

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA Y METALÚRGICA**



**TESIS**

**“SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE PLANES  
MINEROS”**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
**INGENIERO DE MINAS**

ELABORADO POR  
**JORGE FERNANDO LOZANO FERNÁNDEZ**

ASESORA  
**M.Sc. ING. CARMEN ROSALIA MATOS ÁVALOS**

**LIMA – PERÚ**

**2019**

## **DEDICATORIA**

En memoria a mi padre, que me transmitió la curiosidad de buscar soluciones extravagantes en momentos difíciles. Gracias, papá Jorge Roberto. A mi mamita Flor, que hizo todo lo posible para que yo pueda lograr mis sueños. Gracias, mamá, por mostrarme las matemáticas desde pequeño. A mi esposa Melissa, por ser mi fuerza y motor en cada momento.

A todos mis profesores de la **Universidad Nacional de Ingeniería**, quienes me transmitieron el ímpetu por buscar la verdad a través de la ciencia.

## RESUMEN

Una de las etapas de mayor relevancia en la elaboración de los planes de producción de una mina a tajo abierto o subterránea es la estimación de la cantidad de camiones y su uso adecuado.

En el mercado existen aplicaciones de *software* que realiza tal tarea de manera aceptable, pero el inconveniente radica en el uso de ciclos fijos de acarreo para su estimación. Hoy en día, estos ciclos ya no son reales dado que los sistemas de despacho actuales trabajan en forma dinámica, en busca de la mejor producción posible. Adicional a ello es conocido que la estimación de flota se realiza bajo un esquema de foto instantánea, desestimando la variabilidad de las condiciones con que se ejecuta la explotación en la mina. Esto implica que el cálculo sea una *aproximación algebraica* que se acerca muy poco a la realidad operativa.

La estimación de la flota de acarreo necesaria para llevar a cabo un plan de producción involucra no solo la estimación de costos de operación y de adquisición, también tiene un costo extra en términos de personal para mantenimiento, operación y el espacio físico para brindar el mantenimiento requerido al equipo, por lo que la estimación de flota de acarreo en estos tiempos no solo se limita al número de

camiones necesarios también se evidencia un impacto en la gestión operativa debido a la demanda de personal y equipo adicional.

Adicional a la estimación de equipos es necesario tener una comprensión global de la operación y el impacto tanto económico como de seguridad que ocasionaría la operación de cierta cantidad de equipos durante la vida de la mina. Estas necesidades de vital importancia para la correcta toma de decisiones nos llevan a concluir que la metodología tradicional necesita de mayores herramientas para poder brindarnos mayor conocimiento de la forma en que nuestra operación se desempeña.

En esta tesis presentamos las herramientas necesarias para poder cubrir no solo la estimación de camiones, también comprender el comportamiento técnico y económico de un sistema productivo minero con el adicional de poder identificar las zonas de la mina con mayor riesgo operacional. Para lograr dicho objetivo se ha revisado la metodología actual, rescatando los temas más relevantes, como el Match Factor, y se ha integrado la simulación de eventos discretos con la optimización matemática en un solo proceso para responder a los desafíos que la industria necesita para llevar a cabo la ejecución de sus planes de manera rentable y segura.

La metodología propuesta conlleva un riguroso modelamiento matemático con la incorporación de un modelo de simulación y algoritmos de optimización matemática con lo que se asegura que los resultados tengan un alto nivel de confianza y puedan ser aplicables a cualquier operación minera.

## **ABSTRACT**

One of the most important stages in the preparation of production plans for an open pit or underground mine is the estimation of the number of trucks and their proper use.

In the market there are software applications that perform such a task in an acceptable manner, but the drawback lies in the use of fixed haul cycles for its estimation. Today, these cycles are no longer real since current dispatch systems work dynamically, in search of the best possible production. Additionally, it is known that the fleet estimation is carried out under a snapshot photo scheme, disregarding the variability of the conditions under which the exploitation in the mine is executed. This implies that the calculation is an algebraic approach that isn't very close to the operational reality.

The estimation of the transport fleet necessary to carry out a production plan involves not only the estimation of operation and acquisition costs, it also has an extra cost in terms of personnel for maintenance, operation and physical space to provide maintenance to the equipment fleet.

Haul fleet estimation at this time is not only limited to the number of trucks required, but also an impact on operational management is evidenced due to the demand for additional personnel and equipment.

In addition to estimating equipment fleet, it is necessary to have a comprehensive understanding of the operation and the economic and safety impact that a certain amount of equipment fleet would cause during the life of the mine. These needs are vital importance for correct decision-making lead us to conclude that the traditional methodology needs more tools to be able to give us greater knowledge of the way in which our operation is performed.

In this thesis we present the necessary tools to cover not only the estimation of trucks, but also to understand the technical and economic behavior of a mining production system with the additional ability to identify the areas of the mine with the greatest operational risk. To achieve this objective, the current methodology has been revised, rescuing the most relevant issues, such as the Match Factor, and the simulation of discrete events has been integrated with the mathematical optimization in a single process to respond to the challenges that the industry needs to carry carry out the execution of your plans in a profitable and safe way.

The proposed methodology entails a rigorous mathematical modeling with the incorporation of a simulation model and mathematical optimization algorithms, which ensures that the results have a high level of confidence and can be applicable to any mining operation

## ÍNDICE

	Pag.
<b>1 CAPITULO I. GENERALIDADES.....</b>	<b>3</b>
1.1 Antecedentes referenciales.....	3
1.2 Planteamiento de la realidad problemática .....	4
1.3 Objetivos.....	5
1.3.1 Objetivos generales.....	5
1.3.2 Objetivos específicos.....	5
1.4 Hipótesis.....	6
1.4.1 Hipótesis general.....	6
1.4.2 Hipótesis específica.....	6
<b>2 CAPÍTULO II. FUNDAMENTO TEÓRICO.....</b>	<b>7</b>
2.1 Minería superficial .....	7
2.1.1 Equipos de carguío.....	10
2.1.2 Ciclo de carguío de las palas .....	11
2.1.3 Equipo de acarreo: camiones.....	12
2.1.4 Ciclo de acarreo de camiones.....	13
2.1.5 Optimización .....	13
2.1.6 Simulación .....	14
2.1.7 Congestión.....	16
2.2 Productividad pala-camión.....	16
2.2.1 Factor de coincidencia ( <i>Match Factor</i> ).....	17
2.2.2 Teoría de agrupamiento ( <i>Bunching Theory</i> ) .....	24
2.2.3 Teoría de colas .....	25
<b>3 CAPÍTULO III. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>26</b>
3.1 Metodología de investigación .....	26
3.1.1 Enfoque del experimento.....	26
3.1.2 Diseño del experimento.....	27
3.2 Población y muestra.....	28
3.3 Estrategia para la prueba de hipótesis .....	28
<b>4 CAPÍTULO IV. MODELO MATEMÁTICO DE UN SISTEMA MINERO.....</b>	<b>30</b>
4.1 Demostración matemática.....	30

4.1.1	Match Factor .....	31
4.1.2	Mínimo costo de minado .....	39
4.1.3	Función objetivo del plan de producción .....	43
4.1.4	Balance de fases de producción .....	44
<b>5</b>	<b>CAPÍTULO V. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN .....</b>	<b>46</b>
5.1	Metodología .....	46
5.2	Fundamento de asignación de camiones .....	47
5.3	prioridad de fases de minado .....	50
5.4	Análisis y determinación de flota óptima .....	51
5.4.1	Análisis <i>match factor</i> frente a <i>mining cost</i> (MFC) .....	51
5.4.2	Análisis costo de minado frente a plan (CP) .....	53
5.5	Simulación gráfica .....	54
5.6	Criterios de dimensionamiento de flota .....	57
5.6.1	Planeamiento a corto plazo .....	57
5.6.2	Planeamiento a largo plazo .....	57
5.6.3	Perfil de camiones .....	59
<b>6</b>	<b>CAPÍTULO VI. SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA MINERO</b>	<b>61</b>
6.1	Caso 1: sistema de una pala y un solo destino de descarga .....	61
6.1.1	Elementos del sistema .....	61
6.1.2	Resultados de la simulación y demostración de hipótesis .....	62
6.2	Caso 2: sistema de múltiples palas y destinos .....	65
6.2.1	Elementos del sistema .....	66
6.2.2	Resultados de la simulación y demostración de hipótesis .....	69
6.3	Análisis de Congestión .....	75
6.3.1	Análisis matemático .....	77
6.3.2	Análisis de flujo infinito .....	78
6.3.3	Análisis de flujo finito .....	80
6.3.4	Análisis de capacidad .....	82
6.3.5	Simulación en VISSIM .....	84
<b>7</b>	<b>CAPÍTULO VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONTRASTACIÓN DE HIPOTESIS .....</b>	<b>88</b>
7.1	Análisis de Resultados .....	88
7.1.1	Análisis de validez interna .....	88
7.1.2	Análisis de validez externa .....	91
7.1.3	Contrastación de las Hipótesis .....	93
<b>8</b>	<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>94</b>
<b>9</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>96</b>
<b>10</b>	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>97</b>
<b>11</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>98</b>
<b>12</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>99</b>
□	ANEXO 1: Modelo Básico de Simulación (una sola Pala con un solo destino) .....	99



□	<b>ANEXO 2: Modelo Complejo de Simulación para múltiples .....</b>	<b>99</b>
□	<b>ANEXO 3: Modelo de Simulación para generar el código gráfico.palas y múltiples destinos. ....</b>	<b>99</b>
□	<b>ANEXO 4: Diagrama de Bloques de modelo GPSS de multiples Palas y múltiples destinos .....</b>	<b>99</b>
□	<b>ANEXO 5: Resultados del modelo de simulación de múltiples palas con múltiples destinos.....</b>	<b>99</b>

## INDICE DE FIGURAS

	Pag.
FIGURA 1: TOTAL MINADO .....	32
FIGURA 2: COSTO DE MINADO .....	40
FIGURA 3: COSTO UNITARIO DE MINADO .....	42
FIGURA 4: RELACIÓN ENTRE MATCH FACTOR Y MINING COST .....	52
FIGURA 5: RELACIÓN ENTRE MINING COST Y PRODUCTION .....	54
FIGURA 6: SIMULACIÓN GRÁFICA.....	56
FIGURA 7: PERFIL DE CAMIONES .....	59
FIGURA 8: PERFIL DE INVERSIÓN.....	60
FIGURA 9: SISTEMA 1 PALA- 1 DESTINO: % ESPERA VS % COLA .....	64
FIGURA 10: SISTEMA 1 PALA- 1 DESTINO: TONELAJE VS COSTO.....	64
FIGURA 11 : SISTEMA PALA-CAMIÓN .....	67
FIGURA 12:PLAN DE MINADO Y SUS RELACIONES-SISTEMA COMPLEJO .....	70
FIGURA 13: PRODUCCIÓN POR FASE-SISTEMA COMPLEJO.....	71
FIGURA 14: PLAN DE MINADO -SISTEMA COMPLEJO .....	71
FIGURA 15: MATCH FACTOR VS MINING COST-SISTEMA COMPLEJO.....	72
FIGURA 16: PRODUCTIVIDAD DE MINA-SISTEMA COMPLEJO.....	72
FIGURA 17: PRODUCTIVIDAD DE CHANCADORA-SISTEMA COMPLEJO.....	73
FIGURA 18: PRODUCTIVIDAD DE PALAS-SISTEMA COMPLEJO.....	73
FIGURA 19: COLAS EN LAS PALAS-SISTEMA COMPLEJO.....	74
FIGURA 20: N° DE CAMIONES EN COLA--SISTEMA COMPLEJO .....	74
FIGURA 21: EFECTO DE LA CONGESTIÓN: MENOS PRODUCCIÓN.....	76
FIGURA 22: FLUJO INFINITO-INTERSECCIÓN.....	78
FIGURA 23: FLUJO INFINITO- INTERSECCIÓN EN LA MINA.....	79
FIGURA 24: FLUJO INFINITO- RAMPA .....	80
FIGURA 25: INTERACCIÓN DE FLUJOS DE IDA Y DE VUELTA .....	82

FIGURA 26: CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE VELOCIDADES .....	85
FIGURA 27 : CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA ACELERACIÓN .....	85
FIGURA 28: ANÁLISIS DE CAPACIDAD DE SALIDA DE FASE .....	86
FIGURA 29: ANÁLISIS DE CAPACIDAD DE INTERSECCIÓN.....	86
FIGURA 30: ANÁLISIS DE PRODUCTIVIDAD DE PALAS.....	87
FIGURA 31: ANÁLISIS DE ESPERA DE PALAS .....	87

## INDICE DE TABLAS

	Pag.
TABLA 1:RESULTADOS DE 1 SOLA PALA Y UN SOLO DESTINO.....	63
TABLA 2: VELOCIDAD DE ACARREO.....	68
TABLA 3: TIEMPOS FIJOS .....	68
TABLA 4:RESULTADOS DE UN SISTEMA 1 PALA Y 1 DESTINO .....	90

## INTRODUCCION

La presente tesis desarrolla una nueva metodología para estimar la flota de camiones donde se integra la simulación de eventos discreto con los modelos matemáticos. Este nuevo concepto desarrolla un modelo de simulación de mina con optimización en tiempo real de la simulación con el objetivo de maximizar la productividad de la operación. Para poder abordar el estudio en cuestión se ha dividido la tesis en 9 capítulos en búsqueda de una mejor comprensión y discernimiento de los tópicos desarrollados.

Se detallará a manera de resumen todos los conceptos y definiciones a utilizar durante el desarrollo de la investigación. Asimismo, planteáramos la realidad problemática, los objetivos y las hipótesis.

Para introducirnos en el estado del arte actual en la estimación de la flota de camiones, realizaremos una breve revisión de la literatura existente pasando por la teoría de colas y los modelos matemáticos actualmente vigentes; como es el caso del Match Factor que es la ecuación fundamental del transporte de acarreo. Esta ecuación será nuestra base fundamental para probar la validez de nuestras hipótesis.

Teniendo como base teórica los estudios realizados nos introduciremos al mundo de la simulación de sistemas donde explicaremos como construir un modelo de

simulación y como incorporaremos al modelo de simulación el algoritmo de optimización *Match Factor*. Asimismo, explicaremos como analizar los resultados de la simulación usando las gráficas de costo de minado y producción minada en función del número de camiones.

Con todo lo desarrollado hasta el momento planteáramos las ecuaciones matemáticas que gobiernan un sistema productivo minero donde se mostrarán las relaciones entre las palas, los camiones y el sistema de acarreo bajo lineamientos de costos y productividades. En consecuencia, demostraremos matemáticamente la ecuación fundamental de acarreo para un sistema minero de múltiples palas y múltiples destinos.

Para probar nuestras hipótesis definiremos la metodología, la población, la muestra y explicaremos a detalle la estrategia a usar para probarla. Asimismo, presentaremos los modelos de simulación y optimización del caso de una pala y un destino y del caso de múltiples palas y múltiples destinos que servirán como muestra y población respectivamente de los sistemas de acarreo.

Como parte de la evaluación de la factibilidad de un plan de producción desarrollaremos la teoría del análisis de congestión, planteando las ecuaciones fundamentales que describen este comportamiento y desarrollando un caso donde evidenciamos que los elementos de una mina como las rampas e intersecciones tienen capacidad y riesgo asociado.

Finalmente, discutiremos y analizaremos los resultados obtenidos, contrastando con las hipótesis planteadas.

## **CAPITULO I. GENERALIDADES**

### **1.1 ANTECEDENTES REFERENCIALES**

La estimación de la flota de camiones requerida para cumplir un plan de producción es uno de los componentes más relevantes en la planificación de minas; dado que su estimación involucra no solo la inversión en la compra de equipos si no también impacta en la cadena de valor de la mina dado su impacto no solo económico si no también productivo, en ese sentido en el mercado existen aplicaciones de software que realizan dicha tarea de manera aceptable, pero el inconveniente radica en el uso de ciclos fijos de acarreo, el cual no considera la variabilidad de las condiciones reales de operación de una mina.

Dada dicha problemática se ha desarrollado en estos últimos años diferentes estudios que buscan estimar la cantidad de camiones de una mina considerando las condiciones variables de operación y para ello se ha usado la simulación estocástica de procesos. Entre de los estudios desarrollados podemos mencionar la tesis de (Meza, 2011) en la cual se usó como metodología de estimación de camiones la simulación con GPSS aplicada a una mina a tajo abierto, logrando incrementar la producción y estimando la flota más adecuado para operar en dicha mina.

También, podemos mencionar la tesis de (Gamarra, 2015) donde se utilizó como metodología de estimación de camiones la simulación con GPSS, aplicada a una mina a tajo abierto; logrando representar la capacidad actual de producción, calibrando y validando el modelo de simulación con datos de campo, se identificó también los cuellos de botella de la operación minera.

Asimismo, en la tesis de doctorado de (Burt, 2008) se utilizó como metodología de estimación, la programación lineal para resolver su modelo matemático de estimación de flota. La tesis se basa en la puesta en valor del algoritmo de “*Match Factor*” y su extensión a flotas heterogéneas; que antes de la presentación de su tesis solo era válido para flotas homogéneas que fue planteado por (Morgan & Peterson, 1968).

## **1.2 PLANTEAMIENTO DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA**

Actualmente la estimación de la flota de acarreo se realiza con rutas de acarreo fijas y tiempos de acarreo constantes, lo que desestima la variabilidad de las condiciones reales de operación. Esto nos conduce a plantear los siguientes problemas:

### **1.2.1 Problema General:**

- a) La cantidad real de camiones que la operación requiere es menor que la estimación; lo que origina que no se cumplan con los planes de producción.

### **1.2.2 Problemas específicos:**

- a) Asignación de camiones: los camiones siguen rutas preestablecidas cuando regresan de los Botaderos y Chancadoras por lo que no considera los tiempos de cola reales en los frentes de minado; lo que origina que el tiempo de ciclo estimado sea mucho menor que el real.



- b) Intersecciones: los sistemas actuales no consideran las demoras ocasionadas por el tránsito de camiones en las intersecciones de rutas.
- c) No se verifica la simulación matemáticamente.

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **1.3.1 OBJETIVOS GENERALES**

El objetivo general es demostrar que el comportamiento productivo de un sistema minero y su valor económico intrínseco se determina con la aplicación de un modelo de simulación estocástico y con la incorporación del “*Match Factor*” como algoritmo de optimización en la asignación de recursos.

#### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Los objetivos específicos que conducirán este estudio son los siguientes:

- a) Optimizar la asignación de camiones usando el algoritmo de optimización *Match Factor* dentro del modelo de simulación.
- b) Construir un modelo de simulación considerando las intersecciones de las rutas de tal forma que se puedan incluir las demoras originadas por el tráfico de camiones dentro de la operación.
- c) Plantear las bases matemáticas que gobiernan un sistema productivo minero y que existe una equivalencia entre las ecuaciones matemáticas y los resultados de la simulación.

## **1.4 HIPÓTESIS**

### **1.4.1 HIPÓTESIS GENERAL**

La cantidad óptima de camiones que una mina requiere se determina cuando el *Match Factor* se iguala a 1 y el costo de minado es el mínimo.

### **1.4.2 HIPÓTESIS ESPECÍFICA**

La hipótesis específica abarca los siguientes puntos:

- a) El algoritmo de *Match Factor* optimiza la asignación de camiones al mejor destino posible, de tal manera que se incrementa la productividad de la mina.
- b) La simulación de una intersección permite estimar las demoras producidas por el tráfico de camiones.
- c) La simulación debe responder a bases matemáticas para su trazabilidad.

## CAPÍTULO II. FUNDAMENTO TEÓRICO

### 2.1 MINERÍA SUPERFICIAL

La minería superficial comprende múltiples métodos de ingeniería: “*Open Pit*”, dragado, *shipping*, etc., cuyo objetivo es extraer recursos minerales como oro, cobre, carbón, etc. En el comienzo de la evaluación de un proyecto minero, se cuenta con un modelo geológico de recursos y que bajo ciertos supuestos de costos, recuperaciones metalúrgicas y precios de los metales, es valorizado para obtener un modelo económico.

Luego de valorizar el modelo de recursos, tenemos el valor económico de un bloque de mineral, que en estricto rigor no lo es, dado que no se sabe si es económico llevarlo a la planta concentradora, al *PAD* de Lixiviación, al *Stock* o, en su defecto, llevarlo al botadero, dado que se ignora cuándo será explotado. En este punto solo tenemos un modelo valorizado, pero como saber que zonas del yacimiento son económicamente rentables y pueden explotarse de manera rentable, la respuesta la podemos encontrar al hacer uso del algoritmo de *Lerchs and Grossman*. El algoritmo de *Lerchs and Grossman* (LG), cuyo objetivo es encontrar el cono para el cual la suma de masas alcanza el máximo valor económico. Los detalles de este

algoritmo no son el objeto de estudio, pero se puede mencionar que en este estado de la planificación se sabe que, cuando se explota cierto material de la mina, solo se ha encontrado el contorno máximo del problema. Luego de obtener estos contornos finales, se procede a construir un tajo operativo que tenga rampas y accesos que permitan acceder a los recursos minerales. Pero surge la pregunta: ¿cómo y cuándo se explotará dicho recurso?

Se han realizado muchas metodologías usando técnicas tales como programación dinámica y minado banco a banco. Una de estas técnicas surgió de hacer variar el precio de los metales y esto generó tajos anidados, donde el más pequeño representa la zona con mayor valor económico. Esto significa que el tajo final puede ser dividido en fases de explotación, donde una de las variables claves para generarlas es el precio del metal, pero también el ancho y largo de las fases y que dependen de los equipos de carguío que operarán en dichas fases. Encontrar el diseño de fases que maximiza el valor del negocio no es un proceso rápido, en realidad es un proceso iterativo donde se busca maximizar el valor económico del negocio

Las fases de explotación seleccionadas permiten acceder al mineral de mayor valor económico en forma más rápida y segura. Y este, sin duda, es mucho mayor que el del minado *banco a banco*. El diseño de fases es parte clave de la optimización de un plan de minado y no solo está en función del precio del metal sino también de los equipos de carguío y el costo al que operarán, la capacidad de planta, la flexibilidad y el valor agregado que se quiera lograr.

Definidas las fases de minado, se realiza el plan de producción que engrana toda la cadena de valor de la empresa minera; pasando por la Mina, Chancadora Primaria, Concentradora, Taller de Mantenimiento, *PAD* de Lixiviación, Puerto y por supuesto

y lo más importante el recurso humano que administra y opera la mina de manera transversal.

Definida la cadena de valor de la empresa podemos entender el comportamiento del sistema productivo de una mina. Por ejemplo, el material que es definido como mineral es cargado y transportado por camiones desde la mina hacia la Chancadora Primaria donde el material es reducido a un tamaño específico para que pueda ser tratado en la Planta Concentradora o en la Pilas de Lixiviación. En algunos casos también se hace uso de Chancadoras Secundarias que permiten reducir el tamaño aún más con el objetivo de asegurar la recuperación del metal en los procesos metalúrgicos. Asimismo, el material que es definido como desmonte es cargado y transportado por camiones a los diferentes botaderos de desmonte.

El transporte de materiales es una de las labores de mayor impacto en la operación minera, tanto en costo como en seguridad, dado la cantidad de equipos que se despliega en la operación y la interacción que tiene no solo con infraestructura instalada si no también con el personal que gestiona la operación minera.

Toda operación minera tiene un ciclo de vida y aunque cada año se investiga y actualiza los recursos y reservas de mineral tarde o temprano la mina entra en un proceso de cierre de operaciones debido al agotamiento de los recursos minerales, este proceso se denomina cierre de mina y todas las operaciones mineras están sujetas a esta condición que involucra una inversión importante durante la operación y cierre final de la mina con el objetivo de asegurar que la zona afectada por las operaciones no generen un impacto al medio ambiente.

### **2.1.1 EQUIPOS DE CARGUÍO**

Los equipos de carguío están estrechamente relacionados con el tipo de camión a cargar y su productividad y eficiencia dependerá en gran medida del tamaño de camión con el cual trabajará y las condiciones de operación.

Los equipos de carguío pueden ser palas eléctricas, cargadores frontales y en aplicaciones específicas excavadoras. La decisión de usar palas eléctricas o cargadores frontales depende del yacimiento y de la complejidad de este. Los cargadores son versátiles, presentan gran movilidad y permiten mucha selectividad en el minado. En yacimientos de oro, son los equipos de producción, sobre todo cuando hay mucho mineral y desmonte en formas no regulares. Pero una de las grandes desventajas de los cargadores es que para cargar un camión lo realizan en varios tiempos (cargan, retroceden, levantan y descargan) y esto incrementa la duración del ciclo de carguío. Otra gran desventaja es su sistema hidráulico, que, aunque es clave para levantar el material, también es el que más afecta a la disponibilidad mecánica.

En las grandes minas de cobre con varios periodos de minado de solo desmonte se requiere que los equipos de carguío tengan mayor disponibilidad y mejor productividad. En estos yacimientos, la selectividad es un factor secundario en periodos de desarrollo de la mina. Así, las palas eléctricas cobran mayor importancia. Dado que el minado de zonas de desmonte puede tomar de tres a cinco años, para llegar a zonas de mineral, los equipos asignados a dichas fases de minado son usualmente las palas, que, aunque no gozan de gran movilidad, su alta productividad asegura poder llegar al mineral en el tiempo estimado.

### 2.1.2 CICLO DE CARGUÍO DE LAS PALAS

El ciclo de carguío es el tiempo que le toma a una pala llenar de carga un camión.

Para el caso de estudio consideraremos la siguiente ecuación:

$$\mathbf{T_{op} = (T_c + T_s) * n_c + T_e} \quad (1)$$

Donde:

**T<sub>c</sub>**: Tiempo total para cargar un camión.

**T<sub>s</sub>**: Tiempo de cuadrado del camión.

**T<sub>op</sub>**: Tiempo disponible en un periodo T (Los *standby* no se consideran).

**N<sub>c</sub>**: Número de ciclos en un periodo T.

**T<sub>e</sub>**: Tiempo en que la pala está esperando sin camiones.

De la ecuación 1, podemos deducir que la única variable que depende en estricto rigor de la pala es el tiempo de carguío. La variable tiempo de espera (T<sub>e</sub>) depende del sistema global. Dado que la pala funciona como un servidor, el flujo de camiones que llegue a dicha pala va a condicionar el tiempo de espera y la productividad de esta. El flujo de camiones depende de todo el sistema (chancadoras, botaderos, configuración de la mina, congestión en las intersecciones, etc.). Con esto, ahora se puede definir la siguiente ecuación que indica un factor importante en la operación minera; el porcentaje de tiempo de espera de la pala.

$$\%T_e = \frac{T_e}{T_{op}} \quad (2)$$

El porcentaje de tiempo de espera de la pala permite medir el grado de necesidad de camiones del sistema o de una pala en particular. Un sistema puede necesitar más camiones para cubrir su déficit de productividad en la medida que la geometría de las rutas de la mina lo permitan. Matemáticamente, siempre se quisiera llegar a un porcentaje de espera igual a cero para minimizar los costos e incrementar el desarrollo de la mina, pero, como se verá más adelante, esto no es factible debido a consideraciones geométricas y de congestión.

En un sistema de múltiples palas y destinos, la espera de la pala fluctúa entre 20% y 30%, y depende mucho de la configuración de la mina y de los algoritmos de asignación de camiones. Y esto cambia cuando incluimos la congestión en la mina.

### **2.1.3 EQUIPO DE ACARREO: CAMIONES**

Los camiones mineros son los equipos que se usan en minería superficial para transportar el material de la mina hacia los diferentes destinos (chancadora, stocks, botaderos, etc.). Estos camiones tienen diferentes capacidades, dependiendo de la pala asignada. Se puede tener camiones desde 150 toneladas hasta 340 toneladas métricas. De igual manera que las palas, la elección del tamaño de camiones a usar está íntegramente ligada al tipo de operación minera en cuestión.

La productividad de un camión depende en gran medida de las condiciones de las rutas de acarreo y muy en especial de la resistencia a la rodadura (RR), que afecta la eficiencia y es directamente proporcional al consumo de combustible e inversa a la velocidad de acarreo. Este parámetro es crítico en la estimación de la cantidad de camiones necesarios para cumplir un plan de producción.



#### **2.1.4 CICLO DE ACARREO DE CAMIONES**

El ciclo de acarreo está dado por los tiempos de carguío, acarreo, cargado, cuadrado, cola en botadero o chancadora, descarga, retorno, vacío, cola en la pala y cuadrado nuevamente.

En la evaluación de proyectos mineros es usual usar las curvas “*rimpull*”, asociadas con la topografía de la mina, para determinar el tiempo de acarreo desde la pala hasta su destino de descarga, y de esta manera estimar la cantidad de camiones. Pero esta metodología no es tan cierta cuando se considera una flota importante de camiones, dado que aparecen demoras en las intersecciones. Dicha condición origina un incremento en el ciclo de acarreo y un riesgo operativo del cual se debe evaluar su impacto en el desempeño factible de la operación minera.

Es también usual asignar un tiempo de cola estimado con datos históricos o de otras operaciones. Este dato no depende de las curvas “*rimpull*” ni del tipo de equipos, depende de la operación misma, de las ubicaciones de los destinos y orígenes del mineral y desmonte, de las rutas e intersecciones y de la asignación de palas. Dado que el tiempo en la cola no se puede estimar hasta que el sistema esté en operación, no hay forma con métodos determinísticos de saber el porcentaje de tiempo en la cola o grado de saturación de un sistema. Es aquí en donde la simulación de sistemas discretos cobra importancia, ya que este simula un proceso que, como consecuencia de la interacción de sus elementos, origina cola y así se puede evaluar su impacto en la operación. El uso de simulación para construir el panorama de eventos que origina las colas y sus efectos en la producción y productividad.

#### **2.1.5 OPTIMIZACIÓN**

En matemáticas, la optimización matemática es la selección del mejor elemento (con

respecto a algún criterio) de un conjunto de elementos disponibles. También se le puede definir como la búsqueda del máximo o mínimo valor de una función real. Cuando se conoce la función real, es fácil determinar si tiene algún máximo o mínimo haciendo uso de las herramientas del cálculo diferencial si es de una sola variable. Cuando las variables se incrementan, como cuando se trabaja con tres variables, se complica el estudio y las técnicas aplicadas son más avanzadas, se hace uso de los multiplicadores de Lagrange. El proceso de optimización se complica mucho más cuando se trabaja con funciones de  $n$  variables que se desea optimizar y adicionalmente se tienen  $m$  restricciones. Si estas ecuaciones son lineales, se busca apoyo en las técnicas de investigación de operaciones, como, entre otros, la de programación lineal entera, programación lineal mixta, entre otras.

Pero ¿qué sucede cuando se ignora la función objetivo y las variables que la gobiernan son probabilísticas o dependen de otras y no son ecuaciones lineales? Entonces, la modelación matemática es muy compleja. Es aquí donde se recurre a la simulación, para poder entender un sistema como el presentado.

### **2.1.6 SIMULACIÓN**

En la industria con proyectos de gran complejidad, la simulación es la regla y no la excepción. Para ello, se construyen modelos donde se busca obtener conclusiones aplicables al sistema real. Una vez que se ha construido un modelo en particular, se realizan sobre ella múltiples escenarios: se simula. El conjunto de alternativas que se definen para su ensayo constituye la estrategia de simulación<sup>1</sup>.

Uno de los objetivos de la simulación es realizar ensayos de cambios en el sistema, probándolos en el modelo, con el fin de elegir la mejor alternativa, y así representar

---

<sup>1</sup> *Sistemas, modelos y simulación 75.26- Simulación. Facultad de Ingeniería Universidad de Buenos Aires*

de mejor manera una realidad que de otra forma no se podría estimar.

Existen diferentes modelos de simulación según (Garrido & Mileta, 2005) que podemos construir:

- a)** Dinámicos: Utilizados para representar sistemas cuyo estado varía con el tiempo.
- b)** Estáticos: Utilizados para representar sistemas cuyos estados son invariables a través del tiempo.
- c)** Matemáticos: Representan la realidad en forma abstracta de diversas maneras.
- d)** Físicos: Son aquellos en que la realidad es representada por algo tangible, construido en escala o que por lo menos se comporta en forma análoga a esa realidad (maquetas, prototipos, modelos analógicos, etc.).
- e)** Analíticos: La realidad se representa por fórmulas matemáticas. Estudiar el sistema consiste en operar con dichas fórmulas (resolución de ecuaciones).
- f)** Numéricos: Se tiene el comportamiento numérico de las variables intervinientes. No se obtiene ninguna solución analítica.
- g)** Continuos: Representan sistemas cuyos cambios de estado son graduales. Las variables intervinientes son continuas.
- h)** Discretos: Representan sistemas cuyos cambios de estado son de 'a saltos'. Las variables varían en forma discontinua.
- i)** Determinísticos: Son modelos cuya solución es única y siempre la misma para determinadas condiciones.
- j)** Estocásticos: Representan sistemas donde los hechos suceden al azar, lo cual no es repetitivo. No se puede asegurar cuáles acciones ocurren en un determinado instante. En cambio, solo se conoce la probabilidad de ocurrencia y su distribución probabilística.

Para este caso en particular, se usará la simulación de eventos discretos con cierto comportamiento estocástico.

### 2.1.7 CONGESTIÓN

Cuando la cantidad de vehículos y las rutas disponibles al interactuar no generan demoras, ni colas, ni detenciones, es usual creer que el sistema está trabajando en buenas condiciones; pero cuando una de esas variables cambia y aparecen demoras, se comienza a sentir la saturación del sistema. Es en momentos como este en que se habla de grado de congestión.

La Congestión según la Teoría de Tráfico es la manifestación física (demoras, colas, detenciones) de la interacción de flujos vehiculares en un segmento de ruta. Pero para que se considere que un segmento de ruta esta congestionado se tiene que superar cierto umbral en términos de demoras, colas y detenciones<sup>2</sup>.

## 2.2 PRODUCTIVIDAD PALA-CAMIÓN

La capacidad de predecir con exactitud la productividad de una flota de camiones y palas es un problema importante para la minería y la construcción que está intrínsecamente vinculada a la selección del equipo. En particular nos interesa "la predicción de los tiempos de viaje de ida y vuelta de un ciclo de camión y la predicción del efecto de la interacción entre la pala y camión en el punto de carga"<sup>3</sup>

En este contexto se desarrollaron varias teorías que buscan interpretar en forma analítica dicho problema. Tenemos así la teoría del factor de coincidencia (*match*

---

<sup>2</sup> Elementos de la Teoría del Tráfico Vehicular, Rodrigo Fernández

<sup>3</sup> Concepto introducido por Morgan y Peterson 1968

factor), la teoría de agrupamiento (*Bunching theory*) y la teoría de colas (*queue theory*).

La revisión de la literatura incluye los conceptos definidos por (Morgan & Peterson, 1968) y la ampliación de los conceptos para flotas heterogéneas planteados por (Burt, 2008) en su disertación de tesis doctoral.

### 2.2.1 FACTOR DE COINCIDENCIA (*MATCH FACTOR*)

El factor de coincidencia es la relación entre el tiempo de atención de una pala y el tiempo de llegada de camiones a esta. Este factor brinda la medida de productividad de una flota. La formulación matemática original definida por (Morgan & Peterson, 1968) es como sigue:

$$MF_{i,i'} = \frac{t_{i,i'} x_i}{tX x_{i'}} \quad (3)$$

En la ecuación 3,  $x_i$  representa la cantidad de camiones de tipo  $i$ ;  $t_{i,i'}$ , el tiempo de carguío en la pala de tipo  $i'$ ;  $tX$ , el ciclo de acarreo de todos los camiones; y  $x_{i'}$ , el número de palas de tipo  $i'$ .

Este factor tiene un comportamiento dual, es decir, nos brinda dos tipos de información: la intrínseca, que es sobre la cantidad de camiones, y la productividad de la flota de estos. Se usarán ambos comportamientos para los objetivos de la tesis.

Desde el punto de vista de productividad de flota de camiones, este factor brinda tres posibilidades de estado:

- a) Si el *Match Factor* (MF) es igual a 1, significa que el sistema productivo presenta estado óptimo, es decir, en teoría se lograría la máxima productividad posible;

- b) Si el MF es menor que 1, tiene a las palas esperando; y
- c) Si es mayor que 1, está saturado y la productividad disminuye.

Este factor se sustenta bajo el supuesto de que, si la tasa de llegada a las palas es equivalente a la tasa de despacho en las mismas, el sistema se encontrará en equilibrio. Para poder entender a profundidad este concepto se ampliará el análisis examinando su construcción y definición. Entonces, se definen las siguientes variables:

Sea  $i$  un tipo de camión, donde  $i \in [1, n]$ ,  $i'$  es un tipo de pala, y, además,  $i' \in [1, m]$ . También definamos  $x_i$  y  $x_{i'}$  que son el número de camiones y palas para los tipos  $i$  e  $i'$ . Entonces, el tiempo que demora una pala tipo  $i'$  en cargar a un camión tipo  $i$  es  $t_{ii'}$ .

Ahora, se analizará un caso básico: el homogéneo. Es decir, en el sistema existe un tipo de pala y un tipo de camión. De ahí se generalizará el estudio a múltiples tipos de palas y camiones. Entonces, se denomina a  $ta_i$ , la tasa de llegada de los camiones tipo  $i$  a la palas tipo  $i'$ , que está definida por:

$$ta_i = \frac{x_i}{TX} \quad (4)$$

Donde TX es el tiempo promedio del ciclo de acarreo desde un punto en particular hasta la pala. Para el caso del sistema global, este punto se convertiría en un botadero o chancadora.

También, está  $ts_i$ , la tasa de atención de los camiones tipo  $i$  por las palas tipo  $i'$ , que a su vez está definida por:

$$ts_{i'} = \frac{x_{i'}}{t_{ii'}} \quad (5)$$

Las ecuaciones 4 y 5 nos indican la tasa de llegada y atención de camiones, respectivamente. Al realizar el cociente de ambas ecuaciones, surge el concepto de *Match Factor* que es representada por la siguiente ecuación:

$$MF_{ii'} = \frac{x_i t_{ii'}}{x_{i'} T_X} \quad (6)$$

El resultado obtenido en la ecuación 6 es válido para sistemas donde existe un solo tipo de camión y pala. Pero, en sistemas reales no existe a menudo dicha condición y es por ello por lo que se mostrarán las ecuaciones para sistemas heterogéneos.

#### A) Palas homogéneas

En este caso, el tipo de palas en el sistema es homogéneo; es decir, existe un solo tipo de pala, pero múltiples tipos de camiones. Entonces, la tasa de llegada de camiones se estimaría como la cantidad de camiones de múltiples tipos entre el tiempo promedio de sus respectivos acarreoos.

La ecuación que lo describe quedaría definida así:

$$ta_i = \frac{\sum_i x_i}{T_X} \quad (7)$$

Donde  $T_X$  es el tiempo promedio de acarreo de todos los tipos de camiones a todas las palas. Se puede estimar de la forma siguiente:

$$T_X = \frac{\sum_i x_i t_i}{\sum_i x_i} \quad (8)$$

Donde  $t_i$  es el tiempo promedio de acarreo de un tipo de camión  $i$ . Entonces, de las ecuaciones 7 y 8 tenemos que la tasa de llegadas de camiones es como sigue:

$$ta_i = \frac{(\sum_i x_i)^2}{\sum_i x_i t_i} \quad (9)$$

Asimismo, para estimar la tasa de atención de los camiones en las palas, considerando que existen múltiples palas, se debe tener en cuenta que, dado que existen múltiples tipos de camiones, el tiempo promedio de atención es variable para cada grupo de estos. Debido a esto, la tasa de atención de camiones será igual a la cantidad de palas entre el tiempo promedio de atención global a todos los camiones.

Esto es como sigue:

$$ts_{i'} = \frac{x_{i'}}{\frac{\sum_i t_{ii'} x_i}{\sum_i x_i}} = \frac{x_{i'} \sum_i x_i}{\sum_i t_{ii'} x_i} \quad (10)$$

Así, haciendo el cociente de las ecuaciones 9 y 10 obtenemos el *Match Factor*, que se describe como sigue:

$$MF_{i'} = \frac{\sum_i x_i \sum_i t_{ii'} x_i}{x_{i'} \sum_i t_i x_i} \quad (11)$$

## B) Camiones homogéneos

Para los casos de camiones homogéneos, la tasa de llegadas a las palas es igual a la cantidad de camiones entre el tiempo promedio de acarreo. La siguiente ecuación la define así:

$$ta_i = \frac{x_i}{t_i} \quad (12)$$



A diferencia de la ecuación 9, el tiempo de llegada a las palas es solo el cociente de la cantidad de camiones y de su tiempo de ciclo de acarreo promedio, dado que existe solamente un tipo de camión.

La estimación de la tasa de atención de los diferentes tipos de palas se calculará al igual que el caso anterior; es decir, será igual a la suma de las tasas de cada tipo de pala. Para este caso tenemos lo siguiente:

$$ts_{i'} = \sum_{i'} \frac{x_{i'}}{t_{ii'}} \quad (13)$$

Dado que existe un solo tipo de camión, entonces el número de camiones es independiente de la tasa de servicio. El resultado es que el tiempo de atención de las palas es la suma de las tasas individuales de cada tipo de pala en el sistema.

De las ecuaciones 12 y 13 se obtiene el *Match Factor*, considerando que se tienen solo camiones homogéneos.

La siguiente ecuación lo muestra así:

$$MF_i = \frac{x_i}{t_i \sum_{i'} \frac{x_{i'}}{t_{ii'}}} \quad (14)$$

Ahora se verá el caso donde no hay flotas homogéneas en el sistema. Con los casos particulares vistos anteriormente, se podrá entender el funcionamiento del caso complejo, el cual será la base de los algoritmos de optimización que se usarán en la simulación.

### c) Camiones heterogéneos

Al igual que en los casos anteriores, primero se procederá a estimar las tasas de llegada de camiones y de servicio de las palas. Para ello, se hará uso de las ecuaciones que ya se determinaron anteriormente. Para la tasa de llegada de camiones se tiene la ecuación 9. En el caso de la tasa de servicio de las palas, se determinará de la siguiente manera:

$$ts_{i'} = \sum_{i'}^m \left( \frac{x_{i'} \sum_i x_i}{\sum_{i'} \sum_i t_{ii'} x_i} \right) \quad (15)$$

### d) Demostración:

Se sabe que  $t_{ii'}$  es el tiempo de servicio de una pala tipo  $i'$  a un camión tipo  $i$ . Entonces, como  $i$  varía de  $1$  hasta  $n$  e  $i'$  de  $1$  hasta  $m$ , se puede expresar el tiempo total de servicio de la forma siguiente para un tipo de pala  $i'$ :

$$t_{11} x_1 + t_{21} x_2 + \dots + t_{n1} x_n = \sum_{i=1}^n t_{i1} x_i \quad (16)$$

La ecuación 16 muestra el tiempo total de servicio de las palas de tipo  $1$  a los  $n$  tipos de camiones del sistema. Pero, dado que el número de tipos de palas varía desde  $1$  hasta  $m$ , la suma total de servicio de palas a todos los camiones es como sigue:

$$t_{11} x_1 + \dots + t_{n1} x_n + \dots + t_{12} x_1 + t_{22} x_2 + \dots + t_{nm} x_n = \sum_{i'=1}^m \sum_{i=1}^n t_{ii'} x_i \quad (17)$$

Entonces, para encontrar el tiempo de atención promedio se divide la ecuación 17 entre la cantidad de camiones del sistema. Así se tiene lo siguiente:

$$\frac{\sum_{i'=1}^m \sum_i^n t_{ii'} x_i}{\sum_i x_i} \quad (18)$$

Si se divide a la unidad entre la ecuación 18, se obtiene la tasa de servicio de una pala. Así para las m palas se tiene la tasa de servicio del sistema:

$$ts_{i'} = \sum_{i'}^m \left( \frac{x_{i'} \sum_i x_i}{\sum_{i'} \sum_i t_{ii'} x_i} \right) \quad (19)$$

La ecuación 9 representa la tasa de llegada de camiones. Entonces, al dividirlo entre la ecuación 19, se obtiene el *Match Factor* de un sistema de palas y camiones heterogéneos, como se representa en la siguiente ecuación:

$$MF_{ii'} = \frac{(\sum_i x_i)^2}{\sum_i x_i t_i \sum_{i'}^m \left( \frac{x_{i'} \sum_i x_i}{\sum_{i'} \sum_i t_{ii'} x_i} \right)} \quad (20)$$

La ecuación 20 representa el método simplificado *Match Factor* de un sistema con múltiples tipos de palas y camiones y su productividad global. Esta ecuación considera que los tiempos de acarreo promedios son equivalentes en cada punto del sistema. Esto implica que la combinación de rutas, tipos de equipos e interacción, condiciona este valor, por lo que es posible maximizarlo o minimizarlo dependiendo de cómo se mezclen las flotas y el circuito de acarreo en la mina. En esta tesis se

usará esta ecuación general para plantear la hipótesis de optimización que se propone.

### **2.2.2 TEORÍA DE AGRUPAMIENTO (*BUNCHING THEORY*)**

Los modelos de agrupamiento capturan la tendencia de los objetos en movimiento a través de una *línea de movimiento*. Esto suele analizarse debido a que algunos de los objetos que se mueven tienen más eficiencia que otros. También puede originarse por los pequeños retrasos que ocurren en la interacción de los objetos con otros objetos.

El agrupamiento reduce la capacidad de la flota para cumplir con la capacidad máxima del sistema. (Nagatani, 2004) ha estudiado el problema de la transición de modelos de agrupamiento en el flujo de tráfico general y rutas de autobús. Así, encontró que, en un sistema de autobuses, la cantidad de veces que el autobús paraba para subir pasajeros condicionaba el agrupamiento de los autobuses. Este resultado tiene una estrecha relación en el sistema de pala-camión.

En un sistema de pala-camión existe el agrupamiento y está estrechamente relacionado con el ciclo de acarreo de la flota de camiones, las palas y las rutas de acarreo. Por ejemplo, si un camión tiene un tiempo de ciclo menor debido a la productividad de la pala o su mayor velocidad, esta puede ser absorbida por las colas o tiempos de ciclos de la flota de camiones. Esto quiere decir que, si existen camiones más lentos en un sistema de acarreo, los camiones que transiten detrás de ellos tendrán tiempos de acarreo mayores y estarán muy cerca al promedio de ciclo de los más lentos.

En la industria es aceptado usar el promedio de ciclo de la flota de camiones y es un número conservador dado que está influenciado por los camiones más lentos. El

efecto es que la cantidad de camiones a comprar es mayor. Este resultado es interesante dado que es un sistema que se puede optimizar dependiendo de la cantidad de camiones lentos y las rutas de acarreo elegidas.

### **2.2.3 TEORÍA DE COLAS**

La teoría de colas es el estudio de los tiempos de espera, las longitudes de las colas. Los tiempos de espera de palas y camiones han sido el foco de estudio de la productividad pala-camión no solo en minería, también en el ámbito de la construcción y el transporte. Estos modelos utilizan el tiempo entre llegadas de un camión en lugar del tiempo entre llegadas de toda la flota. Sin embargo, el modelo requiere de los tiempos entre las llegadas lo que hace complejo su aplicación dado que se debe tener a priori un modelo que represente las llegadas a los servidores. Existen dos maneras de obtener dicho modelo, el primero es determinar la distribución mediante la toma de tiempos en la operación y el segundo crear un modelo de simulación que reconstruya el flujo de llegada. En ambos casos se desconoce a priori la función que representa las llegadas a los servidores y solo se tiene que modelar bajo supuestos que en la realidad no necesariamente ocurren dado que la tasa de llegada depende de los destinos y su interdependencia.

## **CAPÍTULO III. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

### **3.1 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN**

Para el desarrollo de esta investigación usaremos el enfoque cuantitativo. Bajo esta metodología diseñaremos el experimento para poner a prueba las hipótesis planteadas. El diseño del experimento estará basado en la construcción de un modelo de simulación que represente la operación de la mina y donde definiremos las variables dependientes y las variables independientes. El experimento bajo control será testeado tanto en la muestra como en la población y los resultados de la simulación serán contrastados con el modelo matemático con el cual se podrá demostrar las hipótesis planteadas.

#### **3.1.1 ENFOQUE DEL EXPERIMENTO**

En los capítulos anterior definimos la teoría relacionada a la estimación de la flota de camiones y su relación con la productividad de la mina. También hemos planteado las hipótesis y los objetivos que deseamos alcanzar, por lo que en esta etapa se brindará los lineamientos necesarios para lograr la solución.

Dada la naturaleza del problema se utilizará un enfoque cuantitativo. Un enfoque cuantitativo recolecta datos para probar hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico, con el fin establecer pautas de comportamiento y probar teorías (Hernández Sampieri, 2014).

### 3.1.2 DISEÑO DEL EXPERIMENTO

Lo primero que vamos a construir es un modelo matemático que relacione el *Math Factor* con el costo de minado y la productividad de la mina. Este modelo matemático demostrará la hipótesis planteada con respecto a las relaciones entre el costo de minado, la productividad de la mina y la flota optima de acarreo. Para demostrar que el modelo matemático se sigue cumpliendo incluso con la complejidad de un plan de producción vamos a diseñar un ambiente de producción que emule la realidad de una mina en operación, para ello vamos a hacer uso de la simulación de eventos discretos para construir un modelo de simulación que represente la operación de una mina.

El modelo de simulación tendrá los siguientes componentes:

#### a) Variables Dependientes

- i. Modelo de tiempos de rutas de acarreo.
- ii. Modelo de tiempos de carguío en los frentes de minado.
- iii. Modelo de distribución de materiales.
- iv. Algoritmo Match Factor para asignación dinámica de camiones.
- v. Balance de fases.
- vi. Infraestructura:
  - Chancadora

- Stock
- Botaderos

**b) Variables independientes:**

**i. Número de camiones.**

La variable independiente será el número de camiones y la variable dependiente será el modelo de simulación con todos sus componentes. Los resultados de la simulación tales como productividad, nivel de colas, costos de operación, nos permitirán validar el modelo matemático planteado y por consiguiente demostrar la validez de la hipótesis sugerida.

### **3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA**

La población del estudio será la construcción de los siguientes modelos:

- a)** Modelo de Simulación de una pala y un solo destino.
- b)** Modelo de Simulación de múltiples palas y múltiples destinos.

Estos modelos representaran la muestra y la población respectivamente. El segundo modelo representa la combinación de varios modelos como el primero. La diferencia entre ambos modelos radica principalmente en el tamaño y la complejidad, dado que el segundo debe incluir un algoritmo especial de asignación de flota de camiones que el primer modelo no necesita.

### **3.3 ESTRATEGIA PARA LA PRUEBA DE HIPÓTESIS**

Para poder validar el modelo matemático y comprobar la hipótesis, seguiremos los siguientes pasos:



- A) Construcción del modelo de simulación en el *software* GPSS o VISSIM. El modelo de simulación como se menciona anteriormente tiene submodelos que permiten representar una operación minera real.
- B) Simulación del modelo haciendo variar la cantidad de camiones que operan en la mina.
- C) Preparación de planilla Excel con los resultados de la simulación.
- D) Estimación del *Match Factor* usando las ecuaciones del modelo matemático.
- E) Comparación de estimación del *Match Factor* del punto anterior con los resultados del simulador.

Este proceso lo realizaremos tanto para la muestra como para la población con lo que demostraremos que las ecuaciones matemáticas representan el comportamiento de un sistema productivo minero.

## CAPÍTULO IV. MODELO MATEMÁTICO DE UN SISTEMA MINERO

La hipótesis de esta investigación es que, dado un sistema cerrado (circuito de acarreo pala-camión), con un número fijo de servidores (palas), la cantidad optima de camiones ocurre cuando se encuentra el mínimo costo de minado. Esto es posible cuando el *Match Factor* se iguala a **1**; es decir, el sistema ha llegado a su máxima productividad. Se usará esta condición para estimar la cantidad óptima de camiones y se mostrará el comportamiento técnico económico de un sistema productivo. Este comportamiento permitirá evaluar la factibilidad de la operación. Los resultados parciales de este capítulo han sido presentados por el autor (Lozano, 2019) en diferentes eventos internacionales.

### 4.1 DEMOSTRACIÓN MATEMÁTICA

Se imagina un sistema pala-camión, donde se tienen las fases de minado y los destinos de descarga. Entonces, se puede considerar que existen **m** palas y **n** camiones en el sistema. Las **m** palas están asignadas a diferentes fases de minado y su objetivo es cumplir una cuota de producción **K** donde la producción **P(m)** siempre tiene que ser mayor o igual a **K(m)**. Aquí el cuestionamiento es: ¿cuántos camiones se necesitan? Se puede estimar con la fórmula de *Match Factor* considerando un MF

de 1. Pero se obviaría la naturaleza del sistema de acarreo, es decir, su comportamiento económico.

Si un sistema empieza a operar y no tiene camiones, tendrá un alto costo de minado debido a que no tiene producción. Pero a medida que ingresen camiones al sistema, el tiempo de espera en las palas disminuye, aumentando así su productividad y disminuyendo el costo de minado. Esto es lógico, pero ¿hasta qué punto? La respuesta nos brindará un estudio del comportamiento de las colas y esperas en las palas.

#### 4.1.1 MATCH FACTOR

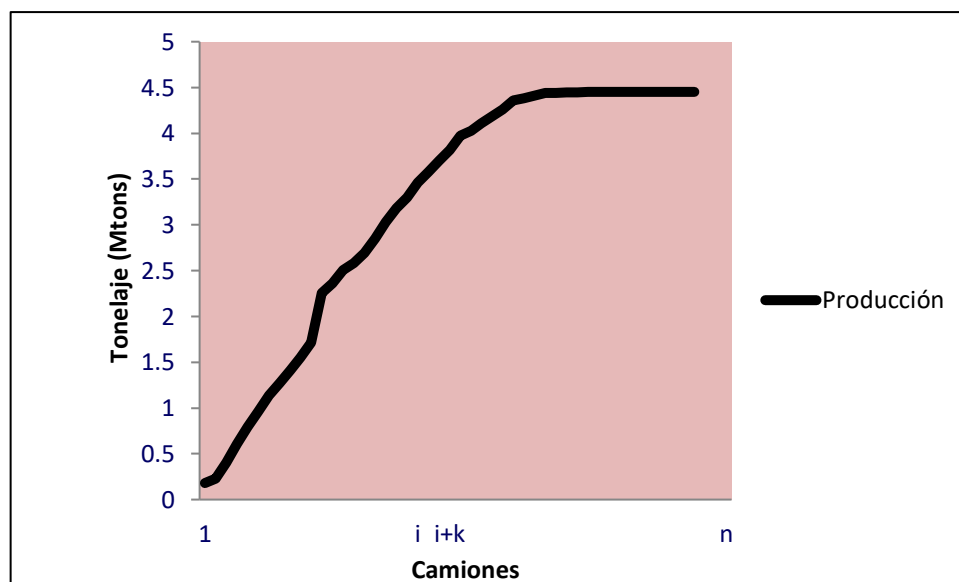
Para entender el comportamiento económico del sistema en función de las colas y las esperas, hay que imaginar la función **WSh(n)**, que representa la cantidad de horas de espera de las palas en función de los camiones. Esta decrece en función del ingreso de camiones. Por otro lado, dado por la naturaleza de los servidores siempre existe cola en un sistema; no siempre es malo tener cola. En principio, cuando no hay camiones, no hay colas, pero, al incrementarse la cantidad de camiones, existe la posibilidad de un incremento en las colas. Este incremento está gobernado por la función **QSh(n)**. Esta posibilidad de existencia se demostrará al determinar la relación de esperas y colas.

De las dos funciones **WSh(n)** y **QSh(n)**, la que tiene un impacto significativo es la espera de las palas. Sea **P(n)** el tonelaje minado y que representa la producción de la mina para n camiones en operación. Entonces, se define esta función como sigue:

$$P_n = \sum_{i=1}^m \left( \frac{H_i f c}{tc_i + ts_i + te_i} \right) \quad (21)$$

Donde:

- $H_i$ : tiempo nominal de operación de la Pala  $i$
- $tc_i$ : tiempo promedio de carguío de la Pala  $i$ .
- $ts_i$ : tiempo promedio de cuadrado de los camiones en la Pala  $i$ .
- $te_i$ : tiempo promedio de espera de la Pala  $i$ .
- $f_c$ : factor de carga de los camiones.



**FIGURA 1: TOTAL MINADO**  
**FUENTE: Elaboración Propia**

De la ecuación 21, se puede ver que el tiempo promedio de espera  $te_i$  de la pala  $i$  es inversamente proporcional a la producción, lo que sustenta que un incremento en la flota de camiones disminuye las demoras e incrementa la producción. Si queremos calcular el límite de  $P(n)$  cuando  $n$  tiende a ser muy grande, el resultado es que la  $P(n)$  es acotada, es decir, tiene un máximo teórico, que es igual a  $\sum_{i=1}^m \left( \frac{H_i f_c}{tc_i + ts_i} \right)$ . Esto se puede ver en forma gráfica en la FIGURA 1.

Para un sistema de una sola pala y un solo destino, como se verá más adelante, es factible llegar a esta producción; pero en un sistema de  $m$  palas y múltiples destinos, solo es un límite máximo, dado que la interacción de múltiples variables agrega un

tiempo de demora adicional que es la congestión. Como se comentó en los párrafos anteriores, la espera en la pala determina la producción en la mina.

Dado este resultado de dependencia entre **P(n)** y **WSh(n)**, se determinará la función **WSh(n)**, que vendría dada por la suma de todas las esperas de las palas. Se representa como sigue:

$$WSh_n = \sum_{i=1}^m \frac{H_i t e_i}{t c_i + t s_i + t e_i} \quad (22)$$

Lo importante de esta función es que brinda una relación con la producción **P(n)** de la mina, pero aún no se sabe su relación con las colas. Para demostrar dicha relación, se define lo siguiente:

El tiempo nominal de operación de una pala es igual al tiempo total de operación más el tiempo de espera. Entonces, según esto, se define la siguiente ecuación:

$$H_i = E_i + (t c_i + t s_i) \#_i \quad (23)$$

Donde  $\#_i$  es el número de ciclos de la pala  $i$  en el tiempo  $H_i$ . De esta ecuación, se encuentra el número de ciclos despejando la ecuación 3.3:

$$\#_i = \frac{H_i - E_i}{t c_i + t s_i} \quad (24)$$

Entonces, dado que el número de ciclos  $\#_i$  ha ocurrido en el tiempo  $H_i$ , entonces la tasa de servicio por hora para las  $m$  palas está dada por la siguiente ecuación:

$$s_m = m \frac{\sum_i \frac{H_i - E_i}{tc_i + ts_i}}{\sum_i H_i} \quad (25)$$

De igual forma, se estima la tasa de llegadas de los camiones a las palas. Se empieza por definir a  $tn_j$  como el tiempo nominal de acarreo, es decir, el tiempo que se demora un camión  $j$  en ser cargado en una pala  $i$ : tiempo de acarrear, cargar, cuadrar, descargar y retornar vacío. Este tiempo es el que se puede estimar usando la topografía de la mina y las curvas *rimpull* del fabricante del camión. Por otro lado, se define a  $tq_j$  como el tiempo de cola. Entonces, el tiempo de ciclo de acarreo  $tcc_j$  se determina de la siguiente manera:

$$tcc_j = tn_j + tq_j \quad (26)$$

La fórmula 26 muestra el tiempo de ciclo real debido al efecto de la cola para un camión  $j$  en una ruta en particular. Si este camión  $j$  da  $k_j$  ciclos en un tiempo de operación  $H_j$ , entonces, se determinan las siguientes ecuaciones:

$$\sum_{k_j=1}^{k_j} tcc_{jk_j} = \sum_{k_j=1}^{k_j} tn_{jk_j} + \sum_{k_j=1}^{k_j} tq_{jk_j} = H_j \quad (27)$$

Generalizando la ecuación 27 para  $n$  camiones, en la operación se tiene la siguiente ecuación:

$$\sum_{j=1}^n H_j = \sum_{j=1}^n \sum_{k_j=1}^{k_j} t n_{jk_j} + \sum_{j=1}^n \sum_{k_j=1}^{k_j} t q_{jk_j} \quad (28)$$

Pero, para una ruta en particular, el tiempo nominal de acarreo no cambia. Entonces, la ecuación 28 se simplifica y obtenemos la siguiente fórmula:

$$\sum_{j=1}^n H_j = \sum_{j=1}^n k_j t n_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k_j=1}^{k_j} t q_{jk_j} \quad (29)$$

De la ecuación 29, el componente  $\sum_{j=1}^n k_j t n_j$ , que es el tiempo nominal total, puede ser expresado de esta manera:

$$\sum_{j=1}^n k_j t n_j = \overline{t x}_{-q} \sum_{j=1}^n k_j = \overline{t x}_{-q} K \quad (30)$$

Donde  $\overline{t x}_{-q}$  es el tiempo nominal de acarreo promedio del sistema y  $K$  es el número de ciclos de acarreo de este. Este tiempo promedio no incluye al tiempo de cola. Ahora, de las ecuaciones 29 y 30 se determina el número de ciclos, que se expresa de la siguiente manera:

$$K = \frac{\sum_{j=1}^n H_j - \sum_{j=1}^n \sum_{k_j=1}^{k_j} t q_{jk_j}}{\overline{t x}_{-q}} \quad (31)$$

De la ecuación 31, se conoce el número de ciclos del sistema ocurridos en  $\sum_{j=1}^n H_j$

horas operativas del sistema. Entonces, se determina el número de ciclos por hora que llegan a las palas. Esto queda determinado así:

$$a_n = n \frac{\left( \sum_{j=1}^n H_j - \sum_{j=1}^n \sum_{k_j=1}^{k_j} t q_{jk_j} \right)}{\bar{t} \bar{x}_{-q} \sum_{j=1}^n H_j} = \frac{n \left( 1 - \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{k_j=1}^{k_j} t q_{jk_j}}{\sum_{j=1}^n H_j} \right)}{\bar{t} \bar{x}_{-q}} = n \left( \frac{1 - Q_n}{\bar{t} \bar{x}_{-q}} \right) \quad (32)$$

Por último, si se considera un sistema de palas y camiones homogéneos, la ecuación 25 se convierte en lo siguiente:

$$s_m = m \frac{\sum_i \frac{H_i - E_i}{tc_i + ts_i}}{\sum_i H_i} = \frac{m(\sum_{i=1}^m H_i - \sum_{i=1}^m E_i)}{(tc_i + ts_i) \sum_i H_i} = \frac{m \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^m E_i}{\sum_i H_i} \right)}{tc_i + ts_i} = \frac{m(1 - E_m)}{tc_i + ts_i} \quad (33)$$

Con las ecuaciones 32 y 33, para un sistema de camiones y palas homogéneos, se puede decir que la tasa de llegadas de  $n$  camiones a  $m$  palas es equivalente a las ecuaciones 32 y 33. Por lo tanto, se plantea la siguiente ecuación:

$$n \left( \frac{1 - Q_n}{\bar{t} \bar{x}_{-q}} \right) = \frac{m(1 - E_m)}{tc_i + ts_i} \quad (34)$$

Esta equivalencia lleva a replantear el  $MF_{nm}$  del sistema. Entonces, la siguiente ecuación, que es el cociente entre la tasa de llegada de camiones y la tasa de servicio de las palas, se presenta de esta manera:

$$MF_{nm} = \frac{n(tc_i + ts_i)}{m \bar{t} \bar{x}_q} \quad (35)$$



Ahora, con el resultado de la ecuación 34, la ecuación 36, que representa el MF en función del porcentaje de esperas, colas y el tiempo de acarreo promedio con cola y sin cola, queda definida de este modo:

$$MF_{nm} = \frac{n(tc_i + ts_i)}{m\bar{tx}_q} = \left( \frac{(1 - E_m)}{(1 - Q_n)} \right) \left( \frac{\bar{tx}_{-q}}{\bar{tx}_q} \right) \quad (36)$$

También se sabe que se cumple la siguiente relación, dado que en toda la operación se han presentado **K** ciclos:

$$k\bar{tx}_q = k\bar{tx}_{-q} + k\bar{q} \quad (37)$$

Además, se sabe que el tiempo promedio de acarreo, incluyendo las colas, multiplicado por el número de ciclos, equivale a las horas totales de operación. Así, se puede convertir la ecuación 37 en la siguiente expresión:

$$\sum_{i=1}^n H_i = \frac{\bar{tx}_{-q}}{\bar{tx}_q} \sum_{i=1}^n H_i + \sum_{j=1}^n \sum_{k_j=1}^{k_j} tq_{jk_j} \quad (38)$$

Despejando el cociente de tiempos de acarreo promedio de la ecuación 38 se presenta:

$$\frac{\bar{tx}_{-q}}{\bar{tx}_q} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i - \sum_{j=1}^n \sum_{k_j=1}^{k_j} tq_{jk_j}}{\sum_{i=1}^n H_i} = 1 - Q_n \quad (39)$$

Aplicando el resultado de la ecuación 39 a la ecuación 36, se tiene la fórmula final del *Match Factor*.

$$MF_{nm} = \frac{n(tc_i + ts_i)}{m\bar{t}x_q} = \left( \frac{(1 - E_m)}{(1 - Q_n)} \right) \left( \frac{\bar{t}x_{-q}}{\bar{t}x_q} \right) = 1 - E_m \quad (40)$$

La ecuación 40, que es el *Match Factor* como se definió en el capítulo 1, brinda la posibilidad de evaluar la productividad de la mina; es decir, si el **MF** es menor que 1 significa que el sistema tiene un déficit de camiones, y si es mayor significa que hay exceso de camiones. En consecuencia, el objetivo es encontrar el punto de equilibrio, cuando el **MF** es igual a 1.

Ahora, se despeja la espera en función de la cola de la ecuación 40, que se expresa como sigue:

$$E_m = 1 - \frac{n(tc_i + ts_i)(1 - Q_n)}{m\bar{t}x_{-q}} \quad (41)$$

De acuerdo con la ecuación 41 y la condición de equilibrio del **MF**, un sistema está en equilibrio cuando el **MF** es igual a 1. Entonces, existe en este punto un número de camiones  $n_0$  de tal manera que no hay déficit ni exceso de camiones. Dicho de otra manera, la tasa de servicio de las palas es igual a la tasa de llegadas de los camiones y estrictamente la espera es igual a cero, como se puede comprobar en la ecuación 5.0. Este  $n_0$  se puede calcular así:

$$n_0 = \frac{m\bar{t}x_{-q}}{(1 - Q_{n_0})(tc_i + ts_i)} \quad (42)$$

Para un sistema de palas y camiones heterogéneos, estas fórmulas aplican directamente.

Para el caso de estudio, se partirá del caso de sistemas de palas y camiones homogéneos y heterogéneos. Se vio en la ecuación 40 la estrecha relación entre las colas de los camiones en las palas, la espera de estas, el número de camiones, el tiempo de servicio de las aquellas y el tiempo promedio de acarreo, y cómo estos parámetros definen la productividad de un sistema. Esta productividad encuentra su máxima expresión cuando el **MF** es igual a **1**, cuando se encuentra el punto de equilibrio del sistema. Esto último equivale a encontrar el número de camiones óptimo, es decir  $n_0$ .

Si se presta atención a la ecuación 40, donde se expresa el **MF**, se verá que depende del porcentaje de cola del sistema, del porcentaje de espera de este, del número de camiones y de los tiempos de servicio de pala y de acarreo de camiones.

Entonces, es posible que exista más de un **MF** igual a **1**, es decir, está dentro de las posibilidades que dos o más flotas de camiones presenten ese valor, dado que depende no solo de los camiones, sino también de las rutas de los destinos. Y no necesariamente existe una solución. Puede ser que para  $n_0$  el **MF** sea **1** pero también es posible para un  $n_0$ , dado que depende del comportamiento de las colas y esperas.

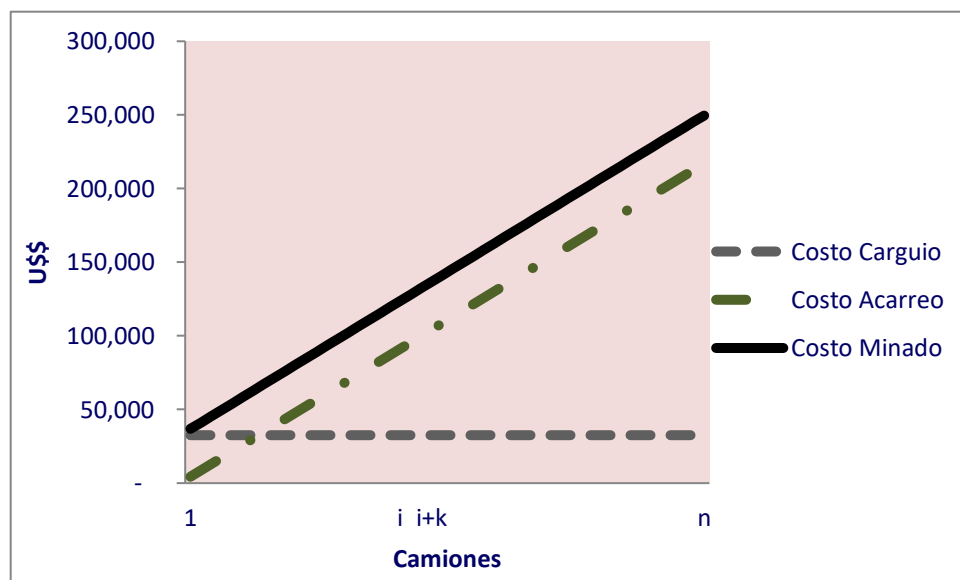
Por esta razón, se necesita utilizar una ecuación diferente, pero que está íntimamente relacionada al **MF**: el costo unitario de minado,  $umc_n$ .

#### 4.1.2 MÍNIMO COSTO DE MINADO

El costo de minado  $MC(n)$  está definido por la siguiente ecuación:

$$MC_n = \sum_{i=1}^m Ch_i H_i + \sum_{j=1}^n Ch_j H_j + GA_{mn} \quad (43)$$

Donde  $Ch_i$  es el costo unitario de una pala  $i$  y  $Ch_j$  es el costo unitario de un camión  $j$ . Además,  $GA$  son los costos adicionales como perforación y voladura. La ecuación 43 resume el costo de carguío, acarreo y otros que la operación asume para mover el total de producción. La componente del costo de carguío es una función constante dado que representa el costo de operar las  $m$  palas en el sistema, mientras que el costo de acarreo del sistema representa una función creciente debido al incremento de camiones. Podemos ver gráficamente este comportamiento en la FIGURA 2:



**FIGURA 2: COSTO DE MINADO**

**FUENTE:** Elaboración Propia

Para estimar el costo unitario de minado, es necesario determinar la producción que se muestra en la siguiente ecuación:

$$P_n = \frac{fc(1 - E_m)}{tc_i + ts_i} \sum_{i=1}^m H_i \quad (44)$$

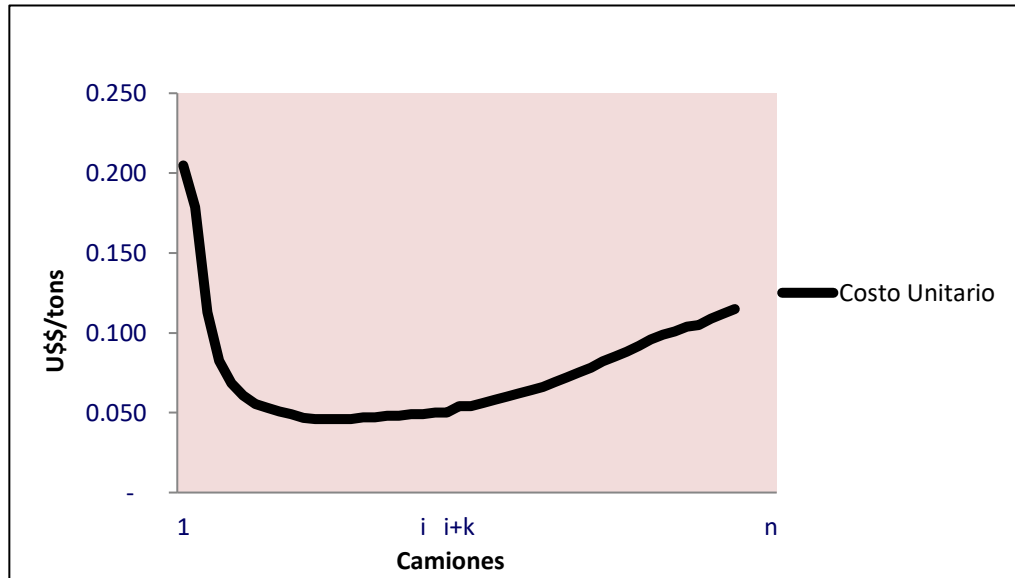
La producción  $P_n$  tiene un máximo, que para un sistema homogéneo equivale a  $\frac{fc}{tc_i + ts_i} \sum_{i=1}^m H_i$ . Teniendo en cuenta este resultado y las ecuaciones 40 y 41, se obtiene el costo unitario de minado que se expresa en la ecuación 45.

$$umc_n = \frac{\sum_{i=1}^m Ch_i H_i + \sum_{j=1}^n Ch_j H_j + GA_{mn}}{\frac{fc(1 - E_m)}{tc_i + ts_i} \sum_{i=1}^m H_i} \quad (45)$$

Se sabe que el denominador de la función  $umc_n$  tiene un máximo, entonces, pasado este punto, cualquier incremento en camiones solo produciría lo mismo en costo unitario de minado. También se sabe que bajo este máximo tendremos un incremento del costo unitario de minado. Por eso, se está ante un punto mínimo de la función  $umc_n$ . Dadas estas consideraciones, se representa la función  $umc_n$  de forma gráfica en la FIGURA 3.

En la FIGURA 3, se ve cómo es la función del costo unitario de minado. Esta función se construye a partir de la ecuación 45. Cuando la cantidad de camiones tiende a cero, el costo de operación unitario es muy alto debido a las altas esperas de las palas y la poca producción. A medida que los camiones ingresan al sistema, la producción se incrementa y el costo unitario de minado se reduce hasta cierto punto, dado que por más que se incremente la cantidad de camiones, la producción de las palas ha llegado a su límite máximo. Es decir, que las esperas son las mínimas

posibles y el incremento marginal del costo de minado es producido porque las colas de los camiones en el sistema empiezan a incrementarse.



**FIGURA 3: COSTO UNITARIO DE MINADO**

**FUENTE:** Elaboración Propia

Existe, entonces, una longitud de cola aceptable que origina un incremento marginal de producción y a partir de dicho punto cualquier incremento de camiones no agrega valor al sistema. Así, el problema se reduce a encontrar el punto de equilibrio de la operación (número de camiones), donde el costo unitario de minado es el mínimo.

Se ha visto que para encontrar el costo unitario mínimo de minado se debe encontrar la cota máxima de producción factible, que matemáticamente es igual a

$\frac{fc}{tc_i + ts_i} \sum_{i=1}^m H_i$ . La ecuación 42 brinda la cantidad de camiones óptimo para lograr un

MF igual a 1, pero expresa que depende de una espera y cola asociadas.

Entonces, se puede afirmar que, dado un sistema de  $m$  palas y  $n$  camiones, la producción máxima ocurre para un  $n_0$  y en este punto existe un mínimo costo unitario de minado que es igual a:

$$umc_{n_0} = \frac{\sum_{i=1}^m Ch_i H_i + \sum_{j=1}^{n_0} Ch_j H_j + GA_{mn_0}}{\frac{fc}{tc_i + ts_i} \sum_{i=1}^m H_i} \quad (46)$$

De todo lo anterior, se concluye que, para un número de camiones  $n_0$ , se encuentra la máxima producción y la cota mínima del costo de minado unitario. Entonces, este  $n_0$  es la cantidad de camiones óptimo que hace que el sistema trabaje a su máxima productividad; este  $n_0$  ocurre cuando el  $MF_{nm}$  es igual a 1. Esto se puede expresar matemáticamente de la siguiente manera:

$$\forall S(m, n, r(x, y, z), d), \exists n_0 \setminus P_{n_0} = \max_n P_n \cap umc_{n_0} = \min_n umc_n \rightarrow MF_{n_0 m} = 1 \quad (47)$$

Donde  $S(m, n, r(x, y, z), d)$  es un sistema de acarreo de  $m$  palas,  $n$  camiones,  $r$  rutas de acarreo y  $d$  destinos.

#### 4.1.3 FUNCIÓN OBJETIVO DEL PLAN DE PRODUCCIÓN

En la sección 4.1 se presentó las relaciones entre la cola y espera de un sistema y cómo determinar los camiones encontrando el mínimo de la función costo unitario de minado o buscando el *Match Factor* igual a 1. Esto daría la máxima producción posible, pero no necesariamente es lo que un plan de largo plazo requiere.

Sea  $K_w$  la producción requerida para el periodo  $w$ , donde  $w \in T[1, x] \forall x \in \mathbb{N}$ . Entonces, para cumplir con la producción planeada se debe cumplir la relación siguiente:

$$P_{n_{0w}} = K_w, \forall w \in T \quad (48)$$

La ecuación 48 es la condición fundamental para calcular el verdadero número de camiones  $n_{0_w}$  requeridos en un periodo dado  $w$ .

#### 4.1.4 BALANCE DE FASES DE PRODUCCIÓN

Ahora se sabe que existe una condición global que se debe lograr y que es la que maximizará el Valor Presente Neto de la empresa minera, pero adicionalmente existe una restricción de la producción por fase de minado. Esto quiere decir que, periodo a periodo, cada fase debe cumplir con una cuota de producción, y que no necesariamente es la máxima.

En ciertas fases se requiere mayor producción que en otras; por lo tanto, la producción para ciertas palas del sistema de acarreo no siempre será la máxima. Entonces, adicionalmente a la condición fundamental, es necesario cumplir objetivos por pala. Así, se tiene:

$$P_{n_{0_{w_m}}} = Z_{w_m} \forall w \in T \quad (49)$$

La ecuación 49 muestra que para cada pala en cada periodo se debe cumplir con un objetivo preestablecido. Ahora, se puede plantear la ecuación general del cálculo de camiones, que es como sigue:

$$P_n = K_w, \forall w \in T \quad \text{Sujeto a:}$$

$$P_{n_{0_{w_m}}} = Z_{w_m} \forall w \in T, \forall m$$

$$K_w = \sum_{m=1}^m Z_{w_m}$$



El sistema de ecuaciones previo no se puede resolver con métodos determinísticos, dado que la naturaleza de las colas y las esperas son resultado del comportamiento probabilístico de un sistema de acarreo y de un proceso de simulación. Para poder aplicar, entonces, toda la teoría desarrollada se debe construir un sistema de simulación y sobre sus resultados aplicar los conceptos estudiados y determinar la flota óptima, sustentado todo en las matemáticas desarrolladas en este capítulo.

## **CAPÍTULO V. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN**

### **5.1 METODOLOGÍA**

En este capítulo se describirá la metodología a usar para desarrollar los sistemas de acarreo. En general, se construirá un programa en *GPSS (Global Propurse Systems Simulations)* que represente al sistema de acarreo. Este programa de cómputo se basa en la generación de transacciones en función del tiempo, el cual para el caso presente representará a los camiones. Cada transacción se generará siguiendo alguna distribución de frecuencias o una medida de tendencia central. Es decir, cada segmento de ruta de la mina tendrá un tiempo promedio de acarreo o una función de distribución que la represente. Este tiempo de acarreo estará modelada según la velocidad de los volquetes, las gradientes y las condiciones de rodadura.

Los camiones recorrerán las rutas de la mina, que para el programa serán transacciones de tiempo. Se sabe que cada camión deberá llegar a un cargador o botadero en algún momento. Si el camión llega al sistema de carguío o de descarga, preguntará si está ocupado. Si esto ocurriera, el sistema controlaría la cola, y solo hasta que el sistema esté desocupado, el camión podrá ingresar y ser atendido.

Cuando el sistema de carguío termina de atender a un camión, este se preguntará si dicha carga es mineral o desmante. Para esto, el sistema tiene una distribución de material por tonelaje la cual controlará el destino del material.

Cuando un camión regresa del botadero o de la chancadora, será asignado en función de un algoritmo, cuya función objetivo es minimizar las colas y maximizar la cobertura de pala. Dicho algoritmo funciona como un *Match Factor* dinámico, y trabaja en tiempo real tomando información de colas en cada frente de carguío.

En líneas generales, se simula los camiones y se optimiza el ciclo de acarreo con el algoritmo mencionado anteriormente; todo esto con el objetivo de encontrar la mejor producción para una realidad específica. Esta Metodología que se describe a continuación ha sido planteada y desarrollada en (Lozano, 2019)

## 5.2 FUNDAMENTO DE ASIGNACIÓN DE CAMIONES

Para poder estudiar el comportamiento de un sistema de acarreo con simulación, es importante definir qué queremos lograr. En este caso en particular ya se tiene un objetivo dado, que es cumplir la producción planeada; también se tienen las herramientas de decisión que se demostraron matemáticamente: el *Match Factor* y el Mínimo Costo de Minado. Pero cuando analizamos un sistema de  $m$  palas y  $d$  destinos de descarga, surge la pregunta: ¿cómo asignar a los camiones vacíos y por qué debemos usar algunas herramientas que los asignen? Debemos usar una herramienta que asigne camiones, porque en la vida real no siempre existen rutas fijas hasta las palas (si este fuere el caso, no tendría sentido la optimización). Lo que sí existe es una combinación posible que origina que el **MF** sea igual a **1**, es decir, que la tasa de llegada de camiones es equivalente a la tasa de atención de las palas y en este punto se encuentra el mínimo costo de minado y máxima productividad como se demostró en los capítulos anteriores.

La herramienta asignada será el concepto de *Match Factor* (**MF**) pero en forma dinámica, es decir, en cada instante requerido de la simulación o cuando el camión lo requiera. Se sabe que el **MF** refleja la productividad de un sistema, por eso buscará la mayor productividad posible para cada camión asignado con el objetivo que en la suma global se logre la mejor producción para una cantidad de camiones en particular.

Así, un camión al regresar de una zona de descarga tiene la oportunidad de ir a “**m**” lugares de atención, pero solo un conjunto limitado de soluciones asegurará que sea atendido en el menor tiempo posible.

Para lograr identificar qué ruta es la idónea, se analizará una ruta específica y se generalizará el resultado. Por ejemplo, si un camión desea definir a qué pala ir tendría que conocer algún factor que le indique adónde. Este factor puede ser el resultado del siguiente razonamiento: sería ideal que un camión llegue a la pala y sea atendido justo a tiempo, es decir, sin que haga cola y sin que la pala espere.

Según las consideraciones anteriores se define el factor **CP**, que mide el tiempo de atención total de la pala versus el tiempo de acarreo total a esta desde un punto dado en la mina. Se define como sigue:

$$CP_i = \frac{(\#Q_i * (tc_i + ts_i) + k_i * (tc_i + ts_i))}{t_i} \quad (50)$$

Donde:

- **#Q<sub>i</sub>**: Cola actual o número de camiones en cola en la Pala i.
- **tc<sub>i</sub>**: Tiempo de carguío de la Pala i.
- **ts<sub>i</sub>**: Tiempo de cuadrado en la Pala i.

- $t_i$ : Tiempo de acarreo hacia la Pala  $i$ .
- $i$ : pala en cuestión.
- $k_i$ : volquetes en ruta asignados a la Pala  $i$ .

Se considera los siguientes valores y significados de  $CP_i$ :

$CP_i = 1$ : Significa que el volquete llegará justo a tiempo sin hacer cola y sin ocasionar que la pala espere. Es decir, el *Match Factor* es iguala 1 en ese instante.

$CP_i > 1$ : El volquete hace cola.

$CP_i < 1$ : La pala espera.

Si se tiene un conjunto de  $CP_i$ , tal que  $i$  pertenece al conjunto  $[1, m]$  y  $m$  pertenece a los enteros positivos, entonces, ¿cómo se elige adónde enviar el camión en un tiempo dado de la simulación?

Si dentro del conjunto  $CP_i$  existe un valor de  $CP_i = 1$ , entonces se ha encontrado la solución; de lo contrario, se debe dividir el conjunto de soluciones en dos subconjuntos: los que pertenecen al intervalo  $]0; 1[$  y los que pertenecen al intervalo  $]1, \infty+ [$ .

Entonces se definen los conjuntos:

- $P = \{CP_i / 0 < CP_i < 1\}$  para todo **MF (i)** que pertenece a los números racionales positivos. Este conjunto está conformado por los destinos donde la pala espera.
- $V = \{CP_i / CP_i > 1\}$  para todo **MF (i)** que pertenece a los números racionales positivos. Este conjunto está conformado por los destinos donde los camiones asignados hacen cola.

Luego se calcula la función mínima de **P (Min {P})**. Esto asegura que para este conjunto el **Min (P)** es la solución del mayor tiempo de espera que puede ocurrir en

la pala. También se calcula la función mínima de **V (Min {V})**. Esto asegura que para este segundo conjunto el **Min (V)** es la solución del menor tiempo de espera que puede ocurrir en los camiones.

Es lógico que la ruta a elegir será la que maximice la cobertura de pala como sistema. Se pueden encontrar tres posibilidades, tales como que:

- Solo exista el conjunto **P**, entonces la solución será la función **Min (P)**. En este caso, el sistema asignará recursos a la pala que menos cobertura tenga para que de esta manera incremente la cobertura del sistema de manera sostenida.
- Solo exista el conjunto **M**, entonces la solución será la función **Min (M)**.
- Existan los conjuntos **P** y **M**. En este caso, es mejor invertir recursos en maximizar la cobertura de pala escogiendo la función **Min (P)**.

Este resultado nos brinda la posibilidad de decidir a qué pala enviar el camión para maximizar la cobertura global del sistema. En todos los casos es evidente que se tendrá cola dado que lo que busca el sistema es maximizar la cobertura global del mismo y de esta manera maximizar la producción. La cola es parte de la optimización y, dependiendo del plan de minado, tendrá un valor aceptable que asegure una cobertura de pala dada y que esta asegure la producción planeada.

### 5.3 PRIORIDAD DE FASES DE MINADO

Al usar los algoritmos mencionados anteriormente, es evidente que el sistema buscará siempre maximizar su cobertura de Pala Global para de esta manera maximizar su producción y minimizar el costo de minado. Esta idea está bien hasta que analizamos el tema de prioridad de fases de minado. No necesariamente la mejor

opción del sistema es la mejor opción para el desarrollo de la Mina, dado que no solo se tiene que cumplir con un tonelaje total sino también con un tonelaje por Fase.

Para ello, el programa tiene un algoritmo que realiza el balance de Fases en tiempo real para asignar a un volquete. Para cuestiones de análisis es necesario ejecutar el sistema primero sin el balance de Fases, que sería el óptimo en producción, y luego restringirlo con este para ver el impacto en la producción global. En algunos sistemas no se notará la diferencia, pero en sistemas en donde el desmonte es prioridad de alguna fase y esta se encuentra en una zona profunda, sí se evidencia que la restricción al sistema origina menos producción que el óptimo.

#### 5.4 ANÁLISIS Y DETERMINACIÓN DE FLOTA ÓPTIMA

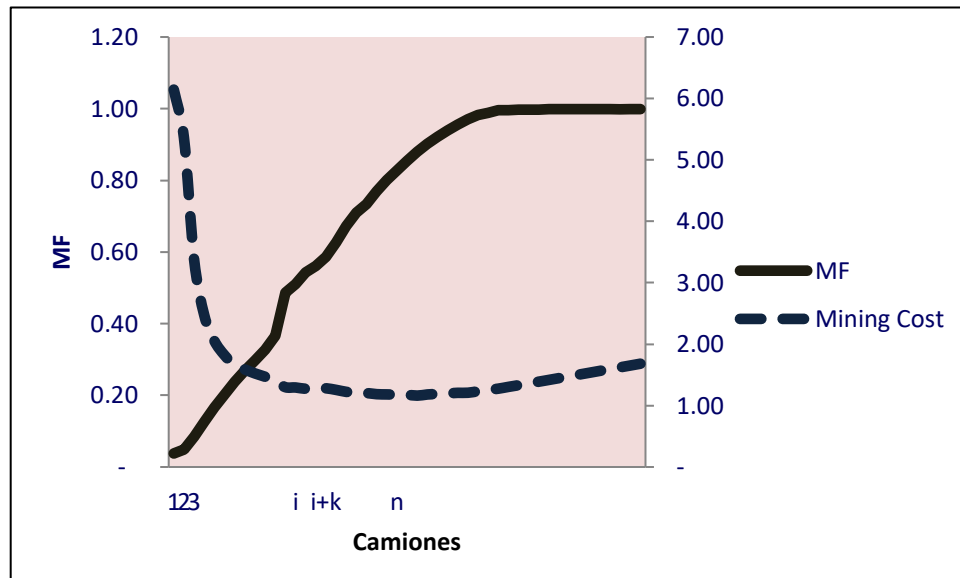
Como se explicó anteriormente, en la toma de una decisión con respecto a la flota elegida de camiones, para cumplir un plan de minado es necesaria alguna herramienta que permita balancear tanto el lado económico como el de producción. Para ello se hará uso de los análisis **MFC** (*Match Factor- Mining Cost*) y **CP**.

##### 5.4.1 ANÁLISIS *MATCH FACTOR* FRENTE A *MINING COST* (MFC)

Este análisis consiste en la evaluación de la FIGURA 4. se muestra cómo la función costo de minado (*umc*) es inversamente proporcional con respecto a la función (*MF*), y cómo para encontrar el mínimo costo se obtiene el máximo de la función (*MF*).

Es decir, al inicio con pocos camiones en el sistema, la espera en la pala es alta y por ende el tamaño de la cola es pequeño o no existe. A medida que al sistema se le adicionan volquetes, este busca optimizarlo y baja el costo de minado, dado que

la espera disminuye y en este caso el costo baja rápidamente con una gradiente negativa alta.



**FIGURA 4: RELACIÓN ENTRE MATCH FACTOR Y MINING COST**

**FUENTE:** Elaboración Propia

Con la adición de camiones, el sistema, con sus algoritmos de optimización, busca mantener una cobertura de pala óptima y lo logra al disminuir el costo de minado. Como resultado, también se logra el mínimo de la función costo y el equilibrio entre la cola y la espera. Este equilibrio es el máximo de la función **MF**.

Pero el sistema, a pesar de llegar al supuesto mínimo de la función costo, puede seguir incrementando su producción y manteniendo un costo muy cerca al mínimo. Esto es lo que se ha denominado la *zona de optimización* o *umbral de optimización (UO)*. Esta zona se mantiene inalterable en costo de minado y es donde es posible analizar el costo de oportunidad de usar más volquetes que lo óptimo previsto, con el objetivo de incrementar la producción. En el futuro podría dar más beneficios en el desarrollo de la mina por entregar zonas de mineral de alta ley en el menor tiempo posible.



Pasada la zona **UO**, el sistema se vuelve inestable dado que la cola empieza a manifestarse de una manera más evidente y esto origina que la función costo empiece a crecer con una gradiente positiva.

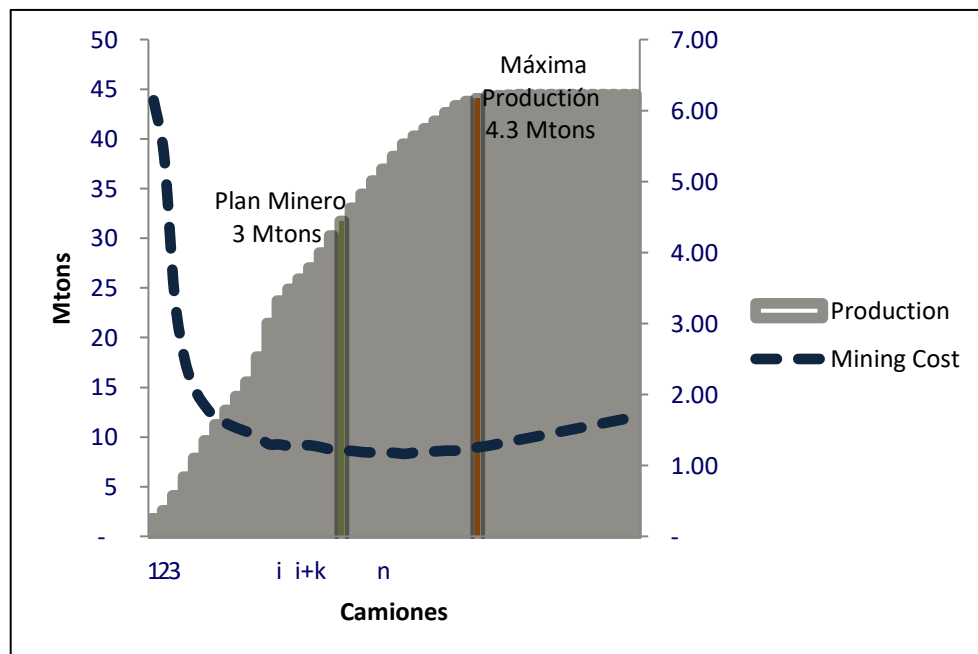
Dependiendo del costo horario de los camiones, la función costo pueda crecer más o menos rápido. Es en esta zona en donde la producción empieza a aumentar de una manera más desacelerada hasta mantenerse constante, dado que el sistema se saturó y llegó al máximo.

#### 5.4.2 ANÁLISIS COSTO DE MINADO FRENTE A PLAN (CP)

Para estimar la flota optima de acarreo se hará uso del plan de minado planteado y se buscará el tonelaje a minar como función objetivo. Como se muestra en FIGURA 5 en este análisis pueden ocurrir tres eventos:

- El primer evento muestra que el plan de minado mapeado en la gráfica **CP** utiliza menos camiones que el óptimo de la gráfica **MFC**. En este caso hay una oportunidad de mejorar el plan de minado en producción y minimizar los costos si incrementamos los camiones. Con esto se reduce el porcentaje de espera.
- El segundo evento muestra que el plan mapeado utiliza más camiones que el óptimo **MFC**. En este caso, se está ante una situación de sacrificar el costo por el desarrollo de la mina. Esto es resultado de que la mina se optimiza al maximizar las ventas y siempre se tiene que producir igual o mayor cantidad de tonelaje del plan de minado. El plan minero está trabajando al máximo de su capacidad productiva y su valor dependerá de que ocurra dicha capacidad productiva; es el caso más extremo y optimista. Aquí es recomendable realizar un análisis de riesgo, debido a lo sensible que es el valor de una mina a su capacidad de desarrollo.

- El tercer evento muestra que el plan mapeado coincide con el óptimo de **MFC**.  
Se puede optimizar el plan de minado buscando un incremento en la producción dentro de la zona **UO** aumentando la cantidad de camiones.



**FIGURA 5: RELACIÓN ENTRE MINING COST Y PRODUCTION**

**FUENTE:** Elaboración Propia

Cuando se haya decidido la flota óptima, se puede saber a qué costo de minado el plan se va a ejecutar y este valor sirve para refinar los estimados cuando se realizó el plan.

También, dado que para lograr el objetivo del plan de minado se ha determinado una flota, se puede saber el porcentaje de cola y espera para que el plan pueda lograr su objetivo. Esto sirve como una medida o índice operacional de control.

## 5.5 SIMULACIÓN GRÁFICA

La simulación gráfica usa el código fuente original del GPSS y es transformado en código *Proff* para su visualización en 3D o 2D. Se puede observar la simulación

usando las rutas reales. Esto ayuda a la toma de decisiones en la optimización de la producción.

Cuando se haya obtenido la solución factible para un plan de minado, con respecto a la cantidad de camiones, es posible generar una simulación en forma gráfica del comportamiento de la mina para el plan propuesto.

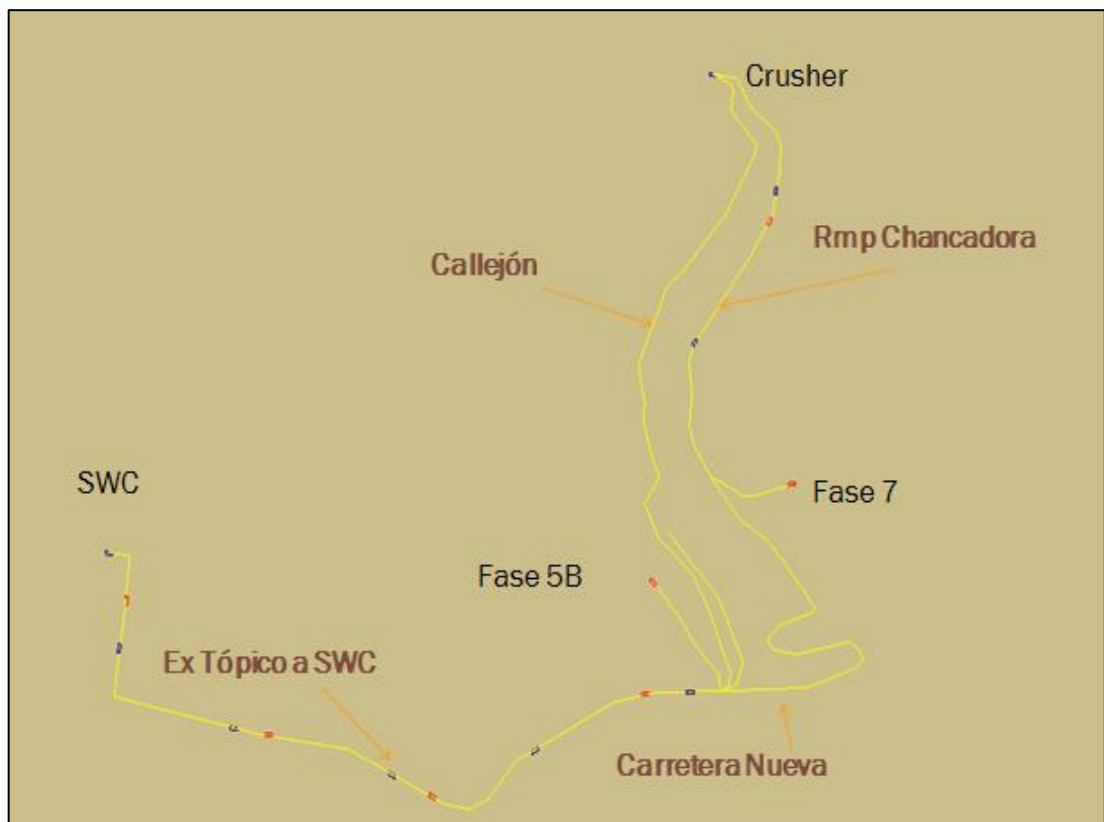
Este plan, al poder ser visualizado en forma gráfica, puede brindar información que los números no brindan rápidamente. Por ejemplo, al observar un sistema donde existen dos fases de minado, una de ellas en mineral y la otra en frente de mineral y desmonte, nos evidencia que el sistema en principio se comporta como un todo. Esto se da debido a que los camiones de ambas fases, con el algoritmo de mejor asignación, se comparten con el propósito de maximizar su función objetivo. Pero cuando el tiempo avanza, solo una fase aporta mineral; la otra, desmonte.

Entonces, dadas las consideraciones geométricas de las zonas de descarga y las rutas de acarreo, se observa que el sistema se divide en dos subsistemas que en algunos momentos trabajan de forma dinámica y en otros, de forma fija. Esta observación es una demostración de que el sistema dinámico no siempre está presente y que posee variaciones significativas dependiendo de las rutas y la ubicación de los cuerpos de mineral.

También, en ocasiones, surge la pregunta en el campo: ¿a qué se debe que una pala tenga una cola grande y otra, ubicada a no mucha distancia, esté esperando camiones? A veces, se afirma que es una mala asignación de despacho, pero, en realidad, lo que sucede es que esto ocurre a menudo cuando la ruta de acarreo a otra pala es tan larga que el algoritmo de asignación prefiere corresponderle a un camión una pala con muchos camiones porque lo atenderán más rápido que si recorriera vacío hacia una pala ubicada más lejos. En estos casos, solo cuando la

pala se satura, el algoritmo asigna a otra pala en una ruta larga. Esto se puede saber gracias a las simulaciones gráficas mostradas. Además, al observar el inicio de un sistema de acarreo se puede entender que la ubicación de los parqueos es crítica y que la mala decisión en la ubicación de estos ocasiona que, cuando inicie el cambio de guardia, se pierda capacidad de producción. Esto se da ya que los camiones pierden minutos valiosos transportándose mientras las palas esperan.

Por otro lado, en cuestiones de seguridad, con la simulación gráfica se pueden determinar zonas de mucha congestión vehicular y asegurar una buena operación indicando las zonas de alto riesgo debido al acarreo.



**FIGURA 6: SIMULACIÓN GRÁFICA**  
**FUENTE:** Elaboración Propia

## **5.6 CRITERIOS DE DIMENSIONAMIENTO DE FLOTA**

Se pueden definir dos enfoques de planificación dentro de la determinación de la flota adecuada. Estos son los siguientes:

- A)** Planeamiento a corto plazo
- B)** Planeamiento a largo plazo

### **5.6.1 PLANEAMIENTO A CORTO PLAZO**

En este caso se tiene un plan de minado a ejecutar y un conjunto de camiones como capacidad de acarreo. El objetivo será maximizar la producción y buscar minimizar los costos. Para ello se usará el criterio simple de análisis MFC y CP, pero teniendo en cuenta que hay una capacidad de camiones preestablecida. Si el análisis MFC y CP nos indica un requerimiento de camiones mayor al actual se tendrá que analizar las variables de velocidad, capacidades y velocidades de carguío, disponibilidad y utilización de camiones, para buscar una solución; pero si no hay forma, se tendrá que revisar el plan de minado y proponer rutas temporales que mejoren la capacidad de acarreo. En caso el requerimiento sea menor al actual, se tiene la posibilidad de optimizar el plan y superarlo incrementando el uso de camiones y disminuyendo las esperas bajo la zona UO.

### **5.6.2 PLANEAMIENTO A LARGO PLAZO**

En este escenario es en donde se decide cuántos camiones por periodo se necesitarán para cumplir con el plan de minado. Dado este, el requerimiento de camiones es usualmente una curva creciente y por periodos constantes, incrementándose a lo largo del tiempo por aumento en la profundidad de la mina, en

la altura de los botaderos y zonas de apilamiento, y en la relación desmonte-mineral de la mina.

Todos los capítulos anteriores se han enfocado en la determinación de la flota óptima para un plan minero y en particular para un periodo de este. Ahora se tiene a lo largo del tiempo de ejecución de un plan las rutas de la zona de operación a la salida del tajo, y también las que se dirigen hacia el botadero. Entonces, mirando en perspectiva todo el escenario de manera económica, se tiene un tajo que profundiza y botaderos que posiblemente incrementen su ciclo de acarreo, a menos que se habiliten nuevos en el tiempo y que se encuentren cerca del mismo tajo. La pregunta que surge es: ¿cómo se construyen botaderos de tal manera que se optimice ciclo de acarreo? Claro está que, si se usan los botaderos más cercanos en los primeros años, se tendrán luego menos camiones; en consecuencia, no se comprarán más, y eso es bueno. Entonces, ¿qué se busca como función objetivo o como estrategia de largo plazo? La respuesta es optimizar el costo de capital. Mientras más derive la inversión en capital de los primeros años, el proyecto será más atractivo en términos financieros y económicos.

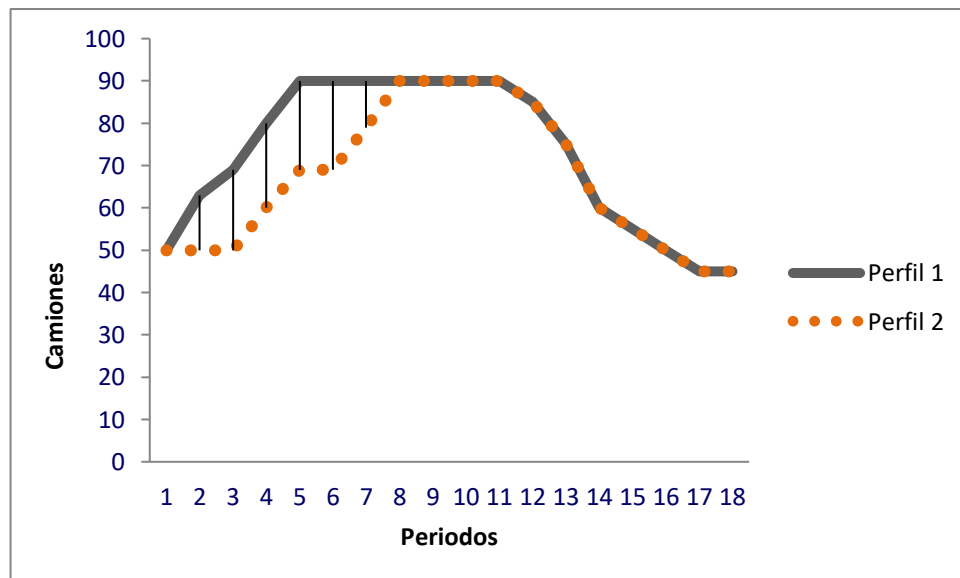
Algo que se debe entender es que cuando se compra un activo debe ser para que se use al máximo de su capacidad. El objetivo es que pague el costo de adquisición y cumpla con la estrategia de maximizar el Valor Presente Neto de la compañía. En este sentido, la construcción de los botaderos deberá asegurar que la curva de camiones sea una **función estrictamente creciente hasta el punto de máxima producción**, y esto se logra asegurando una estrategia de consumo de recursos de botadero que asegure dicha curva. Si la función de camiones, que representa el perfil de camiones de una mina, es creciente por tramos, decreciente en otros y creciente en otros tantos, se tendrá que contratar personal por periodos de tiempo para luego despedirlo, ya que la mina no está optimizada. Como es lógico, podría generar

conflictos con los empleados y sindicatos de trabajadores. Entonces, tenemos dos consecuencias: optimización del capital y conflictos sindicales.

### 5.6.3 PERFIL DE CAMIONES

Como se comentó en el apartado anterior, el perfil de camiones es la curva que representa la necesidad de estos a lo largo del tiempo, con el fin de cumplir un plan minero. Las características de esta curva tienen un impacto significativo en la inversión por adquisición de camiones. Adicionalmente, también tendrá repercusión en la inversión por el requerimiento de bahías con el propósito de realizar los mantenimientos que aseguren mantener la disponibilidad ofrecida de los camiones.

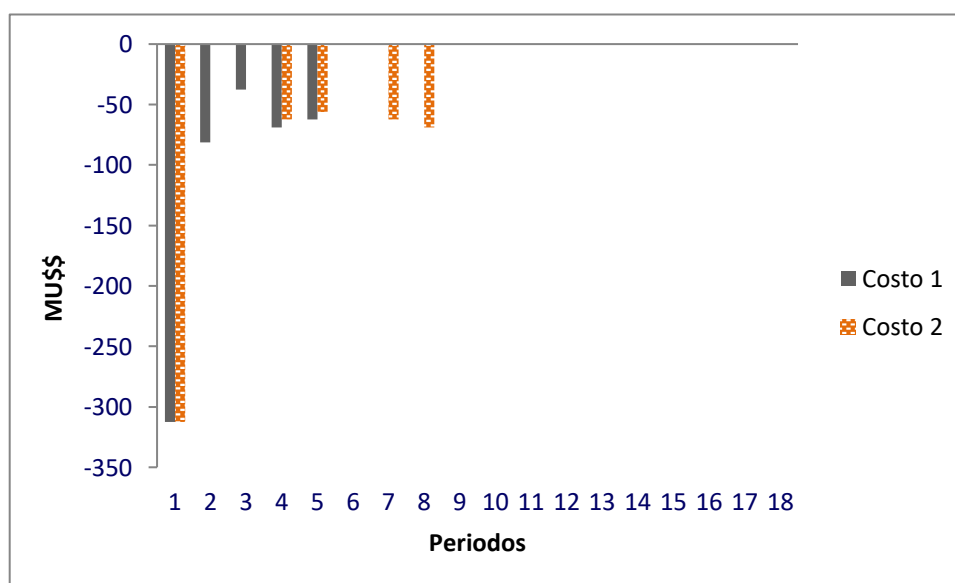
Para entender estos conceptos, vamos a analizar la FIGURA 7. Para un mismo plan minero, dependiendo de la asignación de botaderos en el tiempo y su disponibilidad, es posible tener más de un perfil de camiones.



**FIGURA 7: PERFIL DE CAMIONES**

FUENTE: Elaboración Propia

Por ejemplo, en este caso el perfil 1 requiere comprar camiones mucho antes que el perfil 2. Ambas curvas están optimizadas dentro del rango de los recursos de botaderos disponibles y corresponden a un mismo plan. La diferencia radica en la disponibilidad de botaderos en el tiempo, las resistencias a la rodadura asumidas para las carreteras, entre otros. Inclusive, teniendo los mismos recursos de botadero disponible, la diferencia puede radicar en la secuencia de construcción del botadero. Lo que se quiere representar es que la curva que se elija perfil de camiones tendrá un efecto en la inversión a realizar como se puede ver en la FIGURA 8.



**FIGURA 8: PERFIL DE INVERSIÓN**

**FUENTE:** Elaboración Propia



## **CAPÍTULO VI. SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA MINERO**

En este capítulo se mostrará la aplicación de la teoría desarrollada para estimar el punto óptimo de un sistema productivo y los camiones necesarios para cumplir un plan de producción. También se verá el comportamiento de un sistema de una sola pala y un solo destino de descarga, y un sistema complejo de múltiples palas y múltiples destinos.

### **6.1 CASO 1: SISTEMA DE UNA PALA Y UN SOLO DESTINO DE DESCARGA**

Este sistema comprende un caso básico de un sistema productivo, donde existe una sola pala y un solo destino de descarga. Este sistema representa la muestra de un conjunto de posibles sistemas.

#### **6.1.1 ELEMENTOS DEL SISTEMA**

Este sistema cuenta con una pala y un destino. El tiempo promedio de carguío es de 1.5 minutos y el tiempo de cuadrado del volquete es de 0.5 minutos. El material cargado es enviado a la chancadora, donde el tiempo de cuadrado es de 1 minuto y el tiempo de descarga es de 1.2 minutos. El tiempo de acarreo de un camión vacío es de 4.3 minutos y de un camión cargado es de 11 minutos.

Entonces, surgen los cuestionamientos: ¿cuántos camiones se necesitan para cumplir con la máxima producción del sistema? ¿Existe cola en el sistema?

Para responder a estas y otras preguntas, como el porcentaje de espera de la pala y la chancadora, se construirá un sistema de simulación en GPSS. El código fuente de este sistema se puede revisar y testear en el Anexo 1.

#### **6.1.2 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN Y DEMOSTRACIÓN DE HIPÓTESIS**

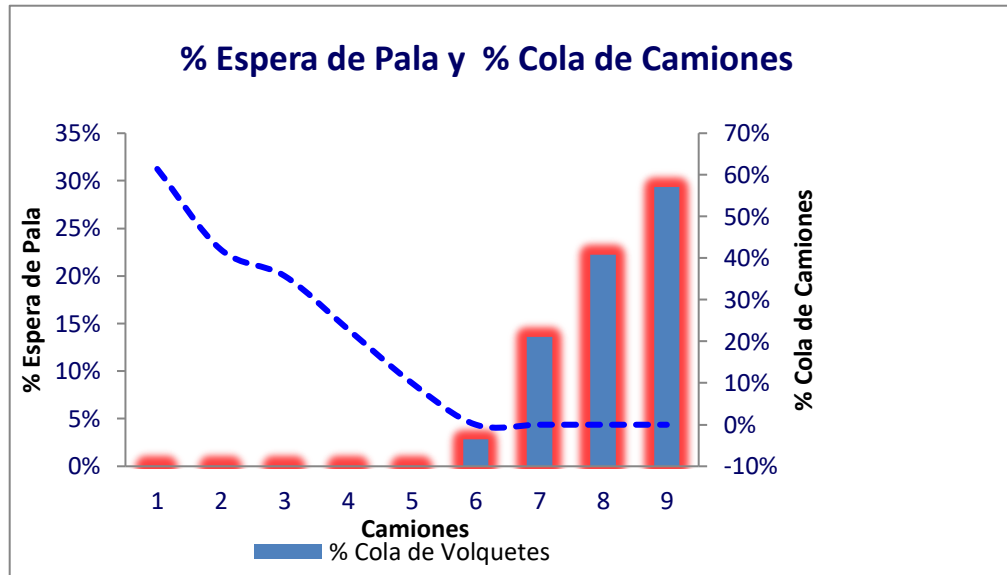
En la TABLA 1 se muestran los resultados de la simulación. Como se puede ver, se estima la cantidad de material minado, el número de ciclos, el tiempo de cola de los camiones y espera de las palas y la chancadora. Se puede observar también el cálculo del *Match Factor* y la demostración de la ecuación 40 usando la simulación con GPSS.

TABLA 1: RESULTADOS DE 1 SOLA PALA Y UN SOLO DESTINO

Simulación de Sistemas Mineros: Caso Base										
# de Corrida	#	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Camiones	Unidades	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Toneladas a Chancadora	Tonelada	786,768	1,049,024	1,311,132	1,573,240	1,835,348	2,038,848	2038848	2038848	2038848
Tonelada por Pala	Tonelada	786,916	1,049,172	1,311,428	1,573,684	1,835,940	2,039,588	2039736	2039736	2039736
Incremental Tonelaje			262,256	262,256	262,256	262,256	203,648	148	-	-
Disponibilidad	%	91%	91%	91%	91%	91%	91%	91%	91%	91%
Utilización	%	87%	87%	87%	87%	87%	87%	87%	87%	87%
Horas operativas	Horas	595	595	595	595	595	595	595	595	595
Ciclos	Unid	5,317	7,989	8,861	10,633	12,405	13,781	13,782	13,783	13,783
Utilización Pala	%	39%	51%	64%	77%	90%	100%	100%	100%	100%
Utilización Chancadora	%	32%	43%	54%	65%	75%	84%	84%	84%	84%
Tiempo de Cola camiones	seg/ciclo	0.09	0.132	0.175	0.219	0.263	35.096	190.482	345.857	501.21
Tiempo de espera Palas	min/ciclo	4.12	1.88	1.44	0.77	0.29	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00
Tiempo de carguío +Cuadrado	seg/ciclo	155.4	155.4	155.4	155.4	155.4	155.4	155.4	155.4	155.4
Tiempo de descarga + Cuadrado	seg/ciclo	130	130	130	130	130	130	130	130	130
Tiempo acarreo vacío	seg/ciclo	263	263	263	263	263	263	263	263	263
Tiempo acarreo lleno	seg/ciclo	660	660	660	660	660	660	660	660	660
Ciclo de acarreo incluido colas	min/ciclo	20.14	20.14	20.14	20.14	20.14	20.72	23.31	25.90	28.49
Ciclo de carguío	min/ciclo	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59
% Espera Pala	%	61%	42%	36%	23%	10%	0%	0%	0%	0%
% Cobertura Pala	%	39%	58%	64%	77%	90%	100%	100%	100%	100%
% Cola de Volquetes	%	0.01%	0.01%	0.01%	0.02%	0.02%	2.82%	13.62%	22.26%	29.33%
Match Factor= $n*(tc+ts)/m*tq$	%	39%	51%	64%	77%	90%	100%	100%	100%	100%
Match = $(1-\%E) * t(-q)/((1-\%Q) * tq)$	%	39%	58%	64%	77%	90%	100%	100%	100%	100%
Match Factor= 1-%E	%	39%	58%	64%	77%	90%	100%	100%	100%	100%
Productividad Pala	Ton/Hr	1,323	1,764	2,205	2,645	3,086	3,429	3,429	3,429	3,429
Productividad Mina	Ton/Hr	441	441	440.91	441	441	429	381	343	312
Costo Acarreo	\$/hr	224	224	224	224	224	224	224	224	224
Costo Carguío	\$/hr	560	560	560	560	560	560	560	560	560
Costo Acarreo	\$/tn	0.508	0.508	0.508	0.508	0.508	0.523	0.588	0.653	0.719
Costo Carguío	\$/tn	0.42	0.32	0.25	0.21	0.18	0.16	0.16	0.16	0.16
Costo Total Unitario	\$/tn	0.93	0.83	0.76	0.72	0.69	0.69	0.75	0.82	0.88

FUENTE: Elaboración propia

Cuando se construye el sistema y se simula para diferentes escenarios de camiones, se pueden encontrar los siguientes resultados que se comentarán y evaluarán en las siguientes figuras:

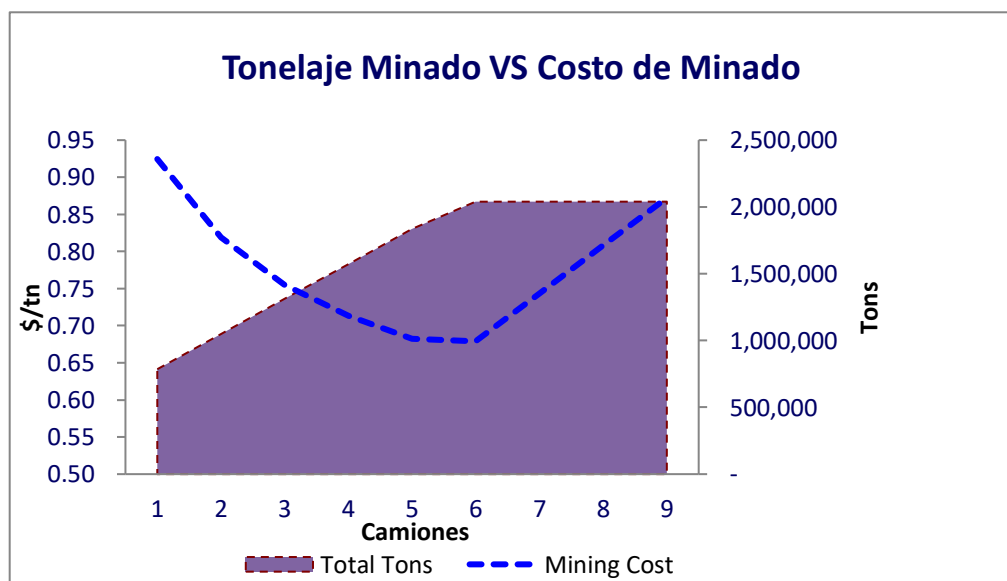


**FIGURA 9: SISTEMA 1 PALA- 1 DESTINO: % ESPERA VS % COLA**

FUENTE: Elaboración Propia

**FIGURA 10: SISTEMA 1 PALA- 1 DESTINO: TONELAJE VS COSTO**

FUENTE: Elaboración Propia



La FIGURA 9 muestra cómo a medida que se incrementa el número de camiones al sistema, el porcentaje de espera de la pala disminuye. Asimismo, un incremento de número de camiones significa un incremento de tiempo en cola. En la FIGURA 10 se visualiza cómo el mínimo costo unitario de minado ocurre en el máximo de la producción posible, como se mostró en el fundamento teórico. También se puede estimar que seis es la cantidad óptima de camiones que este sistema necesita, a un costo mínimo operativo de US\$ 0.68/t.

El sistema que se acaba de desarrollar es básico, pero permite comprobar los fundamentos teóricos y profundizar en un sistema más realista: un sistema de múltiples palas y múltiples destinos analizados a continuación.

## **6.2 CASO 2: SISTEMA DE MÚLTIPLES PALAS Y DESTINOS**

En el mundo real las operaciones mineras realizan sus actividades en múltiples zonas o fases, y el material extraído es clasificado por leyes de corte y tipos de desmonte, con lo que se tienen múltiples destinos tales como *stock piles*, chancadoras, botaderos, etc.

De la misma manera que el caso anterior, la pregunta es que, dado un escenario de producción, ¿cuántos camiones son necesarios? En este caso existen dos maneras de estimar la cantidad de camiones en simulación. La primera es analizar cada pala y, en función del tipo de material que tienen, determinar la cantidad de camiones que son necesarios usando el algoritmo del caso 1.

Luego de analizar todas las palas, sumar la cantidad de camiones de cada una obteniendo la cantidad de camiones que el plan de minado necesita para cumplir con la producción requerida. Esta metodología es muy parecida a lo que la industria realiza actualmente, pero usando métodos discretos y Excel para estimar la cantidad

de camiones; una estimación en donde no se toma en cuenta el comportamiento de las colas y esperas del sistema.

Otra manera es la estimación de camiones donde interactúan todos estos, las palas y los destinos, es decir, un análisis dinámico. Para ello, es conveniente revisar el capítulo 4, sección 4.2, donde se explica la metodología y el algoritmo de asignación dinámico a usar.

Para demostrar este sistema, se ha construido un programa en GPSS, cuyo código puede ser revisado en el ANEXO 2 y 4, al igual que el testeo de su algoritmo correspondiente.

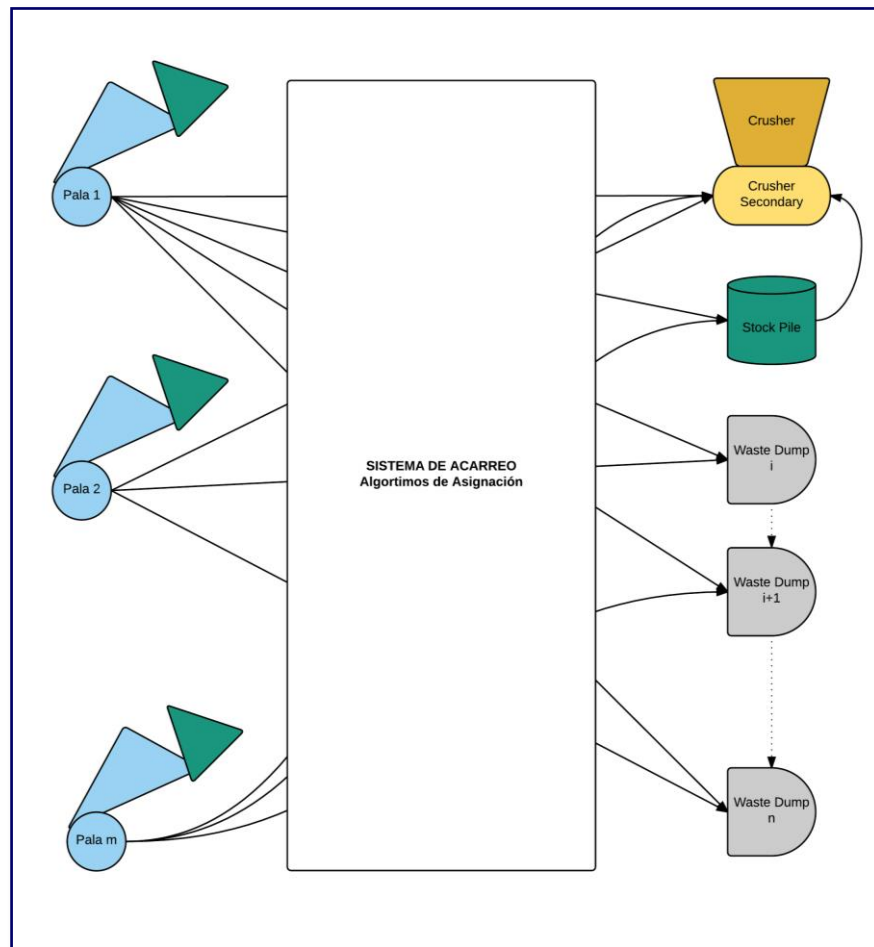
### **6.2.1 ELEMENTOS DEL SISTEMA**

Este sistema cuenta con tres fases de minado, cada una de las cuales cuenta a su vez con una pala. Para este caso se tienen una chancadora y un *stock* cerca de la chancadora para enviar mineral a esta cuando esté saturada o falle. Para el desmonte se consideran tres botaderos como se muestra en la FIGURA 11.

Algo importante en este sistema es que se ha creado zonas de mineral y desmonte en el minado de las palas, por lo que la alimentación de mineral a la chancadora dependerá del avance de la pala. Es un sistema complejo con fases de mineral y desmonte, no en proporción, sino que su minado está en función del tiempo, dado que tiene una ubicación geométrica con el propósito de hacer que el sistema sea más realista desde el punto de vista de la ubicación de los tipos de material. Lo tradicional del sistema simulado es que se considere que todos los materiales se minen en forma proporcional a su cantidad, pero ignorando su ubicación.

Como se explica en el capítulo 5, hay algoritmos de asignación dinámica ubicados en las intersecciones y salidas de botadero y chancadora con el objetivo de asignar

dinámicamente a los camiones y así maximizar la producción de la mina.



**FIGURA 11 : SISTEMA PALA-CAMIÓN**

**FUENTE:** Elaboración Propia

Este sistema tiene 3 Palas Komatsu 1200E, con una productividad promedio real de 2200 toneladas por hora. Los camiones para este sistema son los Cat 785C de 148 toneladas de capacidad. Los tiempos de acarreo promedios han sido calculados en base a las velocidades obtenidas de campo y velocidades máximas desarrolladas que se muestran en la TABLA 2.

**TABLA 2: VELOCIDAD DE ACARREO**

<b>Ruta Plano</b>	<b>Velocidad (Km/h)</b>
Camión Lleno	19.21
Camión Vacío	23.37
<b>Ruta Rampa -8%</b>	<b>Velocidad (Km/h)</b>
Camión Lleno	11.05
Camión Vacío	27.77
<b>Ruta Rampa +8%</b>	<b>Velocidad (Km/h)</b>
Camión Lleno	20.35
Camión Vacío	21.36

**FUENTE:** Elaboración Propia

Como resultado de aplicar estas velocidades a las rutas de acarreo, se obtienen los tiempos de acarreo nominales. Adicionalmente, los tiempos fijos del sistema Pala-Camión se muestran en la TABLA 3.

**TABLA 3: TIEMPOS FIJOS**

<b>Tiempos Fijos en Pala para Cat 785 C</b>		
<b>Palas</b>	<b>Carguío (min)</b>	<b>Cuadrado (min)</b>
Pala 1	2.59	0.96
Pala 2	2.59	0.96
Pala 3	2.72	0.96
<b>Tiempos Fijos Cat 785 C</b>		
<b>Destino</b>	<b>Descarga (min)</b>	<b>Cuadrado (min)</b>
Chancadora	1.83	1.27
Botadero	0.62	1.07

**FUENTE:** Elaboración Propia

En el ANEXO 2, se puede revisar el código fuente en Visual SIS que representa el plan de producción de este escenario. Los resultados de la simulación se muestran gráficamente en la siguiente sección.



## 6.2.2 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN Y DEMOSTRACIÓN DE HIPÓTESIS

En este caso se puede estimar la cantidad de camiones óptimo del sistema de producción de tres palas y cinco destinos (tres botaderos, un stock y una chancadora), con 36 camiones. Este resultado es el óptimo que asegura que el sistema obtenga la máxima producción total, pero no es necesariamente lo que el plan minero está requiriendo. Esto se debe a que el plan está sujeto a maximizar el NPV del negocio minero por lo cual cada fase no siempre se desarrolla como exige la optimización del *Match Factor*. Para esto, en el programa se tienen que asignar prioridades de minado de las fases para cumplir con el requerimiento del plan minero, que se puede implementar al cambiar la productividad de las palas en el programa GPSS.

Esta manipulación origina que la producción esperada de la simulación diste del óptimo si se libera el optimizador, por lo que, cuando se simule se debe buscar cumplir con la producción de las fases. La estimación de camiones y los parámetros como porcentaje de espera de las palas, porcentaje de cola de camiones y productividad de palas, puede ser diferente del óptimo del sistema productivo.

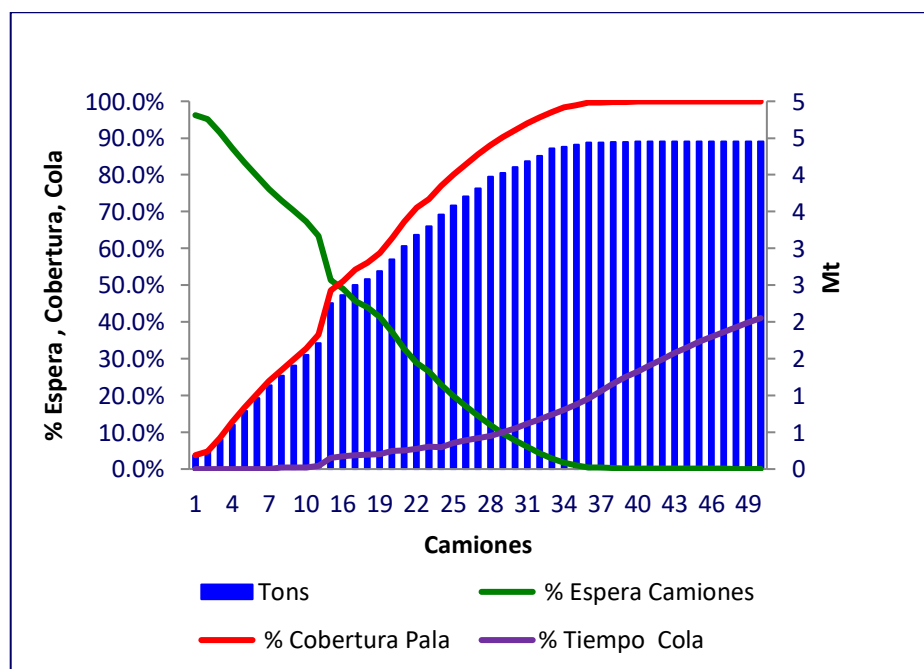
En general, un plan minero debería ser desarrollado con el objetivo de usar al máximo la productividad de las palas, pero en algunos casos los equipos cumplen funciones complementarias en el desarrollo de las fases de minado –como los cargadores frontales, que en ocasiones se usan parcialmente para el arranque de bancos, perfilado de taludes y limpieza de crestas. En estos casos, el equipo de carguío es subutilizado y tiene un alto porcentaje de espera.

Los resultados de este ejemplo demuestran que es posible estimar no solo la cantidad de camiones que un plan minero necesita, sino también muchos parámetros de control como el costo de minado del sistema productivo. Para este ejemplo, como

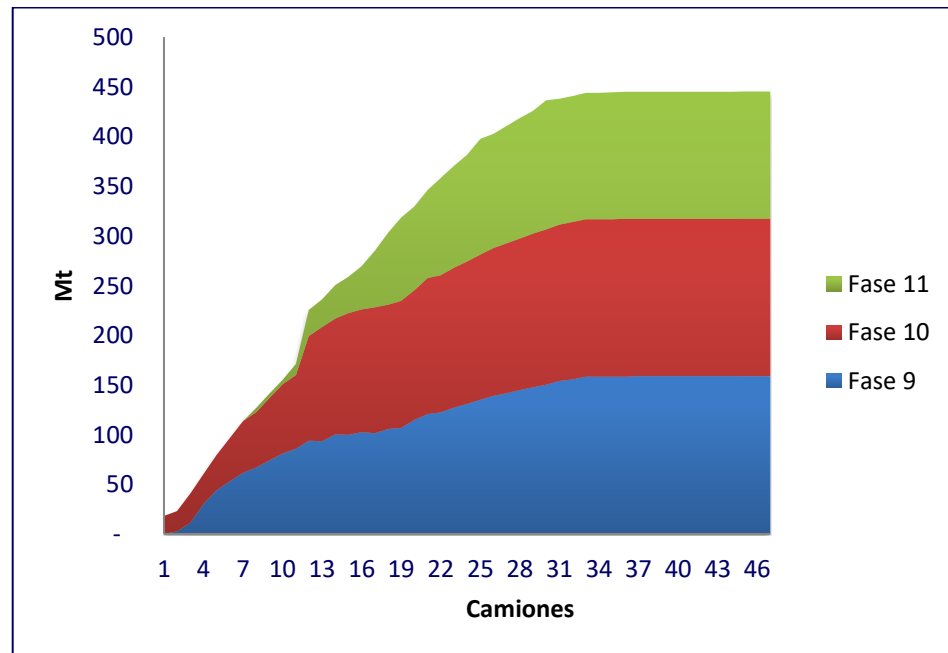
se visualiza en la FIGURA 15, el costo unitario de minado permanece constante o casi constante desde los 13 hasta los 36 camiones, y se incrementa ligeramente al pasar del óptimo. De la experiencia de simular múltiples escenarios, se ve que es un caso particular dado que con otra configuración de desmonte y mineral el costo unitario de minado puede variar significativamente.

En la FIGURA 16 y la FIGURA 17 se puede ver el comportamiento de la productividad de la mina y la chancadora con diferentes escenarios de camiones. También se puede ver la evolución de la productividad de las palas y las colas en cada pala, tal como se muestra en la FIGURA 18 , FIGURA 19 y FIGURA 20.

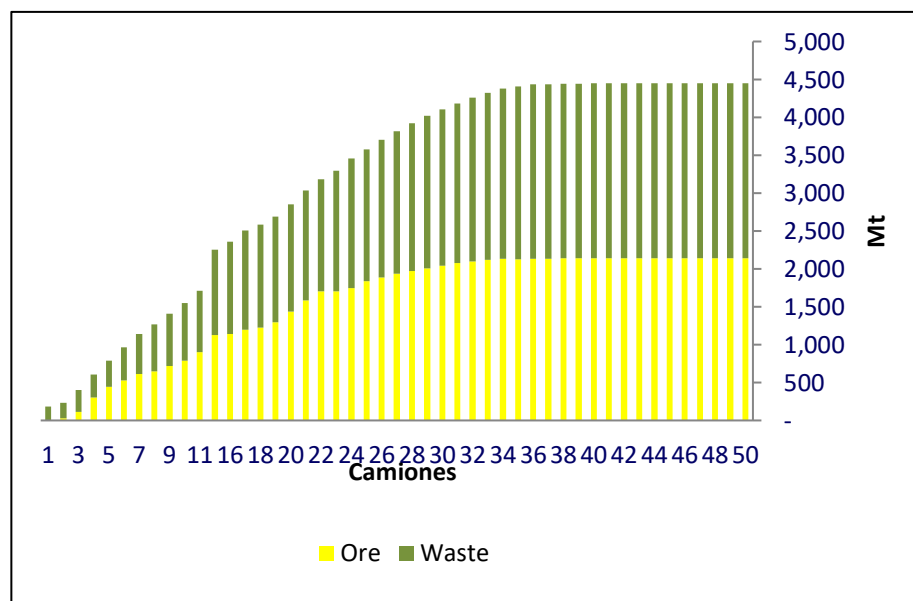
En conclusión, se puede tener un espectro del sistema productivo, tanto desde el punto de vista económico como el de producción, y tomar decisiones con respecto a la cantidad de camiones, cantidad de cola en las palas, esperas, productividad y costo de minado.



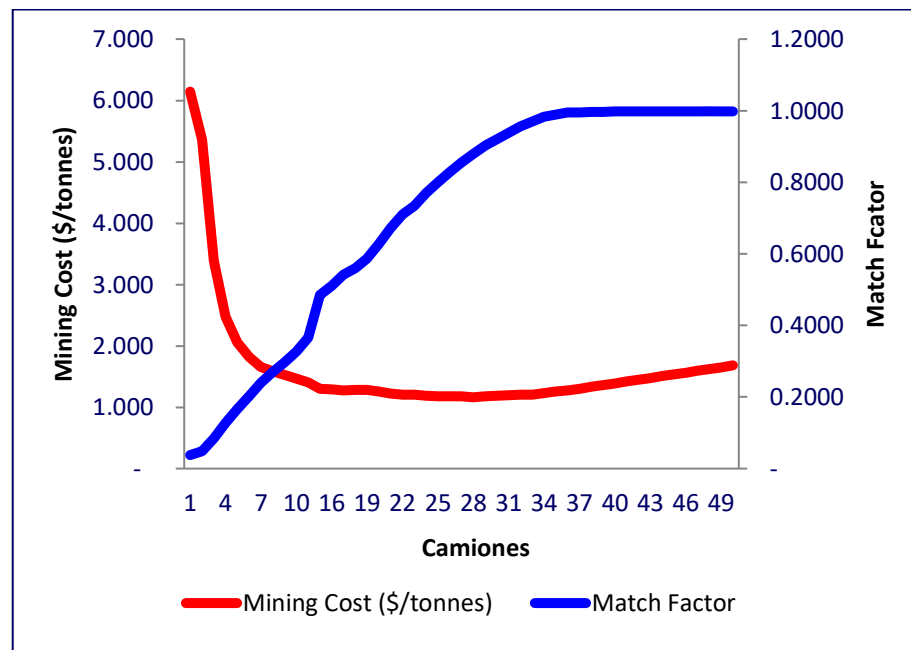
**FIGURA 12: PLAN DE MINADO Y SUS RELACIONES-SISTEMA COMPLEJO**  
**FUENTE:** Elaboración Propia



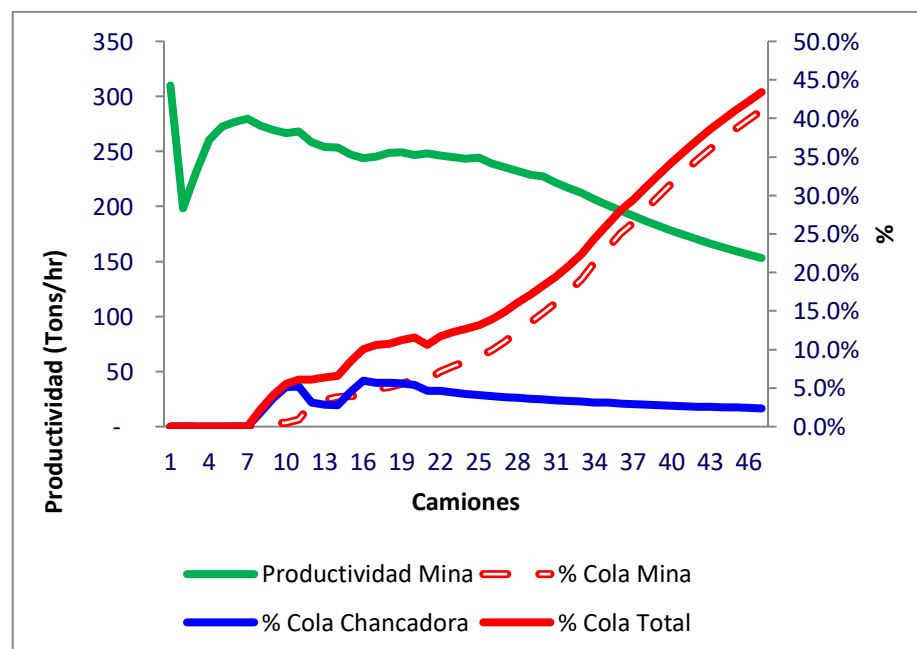
**FIGURA 13: PRODUCCIÓN POR FASE-SISTEMA COMPLEJO**  
**FUENTE:** Elaboración Propia



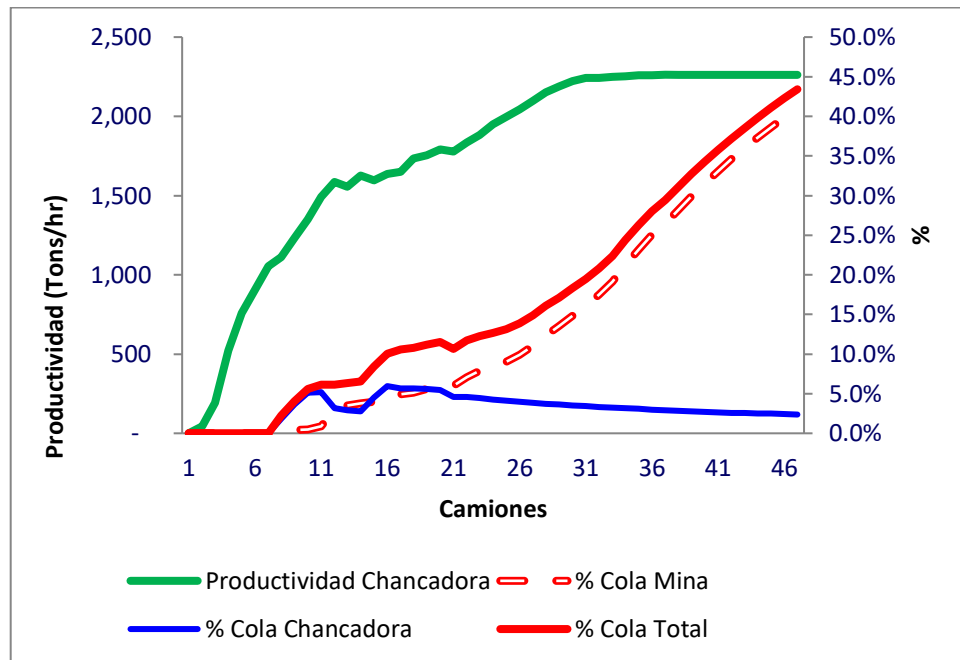
**FIGURA 14: PLAN DE MINADO -SISTEMA COMPLEJO**  
**FUENTE:** Elaboración Propia



**FIGURA 15: MATCH FACTOR VS MINING COST-SISTEMA COMPLEJO**  
**FUENTE:** Elaboración propia

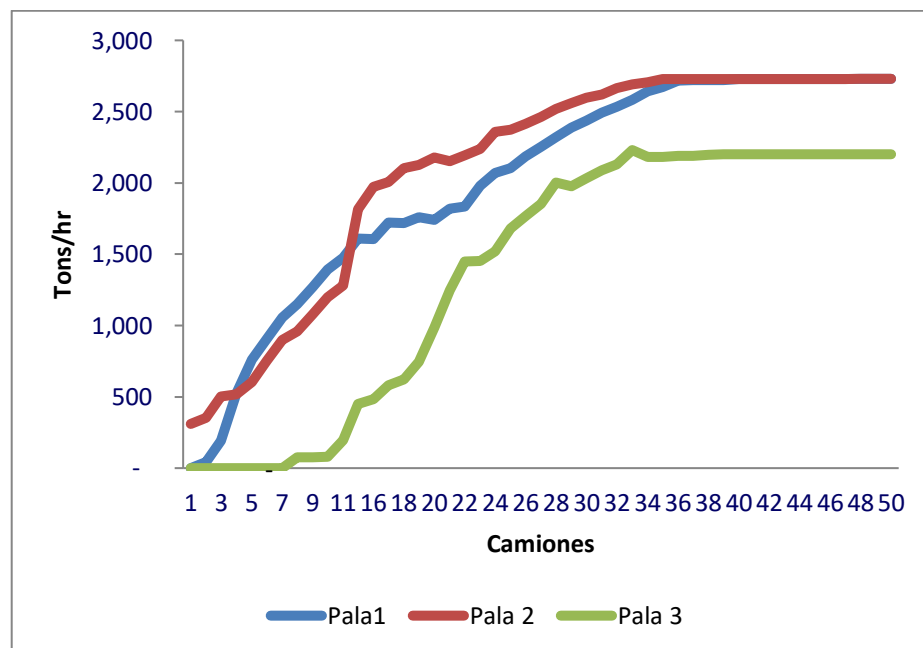


**FIGURA 16: PRODUCTIVIDAD DE MINA-SISTEMA COMPLEJO**  
**FUENTE:** Elaboración propia



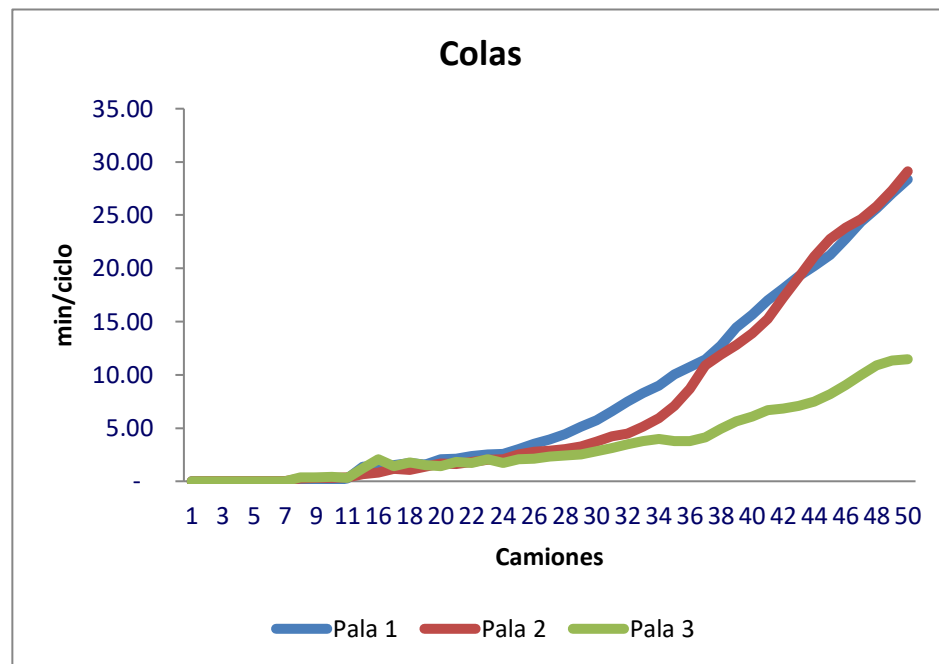
**FIGURA 17: PRODUCTIVIDAD DE CHANCADORA-SISTEMA COMPLEJO**

FUENTE: Elaboración propia



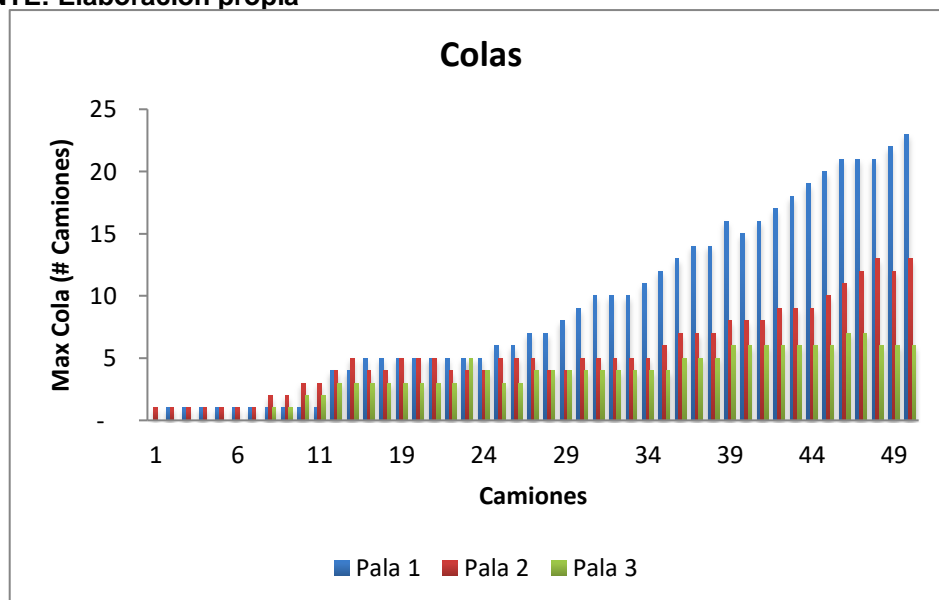
**FIGURA 18: PRODUCTIVIDAD DE PALAS-SISTEMA COMPLEJO**

FUENTE: Elaboración propia



**FIGURA 19: COLAS EN LAS PALAS-SISTEMA COMPLEJO**

**FUENTE:** Elaboración propia



**FIGURA 20: NÚMERO DE CAMIONES EN COLA--SISTEMA COMPLEJO**

**FUENTE:** Elaboración propia

En todos los escenarios de simulación siempre se estima la cantidad de camiones requerida, pero usualmente se olvida el porcentaje de cola asociado. Como se demostró en el capítulo 4, la ecuación 42 muestra la relación entre la cantidad óptima de camiones y el porcentaje de cola. Dicha función es la que se muestra a

continuación, donde se cumple que la cantidad óptima de camiones  $n_0$  es igual a  $\frac{m\bar{t}\bar{x}-q}{(1-Q_{n_0})(tc_l+ts_i)}$ . Este resultado muestra que se puede llegar al óptimo pero sujeto a un nivel de cola asociado.

Volviendo al ejemplo de la simulación, se puede ver en la FIGURA 19 que, para 36 camiones, que es el óptimo, la pala 1 está soportando en ocasiones un máximo de 10 camiones en cola. Las preguntas que surgen en este punto son: ¿será factible operar con 36 camiones? ¿Qué riesgos asociados a esta cantidad de camiones se esconden ‘tras bambalinas’? ¿Existirá una capacidad máxima asociada al sistema productivo que acote esta cantidad de camiones?

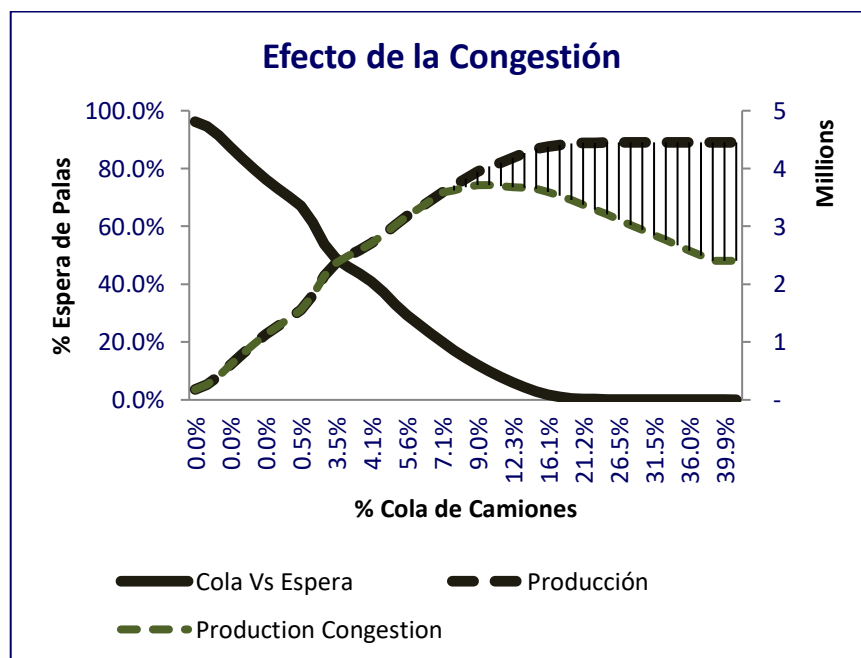
Estos cuestionamientos no son tema de esta tesis, pero se darán las pautas para futuras investigaciones, que se han desarrollado pero que no serán expuestas para no salir de la línea de investigación de este documento. Con todo lo desarrollado hasta ahora, se tiene cubierto todos los objetivos planteados que responden a la necesidad de estimar la óptima cantidad de camiones que necesita un sistema productivo para cumplir con sus objetivos.

### 6.3 ANÁLISIS DE CONGESTIÓN

Al analizar a detalle la ecuación 42 del capítulo 4, se repara en que la cantidad de camiones está sujeta a niveles de cola asociados. Esto quiere decir, que el sistema tiene una variable denominada *geometría del sistema de acarreo*. La geometría de las intersecciones, de las fases donde trabajan las palas, van a condicionar la capacidad de acarreo. Como consecuencia, existe la posibilidad de que, al aumentar la cantidad de camiones en un sistema productivo, este colapse, pues no soporta esa cantidad de camiones. Esto se verá reflejado en colas que están en las intersecciones, palas, botaderos, etc. El impacto de estos efectos se reflejará en la

necesidad de comprar más camiones para suplir dichas pérdidas, aunque esto no resolverá el problema dado que, más camiones se traduce en una mayor cola, como lo demuestra la ecuación 42. Entonces, lo planteado es medir la capacidad de los elementos que conforman el sistema de acarreo. Se llamará *elementos del sistema de acarreo* a las rampas de acarreo y las intersecciones.

Haciendo uso de las investigaciones de la Ingeniería de Transito, se determinará la capacidad de los elementos (rampas, intersecciones) y el grado de congestión asociado. De lo anterior, bajo un mismo escenario de cantidad de camiones, el sistema productivo debe experimentar una reducción de producción como se muestra en la FIGURA 21.



**FIGURA 21: EFECTO DE LA CONGESTIÓN: MENOS PRODUCCIÓN.**  
**FUENTE:** Elaboración propia

En el siguiente apartado se mostrarán los fundamentos y demostraciones propuestas por el autor y que servirán de base para construir un modelo de simulación que mida la capacidad de los elementos de tránsito.



### 6.3.1 ANÁLISIS MATEMÁTICO

Para entender la congestión, se analizará desde el punto de vista del flujo de camiones que transitan por un elemento del sistema de acarreo. Para ello, se definen las siguientes variables:

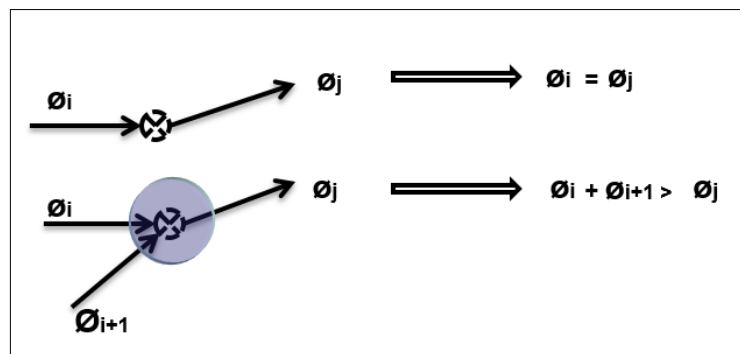
- $\phi_i$  = flujo de camiones que ha lanzado al sistema el servidor **i (Pala i)**
- $\phi r_{i'}$  = flujo de camiones de retorno que ha lanzado al sistema el servidor (botadero o chancadora)
- $h_i$  = tiempo operativo de la pala o servidor **i**
- $tc_i$  = tiempo de carguío de la pala **i**
- $td_i$  = tiempo de descarga en el destino **i**
- $tsp d_i$  = tiempo de cuadrado del camión en el destino **i**
- $tsp_i$  = tiempo de cuadrado del camión en la pala **i**
- $te_i$  = tiempo de espera de la pala **i**
- $R_{j,j+1}$  = Rampa de acarreo de la intersección **j** a la intersección **j+1**.
- $dR_j$  = Distancia de la rampa  $R_{j,j+1}$
- $g$  = geometría de intersección o rampa
- $p$  = políticas de tránsito y mantenimiento de vías

Con estas variables, la mejor forma de analizar la congestión en un sistema minero, desde el punto de vista de flujo infinito o desde el punto de vista de flujo finito. Existen dos maneras de analizar, como ya se mencionó, pero se explicará a detalle para comprender desde los cimientos cómo se comporta un sistema minero y la relación que existe entre el flujo, los elementos y los servidores. Con ello, se sentarán los fundamentos para construir un modelo de simulación en VISSIM y, con los

fundamentos matemáticos claros, poder responder: ¿cuál es la capacidad de los elementos?

### 6.3.2 ANÁLISIS DE FLUJO INFINITO

Cuando se habla de flujo infinito, se simula un sistema con una cantidad infinita de camiones, con colas en las intersecciones y en las rampas, tal que ningún camión más pueda pasar. En ese punto se rescatarán los datos, se analizarán y, finalmente, se concluirá acerca de la capacidad del sistema.



**FIGURA 22: FLUJO INFINITO-INTERSECCIÓN**

**FUENTE:** Elaboración Propia

Este método necesita conocer la tasa de llegada de los camiones o, en su defecto, el flujo de camiones; si se coloca un flujo aleatorio, no se podría representar adecuadamente las condiciones de la mina. Como se muestra en la Figura 22, el flujo de llegada a un elemento que no tiene intersección es igual al flujo de salida; pero, si llegan dos o más flujos a una intersección, el flujo de salida va a ser menor que la suma de flujos de llegada, debido a la interacción en la intersección. Entonces, el flujo de salida es una función de los flujos de llegada y de las políticas que existen en la intersección, como se puede ver en la Figura 22.

También se puede definir que una intersección se comporta como un servidor que recibe flujo de diferentes fuentes y transforma este flujo en uno de salida, que es

menor o igual a la suma de flujos ingresantes y, en este proceso, transforma tiempo productivo en colas de camiones.



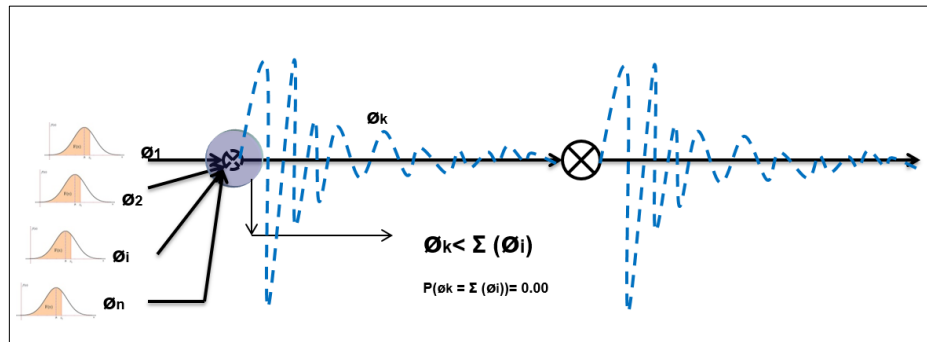
**FIGURA 23: FLUJO INFINITO- INTERSECCIÓN EN LA MINA**

**FUENTE:** Elaboración Propia

De lo anterior, hemos visto que las intersecciones son transformadores de flujo, pero para poder realizarlo necesitan que la fuente primaria que les brinda el flujo represente a un sistema minero, para que los resultados sean convincentes. Es por lo que el análisis de flujo infinito necesita de servidores primarios como palas, botaderos y chancadoras.

Por otro lado, el análisis de flujo infinito brinda información acerca del comportamiento de una intersección y, como se muestra en la FIGURA 24, también muestra lo que pasa en las rampas. Cuando la intersección entrega flujo al sistema de rampas, pasa el control del flujo de productividad a las rampas y, por ende, sus propiedades determinarán si este flujo se preserva o se pierde.

Analizando la FIGURA 24 se puede notar que, si las intersecciones están muy cerca y el flujo de la rampa es alto, es posible que el sistema se sature y colapse y el flujo original empiece a perder productividad y termine convirtiéndose en cola. Dado esto, se puede identificar que otra variable importante en el análisis de la congestión es la distancia entre las intersecciones.



**FIGURA 24: FLUJO INFINITO- RAMPA**

**FUENTE:** Elaboración Propia

Finalmente, se puede concluir en este apartado que la capacidad de los elementos depende de:

- Flujos de entrada
- Geometría de la intersección y políticas de tránsito
- Geometría de la rampa
- Políticas de construcción y mantenimiento de las vías

Con todo esto conceptualizado, se abordará el análisis de flujo finito.

### 6.3.3 ANÁLISIS DE FLUJO FINITO

El análisis de flujo finito se sustenta en el comportamiento de los servidores primarios, es decir las palas y los destinos. Por ende, el sistema es un circuito cerrado donde los camiones interactúan con todos los servidores y el sistema de acarreo.

De los capítulos anteriores se sabe que el flujo del servidor  $i$  (pala) es finito y depende del nivel de espera del sistema. Entonces, se tiene lo siguiente:

$$\theta_i = \frac{h_i}{(tc_i + tsp_i + te_i)} \quad (51)$$

El  $tc_i$  y el  $tsp_i$  dependen de la pala y del camión y no del flujo del sistema. El  $te_i$  depende de factores externos a la pala, como el flujo de retorno  $\theta r_i$ . Entonces, imaginando que se cuenta con suficientes camiones en el sistema para llegar al límite técnico de la pala, la espera se hace nula. Entonces, se tiene lo siguiente:

$$\theta_i = \frac{h_i}{(tc_i + tsp_i)} \quad (52)$$

A medida que el sistema se regularice (empiece a tener demoras), el flujo de salida se va comportando como la ecuación 51, de donde podemos inferir que el tiempo de espera de la pala es una función del flujo de retorno a la pala. Entonces, se tiene que:

$$te_i = f_{\theta r_i} \quad (53)$$

Reemplazado en la ecuación 51:

$$\theta_i = \frac{h_i}{(tc_i + tsp_i + f_{\theta r_i})} \quad (54)$$

Si se analiza el servidor de llegada, es decir un botadero o una chancadora, se tiene lo siguiente:

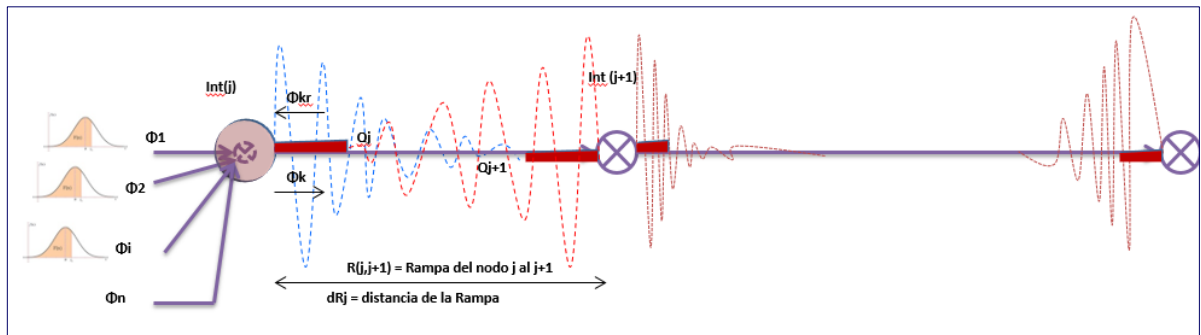
$$\theta r_i = \frac{h_i}{(td_i + tspd_i + f_{\theta_i})} \quad (55)$$

Es decir, se verifica que:  $\theta_i \xleftrightarrow{f} \theta r_i$ , el flujo de ingreso y de salida están correlacionados y se transforman constantemente, generando producción y productividad en la mina, pero también colas y esperas; por ende, para hacer un análisis de congestión, es necesario utilizar el sistema completo en circuito cerrado para entender el comportamiento global del sistema.

Con estos conceptos analizados, ahora se abordará el análisis de la capacidad de los elementos de tráfico, como son las intersecciones y las rampas.

### 6.3.4 ANÁLISIS DE CAPACIDAD

En este apartado se definirán las ecuaciones que gobiernan la capacidad de los elementos de tránsito. Para ello, se puede observar la FIGURA 25:



**FIGURA 25: INTERACCIÓN DE FLUJOS DE IDA Y DE VUELTA**

**FUENTE:** Elaboración Propia

La capacidad de los elementos depende no solo del flujo si no de las geometrías asociadas. En ese sentido, si la distancia  $dR_j$  de la rampa  $R_{j,j+1}$  es lo suficientemente larga y los  $\theta_i$  son pequeños, la capacidad de la rampa no tiene dependencia del flujo  $\theta_i$  y el flujo  $\theta r_i$ ; pero, si la distancia es pequeña y el flujo  $\theta_i$  se incrementa, entonces la capacidad se verá influenciada por la variable distancia. Según esto, se tiene lo siguiente:

$$CR_{j,j+1} = f_{\theta_i, \theta r_i, dR_j, g, p} \quad (56)$$

La capacidad de la rampa del nodo **j** al **j+1** es una función de los flujos de entrada, flujo de retorno y la distancia entre nodos o intersecciones la geometría de la rampa y las políticas de mantenimiento de vías. También se tiene que la capacidad de una intersección responde a la siguiente ecuación:

$$CInt_j = f_{\theta_i, \theta r_i, g, p} \quad (57)$$

Es decir, la capacidad de una intersección está en función de los flujos de entrada, flujos de retorno, la geometría de la intersección y las políticas de tránsito.

Las intersecciones y las rampas funcionan como servidores de entrada y salida de flujo. Si generalizamos, se tendrán las siguientes ecuaciones:

$$CInt_j = f_{\theta_{CInt_{j-1}}, \theta r_{CInt_{j+1}}, g, p} \quad (58)$$

$$CR_{j,j+1} = f_{\theta_{CInt_{j-1}}, \theta r_{CInt_{j+1}}, dR_j, g, p} \quad (59)$$

Con esto se concluye que las capacidades de una rampa y de una intersección asociada a esa rampa son dependientes, por lo que su análisis tiene que realizarse al mismo tiempo y que los resultados estén interrelacionados.

La importancia de las ecuaciones 58 y 59 radican en que, con base en esta definición, se puede construir un modelo de bloques en GPSS que representen las

intersecciones y las rampas. Para el caso de esta tesis, se ha usado el *software* de simulación VISSIM adaptado por el autor para la minería.

En el siguiente apartado se mostrarán los resultados de un modelo implementado en VISSIM.

### **6.3.5 SIMULACIÓN EN VISSIM**

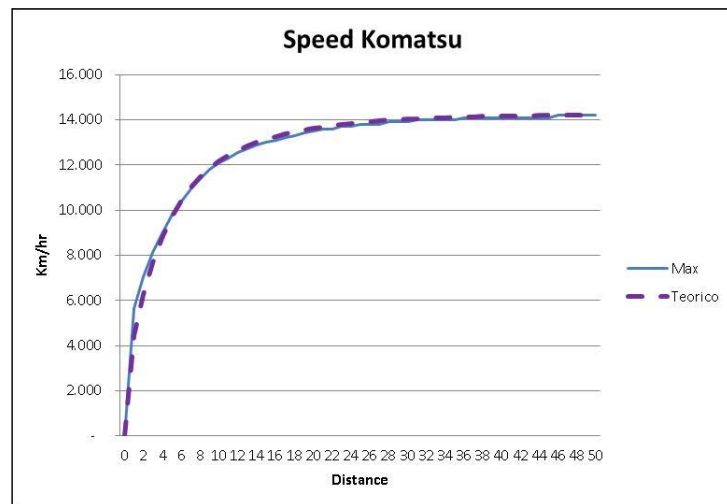
Para poder determinar la capacidad de los elementos del sistema, se hará uso de la Micro Simulación, dado que es imperante representar el comportamiento de los camiones en una intersección. Se puede señalar que, usando la teoría y los métodos de simulación desarrollados y propuestos en esta tesis, se determinó la capacidad de los elementos de Antamina. Para este estudio, se usó el *software* de Micro Simulación VISSIM, adaptándolo a la realidad de una operación minera.

Los resultados de este estudio mostraron que la capacidad de las intersecciones era de 98 millones de toneladas al año con un grado de congestión de 0.86. Este nos aseguraba que, como máximo, tendríamos 3 camiones en cola en las intersecciones. Con este resultado, el siguiente paso es diseñar nuevas intersecciones que superen la capacidad del sistema actual.

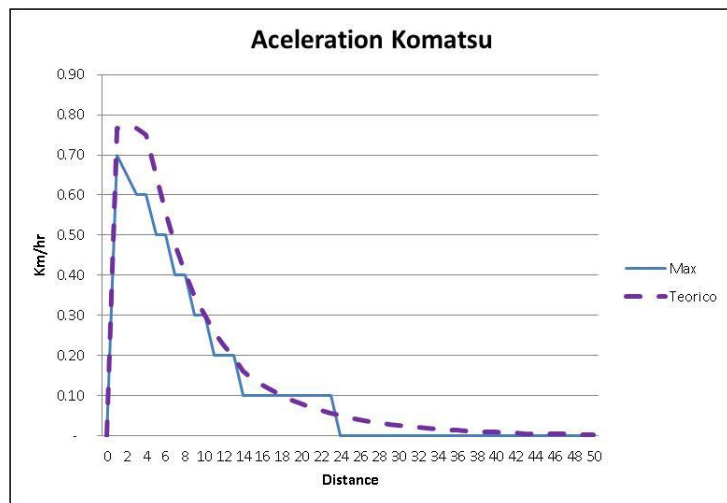
Dado que la producción máxima que desarrolla una pala PH 4100 es de 33 millones de toneladas al año, significa que las fases y accesos que se han construido soportan un máximo de tres palas. Esto implica que los sistemas productivos con fases con tres palas están al máximo de su capacidad con un grado de congestión de 0.86, al límite.

Por temas de propiedad no se mostrará la implementación total del VISSIM a un sistema minero, pero si se pueden mostrar algunos resultados del modelo.

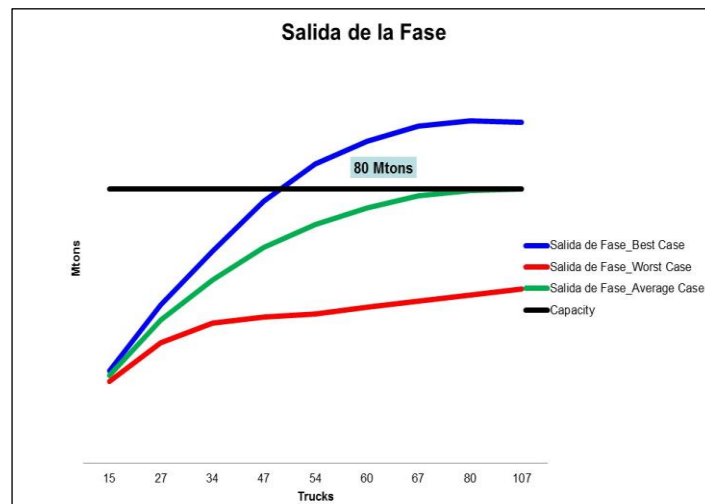




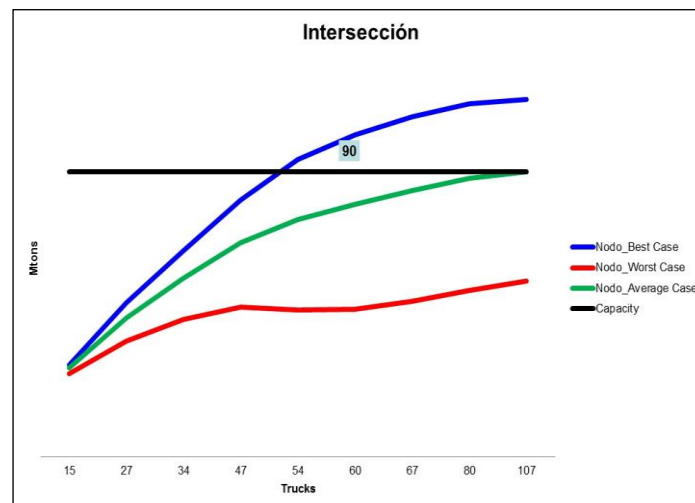
**FIGURA 26: CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE VELOCIDADES**  
**FUENTE:** Elaboración Propia



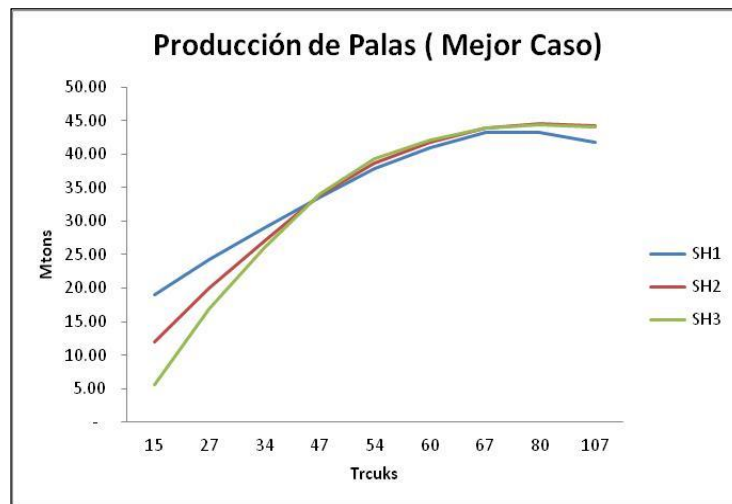
**FIGURA 27 : CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA ACELERACIÓN**  
**FUENTE:** Elaboración Propia



**FIGURA 28: ANÁLISIS DE CAPACIDAD DE SALIDA DE FASE**  
**FUENTE:** Elaboración Propia

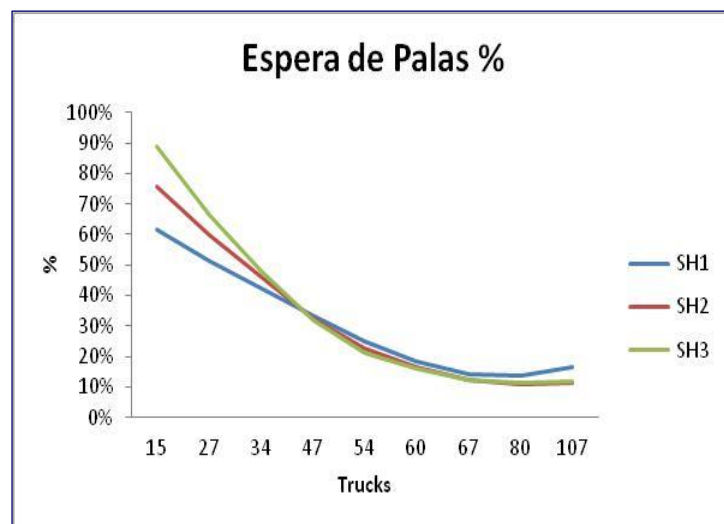


**FIGURA 29: ANÁLISIS DE CAPACIDAD DE INTERSECCIÓN**  
**FUENTE:** Elaboración Propia



**FIGURA 30: ANÁLISIS DE PRODUCTIVIDAD DE PALAS**

FUENTE: Elaboración Propia



**FIGURA 31: ANÁLISIS DE ESPERA DE PALAS**

FUENTE: Elaboración Propia

## CAPÍTULO VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

### 7.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los experimentos deben buscar, ante todo, validez interna, es decir confianza en los resultados por lo que se debe eliminar las fuentes que alteren la validez de los resultados. Asimismo, es deseable que el experimento posea validez externa, es decir sea generalizable a otras muestras y/o poblaciones.

#### 7.1.1 ANÁLISIS DE VALIDEZ INTERNA

En el capítulo 4 se demostró matemáticamente que la productividad de un sistema productivo estaba en función de la cantidad de palas, cantidad de camiones y de los tiempos de acarreo, carguío y descarga como se muestra en la siguiente ecuación.

$$MF_{nm} = \frac{n(tc_i + ts_i)}{m\bar{tx}_q} = \left( \frac{(1 - E_m)}{(1 - Q_n)} \right) \left( \frac{\bar{tx}_{-q}}{\bar{tx}_q} \right) = 1 - E_{mn}$$

Así mismo, se demostró que la productividad de un sistema es inversamente proporcional a la espera del sistema ( $E_{mn}$ ). En el sistema de ecuaciones el número

de palas y el sistema de acarreo son variables fijas por lo que la única variable independiente es el número de camiones y sus respectivas características como velocidad y capacidad de carga.

La variable independiente es responsable del comportamiento del sistema y no existe influencia de otra variable que condicione los resultados. Esto visto desde el punto de vista matemático, pero por otro lado si analizamos los modelos de simulación desarrollados en el capítulo 6 podemos ver que los resultados de la simulación son consistentes con las ecuaciones desarrolladas en el capítulo 4; por ejemplo los resultados de la simulación para un sistema de 1 pala y 1 destino que se muestran en la TABLA 4, nos indica que el Match Factor para 6 camiones es de 77% y los resultados de la simulación coinciden con la aplicación de las fórmulas matemáticas. Los mismos resultados lo podemos verificar cuando analizamos un sistema de múltiples palas y múltiples destinos, que se muestran en el anexo 5 donde para diferentes cantidades de camiones el *Match Factor* es el mismo tanto el valor entregado por la simulación como el entregado por el modelo matemático. Estos resultados confirman que tanto los modelos de simulación como los modelos matemáticos responde únicamente a la variación de variable independiente.

TABLA 4: RESULTADOS DE UN SISTEMA 1 PALA Y 1 DESTINO

Simulación de Sistemas Mineros: Caso Base										
# de Corrida	#	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Camiones	Unidades	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Toneladas a Chancadora	Tonelada	786,768	1,049,024	1,311,132	1,573,240	1,835,348	2,038,848	2038848	2038848	2038848
Tonelada por Pala	Tonelada	786,916	1,049,172	1,311,428	1,573,684	1,835,940	2,039,588	2039736	2039736	2039736
Incremental Tonelaje			262,256	262,256	262,256	262,256	203,648	148	-	-
Disponibilidad	%	91%	91%	91%	91%	91%	91%	91%	91%	91%
Utilización	%	87%	87%	87%	87%	87%	87%	87%	87%	87%
Horas operativas	Horas	595	595	595	595	595	595	595	595	595
Ciclos	Unid	5,317	7,989	8,861	10,633	12,405	13,781	13,782	13,783	13,783
Utilización Pala	%	39%	51%	64%	77%	90%	100%	100%	100%	100%
Utilización Chancadora	%	32%	43%	54%	65%	75%	84%	84%	84%	84%
Tiempo de Cola camiones	seg/ciclo	0.09	0.132	0.175	0.219	0.263	35.096	190.482	345.857	501.21
Tiempo de espera Palas	min/ciclo	4.12	1.88	1.44	0.77	0.29	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00
Tiempo de carguío +Cuadrado	seg/ciclo	155.4	155.4	155.4	155.4	155.4	155.4	155.4	155.4	155.4
Tiempo de descarga + Cuadrado	seg/ciclo	130	130	130	130	130	130	130	130	130
Tiempo acarreo vacío	seg/ciclo	263	263	263	263	263	263	263	263	263
Tiempo acarreo lleno	seg/ciclo	660	660	660	660	660	660	660	660	660
Ciclo de acarreo incluido colas	min/ciclo	20.14	20.14	20.14	20.14	20.14	20.72	23.31	25.90	28.49
Ciclo de carguío	min/ciclo	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59
% Espera Pala	%	61%	42%	36%	23%	10%	0%	0%	0%	0%
% Cobertura Pala	%	39%	58%	64%	77%	90%	100%	100%	100%	100%
% Cola de Volquetes	%	0.01%	0.01%	0.01%	0.02%	0.02%	2.82%	13.62%	22.26%	29.33%
Match Factor= $n \cdot (tc + ts) / m \cdot tq$	%	39%	51%	64%	77%	90%	100%	100%	100%	100%
Match = $(1 - \%E) \cdot t(-q) / ((1 - \%Q) \cdot tq)$	%	39%	58%	64%	77%	90%	100%	100%	100%	100%
Match Factor= 1-%E	%	39%	58%	64%	77%	90%	100%	100%	100%	100%
Productividad Pala	Ton/Hr	1,323	1,764	2,205	2,645	3,086	3,429	3,429	3,429	3,429
Productividad Mina	Ton/Hr	441	441	440.91	441	441	429	381	343	312
Costo Acarreo	\$/hr	224	224	224	224	224	224	224	224	224
Costo Carguío	\$/hr	560	560	560	560	560	560	560	560	560
Costo Acarreo	\$/tn	0.508	0.508	0.508	0.508	0.508	0.523	0.588	0.653	0.719
Costo Carguío	\$/tn	0.42	0.32	0.25	0.21	0.18	0.16	0.16	0.16	0.16
Costo Total Unitario	\$/tn	0.93	0.83	0.76	0.72	0.69	0.69	0.75	0.82	0.88

### 7.1.2 ANÁLISIS DE VALIDEZ EXTERNA

Para probar que las ecuaciones son aplicables para sistemas simples como complejos en el capítulo 6 se desarrolló dos modelos de simulación:

- A) El primer modelo es un sistema productivo de una sola pala y un solo destino, el cual representa el caso más básico.
- B) El segundo modelo es un sistema productivo de múltiples palas y múltiples destinos, el cual representa el caso general.

En estricto rigor el segundo modelo es la implementación de varios sistemas básicos interactuando en un gran sistema productivo. Para demostrar que las ecuaciones desarrolladas son válidas tanto como para la muestra como para la población, consideraremos que un sistema básico representa la muestra, mientras que un sistema de múltiples palas y múltiples destinos representa la población de posibles sistemas productivos.

Los resultados de ambas simulaciones como se muestran en la TABLA 4 y en el anexo 5 nos demuestran que las ecuaciones demostradas en el capítulo 4 son aplicables independiente del tamaño del modelo productivo. Estos resultados confirman que tanto los modelos de simulación como los modelos matemáticos son aplicables tanto a muestras de poblaciones como a poblaciones por lo que su aplicación es generalizada a cualquier modelo de sistema productivo. Pero para que esta condición de generalización no se pierda debemos considerar los siguientes aspectos:

- A) Un modelo de simulación básico dado que solo tiene un solo destino de descarga de material siempre cumple con el principio de optimalidad de *Match Factor* y esto se debe a que los camiones luego de descargar en los botaderos y/o

chancadoras solo tienen un destino de carguío por lo que la solución es simple y universal.

**B)** Un modelo de simulación de múltiples palas y múltiples destinos no siempre cumple el principio de optimalidad de *Match Factor*. Para que cumpla el principio de optimalidad de *Match Factor* y se verifiquen las hipótesis planteadas se debe cumplir con los siguientes requisitos:

**a)** El Sistema productivo debe tener un algoritmo de asignación dinámica implementado de tal manera que los camiones luego de descargar en los botaderos y/o chancadoras sepan en tiempo real de la simulación a que pala dirigirse y de esta manera maximizar su productividad. Este algoritmo de asignación de camiones es una variante del *Match Factor*, pero aplicado en el modelo de simulación. Si el modelo de simulación no posee dicho algoritmo y solo posee probabilidad de ocurrencia no podremos encontrar la productividad máxima ni tampoco se podrán validar las ecuaciones desarrolladas y las hipótesis planteadas. En la vida real las minas poseen sistemas de despacho que maximizan la productividad del sistema y las minas que no tiene este sistema, tienen pocas probabilidades de alcanzar la excelencia operacional dado que no tiene como gestionar sus recursos operativos.

**b)** El Sistema productivo debe tener un algoritmo que permite cumplir con el plan de producción requerido haciendo un balance entre la productividad y cumplir con los requerimientos de alimentación de la planta. En la vida real los sistemas de despacho aplican porcentajes de utilización a las palas para de esta manera cumplir con los requerimientos del plan de producción



### 7.1.3 CONTRASTACIÓN DE LAS HIPÓTESIS

Nos planteamos demostrar que el comportamiento productivo de un sistema minero y su valor económico intrínseco se determina con la aplicación de un modelo de simulación estocástico y con la incorporación del “*Match Factor*” como algoritmo de optimización en la asignación de camiones. En ese sentido hemos podido formular y demostrar matemáticamente que el *Match Factor* se rige por la ecuación siguiente;

$$MF_{nm} = \frac{n(tc_i + ts_i)}{m\bar{t}x_q} = \left( \frac{(1 - E_m)}{(1 - Q_n)} \right) \left( \frac{\bar{t}x_{-q}}{\bar{t}x_q} \right) = 1 - E_m$$

Para poner en evidencia la validez de las ecuaciones desarrolladas, en el capítulo 6 se desarrolló dos modelos de simulación de sistemas productivos, que representan la operación de una mina a tajo abierto. Estos modelos de simulación fueron puestos a prueba haciendo variar la cantidad de camiones que pueden operar en la mina. Los resultados de esta simulación validaron las formulaciones e hipótesis planteadas. Entre los principales parámetros que se pudieron validar se encuentran:

- La formulación del *Math Factor* (MF). El modelo de simulación nos permitió validar las ecuaciones y demostrar que el:
  - A) MF máximo siempre será 1.
  - B) MF menor implica que el sistema es improductivo.
  - C) MF igual a 1 implica que el sistema ha encontrado su máxima productividad.
  - D) MF mayor a 1 no es posible. Se demostró que en sistemas con MF >1 la energía productiva se transforma en colas en las palas e intersecciones.
  - E) El número de camiones óptimos ocurre cuando el costo de minado es el mínimo y el Match Factor es igual a 1.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La simulación estocástica unida a la optimización de procesos nos brinda la posibilidad de conocer el comportamiento económico y productivo de un sistema minero. Como consecuencia, se puede determinar la flota óptima que máxima la producción de una mina. De esta manera se ha demostrado que el *Match Factor* se rige por la ecuación siguiente;

$$MF_{nm} = \frac{n(tc_i + ts_i)}{m\bar{tx}_q} = \left( \frac{(1 - E_m)}{(1 - Q_n)} \right) \left( \frac{\bar{tx}_{-q}}{\bar{tx}_q} \right) = 1 - E_m$$

Esta ecuación muestra que en un sistema productivo existe una relación entre las colas y las esperas y que el *Match Factor* en un sistema real jamás será mayor que la unidad, dado que la cola absorberá dichos camiones extra incrementándose el ciclo de acarreo. En ese punto el sistema ha alcanzado su máxima capacidad productiva, y dado que las palas limitan el sistema en términos de producción, el *Match Factor* máximo será igual a 1. En consecuencia, la cantidad optima de camiones está dada por la siguiente ecuación:

$$n_0 = \frac{m\bar{tx}_{-q}}{(1 - Q_{n_0})(tc_i + ts_i)}$$

Y, esto ocurre cuando el costo unitario de minado es el mínimo y es igual a:

$$umc_{n_0} = \frac{\sum_{i=1}^m Ch_i H_i + \sum_{j=1}^{n_0} Ch_j H_j + GA_{mn_0}}{\frac{fc}{tc_i + ts_i} \sum_{i=1}^m H_i}$$

Finalmente, el *Match Factor* nos brindan la posibilidad de explorar un plan de producción desde un punto de vista global, integrando la gestión operacional y el análisis económico. Los modelos de simulación con modelación integrada del *Match Factor* nos brindan la capacidad de comprender las zonas con mayores riesgos operacionales y con mayores costes de operación que a simple vista sería imposible de determinar.

## CONCLUSIONES

1. La cantidad optima de camiones que una mina necesita se determina cuando el *Match Factor* es igual a la unidad. Asimismo, cuando el *Match Factor* es igual a la unidad; la mina alcanza su máxima productividad y el costo de minado es el mínimo posible.
2. El *Match Factor* como algoritmo de optimización maximiza la productividad de la mina. Para maximizar la productividad de la mina el *Match Factor* determina el mejor destino para un camión con el objetivo de incrementar el *Match Factor* global de la mina y de esta manera reduce el costo de minado al mínimo y maximiza la productividad.
3. La estimación de las demoras en las intersecciones solo es posible estimar si contamos con un modelo de simulación y que su efecto en la estimación de camiones de un plan de producción es relevante y tiene un impacto significativo en el riesgo operacional.
4. Los resultados de la simulación de los sistemas mineros son compatibles al 100% con la estimación realizada con las ecuaciones matemáticas planteadas.

## **RECOMENDACIONES**

Las recomendaciones que se deben tener en cuenta para construir un modelo de simulación minero deben considerar las siguientes:

1. Construir un modelo propio de simulación y optimización para cada mina es indispensable, dado que cada mina tiene una realidad distinta y los resultados no son válidos para todas las minas.
2. Calibrar y validar los modelos de simulación en términos de velocidades de acarreo, tiempos de carguío, tiempos de cuadrado, etc. para que representen la realidad operacional.
3. Estimar la capacidad de los elementos de acarreo, mediante un estudio de congestión, para tener los parámetros operacionales (Kpis) necesarios que permitan desarrollar un plan de producción acorde a la realidad operativa.
4. Simular los planes de producción que las minas proponen para validar el cumplimiento de estos y determinar sus riesgos asociados.

## BIBLIOGRAFIA

- Burt, C. (2008).** An Optimisation Approach to Material Handling in Surface Mining. Australia, Australia: Curtins University of Technology.
- Gamarra, R. (2015).** Modelo probabilístico del transporte de mineral en el tajo Ananá en la unidad minera Anabi S.A.C. Lima, Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería (UNI).
- Garrido, & Mileta. (2005).** *Manual de Visual SIS- Universidad de Fasta Mar del Plata Argentina.* Mar del Plata- Argentina.
- Hernández Sampieri, R. (2014).** *Metodología de la Investigación.* Ciudad de Mexico: McGRAW-HILL .
- Lozano, J. (2019).** Simulation and Optimization de Transporte de Materiales en Minas a Tajo Abierto. *PERUMIN 34.* Arequipa:  
<https://perumin.com/perumin34/assets/uploads/files/foro-tis/presentacion-final-jlozano.pdf>. Obtenido de  
<https://perumin.com/perumin34/assets/uploads/files/foro-tis/presentacion-final-jlozano.pdf>
- Meza, J. (2011).** Desarrollo de un modelo para la aplicación de simulación a un sistema de carguío y acarreo de desmonte de una operación minera a tajo abierto. Lima, Lima, Perú: PUCP.
- Morgan, & Peterson. (1968).** Determining shovel-truck productivity. (pp. 76-80). Minerals Engineering.

## **ANEXOS**

- ❖ **ANEXO 1: MODELO BÁSICO DE SIMULACIÓN (UNA SOLA PALA CON UN SOLO DESTINO)**
- ❖ **ANEXO 2: MODELO COMPLEJO DE SIMULACIÓN PARA MÚLTIPLES**
- ❖ **ANEXO 3: MODELO DE SIMULACIÓN PARA GENERAR EL CÓDIGO GRÁFICO.PALAS Y MÚLTIPLES DESTINOS.**
- ❖ **ANEXO 4: DIAGRAMA DE BLOQUES DE MODELO GPSS DE MULTIPLES PALAS Y MÚLTIPLES DESTINOS**
- ❖ **ANEXO 5: RESULTADOS DEL MODELO DE SIMULACIÓN DE MÚLTIPLES PALAS CON MÚLTIPLES DESTINOS.**

# ANEXO 1: Modelo Básico de Simulación (una sola Pala con un solo destino)

- \* Modelo : Simple Model Trucks Simulation
- \* Plataforma : GPSS
- \* Universidad Nacional de Ingeniería
- \* Escuela Profesional de Ingeniería de Minas
- \* Programado por Jorge Lozano Fernández

\*\*\*\*\*Functions\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*Variables\*\*\*\*\*

INITIAL X\$TNOREBIN,0

INITIAL X\$TNLEACH,0

\*\*\*\*\*

```

                GENERATE 0,0,0,4
                ADVANCE 120
CARGAR  TEST L      C1,447068,FIN
        QUEUE  QOREBIN
                SEIZE   OREBIN
                DEPART  QOREBIN
                ADVANCE 45 ; Tiempo de carga
                ASSIGN  1,148
                SAVEVALUE TNOREBIN+,P1
                RELEASE OREBIN
                ADVANCE 201
                QUEUE  QLEACH
                SEIZE   LEACH
                DEPART  QLEACH
                ADVANCE 160.2 ; Tiempo de descarga
                ASSIGN  2,148
                SAVEVALUE TNLEACH+,P2
        RELEASE LEACH
                ADVANCE 225
                TRANSFER ,CARGAR
FIN      ADVANCE 200
                TERMINATE 1
                START 1

```



## ANEXO 2: Modelo Complejo de Simulación para múltiples palas y múltiples destinos.

; Modelo: Complex Model Simulation (Múltiples Palas y Múltiples Destinos)  
 ; Plataforma de Simulación: Visual SIS  
 ; Universidad Nacional de Ingeniería  
 ; Escuela Profesional de Ingeniería de Minas  
 ; Programado por Jorge Lozano Fernández

\*\*\*\*\*DECLARACION DE VARIABLES DE CONTROL

```

INITIAL      X$TNLOAD1,0
INITIAL      X$TNLOAD2,0
INITIAL      X$TNLOAD3,0
INITIAL      X$TNCRUSHER,0
INITIAL      X$TNSTOCK,0
INITIAL      X$TNWASTEDUMP,0
INITIAL      X$TRUCKS,0

```

\*\*\*\*\*DISTRIBUCION DE MATERIAL POR BANCO

\*\*\*\*\*LOAD2 EN FASE 7

```

TL21      EQU      0
TL22      EQU      340000

```

\*\*\*\*\*LOAD3 EN FASE 5B

```

TL31      EQU      0
TL32      EQU      270000

```

\*\*\*\*\*LOAD1 EN FASE 5C

```

TL11      EQU      300000
TL12      EQU      345000

```

\*\*\*\*\*RUTAS DE ACARREO (TIEMPOS EN SEGUNDO)

```

V12LL     EQU      79.95
V12V      EQU      76.17
V13LL     EQU      559.79
V13V      EQU      222.85
V2XLL     EQU      81.36
V2XV      EQU      77.52
V2YLL     EQU      145.57
V2YV      EQU      57.95
V3X1LL    EQU      19.21
V3X1LL2   EQU      10.44
V3X1V     EQU      7.65
V3X1VV    EQU      9.94
V3X2LL    EQU      499.55
V3X2V     EQU      198.86
V3X2VV    EQU      258.5
V4LL      EQU      657.16
V4V       EQU      261.61
V5LL      EQU      395.31
V6LL      EQU      226.00
V6V       EQU      89.97
V8LL      EQU      104.21
V8V       EQU      41.48
V10LL     EQU      437.35
V10V      EQU      174.10
V11LL     EQU      685.17
V11V      EQU      272.76
VSDF7LL   EQU      789.54
VSDF7V    EQU      358.65
PH02TIME  EQU      1768871
PH01TIME  EQU      1768871

```

```

PH03TIME      EQU      1768871
GLTIME        EQU      1768871
,*****ALGORITMO PARA EL CALCULO DE MÍNIMA RUTA
,
ATENRUTA1     VARIABLE  ABS((P4#P5)/P6)
ATENRUTA2     VARIABLE  ABS((P7#P8)/P9)
ATENRUTA3     VARIABLE  ABS((P10#P11)/P12)
ATENRUTA4     VARIABLE  ABS((P13#P14)/P15)
ATENRUTA5     VARIABLE  ABS((P16#P17)/P18)
ATENRUTA6     VARIABLE  ABS((P19#P20)/P21)
ATENRUTA7     VARIABLE  ABS((P22#P23)/P24)
ATENRUTA8     VARIABLE  ABS((P25#P26)/P27)
ATENRUTA9     VARIABLE  ABS((P28#P29)/P30)
ATENRUTA10    VARIABLE  ABS((P31#P32)/P33)
,***** NÚMERO DE VOQUETES*****
,
TRUCKS1       EQU      80
TRUCKS2       EQU      6
TRUCKS3       EQU      12
,***** TIEMPOS DE CARGUIO, CUADRADO Y DESCARGA PROMEDIOS*****
,
TLOADK        EQU      126.71
TSPOTK        EQU      67.14
TLOADK2       EQU      126.71
TLOSPT1       EQU      325.14
TLOSPT2       EQU      275.14
TLOSPT3       EQU      245.14
TDUMPW        EQU      32.15
TSPOTW        EQU      74.23
TDUMPCH       EQU      110.48
TSPOTCH       EQU      76.17
,*****
,
,*****CODIGO FUENTE DE ACARREO*****
,
GENERATE      120,0,0,TRUCKS1
SAVEVALUE     TRUCKS+,1
ASSIGN        3,X$TRUCKS
TEST         LE  P3,TRUCKS2,DEC2A
TRANSFER      ,POS3XX
DEC2A         TEST  LE  P3,TRUCKS3,POS2XX
TRANSFER      ,LOAD3XX
POS3          TEST  LE  C1,GLTIME,FIN
TEST         LE  C1,PH02TIME,LOAD3XP
ADVANCE       V3X1V
POS3X         ADVANCE  VSDF7V
,*****SHOVEL PH02 EN FASE 7*****
,
POS3XX        QUEUE   QLOAD2
SEIZE         LOAD2
DEPART        QLOAD2
ADVANCE       TLOSPT2
ASSIGN        2,148
SAVEVALUE     TNLOAD2+,P2
RELEASE       LOAD2
,*****FIN SHOVEL PH02 EN FASE 7 *****
,
ASSIGN        2,X$TNLOAD2
TEST         L  P2,TL21,CRUSHER21
WASTE21       ADVANCE  VSDF7LL
ADVANCE       V3X2LL
ADVANCE       V3X1LL
ADVANCE       V4LL

```

```

*****BOTADERO SWC*****
,
    QUEUE      QSWC
    SEIZE       SWC
    DEPART      QSWC
    ADVANCE     TSPOTW
    ADVANCE     TDUMPW
    ASSIGN      2,148
    SAVEVALUE   TNWASTEDUMP+,P2
    RELEASE     SWC
*****FIN DE BOTADERO SWC *****
,
    TRANSFER    ,DECBOT
*****ALGORITMO DE MINIMA RUTA DE F5B Y F7 REGRESANDO DE SWC*****
DECBOT      ADVANCE      V4V
    ASSIGN      4,Q$QLOAD1
    ASSIGN      5,TLOSPT1
    ASSIGN      6,V6V
    ASSIGN      7,Q$QLOAD2
    ASSIGN      8,TLOSPT2
    ASSIGN      9,V3X2V
    ASSIGN      9+,V3X1V
    ASSIGN      9+,VSDF7LL
    ASSIGN      10,Q$QLOAD3
    ASSIGN      11,TLOSPT3
    ASSIGN      12,V3X2V
    ASSIGN      12+,V8V
    TEST        L  V$ATENRUTA1,V$ATENRUTA3,DEC2F7
    TEST        L  V$ATENRUTA1,V$ATENRUTA2,DEC2F7
*****FIN DE ALGORITMO DE MINIMA RUTA F5B Y F7 REGRESANDO DE SWC
LOAD1XX      TEST        L  C1,GLTIME,FIN
    TEST        L  C1,PHO1TIME,DEC2F7
    ADVANCE     V6V
*****SHOVEL PH01 EN FASE 5C*****
,
    QUEUE      QLOAD1
    SEIZE       LOAD1
    DEPART      QLOAD1
    ADVANCE     TLOSPT1
    ASSIGN      2,148
    SAVEVALUE   TNLOAD1+,P2
    RELEASE     LOAD1
*****FIN SHOVEL PH01 EN FASE 5C *****
,
    ASSIGN      2,X$TNLOAD1
    TEST        L  P2,TL11,CRUSHER11
WASTE11      ADVANCE     V6LL
    ADVANCE     V4LL
*****BOTADERO SWC *****
,
    QUEUE      QSWC2
    SEIZE       SWC2
    DEPART      QSWC2
    ADVANCE     TSPOTW
    ADVANCE     TDUMPW
    ASSIGN      2,148
    SAVEVALUE   TNWASTEDUMP+,P2
    RELEASE     SWC2
*****FIN BOTADERO SWC *****
    TRANSFER    ,DECBOT

```

```

*****
CRUSHER21      ASSIGN      2,X$TNLOAD2
TEST          L  P2,TL22,WASTE21
ADVANCE       V12LL
ADVANCE       V10LL
ADVANCE       V11LL
CRUSHERP      TEST        LE  Q$QCRUSH,2,STOCK
*****CRUSHER*****
,
  QUEUE       QCRUSH
  SEIZE       CRUSH
  DEPART      QCRUSH
  ADVANCE     TSPOTCH
  ADVANCE     TDUMPCH
  ASSIGN      2,148
  SAVEVALUE   TNCRUSHER+,P1
  RELEASE     CRUSH
*****
,
FIN CRUSHER*****
RSTOCK      ADVANCE      V11V
,
*****
ALGORTIMO DE MINIMA RUTA F5B Y F7 REGRESANDO DE
CHANCADORA
DECRU      ASSIGN      13,Q$QLOAD1
ASSIGN      14,TLOSPT1
ASSIGN      15,V2XV
ASSIGN      15+,V2YV
ASSIGN      15+,V3X1VV
ASSIGN      15+,V3X2VV
ASSIGN      15+,V6V
ASSIGN      16,Q$QLOAD2
ASSIGN      17,TLOSPT2
ASSIGN      18,V10V
ASSIGN      18+,V12V
ASSIGN      19,Q$QLOAD3
ASSIGN      20,TLOSPT3
ASSIGN      21,V3X1VV
ASSIGN      21+,V8V
ASSIGN      21+,V2XV
ASSIGN      21+,V2YV
TEST        L  V$ATENRUTA5,V$ATENRUTA4,DELOAD23X
TEST        L  V$ATENRUTA5,V$ATENRUTA6,DELOAD23X
*****
FIN DE MINIMA RUTA F5B Y F7 REGRESANDO DE
CHANCADORA
TEST        L  C1,PH02TIME,DELOAD23X
ADVANCE     V10V
ADVANCE     V12V
TRANSFER    ,POS3XX
POS2      ADVANCE     V3X2VV
POS2XX    TRANSFER    ,LOAD1XX
*****
,
CRUSHER11    ASSIGN      2,X$TNLOAD1
TEST          L  P2,TL12,WASTE11
ADVANCE       V6LL
ADVANCE       V5LL
TRANSFER      ,CRUSHERP
*****
,
CRUSHER31    ASSIGN      2,X$TNLOAD3
TEST          L  P2,TL32,WASTE31
ADVANCE       V8LL

```

```

ADVANCE      V3X1LL2
ADVANCE      V2XLL
ADVANCE      V2YLL
ADVANCE      V11LL
TRANSFER     ,CRUSHERP
,*****ASIGNACION A STOCK*****
STOCK        ASSIGN      1,148
              SAVEVALUE   TNSTOCK+,P1
              TRANSFER     ,RSTOCK
,*****FIN ASIGNACION A STOCK*****
LOAD3XP      ADVANCE     V8V
,*****PALA LOAD3 EN FASE 5B*****
LOAD3XX      QUEUE      QLOAD3
              SEIZE       LOAD3
              DEPART      QLOAD3
              ADVANCE     TLOSPT3
              ASSIGN      1,148
              SAVEVALUE   TNLOAD3+,P1
              RELEASE     LOAD3
,*****FIN PALA LOAD3 EN FASE 5B*****
              ASSIGN      2,X$TNLOAD3
              TEST        L P2,TL31,CRUSHER31
WASTE31      ADVANCE     V8LL
              ADVANCE     V3X2LL
              ADVANCE     V4LL
              TRANSFER     ,WASTE2X
DELOAD23X    ADVANCE     V2XV
              ADVANCE     V2YV
              ADVANCE     V3X1VV
              ASSIGN      28,Q$QLOAD1
              ASSIGN      29,TLOSPT1
              ASSIGN      30,V3X2VV
              ASSIGN      30+,V6V
              ASSIGN      31,Q$QLOAD3
              ASSIGN      32,TLOSPT3
              ASSIGN      33,V8V
              TEST        L V$ATENRUTA10,V$ATENRUTA9,POS2
              TEST        LE C1,PH03TIME,FIN
              TRANSFER     ,LOAD3XP
,*****BOTADERO SWC*****
WASTE2X      QUEUE      QSWC3
              SEIZE       SWC3
              DEPART      QSWC3
              ADVANCE     TSPOTW
              ADVANCE     TDUMPW
              ASSIGN      2,148
              SAVEVALUE   TNWASTEDUMP+,P2
              RELEASE     SWC3
,*****FIN DE BOTADERO SWC*****
              TRANSFER     ,DECBOT
,*****ALGORITMO DE MINIMA RUTA F5B Y F7 REGRESANDO DE
SWC (SEGUNDO PUNTO DE OPTIMIZACIÓN)
DEC2F7      ADVANCE     V3X2V
              ASSIGN      22,Q$QLOAD2
              ASSIGN      23,TLOSPT2
              ASSIGN      24,V3X1V
              ASSIGN      24+,VSDF7V

```

```

      ASSIGN      25,Q$QLOAD3
      ASSIGN      26,TLOSPT3
      ASSIGN      27,V8V
      TEST        L  V$ATENRUTA8,V$ATENRUTA7,POS3
,***** FIN DE ALGORITMO*****
      TEST        LE C1,PH03TIME,FIN
      TRANSFER    ,LOAD3XP
FIN      ADVANCE   300
      TERMINATE   1
      START       1
```

### ANEXO 3: Modelo de Simulación para generar el código gráfico.

#### \*Modelo de Simulación y Optimización

\*Programado por: Jorge Lozano

\*Algoritmo : Versión 1.0 (Original Jorge Lozano)

\*Consideraciones de modelo:

\* 1. 2 Cargadores asignados a Fase 7

\* 2. 1 Cargador asignado a Fase 5B

\* 3. Uso de Stock

\* 4. Cálculos de tiempos de acarreo en archivo Truck Study.xlsx

\* 5. Tiempo de simulación para un día

\*\*\*\*\* Declaración de Variables de Control\*\*\*\*\*

INITIAL X\$TNLOAD1,0

INITIAL X\$TNLOAD2,0

INITIAL X\$TNLOAD3,0

INITIAL X\$TNCRUSHER,0

INITIAL X\$TNSTOCK,0

INITIAL X\$TNWASTEDUMP,0

INITIAL X\$Trucks,0

INITIAL X\$nump,0

INITIAL X\$nttruck,0

\*\*\*\*\*Rutas de Acarreo (Tiempos en segundos)\*\*\*\*\*

V1LL EQU 181.22

V1V EQU 72.14

V2LL EQU 478.69

V2V EQU 190.56

V3LL EQU 511.64

V3V EQU 203.67

V4LL EQU 863.57

V4V EQU 343.77

V5LL EQU 380.61

V6LL EQU 89.94

V6V EQU 73.94

V7V EQU 51.04

V8V EQU 158.03

V8LL EQU 62.91

GPSTIME EQU 63141 ; Tiempo de simulación en función de la disponibilidad y utilización máxima ofrecida.

\*\*\*\*\* Algoritmo para el cálculo de mínima ruta\*\*\*\*\*

Atenruta1 VARIABLE ABS(P6-P4#P5) ; parámetros de QLOAD1

Atenruta2 VARIABLE ABS(P9-P7#P8) ; parámetros de QLOAD2

Atenruta3 VARIABLE ABS(P12-P10#P11); parámetros de QLOAD3

Atenruta4 VARIABLE ABS(P15-P13#P14) ; parámetros de QLOAD1

Atenruta5 VARIABLE ABS(P18-P16#P17) ; parámetros de QLOAD2

Atenruta6 VARIABLE ABS(P21-P19#P20); parámetros de QLOAD3

Atenruta7 VARIABLE ABS(P24-P22#P23); parámetro de QLOAD2 cuando regresamos de botadero SWC

Atenruta8 VARIABLE ABS(P27-P25#P26); parámetro de QLOAD3 cuando regresamos de botadero SWC

\*\*\*\*\* Número de volquetes \*\*\*\*\*

Trucks1 EQU 20 ; Volquetes involucrados en la simulación

\*\*\*\*\* Tiempos de carguio, cuadrado y descarga promedios\*\*\*\*\*

tload EQU 174.6 ;Tiempo de carguio en Mina

tspot EQU 10 ;Tiempo de cuadrado en Mina

tdump EQU 32.4 ;Tiempo de descarga en botadero

tspotw EQU 10 ;Tiempo de cuadrado en Botadero SWC

tdumpc EQU 70.8 ; Tiempo de descarga en Chancadora

```

tspotc      EQU      10 ; Tiempo de cuadrado en Chancadora
*****
*****Código fuente de Acarreo *****
      GENERATE 180,0,0,Trucks1 ;Genera Trucks1 volquetes cada 180 segundos
( 3 minutos)
      SAVEVALUE nump+,1
      ASSIGN   3,X$nump
      TEST E   X$nump,1,SIGUE
      OPEN     ("C:\Users\Y450\Desktop\5.Houling\TS3Loaders.atf"),1,CERRAR
SIGUE      WRITE (CATENATE("time ",C1)),1,CERRAR
      WRITE     (CATENATE("create truck ",P3)),1,CERRAR
      WRITE     (POLYCATENATE(("place "),P3,(" on v7v"))),1,CERRAR
      SAVEVALUE Trucks+,1
      ASSIGN   30,X$Trucks
      ADVANCE  V7V
      TRANSFER ,DECBOT ;Transferencia a mejor ruta
LOAD2X     TEST L C1,GPSTIME,FIN
      WRITE     (CATENATE("time ",C1)),1,CERRAR
      WRITE     (POLYCATENATE(("place "),P3,(" on v3v"))),1,CERRAR
      ADVANCE   V3V
POS3       WRITE (CATENATE("time ",C1)),1,CERRAR
      WRITE     (POLYCATENATE(("place "),P3,(" on v1v"))),1,CERRAR
      ADVANCE   V1V
*****Cargador LOAD2 en Fase 7*****
      QUEUE    QLOAD2
      SEIZE    LOAD2
      DEPART   QLOAD2
      ADVANCE  tspotc ;Tiempo de Cuadrado del
volquete
      ADVANCE  tload ;Tiempo de carguio
      ASSIGN   2,150 ;Tonelaje cargado
      SAVEVALUE TNLOAD2+,P2
      RELEASE  LOAD2
*****Fin Cargador LOAD2 en Fase 7*****
      ASSIGN   2,X$TNLOAD2
      TEST L   P2,5000,Crusher21 ;Decisión Mineral, Desmonte
Waste21    WRITE (CATENATE("time ",C1)),1,CERRAR
      WRITE    (POLYCATENATE(("set "),P3,(" color F1"))),1,CERRAR
      WRITE    (POLYCATENATE(("place "),P3,(" on v1ll"))),1,CERRAR
      ADVANCE  V1LL
      WRITE    (CATENATE("time ",C1)),1,CERRAR
      WRITE    (POLYCATENATE(("place "),P3,(" on v3ll"))),1,CERRAR
      ADVANCE  V3LL
      WRITE    (CATENATE("time ",C1)),1,CERRAR
      WRITE    (POLYCATENATE(("place "),P3,(" on v4ll"))),1,CERRAR
      ADVANCE  V4LL
*****Botadero SWC*****
      QUEUE    QSWC
      SEIZE    SWC
      DEPART   QSWC
      ADVANCE  tspotw ;Tiempo de Cuadrado para
descarga
      ADVANCE  tdump ;Tiempo de descarga
      ASSIGN   2,150 ;Tonelaje descargado
      SAVEVALUE TNWASTEDUMP+,P2
      RELEASE  SWC

```



```

***** Fin Botadero SWC*****
WRITE (CATENATE("time ",C1)),1,CERRAR
WRITE (POLYCATENATE(("set "),P3,(" color F2"))),1,CERRAR
WRITE (POLYCATENATE(("place "),P3,(" on v4v"))),1,CERRAR
ADVANCE V4V
***** Algoritmo de Mínima F5B y F7 regresando de SWC*****
DECBOT ASSIGN 4,Q$QLOAD1
        ASSIGN 5,tload ;Tiempo de carguio y cuadrado
        ASSIGN 5+,tspot
        ASSIGN 6,V6V
        ASSIGN 7,Q$QLOAD2
        ASSIGN 8,tload ;Tiempo de carguio y cuadrado
        ASSIGN 8+,tspot
        ASSIGN 9,V3V
        ASSIGN 9+,V1V
        ASSIGN 10,Q$QLOAD3
        ASSIGN 11,tload
        ASSIGN 11+,tspot
        ASSIGN 12,V3V
        ASSIGN 12+,V8V
        TEST L V$Atenruta1,V$Atenruta2,DECLOAD23
        TEST L V$Atenruta1,V$Atenruta3,DECLOAD23
        TRANSFER ,LOAD1X
***** Fin de Algoritmo de Mínima F5B y F7 regresando de SWC*****
LOAD1X WRITE (CATENATE("time ",C1)),1,CERRAR
        WRITE (POLYCATENATE(("place "),P3,(" on v6v"))),1,CERRAR
        ADVANCE V6V
        TEST L C1,GPSTIME,FIN
***** Cargador LOAD1 en Fase 5B*****
        QUEUE QLOAD1
        SEIZE LOAD1
        DEPART QLOAD1
        ADVANCE tspot ;Tiempo de Cuadrado para
carguio
        ADVANCE tload ;Tiempo de carguio
        ASSIGN 2,150 ;Tonelaje cargado
        SAVEVALUE TNLOAD1+,P2
        RELEASE LOAD1
***** Fin Cargador LOAD1 en Fase 5B*****
        ASSIGN 2,X$TNLOAD1
        TEST L P2,5000,Crusher11
Waste11 WRITE (CATENATE("time ",C1)),1,CERRAR
        WRITE (POLYCATENATE(("set "),P3,(" color F1"))),1,CERRAR
        WRITE (POLYCATENATE(("place "),P3,(" on v6ll"))),1,CERRAR
        ADVANCE V6LL
        WRITE (CATENATE("time ",C1)),1,CERRAR
        WRITE (POLYCATENATE(("place "),P3,(" on v4ll"))),1,CERRAR
        ADVANCE V4LL
***** Botadero SWC*****
        QUEUE QSWC2
        SEIZE SWC2
        DEPART QSWC2
        ADVANCE tspotw ;Tiempo de cuadrado para
descarga
        ADVANCE tdump ;Tiempo de carguio
        ASSIGN 2,150 ;Tonelaje descargado
        SAVEVALUE TNWASTEDUMP+,P2

```

```

RELEASE    SWC2
***** Fin Botadero SWC*****
WRITE      (CATENATE("time ",C1)),1,CERRAR
WRITE      (POLYCATENATE(("set "),P3,(" color F2"))),1,CERRAR
WRITE      (POLYCATENATE(("place "),P3,(" on v4v"))),1,CERRAR
ADVANCE    V4V
TRANSFER   ,DECBOT
*****
Crusher21  ASSIGN      2,X$TNLOAD2
TEST L     P2,35000,Waste21
WRITE      (CATENATE("time ",C1)),1,CERRAR
WRITE      (POLYCATENATE(("set "),P3,(" color F1"))),1,CERRAR
WRITE      (POLYCATENATE(("place "),P3,(" on v2ll"))),1,CERRAR
ADVANCE    V2LL
Crusherp   TEST LE     Q$QCRUSH,2,STOCK
*****Crusher*****
QUEUE      QCRUSH
SEIZE      CRUSH
DEPART     QCRUSH
ADVANCE    tspotc           ;Tiempo de cuadrado
ADVANCE    tdumpc           ;Tiempo de descarga
ASSIGN     1,150            ;Tonelaje descargado
SAVEVALUE  TNCRUSHER+,P1
RELEASE    CRUSH
*****Crusher*****
RSTOCK     WRITE      (CATENATE("time ",C1)),1,CERRAR
WRITE      (POLYCATENATE(("set "),P3,(" color F2"))),1,CERRAR
WRITE      (POLYCATENATE(("place "),P3,(" on v2v"))),1,CERRAR
ADVANCE    V2V
***** Algoritmo de Mínima Ruta F5B y F7 regresando de Chancadora*****
DECRU      ASSIGN      13,Q$QLOAD1
ASSIGN     14,tload
ASSIGN     14+,tspot
ASSIGN     15,V3V
ASSIGN     15+,V6V
ASSIGN     16,Q$QLOAD2
ASSIGN     17,tload
ASSIGN     17+,tspot
ASSIGN     18,V1V
ASSIGN     19,Q$QLOAD3
ASSIGN     20,tload
ASSIGN     20+,tspot
ASSIGN     21,V8V
TEST L     V$Atenruta5,V$Atenruta4,DELOAD23X ;Otro punto de asignación
TEST L     V$Atenruta5,V$Atenruta6,DELOAD23X
***** Fin Algoritmo de Mínima Ruta F5B y F7 regresando de Chancadora*****
TEST L     C1,GPSTIME,FIN
TRANSFER   ,POS3           ;Se transfiere a LOAD2X
POS2       WRITE      (CATENATE("time ",C1)),1,CERRAR
WRITE      (POLYCATENATE(("set "),P3,(" color F2"))),1,CERRAR
WRITE      (POLYCATENATE(("place "),P3,(" on v3v"))),1,CERRAR
ADVANCE    V3V
TRANSFER   ,LOAD1X
*****
Crusher11  ASSIGN      2,X$TNLOAD1
TEST L     P2,10000,Waste11
WRITE      (CATENATE("time ",C1)),1,CERRAR

```

```

WRITE  (POLYCATENATE(("set "),P3,(" color F1"))),1,CERRAR
WRITE  (POLYCATENATE(("place "),P3,(" on v6ll"))),1,CERRAR
ADVANCE  V6LL
WRITE  (CATENATE("time ",C1)),1,CERRAR
WRITE  (POLYCATENATE(("place "),P3,(" on v5ll"))),1,CERRAR
ADVANCE  V5LL
TRANSFER ,Crusherp
*****Asignación a Stock *****
STOCK   ASSIGN    1,150
        SAVEVALUE TNSTOCK+,P1
        TRANSFER ,RSTOCK
*****Fin Asignación a Stock*****
LOAD3X  WRITE  (CATENATE("time ",C1)),1,CERRAR
        WRITE  (POLYCATENATE(("place "),P3,(" on v3v"))),1,CERRAR
        ADVANCE  V3V
LOAD3XX WRITE  (CATENATE("time ",C1)),1,CERRAR
        WRITE  (POLYCATENATE(("place "),P3,(" on v8v"))),1,CERRAR
        ADVANCE  V8V
        TEST L   C1,GPSTIME,FIN
*****Cargador LOAD3 en Fase 5B*****
        QUEUE    QLOAD3
        SEIZE     LOAD3
        DEPART    QLOAD3
        ADVANCE   tspot
        ADVANCE   tload
        ASSIGN    1,150
        SAVEVALUE TNLOAD3+,P1
        RELEASE   LOAD3
*****Fin Cargador LOAD1 en Fase 5B*****
        WRITE  (CATENATE("time ",C1)),1,CERRAR
        WRITE  (POLYCATENATE(("set "),P3,(" color F1"))),1,CERRAR
        WRITE  (POLYCATENATE(("place "),P3,(" on v8ll"))),1,CERRAR
        ADVANCE  V8LL
        WRITE  (CATENATE("time ",C1)),1,CERRAR
        WRITE  (POLYCATENATE(("place "),P3,(" on v3ll"))),1,CERRAR
        ADVANCE  V3LL
        WRITE  (CATENATE("time ",C1)),1,CERRAR
        WRITE  (POLYCATENATE(("place "),P3,(" on v4ll"))),1,CERRAR
        ADVANCE  V4LL
        TRANSFER ,Waste2x
DECLOAD23TEST L   V$Atenruta3,V$Atenruta2,DEC2F7
        TRANSFER ,DEC2F7
DELOAD23XTEST L   V$Atenruta6,V$Atenruta5,POS3
        TRANSFER ,LOAD3XX
*****Botadero SWC*****
Waste2x  QUEUE    QSWC3
        SEIZE     SWC3
        DEPART    QSWC3
        ADVANCE   tspotw ;Tiempo de cuadrado para
descarga
        ADVANCE   tdump ;Tiempo de carguo
        ASSIGN    2,150 ;Tonelaje descargado
        SAVEVALUE TNWASTEDUMP+,P2
        RELEASE   SWC3
***** Fin Botadero SWC*****
        WRITE  (CATENATE("time ",C1)),1,CERRAR
        WRITE  (POLYCATENATE(("set "),P3,(" color F2"))),1,CERRAR

```

```

WRITE (POLYCATENATE(("place "),P3,(" on v4v"))),1,CERRAR
ADVANCE V4V
TRANSFER ,DECBOT
*****Algoritmo de Mínima Ruta F5B y F7 regresando de SWC (Punto de ingreso a F7)
Segunda Optimización*****
DEC2F7  ASSIGN    22,Q$QLOAD2
        ASSIGN    23,tload
        ASSIGN    23+,tspot
        ASSIGN    24,V1V
        ASSIGN    25,Q$QLOAD3
        ASSIGN    26,tload
        ASSIGN    26+,tspot
        ASSIGN    27,V8V
        TEST L    V$Atenruta7,V$Atenruta8,LOAD3XX
*****Fin Algoritmo de Mínima Ruta F5B y F7 regresando de SWC (Punto de ingreso a
F7) Segunda Optimización*****
TRANSFER ,POS3
FIN      SAVEVALUE ntruck+,1
        TEST E    X$ntruck,1,FIN2
        WRITE     "end",1,CERRAR
CERRAR   CLOSE    ,1
FIN2     TERMINATE 1
        START     1

```

**ANEXO 4: Diagrama de Bloques de modelo GPSS de multiples Palas y múltiples destinos.**

**ANEXO 5: Resultados del modelo de simulación de múltiples palas con múltiples destinos.**