion Komatsu	730 E	365.86
Pala Komatsu	PC 4000	866.63

Tabla 8. Costo horario de equipos.

Así que para la primera ruta (Banco 3980-StockPile) la cantidad de camiones para el minado son 4, para la ruta (Stock Pile – Chancadora) fueron 7 camiones. Éstas engloban al remanejo del mineral componiendo un costo total siguiente:

Minado Banco-StockPile					
N°	Escenario	TiempoMinado Hrs.	Costo Acarreo	Costo Carguío	CostoTotal
3	4 CAMIONES	2.135	$ 3,124.41	$ 1,850.26	$ 4,974.67
Minado StockPile-Crusher					
N°	Escenario	TiempoMinado Hrs.	Costo Acarreo	Costo Carguío	CostoTotal
2	7 CAMIONES	2.326	$ 5,956.87	$ 2,015.79	$ 7,972.66
Costo total minado Remanejo ($)			$ 9,081.28	$ 3,866.06	$ 12,947.33

Tabla 9. Cuadro de costos según ruta de remanejo.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Para la tercera ruta (Banco 3980 – Chancadora) que implica la ruta directa, el número de camiones óptimo fué de 9. Los costos para esta ruta son los siguientes:

Minado Banco-Crusher					
N°	Escenario	TiempoMinado Hrs.	Costo Acarreo	Costo Carguío	CostoTotal
3	9 CAMIONES	2.363	$ 7,780.66	$ 2,047.86	$ 9,828.52

Los costos son asociados a la cantidad de camiones óptima para el minado de las 10 000 toneladas de mineral propuestas. Siendo en promedio 2 horas de minado.

Por consecuente podemos observar que el minado por remanejo es ligeramente más costoso que el minado directo, generándonos un ahorro de 3,118.82 dólares en un frente de 10 000 toneladas con destino final chancadora.

Tipo de Ruta	Costo Acarreo	Costo Carguío	CostoTotal
Costo total minado Remanejo ($)	$ 9,081.28	$ 3,866.06	$ 12,947.33
Costo total minado Directo ($)	$ 7,780.66	$ 2,047.86	$ 9,828.52
Ahorro ($)			$ 3,118.82

Tabla 11. Cuadro comparativo de costos de minado.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Capítulo VI

6. Conclusiones

Las conclusiones que desprenden de este trabajo de investigación son las siguientes:

- El modelo de simulación fue verificado y validado representando el sistema de carguío y acarreo, de dónde se pudo obtener resultados y éstos fueron analizados para cuantificar la productividad y costo de dicho proceso.

- Para la ruta de remanejo de acuerdo a la evaluación de escenarios la cantidad óptima de camiones a utilizar fueron de 11 en total y por consecuente 2 palas. Para la ruta directa de minado hacia chancadora los camiones determinados a usar fueron 9, además de la pala.

- La ruta de remanejo presenta un costo total de carguío y acarreo de $12,947.33. La ruta directa hacia chancadora refleja un costo de $9,828.52.

- Podemos concluir que el remanejo implica un costo adicional en un 24.08% en nuestra operación, optimizando los recursos de equipos a un número óptimo de cantidad de camiones necesarios para el minado de cada ruta mediante la teoría de colas y el modelo simulado en Arena. El minado directo que constituye la ruta del Banco 3980 hacia Chancadora resulta ser más económico que un minado con almacenamiento temporal de mineral. Si bien es cierto, la diferencia no es muy

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

significativa pero este valor solo representa un caso ejemplo de todas las actividades de minado que se realizan en mina por mes y por años. Los valores resultarán bastantes significativos generando una mayor utilidad a largo plazo. A raíz de esta conclusión principal se puede identificar otros beneficios y oportunidades:

- En una faena minera existen diversos trabajos a realizar requiriendo de equipos para contribuir con el desarrollo de la mina, se puede tener mayor disponibilidad de los equipos si evitamos el doble manipuleo de mineral a fin de poder utilizarlos en otros trabajos adicionales y/o para llegar a una meta de producción.
- Este trabajo ayudará a la toma de decisión en la mina, ayudando a identificar con valores estadísticos los indicadores y riesgos que puede tomar al almacenar el mineral en un stock temporal y decidir de manera apresurada acerca de un trabajo próximo a realizar, es por eso que se debe evaluar previamente el ¿qué pasaría si?, a manera de evitarnos futuras pérdidas.

- La técnica de simulación es una herramienta poderosa que nos permite representar sistemas del mundo real a través de un computador pudiendo realizar experimentos a fin de mejorar o dar una solución ante un problema ahorrando recursos, dinero y tiempo.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Capítulo VII

7. Recomendaciones

Las recomendaciones que se plantean a raíz de este trabajo de investigación son:

- Este estudio representa un modelo de carguío y acarreo en una operación minera a tajo abierto, el cual puede servir como ejemplo para futuras investigaciones en otras operaciones, diferenciándolas en sus propias variables de cada mina. Incluso este modelo puede ser utilizado cambiando los inputs, como tiempos del ciclo de minado, capacidad de tolva, tonelaje por minar y cantidad de camiones.

- Simular incluyendo la disponibilidad mecánica (fallas por mantenimiento) y utilización (demoras operativas) de los equipos representaría mejor la operación del sistema real.

- Se recomienda utilizar data lo más real y precisa posible para llegar a un buen nivel de confianza en el modelo que representará el sistema lo más cercano a la realidad.

- El modelo construido fue realizado en base a condiciones normales en la mina de temporada seca, considerar las variaciones para diferentes condiciones climatológicas ya sea lluvia o nieve para tener un nivel de certeza más elevado.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

- Este trabajo podrá ser utilizado como referencia si en algún momento se desea realizar el análisis de sistema de carguío y acarreo considerando calidad de materiales, llevándonos a mejores resultados económicos y operacionales con respecto al almacenamiento temporal de materiales.

- La asignación optima del número de camiones es muy importante porque nos permite mantener controlados nuestros costos, ya que, si experimentamos en poner o sacar camiones en el sistema real podría resultar costoso, es por eso que nuevamente la simulación es una herramienta vital para la optimización de los procesos ayudándonos a reducir tiempos improductivos de los equipos maximizando la utilización de los mismos.

- Este trabajo de estudio fue enfocado para medir la productividad de las diferentes rutas de minado de mineral, mas no la calidad de éste (ley mineral). Fue netamente medido y comparado como producción.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

LISTA DE REFERENCIAS

Kelton W., Sadowski R., Sturrock D. (2008). Simulación con software Arena. México, McGraw-Hill

Yarmuch J. (2012). Simulación del sistema de carguío y transporte mina chuquicamata.Tesis Doctoral, Santiago de Chile.

Mejía D. (2009). Simulación de transporte y carguío en mina subterránea con GPSS. Lima, Perú

Maxera C. (2005). Modelo probabilístico del transporte de mineral en minería superficial, Lima, Perú.

Sáez N. (2014). Simulación on-line para el despacho de camiones mineros en operaciones a cielo abierto, Tesis Doctoral, Santiago, Chile.

Castillo A. (2011). Simulación del despacho de camiones en la empresa Xstrata tintaya s.a, utilizando lógica fuzzy para Mejorar la productividad. Cusco, Perú.

Cuentas M. (2009). Investigación de Operaciones mineras, Manual Universitario, Puno, Perú.

B. Pinho, C. Cappelli, L. Lima, L. Nascimento, P. Senna, R. Paim, (2009), Metodologias e Ferramentas para Simulação de Processos, Rio de Janeiro, Brasil.

M. Moretti, J. Bianchi, L. Pinto, L. G. Franzese, L. Ezawa, G.Miranda, (2008), Concurrent simulation and optimization models for mining planning, Brazil.

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

Anexo 1: Tiempos de acarreo según ruta

Banco-SP		SP-Crusher		Banco-Crusher	
FullHaul	EmptyHaul	FullHaul	EmptyHaul	FullHaul	EmptyHaul
1.58	1.08	5.54	3.97	7.78	5.87
2.24	1.49	6.37	4.54	8.58	6.41
2.03	1.36	6.10	4.35	8.32	6.23
2.39	1.58	6.56	4.67	8.76	6.53
2.26	1.50	6.39	4.55	8.59	6.42
2.20	1.46	6.32	4.50	8.53	6.37
2.13	1.42	6.23	4.44	8.44	6.31
2.47	1.63	6.66	4.74	8.85	6.59
2.40	1.59	6.57	4.68	8.77	6.54
2.35	1.56	6.50	4.63	8.71	6.49
2.01	1.35	6.09	4.34	8.31	6.22
2.44	1.61	6.61	4.70	8.81	6.56
2.33	1.54	6.47	4.61	8.68	6.47
2.22	1.47	6.34	4.52	8.55	6.39
2.10	1.40	6.20	4.42	8.41	6.29
1.75	1.19	5.77	4.12	8.00	6.01
1.93	1.30	5.98	4.27	8.21	6.15
2.14	1.42	6.24	4.45	8.45	6.32
1.99	1.33	6.06	4.32	8.28	6.20
2.01	1.34	6.08	4.34	8.30	6.22
2.69	1.77	6.92	4.92	9.11	6.77
2.18	1.45	6.29	4.49	8.51	6.36
1.96	1.32	6.02	4.30	8.25	6.18
1.66	1.13	5.65	4.04	7.89	5.94
1.71	1.16	5.71	4.08	7.95	5.98
2.14	1.43	6.25	4.45	8.46	6.33
2.23	1.48	6.35	4.52	8.56	6.39
2.25	1.49	6.38	4.54	8.58	6.41
2.26	1.50	6.40	4.56	8.60	6.42
2.27	1.51	6.40	4.56	8.61	6.43
2.01	1.34	6.08	4.34	8.30	6.22
2.30	1.52	6.44	4.59	8.65	6.45
2.18	1.45	6.30	4.49	8.51	6.36
2.13	1.42	6.23	4.44	8.45	6.32
1.88	1.26	5.92	4.23	8.14	6.11
2.27	1.51	6.40	4.56	8.61	6.43
2.37	1.57	6.53	4.65	8.74	6.51

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

2.39	1.58	6.55	4.66	8.75	6.52
2.22	1.48	6.34	4.52	8.55	6.39
2.10	1.40	6.20	4.42	8.41	6.29
2.45	1.62	6.63	4.72	8.83	6.58
2.34	1.55	6.49	4.62	8.69	6.48
2.57	1.69	6.77	4.82	8.97	6.67
2.51	1.66	6.71	4.77	8.90	6.63
2.23	1.48	6.36	4.53	8.56	6.40
1.99	1.33	6.05	4.32	8.27	6.20
2.19	1.46	6.31	4.49	8.52	6.36
2.06	1.38	6.14	4.38	8.36	6.26
2.44	1.61	6.61	4.71	8.81	6.57
2.04	1.36	6.12	4.36	8.34	6.24
2.37	1.57	6.53	4.65	8.73	6.51
2.42	1.60	6.59	4.69	8.79	6.55
2.78	1.82	7.04	5.00	9.22	6.84
2.93	1.92	7.22	5.13	9.40	6.96
2.27	1.51	6.40	4.56	8.61	6.43
2.15	1.43	6.26	4.46	8.47	6.33
2.08	1.39	6.17	4.40	8.38	6.27
2.10	1.40	6.19	4.41	8.41	6.29
2.42	1.60	6.59	4.69	8.79	6.55
1.79	1.21	5.81	4.15	8.04	6.04
2.14	1.43	6.25	4.45	8.46	6.33
1.93	1.30	5.99	4.27	8.21	6.15
2.31	1.53	6.45	4.59	8.65	6.46
1.88	1.26	5.92	4.22	8.14	6.11
1.71	1.16	5.71	4.08	7.95	5.98
2.50	1.65	6.69	4.76	8.89	6.62
2.09	1.39	6.18	4.40	8.39	6.28
2.08	1.39	6.17	4.40	8.39	6.28
2.26	1.50	6.39	4.55	8.60	6.42
2.31	1.53	6.46	4.60	8.66	6.46
2.42	1.60	6.59	4.69	8.79	6.55
2.34	1.55	6.49	4.62	8.69	6.48
2.20	1.47	6.32	4.50	8.53	6.37
2.04	1.36	6.12	4.36	8.33	6.24
2.35	1.56	6.50	4.63	8.70	6.49
2.19	1.46	6.31	4.50	8.52	6.37
2.19	1.46	6.30	4.49	8.51	6.36
2.55	1.68	6.76	4.80	8.95	6.66

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

2.35	1.56	6.50	4.63	8.70	6.49
1.95	1.31	6.01	4.29	8.23	6.17
2.26	1.50	6.40	4.56	8.60	6.42
2.15	1.43	6.25	4.46	8.47	6.33
2.34	1.55	6.49	4.62	8.70	6.49
2.27	1.51	6.40	4.56	8.61	6.43
2.25	1.49	6.38	4.54	8.59	6.41
2.14	1.42	6.24	4.45	8.45	6.32
1.99	1.34	6.06	4.32	8.28	6.20
2.05	1.37	6.13	4.37	8.35	6.25
2.17	1.45	6.28	4.48	8.49	6.35
2.39	1.58	6.55	4.66	8.75	6.52
2.22	1.48	6.34	4.52	8.55	6.39
2.70	1.77	6.93	4.93	9.12	6.78
2.35	1.56	6.51	4.63	8.71	6.50
2.13	1.42	6.23	4.44	8.44	6.31
2.01	1.35	6.08	4.34	8.30	6.22
2.30	1.52	6.44	4.58	8.64	6.45
2.21	1.47	6.32	4.51	8.53	6.38
1.89	1.27	5.93	4.24	8.16	6.12
2.32	1.54	6.47	4.60	8.67	6.47
2.21	1.47	6.33	4.51	8.54	6.38
1.99	1.33	6.06	4.32	8.28	6.20
2.55	1.68	6.76	4.81	8.95	6.66
1.98	1.33	6.05	4.32	8.27	6.20
2.49	1.64	6.67	4.75	8.87	6.60
2.32	1.54	6.46	4.60	8.67	6.47
2.10	1.40	6.20	4.42	8.41	6.29
2.17	1.45	6.28	4.48	8.49	6.35
1.90	1.28	5.95	4.24	8.17	6.13
2.59	1.71	6.81	4.84	9.00	6.69
2.31	1.53	6.45	4.60	8.66	6.46
2.00	1.34	6.06	4.33	8.28	6.21
2.45	1.62	6.63	4.72	8.83	6.58
2.40	1.59	6.57	4.68	8.77	6.54
2.25	1.50	6.38	4.55	8.59	6.42
2.03	1.36	6.10	4.35	8.32	6.23
2.02	1.35	6.09	4.34	8.31	6.22
2.40	1.59	6.57	4.67	8.77	6.53
2.20	1.46	6.31	4.50	8.52	6.37
2.00	1.34	6.07	4.33	8.29	6.21

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

2.21	1.47	6.33	4.51	8.54	6.38
2.34	1.55	6.49	4.62	8.69	6.49
2.16	1.44	6.27	4.47	8.48	6.34
2.09	1.39	6.18	4.40	8.39	6.28
2.25	1.49	6.38	4.54	8.58	6.41
2.31	1.53	6.45	4.60	8.66	6.46
2.36	1.56	6.51	4.63	8.71	6.50
2.33	1.55	6.48	4.62	8.69	6.48
2.20	1.46	6.31	4.50	8.52	6.37
1.97	1.32	6.03	4.30	8.25	6.18
2.14	1.43	6.24	4.45	8.46	6.32
2.41	1.60	6.58	4.69	8.78	6.55
1.83	1.23	5.86	4.18	8.09	6.07
2.22	1.48	6.34	4.52	8.55	6.39
2.30	1.52	6.44	4.59	8.65	6.45
2.17	1.45	6.28	4.48	8.49	6.35
1.95	1.31	6.00	4.28	8.23	6.17
2.55	1.68	6.76	4.80	8.95	6.66
2.51	1.65	6.70	4.76	8.89	6.62
2.24	1.49	6.36	4.53	8.57	6.40
2.13	1.42	6.23	4.44	8.44	6.31
2.20	1.46	6.31	4.50	8.52	6.37
2.14	1.43	6.25	4.45	8.46	6.33
2.42	1.60	6.60	4.69	8.80	6.55
2.11	1.41	6.21	4.42	8.42	6.30
2.19	1.46	6.30	4.49	8.51	6.36
2.08	1.39	6.17	4.40	8.39	6.28
2.66	1.75	6.88	4.89	9.07	6.74
2.10	1.40	6.19	4.41	8.41	6.29
2.34	1.55	6.50	4.63	8.70	6.49
2.25	1.49	6.37	4.54	8.58	6.41
2.03	1.36	6.11	4.36	8.33	6.23
2.36	1.56	6.51	4.64	8.72	6.50
2.42	1.60	6.59	4.69	8.79	6.55
2.16	1.44	6.26	4.46	8.48	6.34
2.21	1.47	6.33	4.51	8.54	6.38
2.47	1.63	6.65	4.73	8.85	6.59
1.81	1.22	5.83	4.16	8.06	6.05
2.75	1.80	6.99	4.97	9.18	6.81
2.25	1.49	6.38	4.54	8.59	6.41
1.87	1.26	5.90	4.21	8.13	6.10

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis

REPOSITORIO DE
TESIS UCSM

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE SANTA MARÍA

2.23	1.48	6.35	4.52	8.56	6.39
2.03	1.36	6.11	4.35	8.32	6.23
2.42	1.60	6.59	4.69	8.79	6.55
2.28	1.51	6.41	4.57	8.62	6.43
2.30	1.52	6.44	4.58	8.64	6.45
2.03	1.36	6.11	4.36	8.33	6.24
2.42	1.60	6.59	4.69	8.79	6.55
1.97	1.32	6.03	4.30	8.25	6.18
1.95	1.31	6.01	4.29	8.23	6.17
2.35	1.55	6.50	4.63	8.70	6.49
2.11	1.41	6.20	4.42	8.42	6.30
2.54	1.67	6.74	4.79	8.93	6.65
2.09	1.40	6.18	4.41	8.40	6.28
2.12	1.42	6.22	4.43	8.43	6.31
1.98	1.33	6.05	4.32	8.27	6.20
2.34	1.55	6.49	4.62	8.70	6.49
2.41	1.60	6.58	4.69	8.78	6.55
2.32	1.54	6.47	4.61	8.68	6.47
2.26	1.50	6.40	4.56	8.60	6.42
2.35	1.56	6.50	4.63	8.71	6.49
2.07	1.38	6.16	4.39	8.37	6.27
1.99	1.33	6.05	4.32	8.27	6.20
1.59	1.09	5.56	3.98	7.80	5.88
1.89	1.27	5.93	4.23	8.15	6.12
2.39	1.58	6.55	4.67	8.76	6.53
2.43	1.61	6.60	4.70	8.80	6.56
2.04	1.37	6.12	4.37	8.34	6.24
1.96	1.31	6.02	4.29	8.24	6.18
2.24	1.49	6.36	4.53	8.57	6.40
1.75	1.19	5.76	4.12	7.99	6.01
1.96	1.31	6.02	4.29	8.24	6.17
2.19	1.46	6.30	4.49	8.51	6.36
2.35	1.56	6.51	4.63	8.71	6.50
2.31	1.53	6.46	4.60	8.66	6.46
2.23	1.48	6.36	4.53	8.57	6.40
1.91	1.28	5.95	4.25	8.18	6.13
2.18	1.45	6.29	4.48	8.50	6.35
2.03	1.36	6.11	4.36	8.33	6.24
2.32	1.54	6.46	4.60	8.67	6.47
2.09	1.40	6.19	4.41	8.40	6.29

Publicación autorizada con fines académicos e investigativos
En su investigación no olvide referenciar esta tesis