



Universidad de Valparaíso
Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas
Ingeniería Civil Industrial

“Diseño de Metodología para Cálculo de Flota para Procesos de Movimientos de Tierra en Minería”

Por

Jesús Alberto Farías Lillo

**Trabajo de título para optar al Grado de Licenciado en
Ciencias de la Ingeniería y título de Ingeniero Civil
Industrial**

**Prof. Guía Mauricio Valle
Agosto 2014**

Universidad de Valparaíso
Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas
Ingeniería Civil Industrial



**“Diseño de Metodología para Calculo de Flota para
Procesos de Movimientos de Tierra en Minería”**

Por

Jesús Alberto Farías Lillo

**Trabajo de título para optar al Grado de Licenciado en
Ciencias de la Ingeniería y título de Ingeniero Civil
Industrial**

**Prof. Guía Mauricio Valle
Agosto 2014**

Dedicatoria

A mi Familia, en especial a mi Padre quien ha sido fundamental e incondicional en mi formación valórica y profesional, con quien además tuve la suerte de ser colegas y con quien además pasamos muchas horas trabajando en dar una solución a la problemática en la cual enfoqué este trabajo de título.

Índice

Simbología	6
Lista de Figuras	7
Lista de Tablas	8
Resumen	9
CAPITULO I	10
1.1 Introducción	11
1.2 Objetivos	12
1.2.1 Objetivo General	12
1.2.2 Objetivos Específicos	12
1.2.3 Resultados esperados	12
1.3 Descripción de Situación y Problemática Actual	13
CAPITULO II	14
2 Marco Conceptual	15
2.1 ¿Que es un Proceso de Movimiento de Tierras?	15
2.1.1 Proceso de Excavación	15
2.1.2 Proceso de Carguío	16
2.1.3 Proceso de Transporte de Material	17
2.1.4 Proceso de Descarga	18
2.2 Simulación de Procesos	19
2.2.1 Objetivos de la Simulación	19
2.2.2 Simulación y Movimientos de tierras en Minería	20
2.2.3 Líneas de Espera (Modelo de Colas) y Movimientos de Tierra	21
2.3 Variables en Procesos de Movimiento de Tierra	26
2.3.1. Variables Controlables	26
2.3.2 Variables Endógenas	27
2.4 Análisis de Variables y Tiempos en los Procesos	27
2.4.1. Proceso de Carguío	27
2.4.2. Transporte de Material	29
2.4.3. Tiempo de descarga	30
2.4.4. Tiempo de Ciclo del sistema de movimiento de tierras	31
CAPITULO III	32
3. Metodología	33
3.1 Planteamiento Teórico de la Metodología	33
3.2 Análisis Empírico de la Metodología	37
3.2.1 Información del Proyecto	37
3.2.2 Rutas de Transporte	37
3.2.3 Duración de la Actividad	38
3.2.4 Equipos seleccionados	38
3.2.5 Cálculos	39
CAPITULO IV	43
4. Simulación; Validación de Metodología y Análisis de Resultados	44
4.1. Simulación del Proceso en ARENA®	44

4.1.1. Análisis de Resultados de Simulación del Proceso con Llegada de Camiones Constante de acuerdo a Metodología.	49
4.1.2. Análisis de Resultados de Simulación del Proceso con Llegada Aleatoria de Camiones.....	52
4.2 Consideraciones a la Metodología	55
Conclusión.....	56
Bibliografía.....	58
Anexo I – Planilla Cálculo de Flota de Camiones.....	60

Simbología

(λ) : Número Medio de llegadas de camiones por hora

(μ) : Tiempo Medio de camiones servidos por hora

(W_q) : Tiempo Medio en Cola

(L_q) : Longitud Media de Cola

(W_s) : Tiempo Medio en el Sistema W_s

(L_s) : Número Medio de Clientes en el Sistema

(U) : Utilización del sistema

(P_0) : Probabilidad de que el servidor este desocupado

Lista de Figuras

Figura 2.1: operación de excavación.....	15
Figura 2.2: operación de carguío.....	17
Figura 2.3: operación de transporte.....	17
Figura 2.4: fila de espera en punto de carguío.....	21
Figura 2.5: sistema de Líneas de Espera.....	22
Figura 2.6: sistema un canal – una fase.....	23
Figura 2.7: sistema un canal – Múltifase.....	24
Figura 2.8: sistema multicanal – una fase.....	25
Figura 2.9: sistema multicanal – Multifase fase.....	25
Figura 2.10: Excavadora en giro.....	27
Figura 2.11 a): Excavación en Roca.....	28
Figura 2.11 b): Excavación en suelo común.....	28
Figura 2.12: Rutas de Transporte de Material - Proyecto Escondida Norte.....	29
Figura 2.13: Señaléticas en ruta al interior de obra.....	30
Figura 2.14: Camión en descarga.....	30
Figura 3.1: Circuito del proceso de movimiento de tierras.....	33
Figura 3.2: rutas de transporte en obra.....	37
Figura 3.3: programa de construcción – Planta A1.....	38
Figura 4.1: Inicio de Proceso.....	44
Figura 4.2: Llegada de camiones constante.....	45
Figura 4.3: Llegada de camiones aleatoria.....	45
Figura 4.4: Configuración de condiciones del proceso de carga.....	46
Figura 4.5: Termino del proceso en simulación... ..	47
Figura 4.6: Configuración de condiciones de simulación	47
Figura 4.7 A/B: Inicio de Simulación.....	48
Figura 4.8: Estructura de Reportes de ARENA®.....	48
Figura 4.9: Esquema cíclico de proceso de movimiento de tierras.....	51

Lista de Tablas

Tabla 2.1: Tipos de excavaciones.....	15
Tabla 3.1: Datos del Proyecto.....	37

Resumen

El presente trabajo de título, considera la creación de una Metodología Determinística para el cálculo de flota de camiones para llevar a cabo procesos de movimientos de tierra, con la finalidad de aplicarla en estudios y ejecución de proyectos industriales, principalmente enfocando este trabajo a la industria minera.

El interés de resolver esta problemática se debe a que no existe una herramienta u/o práctica estructurada que considere las condiciones reales de terreno para poder efectuar la estimación de flota de camiones, y que además, permita un funcionamiento continuo y eficiente de este proceso.

El desarrollo del trabajo de título se inicia explicando las actuales problemáticas y consecuencias sobre la actual forma de ejecutar estos trabajos, donde posteriormente se explica y analiza los aspectos teóricos en los cuales se fundamentó el desarrollo de la Metodología.

Una vez construida y descrita la Metodología, esta fue empleada para dar solución a una problemática artificial, que consideró condiciones reales de terreno y que fue ajustada a diferentes condiciones de trabajo para probar la flexibilidad de esta práctica ante diferentes situaciones comunes del desarrollo de proyectos de construcción. Los resultados obtenidos de este ejercicio, fueron analizados bajo la sistema de Líneas de Espera (teoría de Colas) a través de una Simulación con el software ARENA®, esto con la finalidad de realizar una validación de esta Metodología a través de una herramienta conocida, que se adaptara a las condiciones del proceso en cuestión y de esta manera respaldar el uso de esta Metodología para el estudio y ejecución de procesos de movimientos de tierras masivos.

CAPITULO I

Planteamiento de Situación Actual y Problemática a Estudiar

1.1 Introducción

Cuando se comienza con el estudio de un proyecto de construcción, se debe considerar que la gran mayoría de estos, lleva consigo movimientos de tierra asociados en el principio de su ejecución, más aun cuando el proyecto corresponde a la construcción de una planta de proceso de mineral desde su primera etapa. Si es así, se debe hacer un estudio completo del terreno, para poder calcular el volumen total de tierra (o material) a remover para ajustar el terreno para la futura construcción, y todos sus sistemas anexos, tales como; Caminos de accesos, caminos interiores, movimientos de tierra para las instalaciones de faenas, talleres para maquinarias, campamentos para el personal, entre otras instalaciones.

Los procesos de movimientos de tierra en los proyectos mineros son de orden masivo, lo que significa que grandes cantidades de material deben ser removidos para la estabilización y nivelación de las superficies donde las futuras instalaciones o infraestructura serán ubicadas. Es por esta razón que esta memoria se basa en el estudio de la actual deficiencia que existe en el cálculo de la flota de camiones necesaria para realizar los procesos de movimientos de tierra, lo cual genera un gran encarecimiento en los costos durante la ejecución de los proyectos, por lo que, la memoria busca analizar todos los factores y variables no consideradas en estos procesos y así plantear una Metodología de cálculo de flota, que permita una mejora en el funcionamiento del proceso de movimiento de tierras.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Establecer una Metodología para la estimación de flota de camiones necesaria para la ejecución de procesos de movimientos de tierra en Minería

1.2.2 Objetivos Específicos

- 1.- Determinar una Metodología para el cálculo de flota de camiones para procesos de movimientos de tierra.
- 2.- Identificación y análisis de variables y su incidencia en las operaciones de movimiento de tierras.
- 3.- Análisis de la Operación bajo diversas condiciones de trabajos.
- 4.- Mejorar la productividad en el proceso considerando la flota de camiones necesarias para el proceso bajo las condiciones particulares de cada caso o proyecto.
- 5.- Plantear una Metodología de cálculo de flota de camiones, que permita ejecutar los movimientos de tierra bajo condiciones de plazo y costos establecidos para el proyecto.
- 6.- Crear una metodología que permita un funcionamiento continuo del sistema, sin la existencia de tiempos muertos por parte de cargador como de camiones en espera a ser atendidos.
- 7.- Validar la Metodología planteada a través de sistema conocido (Análisis Líneas de Espera), para establecer confiabilidad en su uso.
- 8.- Simulación del Proceso a través de la herramienta ARENA® para respaldo de resultados obtenidos en el análisis de Líneas de Espera.

1.2.3 Resultados esperados

De acuerdo al estudio que esta memoria realizará, se espera poder establecer una metodología estándar para el cálculo de flota de camiones para el estudio y ejecución de procesos de movimientos de tierras masivos en minería, con lo que se pretende reducir los errores cometidos en el análisis y cálculos, lo cual genera actualmente un alto impacto en costo y plazo durante el desarrollo de la construcción.

1.3 Descripción de Situación y Problemática Actual

Actualmente las mineras más grandes que están presentes en nuestro país; Codelco, BHP Billiton, Anglo American, entre otras, se encuentran invirtiendo en el desarrollo de nuevos proyectos mineros. La gran parte de ellos corresponde a proyectos de expansión de capacidad de producción, por ende, estos proyectos contemplan la construcción de nuevas instalaciones, lo que significa que habrá movimientos de tierra masivos asociados a estas

Actualmente no existe una Practica establecida para el cálculo de flota de camiones en procesos de movimientos de tierra, de acuerdo a esto, surge la necesidad de establecer una Metodología de cálculo de flota de camiones que considere la identificación de los principales factores que impactan directamente al proceso y a su vez con esto establecer una nueva práctica (Metodología) que además de otorgar una mejora del proceso en su funcionamiento, sea capaz de dar solución a las problemáticas que actualmente está generando debido a los cálculos, tales como:

- Costos adicionales al presupuesto debido a que se debe considerar una vez en obra, más camiones por mala estimación de recursos para llevar a cabo el movimiento de tierras para cumplir con plazos establecidos.
- Costos indeseados debido a sobreestimación de flota de camiones, lo que trae consigo colas y tiempos muertos de espera de estos en puntos de carga y descarga.
- Falta de camiones en el circuito genera tiempos muertos a unidad de Carguío, lo cual genera costos indeseados e ineficiencia en el sistema.
- Ejecutar los movimientos de tierra dentro los plazos y presupuesto establecidos.
- Evitar atrasos en la ejecución de procesos de movimientos de tierras, contando con la flota necesaria. Es importante considerar que los movimientos de tierras son las obras iniciales de toda construcción, por lo que un atraso en estos, genera atrasos en toda la secuencia constructiva y como consecuencia un posible retraso de la construcción del proyecto.

CAPITULO II

Marco Conceptual

2 Marco Conceptual

2.1 ¿Que es un Proceso de Movimiento de Tierras?

“Se define como al conjunto de operaciones que se realizan con los terrenos naturales, a fin de modificar las formas de la naturaleza o de aportar materiales útiles en obras públicas, minería o industria.”(Ref. *Alberto Villarino, Maquinaria de Obra Civil, s.f.*).

Las operaciones del movimiento de tierras en el caso más general son:

- Excavación
- Carga
- Transporte de Material.
- Descarga.
- Extendido. *(Fuera del alcance de esta Tesis).*
- Humectación. *(Fuera del alcance de esta Tesis).*
- Compactación. *(Fuera del alcance de esta Tesis).*
- Servicios auxiliares (refinos, saneo, etc.). *(Fuera del alcance de esta Tesis).*

2.1.1 Proceso de Excavación

Los materiales se encuentran en la naturaleza en formaciones de muy diverso tipo, la excavación consiste en extraer o separar del banco, porciones de su material. Cada terreno presenta distinta dificultad a su excavabilidad y por ello en cada caso se precisan medios diferentes para afrontar con éxito su excavación.

Los productos de excavación se colocan en un medio de transporte mediante la operación de carga. Una vez llegado a su destino, el material es depositado mediante la operación de descarga. Esta puede hacerse sobre el propio terreno, en tolvas dispuestas a tal efecto, etc.

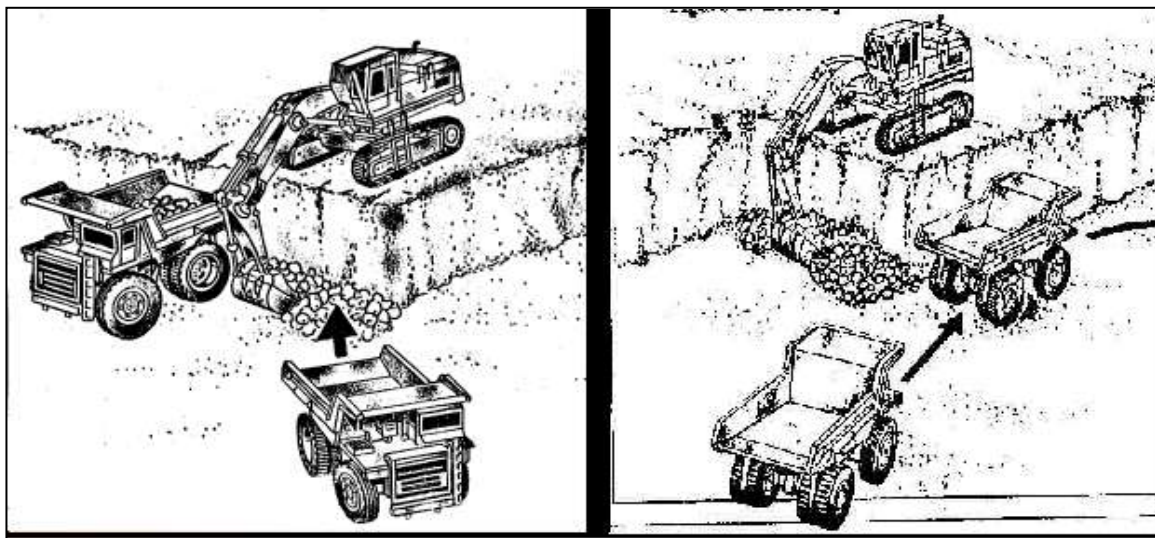


Figura 2.1, operación de excavación

Los tipos de excavaciones se presentan en la siguiente tabla:

TIPOS DE EXCAVACIONES	A CIELO ABIERTO		ROCA Es necesario utilizar explosivos o martillos rompedores hidráulicos (Picadoras).	
			TERRENO DURO Es necesario utilizar explosivos, martillos rompedores hidráulicos (picadoras) o máquinas de ripeado .	
			TERRENO DE TRANSITO Se excavan por medios mecánicos o con escarificadores .	
			TIERRAS Se pueden excavar a mano .	
			FANGOS Medios especiales de transporte o desecar antes.	
	SUBTERRANEAS		TUNEL Y GALERIAS Se emplean explosivos, topes, y medios mecánicos .	
POZOS Excavación vertical o casi vertical, presentando el problema de la extracción de los productos de excavación.				
SUBACUATICAS		No es posible actuar desde tierra, siendo necesario el empleo de medios flotantes .		
TIPOS DE EXCAVACIONES	EXPLANACIONES	*Vaciados en edificación	Terraplén en ambos	Conseguir la rasante a partir de la cual se construirá.
		*Desmontes en obra civil		
	MEDIA LADERA			Excavación de taludes sobre la rasante a un lado de la explanación y bajo rasante en el otro .
	ZANJAS			Excavaciones longitudinales y estrechas.
	TRINCHERA			Excavación longitudinal y ancha destinada a abrir paso a un camino, carretera, ferrocarril, etc.
POZOS			Excavaciones de poca sección y mucha profundidad.	

Tabla 2.1, Tipos de excavaciones

(Ref. "Introducción a Sistemas Mineros" Profesor Raúl Castro, 2008).

2.1.2 Proceso de Carguío.

Consiste en el proceso de carga de material para su posterior traslado a la zona de descarga. Este proceso consiste de dos partes funcionales; un Servidor y una unidad Servida que trasladará el material. Este proceso dependiendo de los requerimientos de productividad-eficiencia y las condiciones operacionales que se presenten, las Palas pueden ser dispuestas en dos modalidades de carguío: Cancha Simple, en donde la pala

tiene habilitado solo uno de sus costados para cargar o bien Cancha Doble, donde se tiene habilitado ambos costados del equipo para cargar.



Figura 2.2, operación de carguío.

2.1.3 Proceso de Transporte de Material

Consiste en transportar el material desde el punto de carguío hacia los distintos puntos de descarga entre los cuales pueden ser estación de chancado, botadero, acopio de mineral, etc.

Los tiempos críticos que se presentan en el ciclo de transporte comprenden una serie de maniobras, que se inician en el momento de ser despachados por el operador de pala y finaliza con una nueva asignación luego de verter el material. Durante este trayecto también conjugan las velocidades en rutas, determinadas principalmente por el tipo de camión y condiciones del camino, la pendiente de cada tramo, así como también el abastecimiento de combustible.

Cada uno de los tiempos críticos se detalla a continuación:

1. Maniobra y Descarga en Chancado
2. Maniobra y Descarga en Botaderos o Stock
3. Acarreo (Perfiles de Transporte).



Figura 2.3, operación de transporte

Las rutas de acarreo usualmente se caracterizan por la variabilidad de pendientes que hay en los distintos caminos, lo que asociado al modelo de camión de extracción que circula por ella determinará una variabilidad en las velocidades que se desarrollan en cada una de estas rutas.

El ciclo de transporte **es una operación clave para conocer los requerimientos de flota en un nivel productivo**, en donde confluyen tanto las tasas de excavación y también el tiempo que demoran los camiones de extracción en cumplir los recorridos asignados entre origen y destino. Un punto fundamental en la evaluación de velocidades en los distintos perfiles de transporte, es la condición de viaje en que va el equipo, es decir si viaja cargado o vacío y la determinación de las rutas por las cuales los camiones se trasladaran.

Más adelante se mostrara más detalle, ya que son puntos a analizar debido a que son parte de la problemática que esta memoria estudiará.

2.1.4 Proceso de Descarga

Este proceso consiste en la descarga del material transportado desde la zona de carguío a la zona de descarga o donde el material tendrá su disposición final o de almacenamiento para futuros rellenos que puedan surgir en la faena donde el material pueda ser utilizado.

Una forma óptima de descarga es evitar las colas que se producen en el sector de descarga. Se debe mantener entonces un flujo in-interrumpido y controlado de la llegada de camiones a estos puntos de vaciado, sin que se produzcan colas entre uno y otro, además este flujo debe permitir una descarga fluida; es decir, no debe existir un camión esperando por descarga. Es por esta razón que una frecuencia de llegada muy corta entre uno y otro equipo no genera la eficiencia deseada, más bien redundante en colas y una apreciación visual errónea en terreno. De esta manera la frecuencia de llegada debe ser tal que permita tanto la maniobra del camión en posesionarse en la zona de descarga y la descarga de material.

2.2 Simulación de Procesos

Una Simulación de un sistema es una imitación del funcionamiento de un proceso real en un tiempo determinado considerando las variables y factores asociados al proceso con la finalidad de acercarse a la obtención de resultados cercanos al de una operación real.

Para realizar una Simulación, principalmente se debe considerar:

- Una idea o modelo del sistema real.
- Generar una historia artificial de sucesos en el sistema y sus repercusiones.

La finalidad de una simulación es la de responder a las interrogantes existentes en un estudio de un proceso a realizar, o un proceso sobre el cual se efectuara algún cambio u optimización y sobre el cual se estudia el comportamiento del proceso frente a los cambios y o nuevas variables.

2.2.1 Objetivos de la Simulación

Existen numerosos propósitos generales para hacer uso de las técnicas de simulación en operaciones mineras, que pueden resumirse de la siguiente manera:

- **Minimizar actividades costosas en tiempo y dinero;** en el mundo de la minería, como en cualquier otra actividad productiva, la competitividad que existe en cuanto a precios y costos de oportunidad, obliga a los investigadores a la búsqueda constante de métodos y técnicas eficaces que contribuyen a este objetivo.
- **Disminuir riesgos en la toma de decisiones anticipadas;** esto exige la utilización de procedimientos de simulación alternamente sofisticados en el uso de coeficientes de seguridad, no solo para cubrir la incertidumbre, sino también para cubrir la variabilidad estadística.
- **Cuantificación de parámetros y valores correspondientes a cada función y modos de fallo asociados;** para ello, deben establecerse criterios de calificación adecuados, asociados a cada factor, parámetros mesurables que los caractericen.
- **Optimización e integración entre la Simulación, el diseño y la experimentación del resultado final;** la Simulación no puede reemplazar la necesidad de realizar ensayos, por el contrario se deben aprovechar al máximo las ventajas; así como, las sinergias positivas existentes entre ellas, en orden de conseguir la máxima eficiencia

conjunta. No obstante, es claro que la Simulación está cambiando el papel de la experimentación en la línea de permitir una disminución en la cantidad de ensayos realizados, que suele ir unida a un aumento en la calidad y complejidad de los mismos. (*Ref. Aplicación de la Simulación para la Optimización del Acarreo de Mineral – Universidad Mayor de San Marcos, Perú, 2010.*)

2.2.2 Simulación y Movimientos de tierras en Minería

Los procesos de Simulación que puedan estar asociados a operaciones o sistemas dentro de la minería, estos pueden ser estudiados de dos formas, estas son bajo Sistemas Discretos y Continuos. La mayoría de las operaciones mineras son ejemplos de eventos Discretos.

Un sistema Discreto es aquel que en un intervalo de tiempo, en cualquier momento solo un número contable de eventos pueden ocurrir, es así para el caso de una mina pueden suceder una variedad de eventos que ocurren simultáneamente y que a su vez pueden ser contabilizados, por ejemplo: en un momento particular un camión puede llegar a tiempo a una pala, mientras otros puede estar alejándose, una pala puede estropearse o un camión puede terminar descargando, es decir existen muchos eventos que tienen lugar a la vez y pueden ser contabilizados.

En un sistema Continuo, no es posible enumerar los eventos, como por ejemplo podría ser el flujo de aire en una mina, el flujo de aceite en una línea de la tubería, etc. Tales sistemas son compuestos principalmente por ecuaciones diferenciales que en general son no lineales, puesto que la mayoría de los sistemas o procesos dentro de la minería pueden representarse como sistemas discretos, incluyendo los procesos de movimiento de tierras, interés de esta memoria.

Inicialmente el uso de las ecuaciones y sistemas de ecuaciones diferenciales han sido las herramientas más adecuadas para modelar sistemas, para resolverlas se han reducido muchas veces a sistemas lineales, siendo el álgebra vectorial, el análisis funcional y la teoría general de operadores, herramientas útiles que son ciertas condiciones simplificadoras se han mostrado eficaces para el estudio de las distintas ciencias (física, economía, biología, sociología, etc.).

Existen diversos métodos de Simulación y estos se dan en función al diseño del modelo (Continuo, Discreto, Estocástico y Matemático), que representa en esencia las características del sistema real, con la finalidad de comprender su comportamiento y evaluar nuevas estrategias para abordarlo, ellos se dividen principalmente en:

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

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

2.2.3 Líneas de Espera (Modelo de Colas) y Movimientos de Tierra.

El objetivo de esta memoria además de plantear una nueva práctica para el cálculo de flota de camiones, considera dentro de sus objetivos realizar una mejora del sistema; esto implica realizar la actividad bajo condiciones eficientes y que no permitan el surgimiento de tiempos muertos tanto en la unidad Servidora (Cargador) como en los camiones en el punto de carguío.

La existencia de Colas de camiones esperando a ser servidos, es sinónimo de una mala estimación de camiones, ya que la Metodología está diseñada considerando todas las variables del proceso con el objeto que este sistema funcione eficientemente bajo un proceso continuo y de llegadas de frecuencia constante.



Figura 2.4, fila de espera en punto de carguío.

Un mal cálculo de flota puede generar tiempos muertos en flota de camiones cuando esta considera más de los camiones necesarios, por lo que la unidad servidora (Cargador) no puede cumplir con el servicio de carga, lo que genera Colas de espera de camiones.

Caso opuesto es una subestimación de camiones para el circuito lo que generara tiempos de llegada irregulares al punto de carguío, lo que provocara que el Cargador frecuentemente este con tiempos muertos (sin funcionamiento), lo que se traduce en ambos casos, en costos indeseados por mantener maquinaria sin uso.

Para esto se analizará la Metodología bajo el Modelo de Colas o también conocido como Líneas de Espera, herramienta que permitirá identificar si la flota de camiones calculada es la adecuada para llevar a cabo el proceso de Movimientos de Tierra bajo un escenario eficiente y continuo.

Las Líneas de Espera fueron estudiadas por primera vez por A.K. Erlang en 1913 quien enfoco sus estudios en los servicios telefónicos de la época, esto con la finalidad de encontrar el equilibrio entre el Costo de suministrar un buen servicio y tiempo de espera de los clientes.

(Ref. Guía Clase Investigación de Operaciones, U. Valpo, Enrique Fajó 2009)

Las Líneas de Espera cuentan con su propia terminología la que se muestra a continuación:

- **Cola:** Línea de Espera.
- **Llegada:** es cualquier entidad que llega y demanda por un servicio.
- **Disciplina de Colas:** corresponde a las reglas para determinar el orden en el que las llegadas reciben el servicio.
- **Servidor:** Ente encargado de satisfacer la demanda del servicio.
- **Canal:** corresponde al número de servidores que satisfacen la demanda del servicio.
- **Fase:** Son los pasos a seguir dentro del servicio.

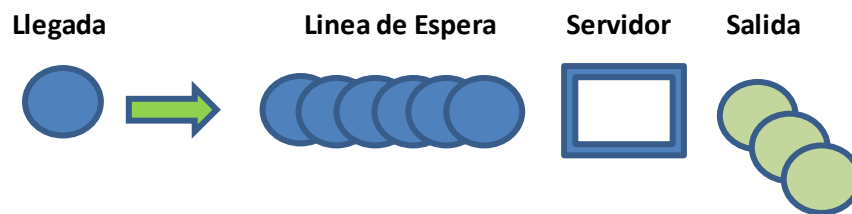


Figura 2.5, sistema de Líneas de Espera

El sistema de Línea de Espera se ajusta a la problemática en estudio, pudiendo ver este esquema como el punto de carguío donde los camiones son servidos por la unidad cargadora.

Antes de realizar un análisis de un sistema utilizando Líneas de Espera, es necesario comprender como el sistema está compuesto y en base a esto determinar cuál es el Sistema de evaluación que más se ajusta a la problemática, esto se debe a que existen

diversos sistemas de Líneas de Espera y la elección de uno o de otro, es dependiente de la cantidad de Canales y de Fases dentro del proceso o sistema a evaluar; pero antes de revisar los diferentes sistemas y sus características, es importante mencionar las medidas de evaluación por las cuales se rigen estos sistemas de Líneas de Espera.

Las medidas de evaluación que componen los diversos sistemas de Líneas de Cola son los siguientes:

- λ : Es el número medio de llegadas por periodo de tiempo (1 unidad/hora).
- μ : Es el número medio de entes servidos por periodo de tiempo (2 unidades/min).
- W_q : Es el tiempo medio en la cola.
- L_q : Longitud media de cola
- W_s : Tiempo medio en el sistema
- L_s : Número medio de clientes en el sistema
- P_0 : Probabilidad de que el servidor este desocupado
- U : Utilización del sistema
- P_x : Probabilidades de que haya unidades en el sistema.

De acuerdo a lo mencionado anteriormente y conociendo las medidas de evaluación de los sistemas de Líneas de Espera, a continuación se presentan los diferentes tipos de sistemas existentes, con la finalidad de hacer elección del sistema que se adecue para analizar la Metodología que esta tesis propone para el cálculo de flota de camiones. Los Sistemas de Líneas de Espera son los siguientes:

a) Sistema de Un Canal – Una Fase

Los entes llegan al punto de servicio a través de un solo canal y el servicio es brindado de una sola vez, ósea en una sola fase. Estos sistemas se caracterizan por lo siguiente:

- Las llegadas son atendidas de acuerdo a FIFO, Primero que llega, es el primero en salir.
- Las llegadas son independiente de las llegadas anteriores.
- Se conoce el tiempo de servicio medio para que un ente sea atendido.
- Generalmente el ritmo de servicio es mayor que el de llegadas.
- Posee un único servidor en el sistema.



Figura 2.6, sistema un canal – una fase

Las medidas de evaluación para llevar a cabo el análisis empírico de este sistema están determinadas por las siguientes fórmulas:

- L_s : Número medio de clientes en el sistema $\equiv \frac{\lambda}{\mu - \lambda}$
- W_s : Tiempo medio en el sistema $\equiv \frac{1}{\mu - \lambda}$
- L_q : Numero medio de unidades en cola $\equiv \frac{\lambda(\exp 2)}{\mu (\mu - \lambda)}$
- W_q : Es el tiempo medio en la cola. $\equiv \frac{\lambda}{\mu (\mu - \lambda)}$
- U : Utilización del sistema $\equiv \frac{\lambda}{\mu}$
- P_0 : Probabilidad de que el servidor este desocupado $\equiv 1 - U$
- P_x : Probabilidades de que haya k unidades en el sistema. $\equiv \left[\frac{\lambda}{\mu} \right]^{k+1}$

b) Sistema de Un Canal – Múltifase

Los entes llegan al punto de servicio a través de un solo canal y el servicio es brindado en más de una Fase. Posee las mismas características de un Sistema Un Canal – Una Fase, solo que el servicio es dado en más de una etapa (más fases).

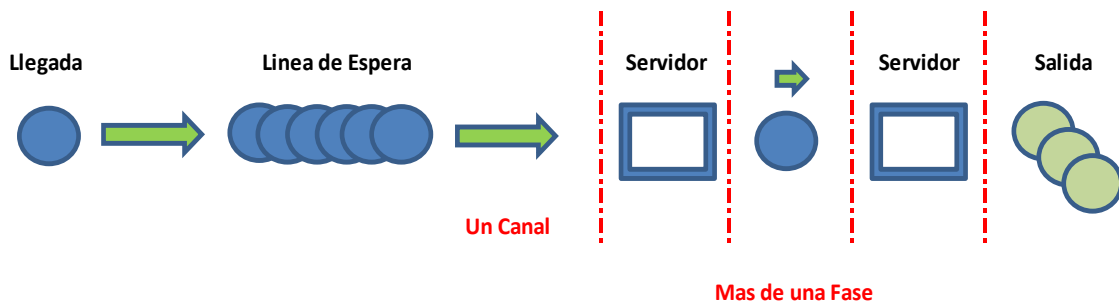


Figura 2.7, sistema un canal - Múltifase

c) Sistema Multicanal – Una Fase

- Las llegadas son atendidas de acuerdo a FIFO, Primero que llega, es el primero en salir.
- Los entes pueden poseer diferentes tiempos de servicio dependiendo del servidor.
- Tiempos de espera menor a otros sistemas
- Relación del servicio y llegadas, son independientes.

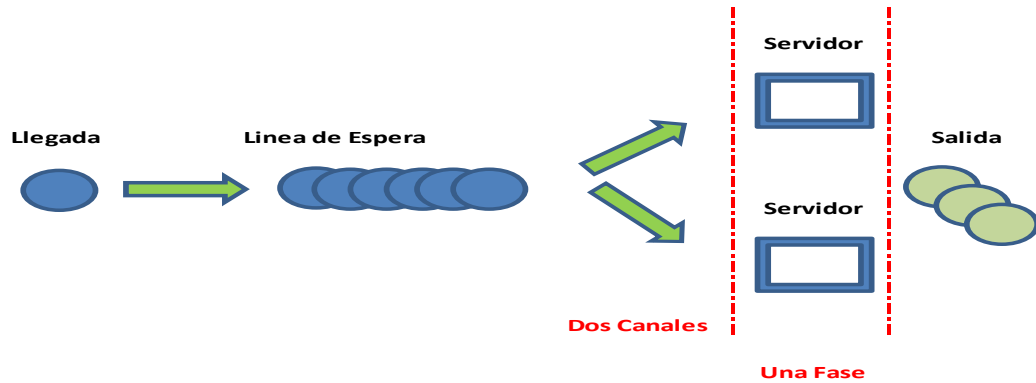


Figura 2.8, sistema multicanal – una fase

d) Sistema Multicanal - Multifase

Estos sistemas están compuestos por más de un Canal de llegada al punto de servicio y este es brindado en más de una Fase.

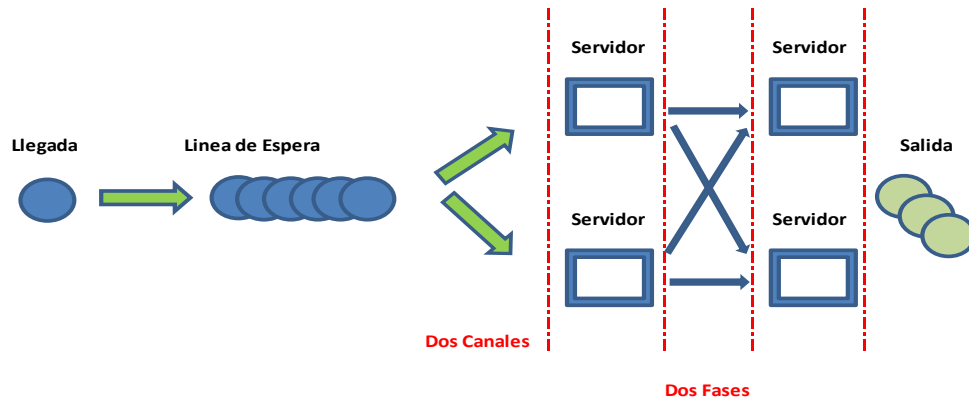


Figura 2.9, sistema multicanal – Multifase fase

De acuerdo a esto, es posible determinar que el sistema que más se ajusta al proceso de movimiento de tierras para el análisis es el de **Un Canal – Una Fase**, ya que la Metodología que se estudiara más adelante, plantea llevar a cabo la actividad con una Unidad Servidora (Cargador) y su respectiva flota de camiones (Entes) los cuales se encuentran dentro de un circuito cerrado, teniendo como punto inicial y final el servicio de carguío.

Una vez que la Metodología que esta memoria plantea sea analizada empíricamente, los valores arrojados serán reanalizados bajo el Sistema de Líneas de Espera de Un Canal – Una Fase con la finalidad de determinar la eficiencia del sistema determinando la existencia de Líneas de Espera y tiempos muertos de las entidades en el proceso, que idealmente se espera sea cero.

(Ref. *“Teoría de Colas y Simulación de Eventos Discretos”* – Pearson Education 2003).

2.3 Variables en Procesos de Movimiento de Tierra

Como se ha mencionado anteriormente una Simulación es una imitación del funcionamiento de un proceso real en relación al tiempo, por lo cual para realizar una Simulación, es necesario contar con un modelo del sistema real, posterior a esto, generar una historia artificial de los sucesos en el sistema identificando todas las variables que inciden en el sistema.

De acuerdo a lo anterior, una vez definido el proceso a estudiar, se debe tener en consideración:

- Identificar las variables de control y endógenas.
- Definir la escala de medida.
- Definir la relación entre las variables.

2.3.1. Variables Controlables

Las variables controlables, son aquellas que es posible definir las y establecerlas en el proceso a simular, estas variables pueden ser definidas dependiendo de la disponibilidad de los recursos existentes para ejecutar el proceso en estudio.

Las variables controlables asociadas al proceso de movimiento de tierras pueden ser entre otras los más incidentes y determinantes del sistema por ejemplo:

- Método de transporte del material, (tipo de camión y capacidad para este caso).
- Tipo de cargador a utilizar.
- Ubicación de infraestructura de descarga del material (siempre y cuando pueda tener libertad de definirla, de acuerdo a disponibilidad del sitio donde se ejecutara el proceso).

2.3.2 Variables Endógenas

Son aquellas variables que están ya definidas en el sistema por defecto y sobre las cuales no es posible incidir o realizar cambios. Para los procesos de movimiento de tierras, estas variables son por ejemplo:

- La ubicación del punto de excavación o yacimiento.
- Factores legales asociados a los procesos.
- Ley de Mineral.
- Tipo de material (rocoso, tierra común, etc.).
- Rutas de traslado de material (solo si están ya establecidas en obra).

(Ref. Aplicación de la Simulación para la Optimización del Acarreo de Mineral – Universidad Mayor de San Marcos, Perú, 2010).

2.4 Análisis de Variables y Tiempos en los Procesos

El cálculo de la flota, es directamente dependiente del tiempo que los procesos poseen, y estos a su vez, son determinados por las variables que los afectan, por lo cual, para comenzar a determinar la metodología de cálculo, es necesario conocer y definir las variables a las cuales el proceso de movimientos de tierra se verá afecto, para poder realizar una Simulación que permita obtener datos más fiables que representen lo será el funcionamiento del proceso en la realidad.

El proceso de movimientos de tierra se compone de cuatro etapas; carguío, transporte del material, descarga, y regreso a punto de carga. Cada una de estas etapas es un proceso en sí, que poseen sus propias variables, las cuales determinan sus tiempos, lo que se traspa directamente al funcionamiento del proceso en conjunto o sistema global de movimiento de tierras.

2.4.1. Proceso de Carguío

Las variables que están asociadas a este proceso, y que determinan su tiempo de ejecución son principalmente:

a) El Cargador y tiempo de ciclo de pala: este equipo que debe ser seleccionado de acuerdo a su disponibilidad y capacidad para llevar a cabo el trabajo. El cargador de acuerdo a sus especificaciones técnicas, posee tiempos de proceso asociados a su

funcionamiento. Este tiempo es el que toma desde que excava, gira, y vierte el material dentro del camión, y giro de posicionamiento para próxima palada.



Figura 2.10, Excavadora en giro.

b) Estado del Material: el estado en el que se encuentra el material, impacta directamente en el tiempo de ciclo del cargador, y que dependiendo de las propiedades físicas en que se encuentre, este proceso puede tomar mayor o menor tiempo. El material en estado rocoso, lógicamente tomara mayor tiempo de ciclo de pala, ya que su manejo es poco más complejo por su peso y granulometría, lo contrario a excavar en suelo común. Estos tiempos también son mencionados en la eficiencia del equipo en las especificaciones técnicas, por lo cual se recomienda utilizar estas especificaciones del equipo para la determinación del tiempo de pala.

Teniendo en consideración estas variables, es posible calcular el Tiempo de Carguío que este proceso tendrá y que como vemos, es determinado por las variables mencionadas.



Figura 2.11 a), Excavación en Roca



Figura 2.11 b), Excavación en suelo común

El Tiempo de Carguío, es el tiempo que toma el cargador con sus tiempos de pala, en cargar un camión hasta su capacidad de balde. Este tiempo puede ser calculado de la siguiente forma, y es determinante en el cálculo de flota como se verá más adelante.

2.4.2. Transporte de Material

Estas variables corresponden principalmente a variables endógenas y errores de consideración al proceso.

Dentro de las variables más incidentes que afectan este proceso podemos mencionar:

- Considerar misma ruta de ida como de vuelta, (misma distancia), lo cual es poco probable ocurra por consideraciones de seguridad, debido a que camiones cargados y vacíos presentan condiciones dinámicas diferentes por lo cual no deberían circular por misma ruta



Figura 2.12, Rutas de Transporte de Material - Proyecto Escondida Norte – PIT Growth (BHP Billiton).

- Consideración de velocidad de traslado constante; esto es prácticamente imposible porque para esto, se debe definir las condiciones del camino tanto de ida como de vuelta, ya que estas determinan la variación en las velocidades. Además se debe considerar que el camión en traslado cargado es más lento que el camión que regresa vacío al punto de carga.

- Consideración de velocidades en los cálculos que no son permitidas en terreno por factores de seguridad. Cada proyecto establece sus señaléticas para la ejecución de los trabajos, estas también incluyen la definición de velocidades de circulación internas.



Figura 2.13, Señaléticas en ruta al interior de obra

En resumen, para el cálculo del Tiempo de Traslado se deben considerar distancias lo más reales posible, para ello obtener planos de terreno, Layouts y/o cualquier información de terreno que facilite la visualización de las rutas. Considerar velocidades de acuerdo a las condiciones de traslado y condiciones en las que se encuentran las rutas por las cuales se desplazarán los camiones.

2.4.3. Tiempo de descarga.

Actualmente no se considera tiempo de espera en punto de descarga, en caso de haberlo, ya que simplemente se considera para el cálculo de tiempo de descarga, lo que el camión demora en vaciar el material, pero no existe estudio que permita desglosar el tiempo de descarga en las variables que pueden componerlo.

Entre esas variables:

- Tiempo de espera para descarga.
- Maniobras para posicionamiento en el lugar de descarga.
- Descarga de material.



Figura 2.14, Camión en descarga

2.4.4. Tiempo de Ciclo del sistema de movimiento de tierras.

El tiempo de Ciclo del sistema, corresponde a la sumatoria de todos los tiempos de los procesos individuales que un solo camión requiere para llevar a cabo el proceso de movimiento de tierras.

El tiempo de Ciclo como se verá en detalle más adelante, es determinante para el resultado del cálculo de la flota, es por ello la importancia del análisis de los tiempos individuales de cada proceso, que son los que lo componen.

CAPITULO III

Metodología; planteamiento Teórico y Análisis de Problemática

3. Metodología

3.1 Planteamiento Teórico de la Metodología

Con toda la información hasta el momento presentada, se tiene una visión más clara de la problemática que esta memoria estudiará. Por lo cual, se procederá a hacer una estructuración de la información, y aplicación de esta, en la creación de una Metodología para el cálculo de flota, que será posteriormente analizada empíricamente, donde la Metodología propuesta en este punto, será usada para dar solución a una problemática artificial de un proceso de movimiento de tierras.

El análisis del proceso de movimiento de tierras comienza con la elección de la maquinaria a utilizar para llevar a cabo el proceso. La maquinaria a elegir dependerá netamente del volumen de tierra a mover, por lo que la capacidad de los equipos (m³) es decisiva para el inicio del análisis. Se debe tener en consideración que la maquinaria a utilizar, debe existir en el mercado, esto quiere decir, apoyarse de manuales y especificaciones técnicas de proveedores de equipos. De esta manera se evita trabajar en los cálculos con capacidades inexistentes que causaran un error en el cálculo final de flota de camiones.

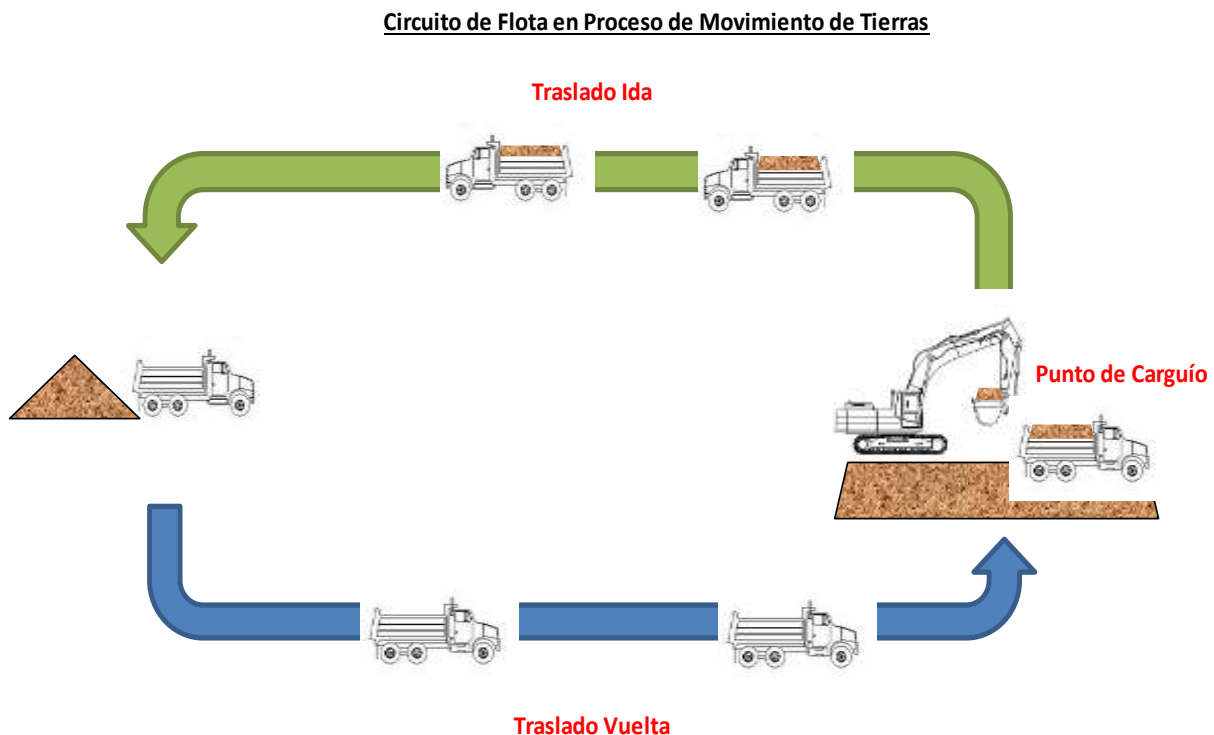


Figura 3.1, Circuito del proceso de movimiento de tierras

Una vez seleccionada la capacidad del cargador, como así también el tipo de camión (capacidad), se procede con el análisis de los tiempos de los procesos, y con esto, el inicio de la Metodología bajo análisis.

a) Tiempo de Carguío; esta variable corresponde al tiempo que toma la unidad servidora en cargar un camión, por lo cual los pasos para el cálculo de tiempo de carguío son los siguientes:

- Con la capacidad del camión (m³), y con la capacidad de la pala (m³) del cargador, realizar a través de una relación, el cálculo de la cantidad de paladas necesarias para llenar la cubeta del camión.
- Luego por catálogo o especificación técnica del cargador seleccionado, ver el tiempo de ciclo de palada. Esto se refiere al tiempo que transcurre entre que el cargador/excavadora toma el material, gira, vacía el material en la cubeta del camión, y gira para nuevamente tomar material.
- Finalmente el tiempo de Carguío es calculado por la cantidad de paladas necesarias para cargar el camión, por el tiempo de ciclo de cada palada.

En resumen, la operación puede ser calculada a través de la siguiente formula:

$$\text{Tiempo de Carguío: } \left[\frac{\text{Capacidad de Tolva de Camión}}{\text{Capacidad de Cuchara cargador (m3)}} \right] \times \text{Tiempo de ciclo por pala}$$

b) Tiempo de Traslado; corresponde al tiempo que toma el camión en trasladar el material hasta el punto de descarga, y luego, el tiempo desde el punto de descarga hasta el punto de carguío (traslado ida-vuelta). Para el cálculo del tiempo de Traslado, se plantea la siguiente metodología:

- Determinar la distancia de las rutas que harán los camiones desde el punto de carguío, al punto de descarga.
- Identificar todas las variables y/o problemáticas de la ruta y establecer la velocidad promedio de traslado del camión, considerando, camión cargado, estado del camino, si la ruta considera paso por carretera, cruces, señaléticas, etc. Lo mismo debe ser considerado para el traslado de vuelta; esto quiere decir, si la ruta será la misma, cambia condición dinámica por camión circular vacío, condiciones de la nueva ruta (de existir), etc.

- Una vez definidas las distancias y velocidades tanto para la ruta de ida, como la ruta de vuelta, proceder al cálculo del tiempo de traslado, de acuerdo a la siguiente formula:

$$\text{Tiempo Traslado (ida): } \frac{\text{Distancia a punto de descarga (km)}}{\text{Velocidad (km/Hr)}}$$

$$\text{Tiempo Traslado (vuelta): } \frac{\text{Distancia a punto de carga (km)}}{\text{Velocidad (km/Hr)}}$$

Tiempo Traslado Total: Tiempo Traslado (Ida) + Tiempo Traslado (Vuelta)

- c) **Tiempo de Ciclo;** corresponde al tiempo requerido para que un camión complete el ciclo de movimiento de tierras, desde que es cargado hasta que vuelve al punto de carga.

Por lo que en resumen, el Tiempo de Ciclo, es la sumatoria de todos los tiempos involucrados en el proceso de movimiento de tierras, y es determinado de la siguiente forma:

Tiempo de Ciclo: Tiempo de Carguío + Tiempo de Traslado + Tiempo de Descarga

- d) **Cálculo de Flota;** corresponde al cálculo de flota de camiones dentro del circuito, que son necesarios para llevar a cabo el proceso de movimientos de tierra. Esta flota de camiones está asociada a solo una unidad cargadora, como se verá, ya que este cálculo se relaciona directamente del tiempo de carguío de solo una unidad. Es por esto que más adelante se mencionaran algunas consideraciones operativas, ya que muchas veces es posible que con la flota calculada, no sea posible cumplir con los plazos para realizar un proceso de movimiento de tierras, por el alto volumen de tierra involucrado, esto producto de que la flota calculada permite que se lleve a cabo el proceso, sin tener camiones en colas en los puntos de carguíos y descarga, por lo cual, el sistema debe ser ajustado posteriormente a las condiciones del Programa de Construcción. Es por esto, que existen algunas formas de analizar esta situación, la cual puede ser abordada, poniendo más frentes de trabajo, aumentando los turnos de trabajos, o realizando nuevo cálculo de flota, modificando las capacidades en los equipos para ajustarse al programa de construcción establecido para el proyecto, lo cual denominaremos ajuste del proceso y es parte del análisis empírico de la Metodología.

El cálculo de flota de camiones es determinado por la relación entre Tiempo de Ciclo y Tiempo de Carguío, como se muestra a continuación:

$$\frac{\text{Tiempo de Ciclo}}{\text{Tiempo Carguío}} = \text{Flota de Camiones}$$

3.2 Análisis Empírico de la Metodología

Con la Metodología previamente descrita, se realizará el análisis empírico de esta, sobre el proyecto ficticio “Prueba – Planta A1”, el que cuenta con la siguiente información:

3.2.1 Información del Proyecto

Nombre del Proyecto	Prueba - Planta A1
Ubicación	Diego de Almagro, Región de Atacama
Actividad en Análisis	Mov. Tierras para Plataforma A1
Volumen a remover	10,000 m ³
Disposición del Material	En acopio (solo cargar)
Turno por Día	10 Hrs

Tabla 3.1 – Datos del Proyecto

3.2.2 Rutas de Transporte

Ruta de Ida posee una longitud de 4,2 km, cuenta con pendientes de bajada aproximadamente 1,7 km, posterior a esto la ruta es lineal y pareja. Camino tiene 6 metros de ancho. Se estima su velocidad promedio cargado en 30 km/hr.

Ruta de Vuelta posee una longitud de 3,8 km, cuenta con pendientes de subida aproximadamente 2,8 km, posterior a esto la ruta es lineal y pareja. Camino tiene 6 metros de ancho. Se estima su velocidad de traslado vacío promedio en 30 km/hr esto debido a la longitud del tramo en pendiente de subida y seguridad.



-  : Punto de Carguío
-  : Punto de Descarga
-  4,2 km : Ruta Ida
-  3,8 km : Ruta Vuelta

Figura 3.2, rutas de transporte en obra.

3.2.3 Duración de la Actividad

De acuerdo al Programa de Construcción Prueba – Planta A1, el plazo para la ejecución de esta actividad es de 33 días continuos, bajo un turno de 10 horas por día.

La actividad fue marcada en el Programa de Construcción, con color verde para su rápida identificación.

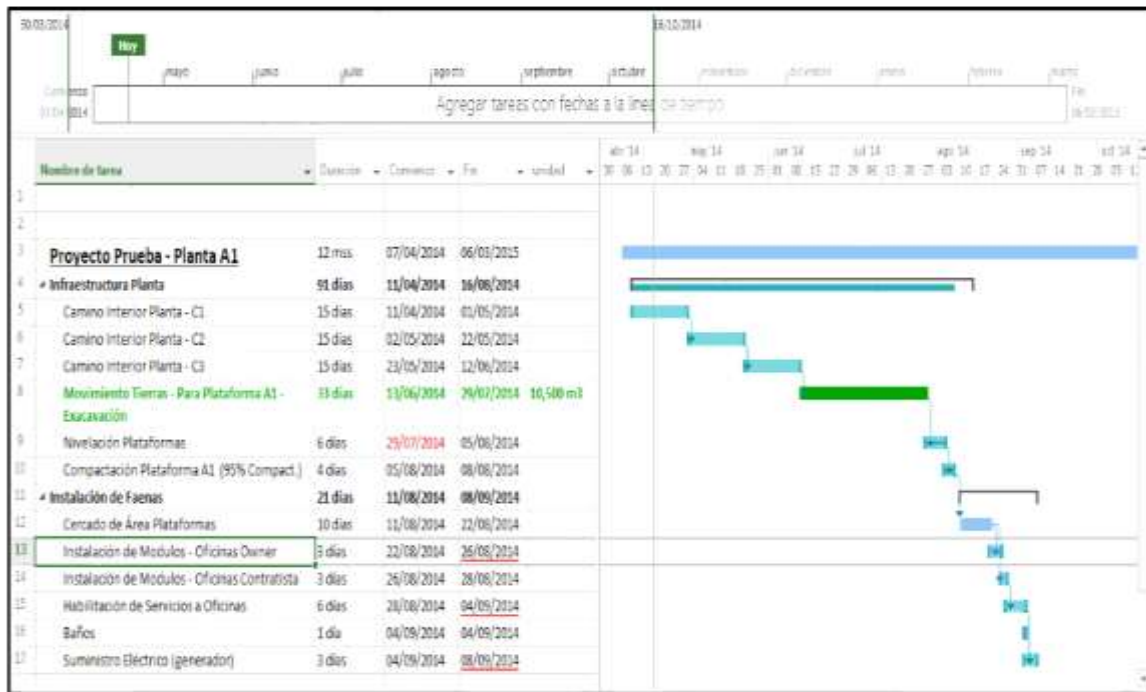


Figura 3.3, programa de construcción – Planta A1

3.2.4 Equipos seleccionados

Para llevar a cabo la actividad, se utilizarán los siguientes equipos de acuerdo a la disponibilidad de mercado y volumen a remover.

Excavadora

Modelo	Kobelco 350
Potencia	264 Hp
Capacidad de Cuchara (m3)	2,30
Tiempo de ciclo palada	1,2 min = 0,02 Hr.



Camión

Marca	Iveco (12,880 cc)
Potencia	380 Hp
Capacidad de Tolva	20 (m3)



3.2.5 Cálculos

Caso I: Cálculo de Flota dentro de Condiciones de Programa de Construcción

a) **Tiempo de Carguío:** $\left[\frac{\text{Capacidad de Tolva de Camión (m3)}}{\text{Capacidad de Cuchara cargador (m3)}} \right] \times \text{Tiempo de ciclo por pala}$

$$= \left[\frac{20 \text{ m3}}{2,3 \text{ m3}} \right] \times 0,02 \text{ hr} = \mathbf{0,17 \text{ Hr.}}$$

b) **Tiempo de Traslado:**

$$\text{Tiempo Traslado (ida): } \frac{\text{Distancia a punto de descarga (km)}}{\text{Velocidad (km/Hr)}}$$

$$\text{Tiempo Traslado (vuelta): } \frac{\text{Distancia a punto de carga (km)}}{\text{Velocidad (km/Hr)}}$$

$$\text{Tiempo Traslado (ida): } \frac{4,2 \text{ Km}}{30 \text{ Km/Hr}} = \mathbf{0,14 \text{ Hr}}$$

$$\text{Tiempo Traslado (vuelta): } \frac{3,8 \text{ Km}}{30 \text{ Km/Hr}} = \mathbf{0,13 \text{ Hr}}$$

$$\text{Tiempo de Traslado Total} = [0,14 \text{ Hr} + 0,13 \text{ Hr}] = \mathbf{0,27 \text{ Hr.}}$$

c) **Tiempo de Descarga:** Se estima lo siguiente,

Tiempo de posicionamiento en punto de descarga 2 min = 0,034 Hr.

Tiempo de Descarga de Material 2 min = 0,034 Hr.

Tiempo de Descarga: 0,068 Hr

d) **Tiempo de Ciclo: a) + b) + c) = 0,17 + 0,27 + 0,068 = 0,508 Hr**

e) **Cálculo de Flota de Camiones:** $\frac{\text{Tiempo de Ciclo}}{\text{Tiempo de Carguío}} = \frac{0,508 \text{ Hr}}{0,17 \text{ Hr}} = \mathbf{3 \text{ Camiones}}$

f) Revisión del Proceso con Flota Calculada

$$\begin{aligned}\text{Volumen transportado por viaje} &= \text{Volumen Camión en un Ciclo} \\ &= 20 \text{ m}^3 / \text{viaje (0,508 hr)}\end{aligned}$$

Volumen transportado en 1 Hora = Si 20 m³ son transportados en 0,508 Hr. (Tiempo por viaje), entonces en una hora:

$$\begin{aligned}&= 20 \text{ m}^3 / 0,508 \text{ hr} \\ &= 39,4 \text{ m}^3 / \text{hr}\end{aligned}$$

Volumen transportado en 1 Día = **Volumen por Hora x 1 día** (turno de 10 horas por día)

$$\begin{aligned}&= 39,4 \text{ m}^3 \times 10 \text{ Horas} \\ &= 394 \text{ m}^3 / \text{Día}\end{aligned}$$

Volumen transportado en 33 Días = **m³ por Día x Días para actividad en Programa**

$$\begin{aligned}&= 394 \text{ m}^3 \times 33 \text{ Días} \\ &= 13,002 \text{ m}^3\end{aligned}$$

De acuerdo a este resultado, en el tiempo establecido en el Programa de Construcción (33 días), es posible mover 13,002 m³ de material, lo cual es más que el volumen de tierra requerido de 10,000m³ para la Plataforma A1. Por lo cual, se realizara un sencillo análisis para determinar en cuanto tiempo efectivo se podrían mover los 10,000 m³, de esta manera es posible realizar el trabajo en menos tiempo de lo programado y con esto provocar un adelanto de las actividades constructivas posteriores a los movimientos de tierra; por lo tanto, es posible realizar estos trabajos en:

$$\begin{aligned}\text{En 33 días} &= 13,002 \text{ m}^3 \\ \text{¿En XX días} &= 10,000 \text{ m}^3? \\ &= (33 \times 10,000) / 13,002 = 25 \text{ Días} \\ &\text{es posible remover los } 10,000 \text{ m}^3\end{aligned}$$

Este resultado genera un impacto positivo al Programa de Construcción, lo que significa un adelanto de 8 días en toda la secuencia constructiva.

Caso II: Cálculo de Flota fuera de Programa de Construcción

Para este Caso, se considerará que el tiempo de acuerdo a Programa de Construcción se reducirá a 15 días continuos de trabajo, se considera mismos datos de **Caso I**.

A) Cumplir con Programa de Construcción con trabajo de Doble turno

$$\begin{aligned}\text{Volumen transportado por viaje} &= \text{Volumen Camión en un Ciclo} \\ &= 20 \text{ m}^3 / \text{viaje (0,508 hr)}\end{aligned}$$

Volumen transportado en 1 Hora = Si 20 m³ son transportados en 0,508 Hr.
(Tiempo por viaje), entonces en una hora:

$$\begin{aligned}&= 20 \text{ m}^3 / 0,508 \text{ hr} \\ &= 39,4 \text{ m}^3 / \text{hr}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Volumen transportado en 1 Día} &= \text{Volumen por Hora x 1 día (Horas de Turno)} \\ &= 39,4 \text{ m}^3 \times 10 \text{ Horas} \\ &= 394 \text{ m}^3 / \text{Día}\end{aligned}$$

Volumen transportado en 7 Días = m³ por Día x Días para actividad en Programa

$$\begin{aligned}&= 394 \text{ m}^3 \times 15 \text{ Días} \\ &= 5,910 \text{ m}^3\end{aligned}$$

Se puede observar que con la flota calculada de 3 camiones en 15 días no es posible mover los 10,000 m³ de material de la Plataforma A1, por lo que se realizarán los trabajos asumiendo que se cuenta con la autorización de trabajar en doble turno por día, esto quiere decir, 20 horas / Día (un equipo de día y otro de noche). De acuerdo a esto se tiene lo siguiente:

$$\begin{aligned}\text{Volumen transportado en 1 Día} &= \text{Volumen por Hora x Horas de Turno} \\ &= 39,4 \text{ m}^3/\text{Hr} \times 20 \text{ Horas por día (2 turnos)} \\ &= 788 \text{ m}^3 / \text{Día}\end{aligned}$$

Volumen transportado en 15 Días = m³ por Día x Días para actividad en Programa

$$= 788 \text{ m}^3 \times \mathbf{15 \text{ Días}}$$

$$= \mathbf{11,822 \text{ m}^3}$$

B) Realizar Movimientos de tierra con más de un frente de Trabajo.

Este caso es probable que ocurra cuando no es posible realizar el trabajo en doble turno, ya sea por condiciones de poca iluminación, estándares del cliente, o porque no se estableció en las bases contractuales. Para este caso, se puede resolver de la siguiente forma tomando como referencia los datos del **Caso I**:

Volumen transportado en 1 Día = Volumen por Hora x Horas de Turno

$$= 39,4 \text{ m}^3 \times 10 \text{ Horas}$$

$$= \mathbf{394 \text{ m}^3 / \text{Día}}$$

Volumen transportado en 15 Días = m³ por Día x Días para actividad en Programa

$$= 394 \text{ m}^3 \times \mathbf{15 \text{ Días}}$$

$$= \mathbf{5,910 \text{ m}^3}$$

Debemos recordar que el cálculo de flota de camiones es en base a un solo Cargador, ósea los **5,910 m³** que es posible mover, son ejecutados por un solo “**frente de trabajo**”, esto quiere decir, un solo cargador más su flota de camiones, por lo que debido a la actual situación de incumplimiento al Programa de Construcción, se puede considerar un segundo frente de trabajo (otro cargador más 3 camiones), y con esto se tiene que:

Un Frente de trabajo en 15 días mueve 5,910 m³ de material, por lo que con 2 Frentes es posible mover 11,280, esto quiere decir que con 2 Frentes de trabajo se puede ejecutar los movimientos de tierra en:

$$= (15 \times 10,000) / 11,280 = \mathbf{13.3 \text{ días.}}$$

CAPITULO IV

Simulación; Validación de Metodología y Análisis de Resultados

4. Simulación; Validación de Metodología y Análisis de Resultados

Habiendo descrito y utilizado la Metodología para el cálculo de flota de camiones en un ejercicio que considera todas las variables de terreno para un proceso de movimiento de tierras; se procedió a analizar esta metodología, bajo Teoría de Líneas de Espera, antes descrita en punto 2.2.3. Con la finalidad de validar el Cálculo de Flota de camiones, a través del software ARENA® Simulator.

A continuación se mostraran las dos simulaciones al proceso; la primera de ellas (punto 4.1.1.), corresponde a la Simulación de la Metodología que este trabajo de título plantea, de acuerdo a lo mencionado anteriormente, se determina que la llegada de camiones al punto de carga sea de carácter constante (proceso determinístico), esto con la finalidad de analizar el funcionamiento del sistema bajo Líneas de Espera, para la determinación de colas en el sistema y con esto ver la existencia de tiempos muertos de espera tanto como en camiones como en la unidad cargadora; la segunda simulación corresponde a esta misma Metodología pero con arribo de camiones de forma aleatoria (exponencial Poisson), ósea llegadas de camiones de forma irregular al punto de carguío, para ver la diferencia entre ambos procesos, y con esto dar validez a la Metodología planteada por esta tesis.

A continuación se detallan los pasos realizados para la simulación del proceso.

4.1. Simulación del Proceso en ARENA®

Paso 1:

Se realiza inicio del proceso agregando desde la barra de proyecto, icono “**Create**”.

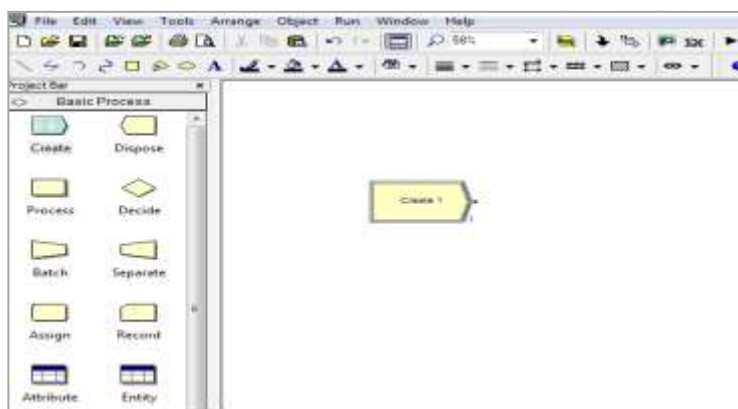


Figura 4.1, Inicio proceso

Paso 2:

De acuerdo a las condiciones del funcionamiento del proceso en estudio, se completan los campos de “**Create**” mostrado en la figura 2A, donde se observa que:

- **Nombre:** Llegada de Camiones (al punto de carguío)
- **Tipo de Entidad:** Las entidades son los camiones en el sistema
- **Tiempo entre llegadas:** es constante y está determinada por el tiempo de carguío de los camiones (ver punto 4.2.1.).
- **Valor:** 0,17 Hr/Cami3n (Ver punto 4.1.).
- **Entidades por Llegada:** los camiones llegan de 1 en 1.

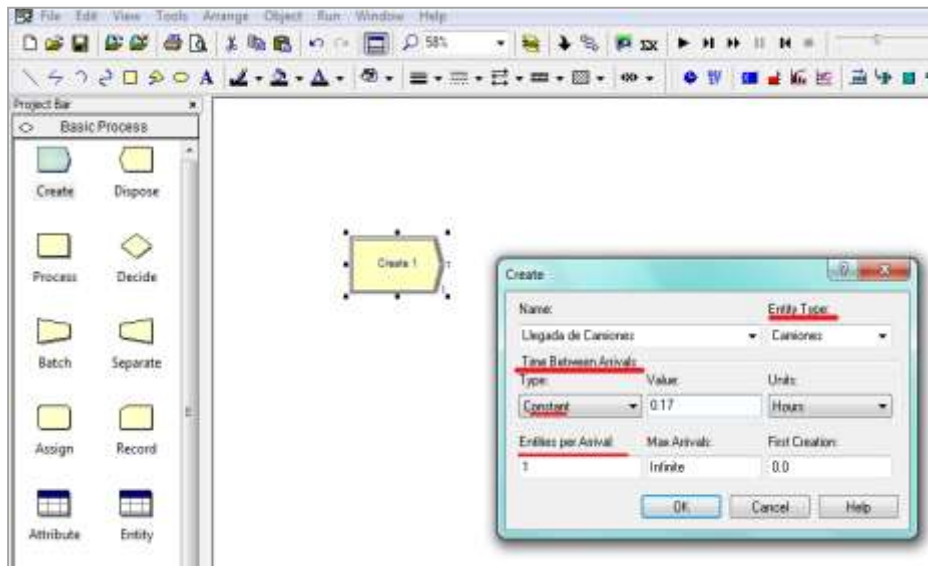


Figura 4.2, llegada camiones constantes

Para el **Caso (4.1.2.)** donde los camiones se simulan bajo una condici3n de llegada aleatoria, la configuraci3n de llegada es la siguiente:

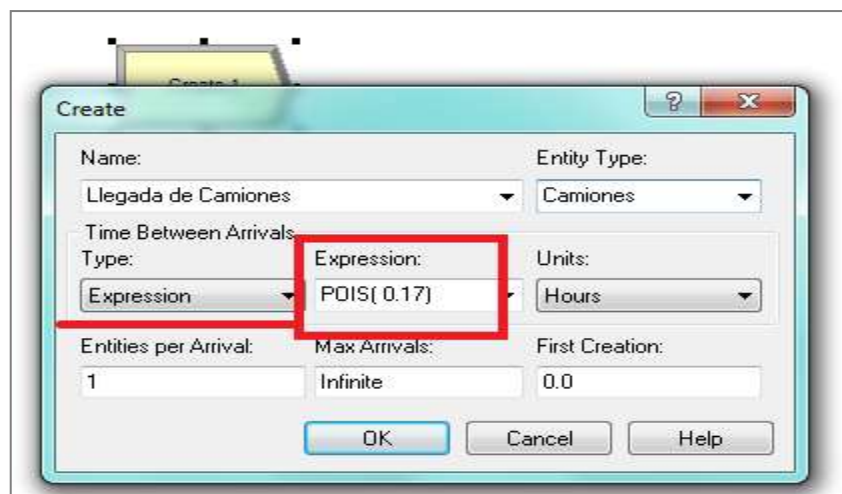


Figura 4.3, llegada camiones aleatoria

Esto tomando mismo valor de 0,17hr por camión pero en carácter aleatorio con distribución exponencial de Poisson.

Paso 3:

Se agregó desde la barra de proyecto el icono “**Process**” y se completó con la información correspondiente al Proceso en estudio, esto de acuerdo a:

- **Nombre del Proceso:** Punto de Carguío
- **Acción:** Se seleccionó la opción “**Seize Delay Release**”, (Toma, Retraso y Liberación), esto por la naturaleza del proceso.
- Se agregó el **Recurso** (resource) al punto de carguío, lo cual corresponde al Cargador quien será el servidor del proceso.
- **Tipo de Atraso (Delay Type):** Debido a la constante llegada de los camiones al punto de carguío, también se considera constante el servicio.
- **Valor (Value):** De acuerdo a calculo (ver ítem a) del punto 3.2.5), el tiempo de carguío es de 0,17 Hr por camión.

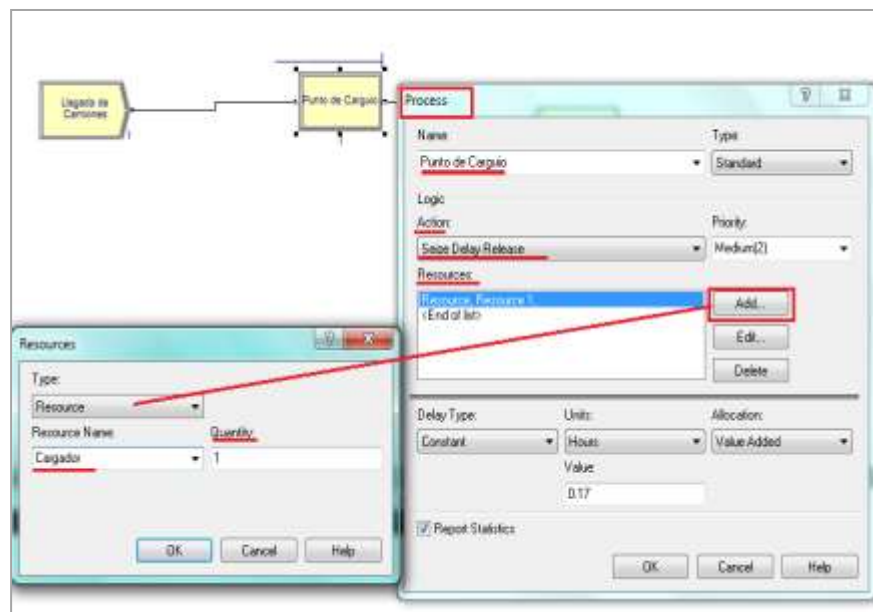


Figura 4.4, Configuración condiciones del Proceso de carga

Paso 4:

Se agregó desde la barra de proyecto, el Icono “Dispose” con el cual se da termino el proceso en análisis, siendo este considerado la Salida de este.

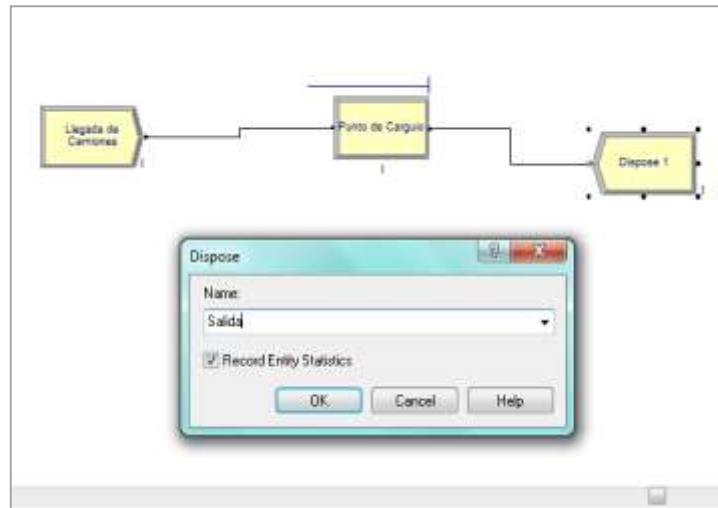


Figura 4.5, Terminación del Proceso en simulación

Paso 5:

Se realizó configuración de las condiciones para correr la simulación, determinando 3 replicaciones de simulación para el proceso (mayor confianza de datos) y bajo las condiciones de turno del proyecto anteriormente estudiado de 10 Horas por día y con un tamaño por replicación de 10 horas.

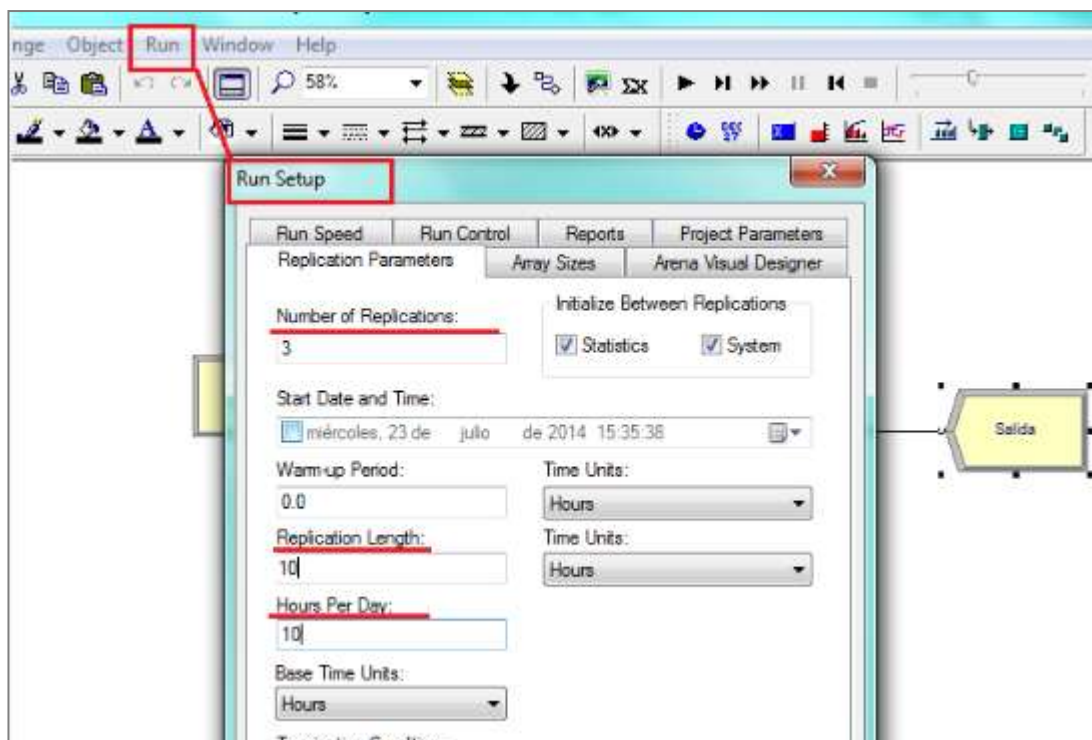


Figura 4.6, Configuración de Condiciones de Simulación

Paso 6:

Se da inicio a la simulación del Proceso.

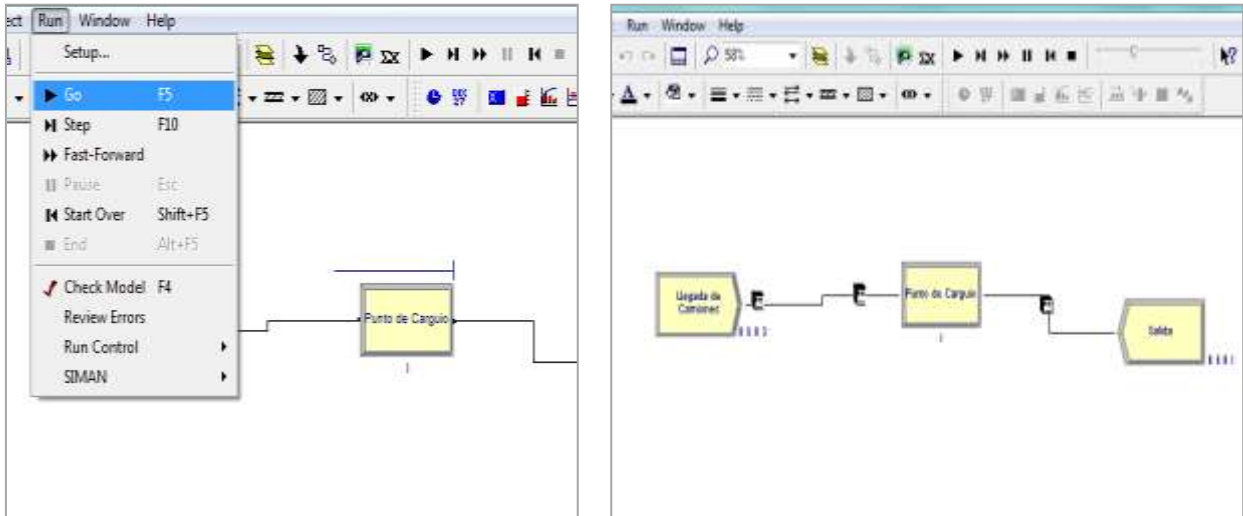


Figura 4.7A, 4.7B, Inicio de Simulación

Paso 7:

Una vez terminada la simulación se arrojan los reportes, los cuales se estructuran de la siguiente forma y serán vistos en detalle en los Análisis de Resultados.

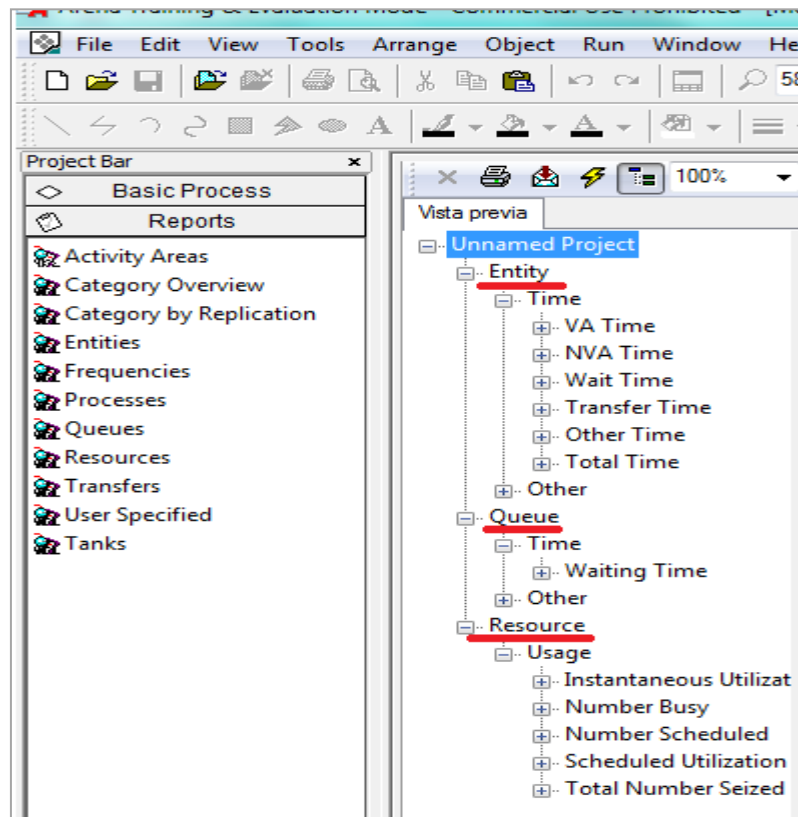


Figura 4.8, Estructura de Reportes de ARENA

4.1.1. Análisis de Resultados de Simulación del Proceso con Llegada de Camiones Constante de acuerdo a Metodología.

Se debe tener en consideración que el número de llegadas por periodo de tiempo de camiones al punto de carguío (punto de servicio), está determinada por la distancia en tiempo (frecuencia) entre cada camión (λ). Esto quiere decir, que dentro del circuito del proceso de movimiento de tierras la frecuencia entre cada camión, es determinada por el tiempo que toman en ser cargados (tiempo de carguío), esto ya que al salir el primer camión, el segundo camión saldrá una vez que termine de ser cargado, y el tercero de igual manera, por lo tanto, la frecuencia está determinada por el **tiempo de carguío y la frecuencia de llegada es constante debido a que es un proceso en circuito cerrado.**

Análisis de Resultados

Entidades (Camiones)

Entity						
Time						
Camiones	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	0.
Wait Time (Tiempo de Espera de camiones)	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Camiones	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	0.
Transfer Time Tiempo transferido a camiones	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value

Tiempo de Espera: 0,0 Hrs, lo que indica que no existe cola de camiones esperando a ser servidos por el Cargador

Tiempo Tranferido: 0,0 Hrs, indica que por no existir tiempo de espera, no existen tiempos de atrasos transferidos a camiones predecesores en el sistema.

Colas en punto de Carguío (Queue)

Queue (COLAS)						
Time						
Waiting Time Tiempo de espera	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Punto de Carguío.Queue	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	0.00
Other						
Number Waiting Numero de esperas	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Punto de Carguío.Queue	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	1.0000

Tiempo de Espera: No existe tiempo de espera de camiones en Cola.

Número de Esperas: No existe número de esperas de camiones durante el proceso en el punto de carguío.

Recurso (Cargador)

Resource (CARGADOR)						
Usage						
Instantaneous Utilization Utilización instantanea	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Cargador	1.0000	0,00	1.0000	1.0000	0.00	1.0000
Number Busy Cargador ocupado	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Cargador	1.0000	0,00	1.0000	1.0000	0.00	1.0000
Number Scheduled Numero cargadores programados	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Cargador	1.0000	0,00	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Scheduled Utilization Utilización programada	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average		
Cargador	1.0000	0,00	1.0000	1.0000		

Utilización instantánea: Existe una unidad servidora (Cargador) en trabajo constante durante el proceso.

Número Ocupado (Number busy): la unidad cargadora se encuentra completamente en servicio de carguío de camiones.

Número Programado (Number scheduled): el sistema tiene programado una unidad Cargadora para el proceso.

Utilización Programada (scheduled Utilization): El proceso se lleva a cabo con una unidad servidora (Cargador).

Por lo general, en los procesos de Líneas de Espera, las unidades que llegan a un punto de servicio, son entidades con orígenes y llegadas independientes. Para este caso en particular, como son entidades (camiones) que están dentro de un circuito cerrado, poseen la misma naturaleza como entidad, y la llegada de estas al punto de Carguío, son de carácter regular y constante; esto debido a que es el tiempo que este toma en cargar a un camión, el que causa la distancia en tiempo entre los camiones (frecuencia) desde punto de “partida” del proceso de movimiento de tierras, ósea, desde el punto de carguío.

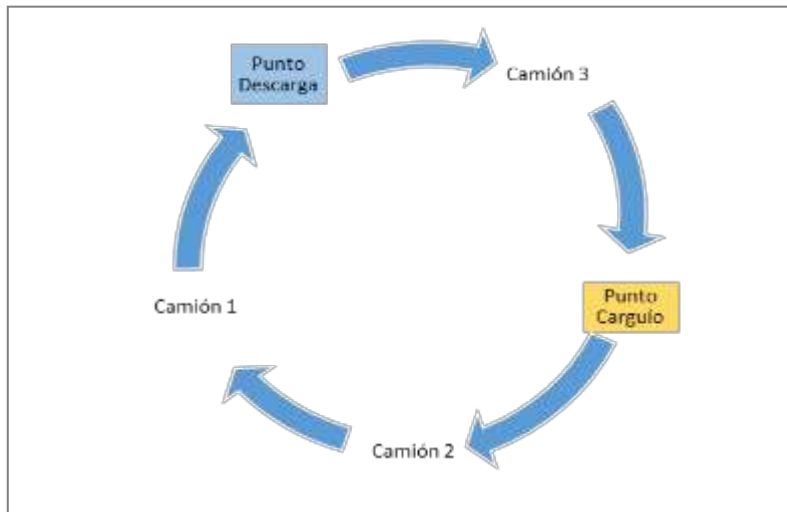


Figura 4.9, esquema cíclico del proceso de movimiento de tierras

De acuerdo a los resultados obtenidos en esta simulación de la Metodología, es posible ver que esta cumple con los objetivos planteados en este trabajo de título, esto significa que es posible realizar el proceso de movimientos de tierra con una flota de camiones adecuada que trabaja de forma constante y eficiente, no generando tiempos muertos de espera por parte de los camiones en cola y por parte del cargador esperando por la llegada de camiones al punto de carguío, lo que permite que el proceso se lleve a cabo dentro de los plazos y costos establecidos.

4.1.2. Análisis de Resultados de Simulación del Proceso con Llegada Aleatoria de Camiones

Estos resultados representan la llegada de camiones de forma aleatoria (no constante) al punto de carguío, por lo cual de acuerdo a los resultados que se verán a continuación, existe en el proceso tiempos de espera y colas dentro del sistema tanto para los camiones como para el cargador.

Análisis de Resultados

Entidades (Camiones)

Replications: 3		Time Units: Hours					
Entity							
Time							
Wait Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value	
Camiones	0.2833	0,24	0.1700	0.3400	0.00	0.6800	
Transfer Time	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value	
Camiones	0.00	0,00	0.00	0.00	0.00	0.00	

Tiempo de espera de camiones (wait time): de acuerdo a los resultados entregados por el simulador, existen tiempos muertos de espera por parte de los camiones en el punto de carga.

Colas en punto de Carguío (Queue)

Replications: 3		Time Units: Hours					
Queue (COLAS)							
Time							
Waiting Time Tiempo de espera	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value	
Punto de Carguío.Queue	0.3258	0,43	0.1275	0.4250	0.00	0.8500	
Other							
Number Waiting Numero de esperas	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value	
Punto de Carguío.Queue	4.5367	11,43	0.5100	9.5500	0.00	16.0000	

Tiempo y Número de Esperas: Los resultados del informe muestran la existencia de cola en el punto de carguío y la duración mínima, promedio y máxima de esta durante el proceso.

Recurso (Cargador)

Resource (CARGADOR)						
Usage						
Instantaneous Utilization Utilización instantánea	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Cargador	0.8367	0,70	0.5100	1.0000	0.00	1.0000
Number Busy Cargador Ocupado	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Cargador	0.8367	0,70	0.5100	1.0000	0.00	1.0000
Number Scheduled Nº cargadores programados	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average	Minimum Value	Maximum Value
Cargador	1.0000	0,00	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Scheduled Utilization Utilización programada	Average	Half Width	Minimum Average	Maximum Average		

Utilización instantánea: Existe una unidad servidora (Cargador) que presenta tiempos muertos de espera por camiones que lleguen al punto de carguío debido a que su Utilización instantánea es inferior a “1”, lo que significa que no está en constante trabajo durante el proceso.

Número Ocupado (Number busy): la unidad cargadora se encuentra ocupada solo un 0.8367 de un total de 1. (83,67%).

Número Programado (Number scheduled): el sistema tiene programado una unidad Cargadora para el proceso.

Utilización Programada (scheduled Utilization): El proceso se lleva a cabo con una unidad servidora (Cargador).

De acuerdo a los resultados obtenidos en la simulación con llegadas aleatorias, se puede ver que existen tiempos muertos de espera tanto para los camiones como para el Cargador durante el proceso. Esta situación es producto que los camiones tienen una frecuencia de llegada variable, lo que significa que en algunos momentos existe una mayor frecuencia de llegadas de camiones al punto de carga, generando colas de espera ya que el cargador quien trabaja con un tiempo constante, no puede servir a los camiones; y por otro lado se puede apreciar que también existe tiempo de espera por parte del cargador (Recurso), lo que significa que en algunos momentos del proceso, la

frecuencia de llegada entre los camiones es menor, esto provoca que el cargador tenga tiempos de inactividad a la espera de que los camiones lleguen para ser servidos.

Estos resultados son la perfecta representación que existe actualmente en los procesos de movimientos de tierra; un problema de llegada aleatorias (variables) es producto del escaso análisis de las condiciones de terreno para los procesos que forman el sistema de movimiento de tierra, y esto también es producto de la mala estimación de flota de camiones que se necesita para llevar a cabo los movimientos de tierra de un proyecto determinado.

En resumen, las simulaciones realizadas son la representación de que la Metodología para el cálculo de flota de camiones, tiene un funcionamiento eficiente y constante para ejecutar procesos de movimiento de tierras (sin colas ni tiempos de espera); además es una Metodología que puede ser adaptada a las diferentes condiciones de Programación de los trabajos.

Por lo tanto, los resultados obtenidos a través del desarrollo de esta Metodología bajo el análisis de Líneas de Espera, validan su uso para el cálculo de flota de camiones para la ejecución de Movimientos de tierra de orden masivo e industrial, como lo es para este caso, la Minería.

4.2 Consideraciones a la Metodología

Se debe tener en consideración que en toda actividad de carácter constructivo, existen posibilidades de imprevistos y se debe tener contingencia ante estos para evitar tener impactos sobre la ejecución de las actividades constructivas.

Como se ha visto, la Metodología permite llevar a cabo un cálculo de los camiones necesarios para ejecutar una actividad de movimientos de tierras bajo condiciones determinadas para el proyecto; esta flota de camiones es funcional en base a una sola unidad cargadora, y bajo trabajo de periodo constante. Lo que para efectos de estudio y ejecución, es la forma de realizarlo; pero para la ejecución en obra de estas actividades, se deben tener en consideración al menos estos 4 puntos:

- Considerar al menos un camión adicional en stand-by por posibles fallas de algún camión en funcionamiento, de esta forma reemplazar el camión en el sistema de forma inmediata, sin afectar la continuidad del proceso.
- Consideración de tiempos para carga de combustibles, tanto para camiones, como para cargadores; generalmente esto se lleva a cabo por operarios de mantención en horarios de colación para evitar existan paros de maquinaria durante el proceso, esto recordando que puede causar un alto impacto en la sincronización del sistema de acuerdo a lo estudiado.
- Considerar contingencia en tiempo para cambio de repuestos para Cargador, como por ejemplo, pala, sistemas hidráulicos, etc.
- Frecuentes revisiones y chequeos de estado de la maquinaria y de su combustible.

Conclusión

Actualmente, el no uso de una práctica estructurada de trabajo para el estudio de flota para trabajos de movimiento de tierra, está generando un impacto considerable en plazo y costo en la ejecución de proyectos. Esto debido a que no se realiza un estudio de las condiciones de terreno y del programa de construcción del proyecto, y por lo general, en obra, se delega la completa responsabilidad a las empresas contratistas encargadas de ejecutar los movimientos de tierra, y muchas veces, son estas las que no cuentan con procedimientos o metodologías para llevar a cabo los trabajos, y menos aún, las empresas mandantes, las cuales no tienen una herramienta que les permita controlar si estas actividades podrán ser llevadas a cabo dentro de las condiciones de terreno y contractuales (tiempo y costo).

Debido a esta necesidad, el objetivo de este trabajo de título fue el plantear una práctica que permitiera llevar a cabo los procesos de movimiento de tierra, adaptándola a diferentes condiciones de trabajo y que además contara con la cantidad de equipo justo y necesario para un desarrollo del proceso de forma eficiente y continua; es por esto que de acuerdo a los resultados obtenidos, se pudo demostrar de forma empírica que esta Metodología es útil y tiene la flexibilidad de ser adaptada a las necesidades que las distintas condiciones de trabajo exigen. Posteriormente, con los resultados del análisis de validación a través de la simulación de este bajo la herramienta ARENA®, se demostró que efectivamente el proceso de movimiento de tierras es posible realizarlo sin que en este, se formen colas en el punto crítico del sistema, como lo es el punto de carguío (4.1.1.). Además que los resultados de este análisis, muestran la inexistencia de tiempos muertos de espera por parte de los camiones esperando a que el cargador se desocupe, y viceversa; que la unidad cargadora, este sin actividad a la espera de que los camiones lleguen al punto de carga. Esto gracias a que la flota calculada de camiones dentro del circuito, es la adecuada, por lo tanto, todas las unidades dentro del sistema se mantienen bajo funcionamiento continuo, evitando costos y tiempos adicionales por maquinaria sin trabajar.

De acuerdo a la Simulación efectuada en el Software ARENA®, es posible ver que los resultados Obtenidos en los Reportes de ARENA® para la simulación del proceso efectuada bajo condiciones de llegada constante (4.1.1.) reflejan un funcionamiento continuo y de carácter eficiente, lo cual genera una mayor confianza sobre la Metodología propuesta en este trabajo de título, validando su uso para los estudios de Movimientos de tierras masivos y en la industria Minera. Así además los resultados obtenidos en la Simulación (punto 4.1.2.) nos dan la representación perfecta de como se están llevando a

cabo los procesos de movimiento de tierras en los proyectos; esto ya que una mala estimación de flota de camiones se traduce en llegadas aleatorias (variables) al punto de carguío, generando como ya se vio anteriormente, tiempos muertos tanto a las entidades en el sistema (camiones) como a la unidad servidora (cargador).

Bibliografía

1. Libro: "Estimating Construction Costs", 5ta Edición.
Autor: Robert L. Peurifoy & Garold D. Oberlender
2. Libro: "Simulación con Arena", Mc Graw Hill, 2008.
Autor: David Kelton
3. Libro: "Teoría de Colas y Simulación de Eventos Discretos" – Pearson Education 2003.
Autor: Pazos, Suarez, Diaz.
4. Documento: "Especificación Técnica Corporativa, Civil – Movimiento de Tierras, DCC2008-VCP.GI.ESPCI02-0000-002-0", Rev.0.
Autor: Vicepresidencia de Proyectos, CODELCO, 2012.
5. Documento: MI57E – Explotación de Minas - "Generalidades Acerca del Manejo de Materiales".
Autor: Julián M. Ortiz, 2008.
6. Documento: MI57G – Explotación de Minas - "Introducción a Sistemas Mineros".
Autor: Profesor Raúl Castro, 2008.
7. Documento: Aplicación de la Simulación para la Optimización del Acarreo de Mineral – Universidad Mayor de San Marcos, Perú, 2010.
Autor: Maxera Bedon & Carlos Omar.
8. Apunte: "Carguío y Transporte Mina Rajo Abierto" – MANTEMIN 2006, Primer Encuentro de Mantenedores de Equipos Mina.
9. Apunte: "Modelos de Colas (Líneas de Espera)" – Universidad de Valparaíso – Investigación de Operaciones.
Autor: Enrique Faijo.
10. Manual: "Manual de Usuario del Software ARENA" – Universidad Minuto de Dios; Ingeniería de Sistemas. 2011.
Autor: Rubén Darío Vargas & Cindy Santiago.
11. Guía para citar textos y referencias bibliográficas según (APA).
Autor: Dirección Nacional de Bibliotecas INACAP 2013.

ANEXO I
Planilla de Cálculo de Flota de Camiones

