



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE MINAS**

**SIMULACIÓN DE TRANSPORTE AUTONOMO**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS**

**GUILLERMO FELIPE LÓPEZ LUNA**

**PROFESOR GUÍA:  
MANUEL REYES JARA**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN  
WINSTON ROCHER ANDA  
JAVIER RUIZ DEL SOLAR**

**SANTIAGO DE CHILE  
2014**

## RESUMEN

Una de las mayores innovaciones en minería a cielo abierto ha sido la automatización de camiones mineros, con el objetivo de disminuir los costos operacionales y mejorar la continuidad del proceso. En este trabajo de título, el objetivo consiste en crear un modelo de simulación para comparar un sistema de transporte manual y un sistema de transporte autónomo, el modelo presenta el uso de algunas variables de desempeño, tales como la productividad, utilización efectiva, tiempos de ciclo y demoras por cola de los camiones.

Para el cumplimiento del estudio se desarrolló un modelo conceptual de simulación, así como también se determinaron los principales parámetros y condiciones que se utilizaran para comparar los dos sistemas de transporte. Los datos usados en el modelo fueron extraídos de estudios específicos del tema. Adicionalmente se realizaron otros escenarios de simulación, tales como análisis de sensibilidad y cumplimiento de un plan de producción.

Los resultados indican que la producción del sistema autónomo disminuye un 14.85 % con respecto al sistema manual, a pesar de que la utilización efectiva y los tiempos de ciclo resultaron mejorar un 27.43 % y 3.49 % respectivamente. Los tiempos de cola también aumentaron en un 0.69% en comparación con el sistema manual. Estas diferencias resultan como consecuencia de la sensibilidad que tienen los camiones autónomos al detenerse por cualquier evento en la ruta. Los resultados del cumplimiento del plan corresponden a un 84.11% y un 98.78% para el sistema autónomo y manual respectivamente.

Finalmente, destacar que se pudo construir la estructura de un modelo de simulación siguiendo una metodología coherente con la forma de operar de una mina en la actualidad. Como sugerencias para continuar con esta línea de investigación se recomienda incluir simulaciones con fases dinámicas, distancias de interacción entre camiones y la realización de un estudio económico entre los dos sistemas.

## ABSTRACT

One of the biggest innovations in open pit mining has been the automation of mining trucks in order to reduce operational costs and improve the continuity of the process. In this title work objective is to create the structure of a model to compare autonomous and hand trucks, the model presents the use of some performance variables, such as productivity, effective utilization, cycle times and delays tail trucks.

For the research a conceptual simulation model was developed, as well as the main parameters and conditions which will be used to compare the two transport systems. The data used in the model were drawn from specific studies of the topic. Additionally other simulation scenarios were performed, such as sensitivity analysis and compliance of a production plan

The results indicate that production decreases autonomic 14.85% with respect to the manual system, even though the effective utilization and cycle times were 27.43% and improving a 3.49% respectively. The autonomous trucks queuing time increase by 0.69% compared to the manual system, these differences are due to the sensitivity of the autonomous trucks to stopped for any event in the route. The results of the fulfillment of the plan were 84.11% and 98.78% for the autonomous system and manual respectively.

Finally, highlight that developed the structure of a simulation model following a coherent methodology with a real mine operation. Some suggestions to continue the work line have to do with dynamics phases, safe distance between trucks and a economic study for each system.

## AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Gloria y Guillermo, por contar siempre con su apoyo, dedicación, cariño y por entregarme los valores para finalizar esta etapa de mi formación como profesional.

A Juliet, por estar junto a mi lado en todo momento y por brindarme los mejores momentos de felicidad en esta etapa de mi vida universitaria.

A mi familia (Están todos incluidos), por haber sido un apoyo afectivo incondicional en mi crecimiento como persona.

A los miembros de mi comisión, Manuel y Winston, que en todo momento fueron un apoyo para realizar el trabajo, gracias por responder a mis inquietudes y por brindarme parte de su tiempo para ayudarme. A mi profesor integrante, Javier, que me recibió con la mejor de las disposiciones y me brindo los aportes necesarios para un mejor desarrollo del estudio.

También agradecer a mis amigos: del colegio y de la U, por los agradables momentos vividos y que recordaremos con nostalgia en años futuros.

## TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción.....	1
1.1.	Importancia del transporte en minería a cielo abierto.....	2
1.2.	Motivación .....	3
1.3.	Objetivos .....	3
1.3.1.	Objetivo general.....	3
1.3.2.	Objetivos específicos.....	4
1.4.	Alcances.....	4
1.5.	Metodología .....	4
2.	Antecedentes .....	6
2.1.	Historia de la automatización en la minería.....	6
2.2.	Camiones autónomos .....	8
2.2.1.	Factores influenciados por los camiones autónomos .....	9
2.2.2.	Primeros proveedores de camiones autónomos .....	11
2.2.3.	Implementación de camiones autónomos en Chile .....	13
2.2.4.	Simulación de camiones autónomos (Parreira, 2013) .....	14
2.3.	Conceptos fundamentales de la simulación .....	15
2.3.1.	Sistema.....	16
2.3.2.	Tipos de simulación (García, 2006) .....	17
2.3.3.	Ventajas y desventajas de la simulación .....	19
2.4.	Software Arena .....	20
2.5.	Disponibilidad y Utilización efectiva (Lagos, 2007) .....	21
3.	Modelo de simulación.....	23
3.1.	Descripción global del sistema a simular .....	24
3.2.	Identificación de entidades, recursos, atributos y variables de estado.....	25
3.2.1.	Entidades.....	25
3.2.2.	Recursos .....	25
3.2.3.	Locaciones .....	25
3.2.4.	Atributos .....	28
3.2.5.	Demoras generadas por colas.....	28
3.2.6.	Eventos que modificaran la rutina de los camiones.....	29

3.2.7.	Variables sobre medidas de desempeño de la simulación .....	29
3.3.	Layout del modelo .....	30
3.4.	Aspectos estocásticos del modelo .....	31
3.4.1.	Tiempos de carga y descarga de los camiones.....	31
3.4.2.	Mantenimiento de los camiones .....	32
3.4.3.	Demoras por almuerzo, cambio de turno y descansos.....	32
3.4.4.	Reabastecimiento de combustible .....	33
3.4.5.	Detención de los camiones en rutas.....	34
3.4.6.	Factor de carga y ley media.....	34
3.5.	Horizonte de simulación .....	34
3.6.	Principales criterios de decisión .....	35
3.6.1.	Sistema de permiso .....	35
3.6.2.	Decisión de ir hacia el parking.....	35
3.6.3.	Cambio en camiones de estéril por camiones de producción.....	36
3.6.4.	Cambio en la modalidad de sistema autónomo a manual .....	37
3.6.5.	Parámetros del simulador .....	37
3.7.	Verificación modelo de simulación .....	38
4.	Resultados .....	40
4.1.	Comparación sistema manual c/remanejo y camiones autónomos. ....	40
4.1.1.	Producción.....	40
4.1.2.	Utilización efectiva .....	41
4.1.3.	Razón estéril – mineral (E/M) .....	41
4.1.4.	Demoras por cola .....	42
4.1.5.	Resumen principales resultados.....	42
4.2.	Análisis de sensibilidad sistema autónomo .....	44
4.2.1.	Velocidades .....	44
4.2.2.	Probabilidad de detención por segmento .....	46
5.	Análisis de resultados .....	48
6.	Conclusiones y comentarios finales. ....	50
6.1.	Conclusiones.....	50
6.2.	Comentarios finales.....	51
7.	Recomendaciones .....	53

8. Bibliografía .....	55
9. Anexos .....	57
9.1. Anexo A: Resultados simulación .....	57
9.1.1. Camiones manuales .....	57
9.1.2. Camiones autónomos .....	62
9.1.3. Cambio de sistema (Autónomo → Manual) .....	66
9.2. Anexo B: Modelo realizado en ARENA .....	70
9.2.1. Modelo general .....	70
9.2.2. Sub modelo creación de entidades secundarias .....	71
9.2.3. Módulos utilizados en ARENA .....	71
9.3. Anexo C: Misceláneo .....	75
9.3.1. Distancias de segmentos .....	75
9.3.2. Dimensiones camión autónomo 930E-4 .....	75
9.3.3. Resumen parámetros del modelo .....	77

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Ventajas y desventajas de la simulación.....	19
Tabla 2: Distribución de tiempos para disponibilidad y utilización.....	21
Tabla 3: Atributo número de camión.....	28
Tabla 4: Velocidades medias de los camiones (Parreira, 2013).....	28
Tabla 5: Longitud de las rutas .....	31
Tabla 6: Distribución tiempos de carga y descarga de camiones. ....	32
Tabla 7: Retrasos de mantención (Parreira, 2013) .....	32
Tabla 8: Retrasos debido a almuerzo, café y cambio de turno (Parreira, 2013).....	33
Tabla 9: Retraso por reabastecimiento de combustible (Parreira, 2013).....	33
Tabla 10: Demoras por eventos en la ruta .....	34
Tabla 11: Factor de carga .....	34
Tabla 12: Parámetros plan de producción.....	37
Tabla 13: Comparación demoras por cola.....	42
Tabla 14: Resultados principales Manual c/remanejo - Autónomo .....	43
Tabla 15: Resumen análisis de sensibilidad de detección por segmentos.....	45
Tabla 16: Resumen análisis de sensibilidad de detección por segmentos.....	47
Tabla 17: Estadísticas producción camiones manuales .....	57
Tabla 18: Estadísticas utilización efectiva camiones manuales.....	58
Tabla 19: Estadísticas Razón estéril - mineral camiones manuales.....	59
Tabla 20: Demoras por cola camiones manuales .....	59
Tabla 21: Tiempos de ciclo camiones manuales.....	60
Tabla 22: Resumen simulación camiones manuales (con ir a stockpile).....	60
Tabla 23: Resumen simulación camiones manuales (sin ir a stockpile).....	61
Tabla 24: Estadísticas producción camiones autónomos .....	62
Tabla 25: Estadísticas utilización efectiva camiones autónomos .....	63
Tabla 26: Estadísticas razón estéril - mineral camiones autónomos .....	64
Tabla 27: Demoras por cola camiones autónomos.....	64
Tabla 28: Tiempos de ciclo camiones autónomos .....	65
Tabla 29: Resultados simulación camiones autónomos .....	65
Tabla 30: Estadísticas producción Autónomo/Manual.....	66
Tabla 31: Estadísticas utilización efectiva Autónomo/Manual.....	67



Tabla 32: Estadísticas razón estéril - mineral Autónomo/Manual.....	68
Tabla 33: Demoras por cola Autónomo/Manual .....	68
Tabla 34: Tiempos de ciclo Autónomo/Manual.....	69
Tabla 35: Resultados simulación camiones autónomos /manual.....	69
Tabla 36: Distancias de segmentos utilizados en el modelo .....	75
Tabla 37: Resumen 1, parámetros modelo: .....	77
Tabla 38: Resumen 2, parámetros modelo: .....	77

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Historia de la automatización en la minería.....	7
Figura 2: Principales Sub sistemas camiones autónomos .....	8
Figura 3: Lógica de los camiones autónomos (Meech, 2013).....	9
Figura 4: Camión Komatsu 930E-AT utilizado en Radomiro Tomic.....	12
Figura 5: Camión autónomo 777C de Caterpillar .....	13
Figura 6: Modelos de simulación.....	18
Figura 7: Descripción ARENA .....	20
Figura 8: Estructura jerárquica de ARENA.....	20
Figura 9: Elementos principales de modelación .....	23
Figura 10: Diagrama de flujo modelo de simulación.....	27
Figura 11: Layout del modelo (Navarrete, 2013).....	30
Figura 12: Criterio de decisión sistema de permiso.....	35
Figura 13: Criterio de decisión parking.....	36
Figura 14: Criterio de decisión a stockpile.....	38
Figura 15: Comparación demoras por cola .....	42
Figura 16: Modelo realizado en ARENA .....	70
Figura 17: Sub modelo creación de entidades secundarias.....	71
Figura 18: Modulo Create.....	71
Figura 19: Modulo Assign.....	72
Figura 20: Modulo Seize.....	72
Figura 21: Modulo Delay.....	72
Figura 22: Modulo Release .....	72
Figura 23: Modulo Decide .....	73
Figura 24: Modulo Separate.....	73
Figura 25: Modulo Record.....	73
Figura 26: Modulo Dispose .....	73
Figura 27: Modulo Route .....	74
Figura 28: Modulo Station .....	74
Figura 29: Modulo Hold.....	74
Figura 30: Modulo Submodel.....	74

Figura 31: Modulo Branch .....	75
Figura 32: Vista lateral camión autónomo 930E-4 .....	75
Figura 33: Vista delantera camión 930E-4 .....	76
Figura 34: Vista trasera camión autónomo 930E-4.....	76

## ÍNDICE DE GRAFICOS

Grafico 1: Costos típicos en minas a cielo abierto (Meech, 2013) .....	2
Grafico 2: Evolución capacidad equipos de transporte .....	3
Grafico 3: Comparación producción de los dos sistemas .....	40
Grafico 5: Comparación utilización efectiva .....	41
Grafico 6: Comparación razón E/M.....	41
Grafico 7: Análisis de sensibilidad de velocidad.....	45
Grafico 8: Análisis de sensibilidad detección por segmentos.....	46
Grafico 9: Producción camiones manuales .....	57
Grafico 10: Utilización efectiva sistema manual .....	58
Grafico 11: Razón estéril - mineral camiones manuales.....	59
Grafico 12: Producción camiones autónomos .....	62
Grafico 13: Utilización efectiva camiones autónomos .....	63
Grafico 14: Razón estéril - mineral camiones autónomos .....	64
Grafico 15: Producción Autónomo/Manual.....	66
Grafico 16: Utilización efectiva Autónomo/Manual.....	67
Grafico 17: Razón estéril - mineral Autónomo/Manual.....	68

# CAPITULO 1

## 1. Introducción

En los últimos años el aumento de la competitividad en el sector minero y la continua fluctuación de precios de los commodities, ha generado una mayor incertidumbre en el mercado de la minería. Dicho esto, y considerando la gran inversión extranjera en proyectos mineros en Chile durante las dos últimas décadas, con un crecimiento promedio de 11% anual en la década de 1990 (Jara et al., 2010), surgen importantes oportunidades de investigación y desarrollo de nuevas tecnologías que permitan disminuir los costos y aumentar la capacidad de producción de los principales procesos en una operación minera. Como resultado, las organizaciones mineras están empezando a mirar la automatización para aumentar la eficiencia de la producción. A través de la automatización, se espera que:

- ✓ Los sistemas sean más seguros reduciendo el peligro de accidentes para las personas.
- ✓ La utilización de la automatización implique menores costos operacionales
- ✓ La eficiencia del proceso aumente.

En la minería, la automatización está desempeñando un papel cada vez más importante debido a la escasez de metales de alta demanda y personal capacitado para operar. Lugares de difícil acceso se están convirtiendo en algo común para los nuevos proyectos mineros, por lo que los sistemas automatizados pueden llegar a ser una solución para estos inconvenientes. Dentro de sus principales innovaciones se encuentran:

- ✓ Equipos de excavación y transporte subterráneas (LHD).
- ✓ Perforación subterránea.
- ✓ Perforación a cielo abierto.
- ✓ Monitoreo de estabilidad de taludes.
- ✓ Camiones autónomos para minería a cielo abierto.

Precisamente en minería a cielo abierto, la operación minera con camiones no tripulados (autónomos), es una respuesta a la necesidad de las empresas mineras de disponer de un medio tecnológico y automatizado, distinto al tradicional, que permita la extracción del mineral de manera segura y productiva.

## 1.1. Importancia del transporte en minería a cielo abierto

El transporte de material es uno de los más importantes aspectos en una operación minera a cielo abierto, llegando a representar alrededor del 50% de los costos operacionales e incluso el 60% según algunos autores (Alarie y Gamache, 2002). En el grafico 1 se indican los costos típicos por tonelada en una mina a cielo abierto, donde se puede apreciar que el costo de transporte representa alrededor de un 45 % de los costos operacionales en minería a cielo abierto.

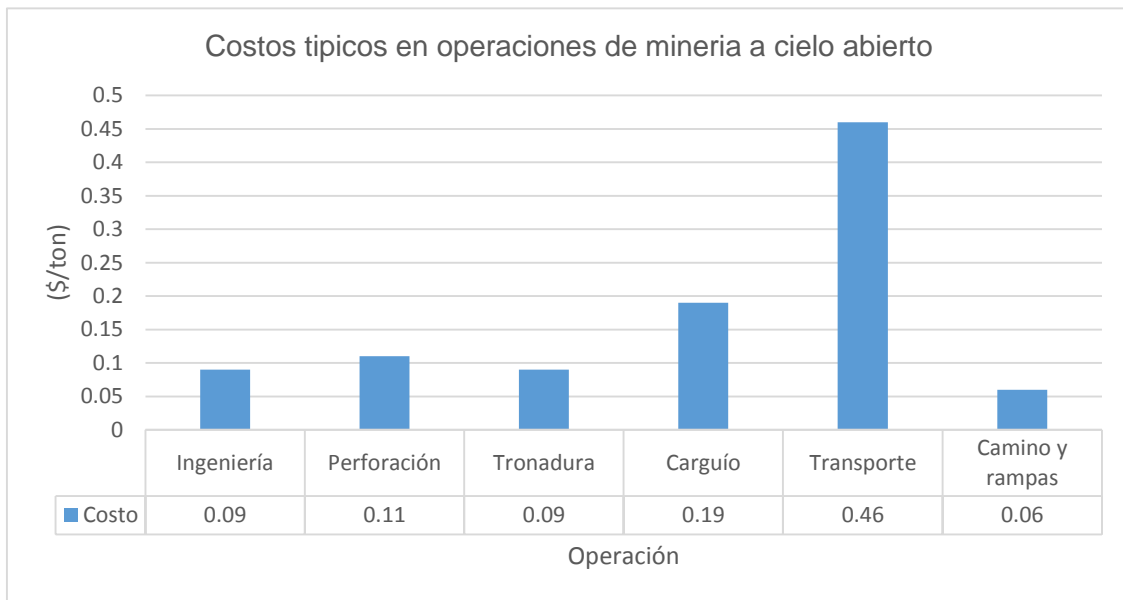
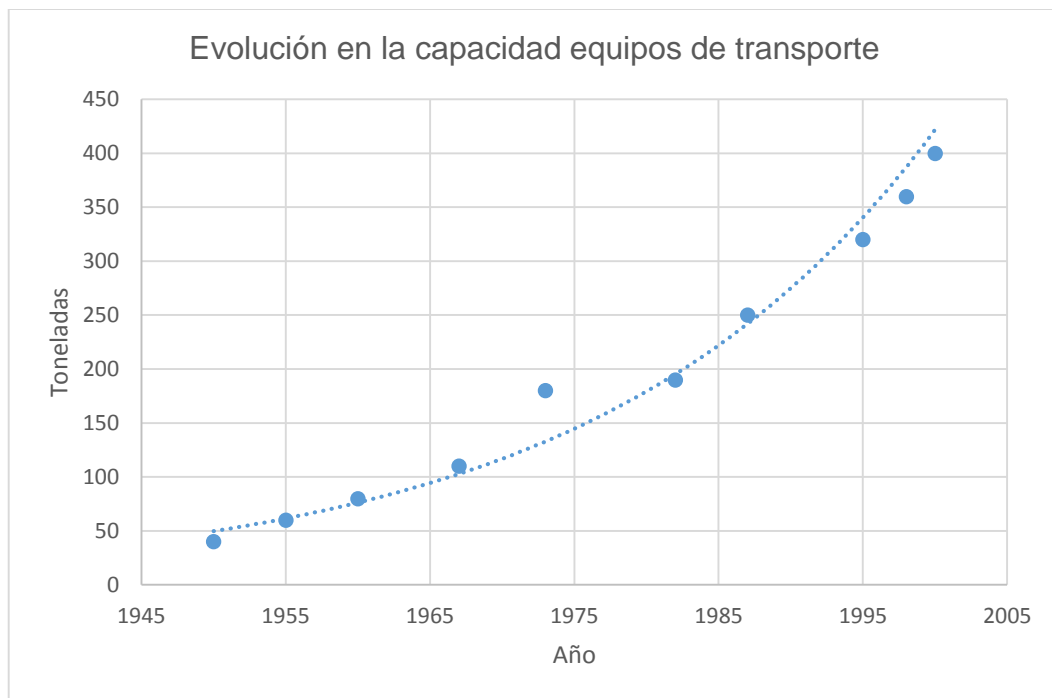


Grafico 1: Costos típicos en minas a cielo abierto (Meech, 2013)

En cierto modo, el transporte de minerales puede ser representado como una red de transporte: los puntos de carguío son como nodos oferentes, los sitios de vaciado como nodos demandantes y las rutas entre estos puntos como los arcos del sistema. Es decir la importancia del transporte de material en la planificación y costos resulta vital a la hora de evaluar proyectos.

Desde el punto de vista de evaluación de dimensionamiento de equipos, se puede decir que el transporte es el punto por el cual constantemente se está re evaluando, ya que dentro de las operaciones unitarias es la que más influyente, las otras operaciones (Perforación, tronadura, etc..) también se re evalúan pero es mucho más común ver cambios notorios en el transporte que en perforación y carguío (respecto a los equipos), es por ello que dentro de una faena, siempre se están implementando sistemas de control bastante rigurosos con el transporte, que pretenden buscar el óptimo para reducir los costos.

En la historia, el aumento en la capacidad de producción (*Grafico 2*) de los camiones ha sido el foco de tecnología, dejando de lado otros aspectos como la automatización.



*Gráfico 2: Evolución capacidad equipos de transporte*

## 1.2. Motivación

Se estima que al año 2020, habrá sobre 100 camiones autónomos operando en todo el mundo, y que la tendencia mundial debiese apuntar hacia este tipo de tecnologías, dada la seguridad que entrega el sistema, operatividad y adaptabilidad climática (Navarrete, 2013)

A raíz de estos recientes cambios que se experimentan en el transporte de minería a cielo abierto, resulta trascendental estudiar el comportamiento de estos sistemas, ya sea por medios físicos o matemáticos que puedan servir como herramientas útiles para el conocimiento de nuevas tecnologías. La simulación, en ese sentido, resulta ser una herramienta poderosa para entender en una primera instancia, las repercusiones en el uso de este tipo de camiones.

## 1.3. Objetivos

### 1.3.1. Objetivo general

Desarrollar una metodología de simulación, de tal forma que permita comparar 2 sistemas de transporte, donde el primero será comandado por camiones autónomos y el segundo por camiones manuales, a través de simulaciones.

### 1.3.2. Objetivos específicos

Para el correcto cumplimiento del objetivo general se ha identificado una serie de etapas a cumplir que permitirán el desarrollo de este:

- ✓ Investigar las debilidades y fortalezas de los camiones de transporte autónomo desde el punto de vista de la productividad de los camiones.
- ✓ Analizar preguntas como:
  - ¿Son los camiones autónomos más productivos?
  - ¿Cuáles son los aspectos importantes a tener en cuenta al momento de cambiar una mina antes de usar camiones autónomos?

### 1.4. Alcances

- ✓ Realizar simulaciones que permitan integrar las operaciones de carguío, transporte y vaciado de minerales como un solo sistema minero, el cual incorpora probabilidades y teoría de colas mediante simulación de eventos discretos.
- ✓ Se utilizaran datos encontrados en la literatura para la construcción del modelo.
- ✓ La programación y validación del modelo se realizara en ARENA.
- ✓ La asignación de los camiones a los equipos de carguío será en un frente estático. Por lo que estudio se realizara para una planificación a corto plazo.
- ✓ No se realizara un análisis económico del estudio realizado.
- ✓ El estudio de este trabajo es de carácter práctico.

### 1.5. Metodología

Para llevar a cabo el trabajo en cuestión, primeramente se identificarán los problemas operacionales y factores de rendimiento que razonablemente puedan influir en el cumplimiento de un determinado plan de producción de los camiones autónomos y los camiones manuales.



Se ajustarán posteriormente distribuciones de probabilidad a los datos recopilados, para introducirlas en los modelos de simulación (Camiones autónomos y manuales), que debe representar de la mejor manera posible la disposición funcional del sistema minero considerado.

Secuencialmente, los diferentes hitos a alcanzar durante el desarrollo del trabajo son los siguientes:

- ✓ Identificación de las variables y parámetros relevantes a utilizar en la simulación.
- ✓ Estudio exploratorio y ajuste de distribuciones de probabilidad de los parámetros.
- ✓ Construcción de un modelo de simulación capaz de reproducir el funcionamiento del sistema minero en estudio considerando:
  - Camiones autónomos.
  - Camiones manuales.
  - Camiones autónomos cambiando modalidad a camiones manuales.
- ✓ Análisis en el modelo de simulación del impacto en la productividad, provocado por las interferencias operacionales y distintas estrategias de operación para el modelo de simulación.
- ✓ Análisis de sensibilidad de variables influyentes en el modelo de camiones autónomos.
- ✓ Conclusiones y recomendaciones sobre el trabajo realizado.

# CAPITULO 2

## 2. Antecedentes

### 2.1. Historia de la automatización en la minería

En las últimas décadas, la minería ha ido perdiendo terreno en avances tecnológicos en comparación con otros sectores como la informática, medicina, industria, etc. (Bellamy, 2010). Es fácil apreciar que estos sectores constantemente se encuentran innovando en nuevas tecnologías para mejorar los procesos, mientras en la minería se ha optado por mejorar el tamaño de los distintos equipos mineros para mejorar la eficiencia del sistema en vez implementar nuevas mejoras.

Las principales causas de esta falta de innovación tecnológica se debe principalmente a:

- ✓ El tiempo requerido en el cual las nuevas tecnologías pueden ser desarrolladas y comercializadas. En la industria minera, los plazos de ejecución para desarrollar y comercializar nuevos equipos van del orden de 7 a 10 años. Esta cantidad de tiempo puede afectar el desarrollo del proyecto (Bartos, 2006).
- ✓ Generalmente se suele confundir la optimización de procesos con innovación tecnológica.
- ✓ Escaso personal dedicado a la investigación e innovación tecnológica. Son muy pocas las empresas mineras que poseen departamento internos de investigación e innovación (SONAMI, 2006).
- ✓ Poco interés por parte de las empresas mineras a crear acuerdos con las universidades (SONAMI, 2006).

Sin embargo frente a todos estos inconvenientes, el avance gradual de la automatización empezó en la década de 1960, de ahí a la actualidad se identifican 3 etapas de automatización minería (Konyukh, 2002).

- ✓ La primera de estas etapas corresponde a la inclusión de ferrocarriles mineros y perforación automatizada.
- ✓ La segunda etapa involucra equipos de extracción subterráneo contralados por control remoto (principalmente usado en minas de carbón). Estas máquinas estaban encargadas de extraer las capas de carbón delgadas por un control remoto.

- ✓ La tercera etapa llego a mediados de la década de 1990, cuando las grandes faenas especializadas en la minería del cobre, se vieron forzadas a implementar algunas técnicas desarrolladas para la minería del carbón, principalmente por el agotamiento de roca secundaria. Sin embargo, estas máquinas todavía eran dependientes de un operador humano, por lo que una verdadera automatización estaba fuera del alcance.

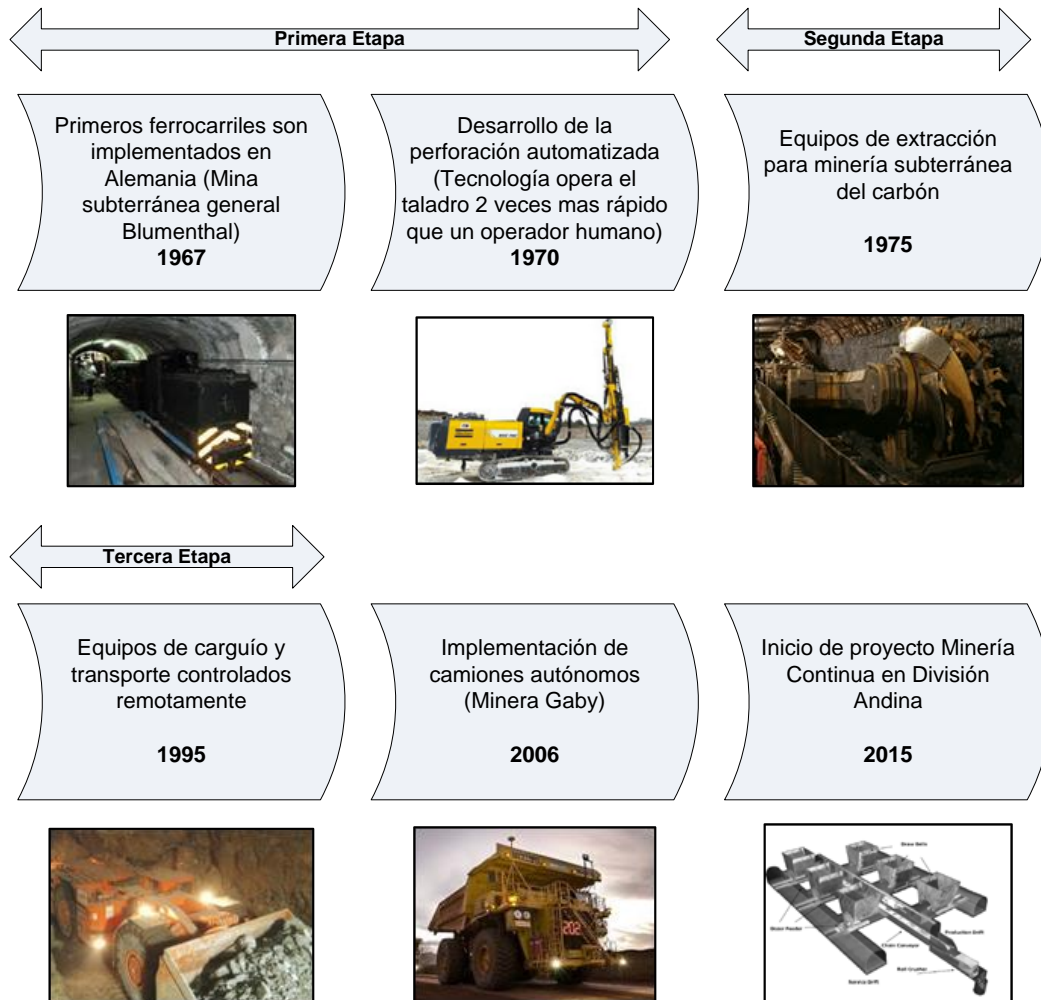


Figura 1: Historia de la automatización en la minería

La focalización por el uso de la automatización ha favorecido con mucho más ímpetu a la minería subterránea, los cambios en las minas a cielo abierto han sido más lentos debido a la complejidad de los entornos topográficos, así como también los obstáculos tecnológicos asociados al proceso de automatización efectiva. Usar este tipo de tecnología resulta complicado por el tamaño de los equipos mineros usados en estas faenas, donde también hay menores restricciones de movimientos y velocidades de operaciones más altas. Sin embargo, los continuos avances, combinados con las frecuentes negativas de trabajar en terreno por parte de los trabajadores y el aumento

de los costos de combustible y salarios, han llevado a acelerar la implementación autónoma para minería a cielo abierto.

La transición del cambio de estas tecnologías a equipos autónomos ha sido gradual, por ejemplo los camiones autónomos y otros equipos han sido probados por más de una década. Sin embargo, el amplio uso de estos equipos en las mineras aún no se ha convertido en una realidad, a pesar de que una gran cantidad de empresas tienen partes "automáticos" en sus operaciones. Para realizar los cambios necesarios, las empresas no solo necesitan automatizar, sino también cambiar la forma en que elaboran sus operaciones, gestionar el negocio y su personal, para este nuevo tipo de tecnología.

Los avances significativos, producto de estos desarrollos han proporcionado una gran oportunidad para las empresas mineras para probar nuevas formas de ver el negocio minero.

## 2.2. Camiones autónomos

La tecnología de Camiones Autónomos es un sistema informático y satelital desarrollado que se adapta a un vehículo minero y que utiliza una señal GPS (Global Positioning System). Junto a otras señales de apoyo en tierra, como sistemas de posicionamiento y navegación, que le permite al camión desplazarse y transportar cargas de manera independiente, es decir, sin la necesidad de operadores o de un tele comando remoto.

A su vez este tipo de camiones posee diferentes sub sistemas que hacen que el camión funciones por su cuenta.

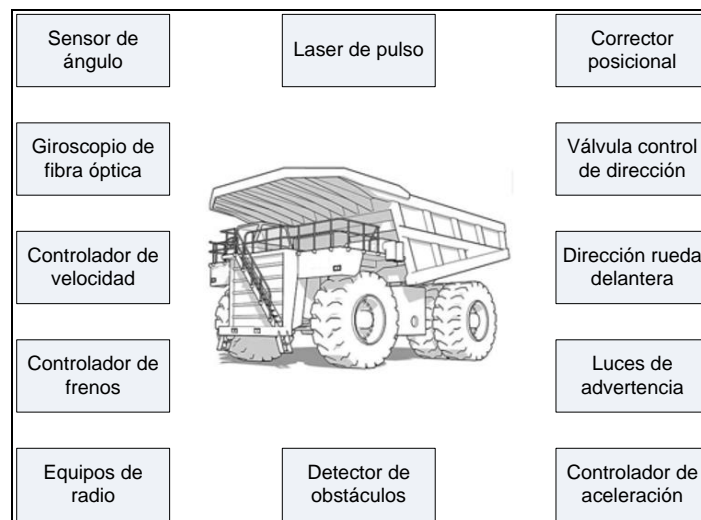


Figura 2: Principales Sub sistemas camiones autónomos (Parreira, 2013)

El sistema de transporte autónomo se describe como tecnologías que involucran información y comunicación tales como GPS de alta precisión y tecnología de

determinación de ubicación para su sistema de navegación, un sistema de detección de obstáculos, una red de comunicación inalámbrica y un sistema de gestión de flotas para controlar los camiones. La información acerca de la velocidad y ruta de acarreo es enviada inalámbricamente desde el sistema de gestión de flotas hacia los camiones en el traslado, mientras estos establecen su posición usando información del GPS, que es la tecnología clave para este tipo de equipos, dado que proporciona la información de localización de los camiones.

Para el carguío, el sistema de gestión de flotas guía a los camiones hacia el punto de carguío, basado en la posición del balde de la pala. Después de cargar, el sistema dirige al camión hacia su destino para su descarga.

Usando GPS y la red inalámbrica, el sistema de gestión de flotas controla la mayoría de los equipos de la mina, incluyendo otros equipos y vehículos operados por personas, para evitar colisiones, si el sistema de detección de obstáculos detecta otro vehículo o persona dentro del área de acarreo durante la operación autónoma, los camiones se detienen inmediatamente (Walker, 2014).

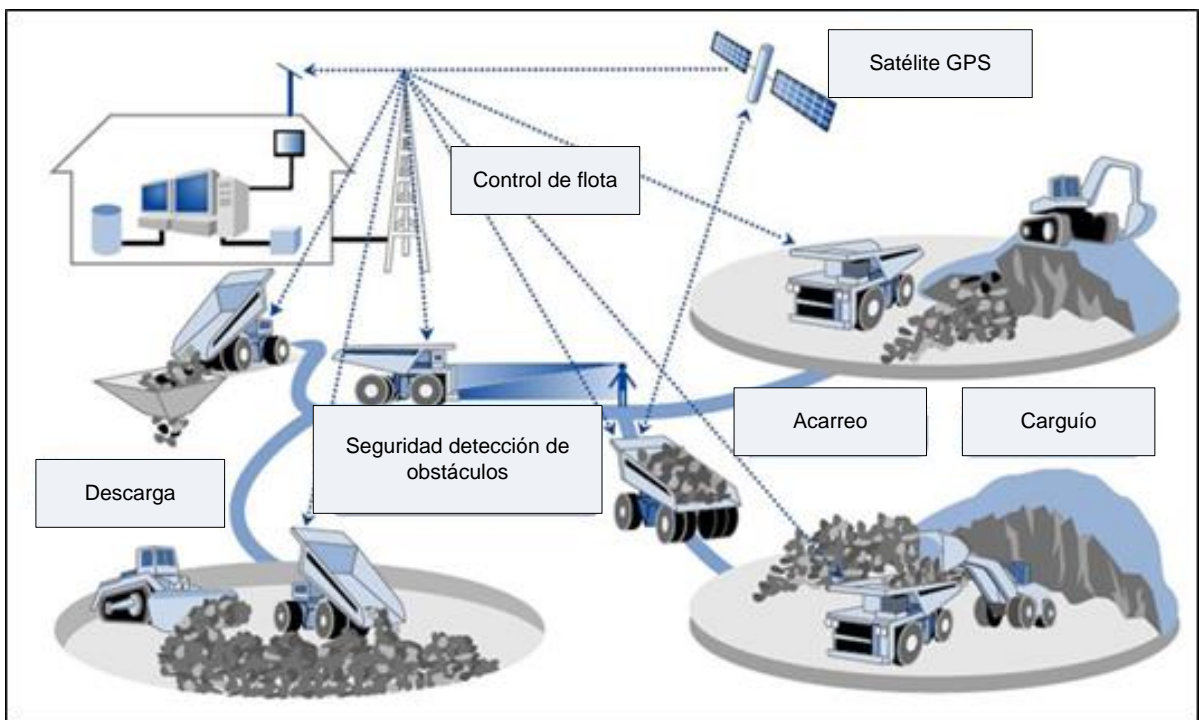


Figura 3: Lógica de los camiones autónomos (Meech, 2013)

### 2.2.1. Factores influenciados por los camiones autónomos

El concepto de camiones autónomos se ha estudiado por décadas, su implementación ha resultado muy difícil debido a los grandes riesgos del negocio minero (Parreira, 2013). Sin embargo, los proveedores de equipos y empresas mineras como

CODELCO y Rio Tinto han sido el impulso necesario para adquirir la experiencia y en parte evidenciar los factores que hoy en día afectan a la minería.

Los principales factores que han llevado a la adquisición de este tipo de camiones según un paper sobre el impacto de los camiones autónomos en Australia (Bellamy, 2010) son:

El primero de ellos es el aumento sustancial de la seguridad, el uso de estos camiones asegura la integridad del personal encargado del transporte, debido a que estos se encuentran fuera del alcance del proceso in situ, además por el sistema de detección de obstáculos, la conexión con los vehículos auxiliares permite aumentar la seguridad del sistema global, por otra parte el riesgo para los conductores siempre existe en algún grado debido a los peligros inevitables que existen en la actividad minera. Manejar un camión de extracción durante un turno de 12 horas en un ciclo regular es esencialmente una tarea tediosa. Esto desemboca rápidamente en somnolencia, la posibilidad de la falta de atención aumenta proporcionalmente, y allí el riesgo de cometer errores. Por lo tanto es lógico pensar que los conductores, especialmente en el turno de noche, son propensos a los errores relacionados con la fatiga con resultados en la mayoría de las ocasiones desfavorables para las víctimas.

Los costos son otro factor a considerar, ya que el costo de emplear a un grupo de choferes para conducir un camión las 24 horas es bastante elevado en estos tiempos. La cantidad de mano de obra se ve favorablemente disminuida para los camiones autónomos, solo operadores del mando de control de los camiones son necesarios, sin embargo, el proceso de capacitación para estas personas resulta más complejo y por ende se traduce en sueldos altos para estos supervisores, pero a pesar de todo eso, la gran diferencia radica en el capital de trabajo para cada sistema. Por otra parte el gasto de materias primas como el combustible también ha sido un factor relevante, las continuas fluctuaciones y alzas en los precios de los combustibles afectan de forma considerable los costos de la operación. Por seguridad y por programación, los camiones autónomos transitan a velocidades menores y más constantes que los manuales, esto se traduce en que para un mismo circuito los camiones autónomos aceleran en menor medida que los manuales, lo que a su vez permite reducir el consumo de combustible.

El tercer factor es que las faenas mineras están buscando reducir la dependencia de su personal debido al problema que existe con la insatisfacción del trabajo en lugares remotos. Esto significa constantes rotaciones de personal que provocan costos por los diferentes traslados. La escasez de operadores calificados también se está volviendo frecuente, el personal cada vez está siendo más difícil de conseguir y retener, lo que se traduce finalmente en un aumento de los costos.

Traduciendo lo anterior a números, John Meech, profesor de Ingeniería de Minas de la Universidad Británica de Columbia, predice que los beneficios de los sistemas de acarreo autónomas incluyen:

- ✓ Aumento de un 15 a 20% en la producción.
- ✓ Disminución de un 10 a 15% en el consumo de combustible.
- ✓ Disminución de un 5 a 15% en el desgaste de los neumáticos.
- ✓ Aumento del porcentaje de utilización de un 10 a 20%.
- ✓ Disminución del costo de mantención en hasta un 8%

Por otro lado existen ciertos inconvenientes en este tipo de tecnologías, el primero de ellos, es que el cambio de tecnología manual a autónoma no es a corto plazo, existe todo un tema de planificación y rediseño a considerar, lo que supone una inversión adicional a considerar. La empresas que han realizado pruebas con esta tecnología, es porque ven este sistema como un proyecto a largo plazo para implementarlo en nuevos proyectos.

El segundo aspecto tiene que ver con fallas y toma de decisiones percibidas por humano vs máquina, el operador percibe intuitivamente el entorno que lo rodea a diferencia de los camiones sin operador, el humano es capaz de percibir fallas imprevistas que en ocasiones especiales los autónomos no pueden detectar, a pesar del seguimiento de los sub sistemas del camión. La toma de decisiones ante diferentes eventos también sigue siendo un punto de inflexión. Mientras los manuales poseen múltiples decisiones, los autónomos se limitan a lo programado, restringiendo mucho más sus acciones.

El último aspecto, es la implementación del software para la programación del camión, existen situaciones en los cuales los camiones autónomos ejecutan acciones erróneas en el ciclo mismo, detenciones inesperadas, cambio en las velocidades e ineficiencias en los distintos procesos (carguío, descarga y aculatamiento) son solo alguno de los principales problemas que afectan al sistema computacional de los camiones. Lo anterior no quiere decir que existan errores en la programación, sino más bien que dentro de la operación misma pueden existir situaciones que no se encuentran dentro de la codificación del software.

### 2.2.2. Primeros proveedores de camiones autónomos

Los impulsores de estos camiones han sido principalmente los proveedores de equipos (Komatsu y Caterpillar). Como se dijo anteriormente los cambios de tecnología fueron gradualmente más lento en cielo abierto, esto gatillo en que las empresas mineras tomaron una posición estratégica en dejar que los proveedores asumieron la inversión, costos y desarrollo tecnológico de los camiones.

### 2.2.2.1 Komatsu

Según el gerente general de Komatsu (Takao Nagai), Komatsu ha estado investigando en camiones autónomos desde la década de 1970, los primeros ensayos se realizaron en una mina de carbón en Australia en el año 1995. En ese entonces los sistemas que controlaban los camiones, eran solo capaces de controlar a 4 camiones. Este problema se debía a la poca experiencia de Komatsu con la programación del Software. La solución a este problema de programación llegó en 1996, con la alianza de Komatsu con Modular Mining Systems (MMS).

En el año 2002, Takao Nagai confirmó un plan de desarrollo para la puesta en marcha de camiones autónomos en minas de mayores envergaduras. Luego de trabajar en el desarrollo de esta tecnología por 3 años, a principios del 2006 se probó una flota de 5 camiones autónomos 930E-AT en la mina Radomiro Tomic de CODELCO.



*Figura 4: Camión Komatsu 930E-AT utilizado en Radomiro Tomic*

Finalmente el año 2007, Komatsu realizó la entrega de 11 camiones autónomos a la división Gabriela Mistral de CODELCO, convirtiéndose en la primera venta de este tipo de productos al sector minero.

### 2.2.2.2 Caterpillar

La experiencia de Caterpillar con los camiones autónomos comenzó posteriormente a los primeros estudios realizados por Komatsu, en donde en el año 1996 se realizaron presentaciones públicas, presentaciones que adicionalmente sirvieron para la mostrar la intención de Caterpillar de hacerle competencia a Komatsu en el mercado de los camiones.

La siguiente etapa a destacar ocurrió en el año 2010, en la cual se realizaron pruebas con 4 camiones en una mina de carbón en Arizona. Al año siguiente 3 de esos camiones fueron enviados para realizar un ensayo de mayor envergadura en la mina de carbón Navajo de BHP Billiton. (Walker, 2014)





*Figura 5: Camión autónomo 777C de Caterpillar*

### 2.2.3. Implementación de camiones autónomos en Chile

En Chile la operación de estos camiones se inició el año 2006 en Radomiro Tomic de CODELCO, con una flota de 3 a 5, en el cual los camiones se cargaban con un cargador frontal hacia un botadero. Al ver la positiva interacción con el sistema establecido, CODELCO y Komatsu confirmaron que los camiones funcionaban.

El año 2007, por lo apretado que significaba económicamente el proyecto Gabriela Mistral y en parte por el equipo de trabajo encargado de llegar a Gaby, el cual era la mayora de Radomiro Tomic, se toma la decisión de operar la mina con camiones autónomos. La operación comenzó el año 2007 con 11 camiones, a diferencia de lo que se realizó en Radomiro Tomic se utilizó un sistema completo con perforadoras, palas, cargadores, en un circuito tanto hacia botadero como a chancador primario.

Entre los años 2007 y 2010, el personal de Gaby ratificó que los resultados mostrados por los camiones de Radomiro Tomic, no eran lo suficientemente aptos como para ser aplicados en Gaby, y en consecuencia el desarrollo de la mina se fue retrasando.

Las razones principales de estos retrasos era que la implementación de la tecnología autónoma no necesariamente se traducían en una continuidad de la operación (Navarrete, 2013), dado que el sistema también tiene influencias por la operación manual, también existían muchas falencias desde el punto de vista operativo (Detenciones innecesarias, ineficiencias en los procesos de carga y descarga, disminución de velocidad), pues en el fondo se estaba operando para el camión autónomo, en otras palabras, no se estaba planificando para el camión.

Debido a estos inconvenientes, durante algunos periodos del mes, los camiones autónomos se cambiaban de modalidad a manuales para cumplir con el plan de producción de finos de cobre. Las razones principales de realizar este cambio eran que los camiones podían circular a velocidades mayores y que también podían elegir zonas con mejores leyes a la hora de cargar los camiones. En los camiones autónomos es

necesario que el día anterior, una camioneta auxiliar realice una huella de seguimiento que marcara la ruta del camión autónomo.

En base a esto se realizó un estudio interno en donde se detectaron algunas falencias en el sistema, en las cuales se destacan (Navarrete, 2013):

- ✓ Los camiones tenían problemas en su sistema de radares, ya que los camiones se detenían bruscamente por alguna roca obstáculo en el camino.
- ✓ En la interacción con vehículos no automatizados (principalmente palas), los camiones no operaban de la forma más eficientemente posible. Los tiempos de carguío demoran muchos más de lo contemplado debido al aculatamiento de los camiones.
- ✓ El camión disminuía su velocidad en trayectos aptos topográficamente para una velocidad mayor a la programada por el camión.
- ✓ Los camiones se detenían en las rampas principales debido a que estas eran muy angostas para el sistema de detección de obstáculos, provocando en algunas ocasiones detenciones por el cruce de camiones, por lo que el diseño de las rampas se modificó.

El año 2011, la implementación de las mejoras al software de los camiones, trajo como resultados la continuidad operacional, pero también la productividad del camión fue menor (Navarrete, 2013), donde el factor rendimiento por las horas efectivas era menor al esperado, operativamente se logró un porcentaje de utilización de los camiones de hasta un 85%, sin embargo, el rendimiento de los camiones en esas horas efectivas no era el deseado.

El caso de Gaby lleva a reflexionar que la implementación de este tipo de camiones no es fácil, la división Gabriela Mistral se diseñó para ser operada con camiones manuales, por lo que sus rampas, caminos, espacio físico estaban pensadas para un sistema de camiones tripulados por humanos.

También el hecho de que se hayan probado los camiones en Radomiro Tomic, no garantizaba el mismo resultado en Gaby, cada en mina particular tiene sus propias restricciones geométricas y operativas que condicionan el sistema minero, y en consecuencia los resultados de nuevas tecnologías, no siempre son los esperados.

#### 2.2.4. Simulación de camiones autónomos (Parreira, 2013)

El estudio realizado por Parreira consiste en presentar un modelo estocástico/determinístico para comparar camiones autónomos y manuales, este modelo entrega como resultados algunos indicadores de rendimiento como: productividad,

seguridad, costos, consumo de combustible y desgaste de neumáticos. La mina contribuyente de los datos necesarios para el desarrollo del estudio es de carácter confidencial.

Para el desarrollo de las simulaciones, el modelo de los camiones consta de 4 sub modelos:

- ✓ Sub modelo de comportamiento del chofer para el sistema manual.
- ✓ Sub modelo de movimiento de los camiones.
- ✓ Sub modelo de consumo de combustible.
- ✓ Sub modelo de desgaste de neumáticos.

Los principales resultados de la investigación arrojaron que el uso de camiones autónomos implica:

- ✓ Un aumento en la producción de un 21.3 %.
- ✓ Menor consumo de combustible en un 5.3 %
- ✓ Menor desgaste de neumáticos en un 7.6 %.
- ✓ Menores tiempo de colas en un 28.7 %.
- ✓ Un aumento en la utilización efectiva de un 12.9 %.

Los resultados permiten aseverar una supremacía del sistema autónomo con respecto al manual para los indicadores de rendimiento analizados, los indicadores fueron medidos bajo distintos escenarios.

En los capítulos posteriores, se apreciara que una gran cantidad de datos que utilizados para la construcción del modelo de simulación de esta memoria, fueron extraídos de los estudios de Parreira. Esto debido a la falta de datos existentes sobre camiones autónomos y que además la información presentada por Parreira es uno de los pocos estudios serios realizado sobre camiones autónomos.

### **2.3. Conceptos fundamentales de la simulación**

En los últimos años, los nuevos y mejores desarrollos en el sector informático han traído consigo innovaciones importantes en la toma de decisiones y el diseño de los distintos procesos que afectan un sistema. En ese sentido, una de las técnicas de mayor impacto es la simulación. (García, 2006)

La simulación de procesos se puede definir como una herramienta que nos permite representar, imitar y recrear el funcionamiento de un sistema en particular cuando este evoluciona con el tiempo. Esta simulación nos permitirá poder, en primer lugar, entender el funcionamiento del sistema actual para luego poder plantear diversos escenarios y alternativas de mejora para el caso real.

### 2.3.1. Sistema

Se denomina sistema a un grupo de objetos o componentes que son unidos en una interrelación o interdependencia regular con el fin de cumplir un propósito. Desde el punto de vista de la simulación, tales objetos deben tener una frontera clara.

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

- ✓ Entidad: Las entidades son las representaciones de flujo de entrada en un sistema, son los elementos responsables de que el sistema vaya cambiando de estado. A su vez existen 2 tipos de entidades:
  - Dinámica: Corresponde a la entidad que se moviliza a través del sistema, son los elementos que son recibidos por los procesos.
  - Estática: La entidad estática sirve a otras entidades para que estas puedan circular por el sistema.
- ✓ Atributo: Elemento que describe las características de una entidad que la distingue de otra (por ejemplo, peso, ley, tamaño)
- ✓ Evento: Ocurrencia que indica cambia el estado del sistema. Puede cambiar el estado de los atributos, de las variables, o los resultados estadísticos. Los eventos se pueden catalogar dentro de dos tipos:
  - Eventos actuales: Son aquellos que están sucediendo en el sistema en un momento dado.
  - Eventos futuros: Cambios que se presentaran en el sistema después de haber transcurrido un determinado tiempo de simulación, condición específica de programación.
- ✓ Localizaciones: Se definen como todos aquellos lugares en donde las entidades entran a un determinado proceso para ser transformadas, procesadas o esperar a serlo.

- ✓ Recurso: Son aquellos objetos necesarios para llevar a cabo una operación dentro del sistema.
- ✓ Variables del estado del sistema: Son las variables que representan toda la información necesaria para definir en detalle lo que sucede en el sistema en un tiempo determinado. Generalmente son condiciones cuyos valores se crean por medio de ecuaciones y relaciones lógicas.
- ✓ Reloj de simulación: Es el contador tiempo de la simulación, y su función consiste en determinar cuánto tiempo es utilizado el modelo en la simulación, y cuanto tiempo en total se desea que dure el horizonte de simulación. En general, se habla de dos tipos de reloj de simulación:
  - Reloj de simulación absoluto: Tiempo que parte de cero y termina en un tiempo total de simulación definido.
  - Reloj de simulación relativo: Tiempo que considera el lapso de tiempo que transcurre entre dos eventos.

### 2.3.2. Tipos de simulación (García, 2006)

Existen distintos modelos de simulación que permiten representar el sistema simular. Estos modelos puede ser clasificados en modelos físicos y modelos matemáticos.

Los modelos físicos son aquellos que representan físicamente un sistema a escala. Estos son conocidos como: maquetas, prototipos, diseños pilotos etc.

Los modelos matemáticos representan un sistema en términos lógicos y relaciones cuantitativas que son programadas coherentemente para conocer cómo reacciona el modelo bajo distintos escenarios. Un modelo matemático puede ser examinado y estudiado bajo 2 perspectivas: La solución analítica o la simulación.

Las soluciones analíticas son modelos cuyos niveles de complejidad son aceptables en los cuales el uso de papel y lápiz pueden ser necesarios para su resolución, en caso que el modelo requiera herramientas más avanzadas para encontrar la solución se necesitaran simulaciones a través de recursos computarizados.

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

- ✓ En función del tiempo
  - Estático: Son los modelos de un sistema en un instante de tiempo en particular.
  - Dinámico: Son aquellos modelos en los que el estado del sistema que se está analizando cambia respecto al tiempo.

- ✓ En función de la aleatoriedad de los datos
  - Determinístico: Modelos que no usan variables aleatorias. Para cada conjunto de datos de entrada, existirá solamente una respuesta.
  - Estocástico: Modelos que utilizan distribuciones de probabilidad de una o más variables aleatorias. En este escenario sólo se puede estimar la respuesta.
  
- ✓ En función a las variables de estado del sistema
  - Discreto: Son los modelos en los cuales el comportamiento del sistema puede representarse por medio de ecuaciones evaluadas en un punto determinado.
  - Continuo: Son los modelos en los cuales las variables de estado cambian continuamente respecto al tiempo. Su comportamiento se encuentra definido por medio de ecuaciones diferenciales.

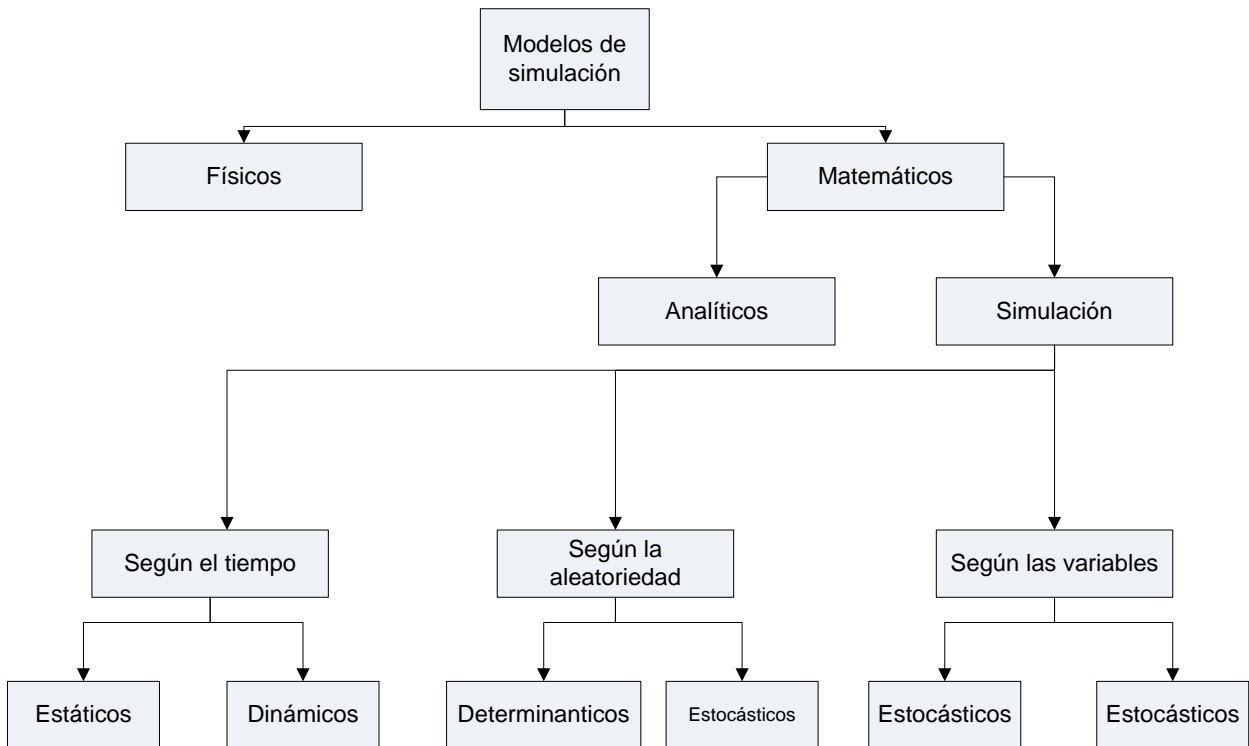


Figura 6: Modelos de simulación

### 2.3.3. Ventajas y desventajas de la simulación

Dentro de las ventajas y desventajas más comunes que ofrece la simulación se pueden resaltar las siguientes (García, 2006):

Tabla 1: Ventajas y desventajas de la simulación

Ventajas	Desventajas
Es un método directo y flexible, además existe un amplio abanico de programas y lenguajes destinados a simular.	Una buena simulación puede resultar muy complicada, debido al gran número de variables.
Cuando el modelo matemático es demasiado complicado la simulación permite obtener una aproximación, incluso resolviendo problemas que no tienen solución analítica.	La simulación no genera soluciones óptimas globales.
La simulación permite formular condiciones extremas con riesgos nulos, sin afectar a la realidad.	No proporciona la decisión a tomar, sino que resuelve el problema mediante aproximación para las condiciones iniciales.
Permite estudiar la interacción entre las diferentes variables del problema. Prediciendo las consecuencias que tendrá una decisión determinada.	Cada simulación es única, interviene el azar.
En la actualidad, los paquetes de softwares para simulación tienden a ser más sencillos, lo que facilita su aplicación.	Aunque muchos paquetes de software permiten obtener el mejor escenario a partir de una combinación de variaciones, la simulación no es una herramienta de optimización.
Gracias a las herramientas de animación que forman parte de muchos de esos paquetes es posible ver como se comportara un proceso una vez mejorado.	Se requiere bastante tiempo para realizar un buen estudio de simulación; por desgracia, no todos los analistas tienen la disposición de esperar ese tiempo para obtener una respuesta.
Es más económico realizar un estudio de simulación que hacer muchos cambios en los procesos reales.	Es preciso que el analista domine el uso de paquetes de simulación y que tenga sólidos conocimientos de estadística para interpretar los resultados.
La simulación suele ser utilizada también con una perspectiva pedagógica para ilustrar y facilitar la comprensión de los resultados que se obtienen mediante las técnicas analíticas.	La solución de un modelo de simulación puede dar al análisis un falso sentido de seguridad.
No es necesario interrumpir las operaciones de la compañía.	Los resultados de simulación son numéricos; por tanto, surge el peligro de atribuir a los números un grado mayor de validez y precisión.

## 2.4. Software Arena

El software ARENA es un programa de simulación perteneciente a Rockwell Software orientado al proceso, donde además se tienen herramientas que permiten describir el desarrollo completo de cierta entidad que fluye dentro de un sistema.

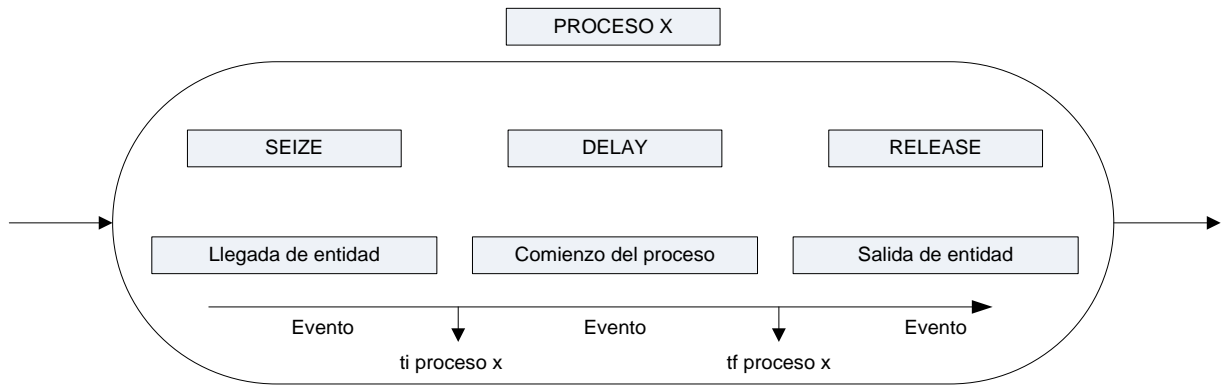


Figura 7: Descripción ARENA

Como la orientación de ARENA es el proceso en sí, el desarrollo de modelos se estructura sobre una base grafica asociada a la construcción de diagramas de flujo (David Kelton, 2004), que describirán los pasos a seguir por las entidades conforme avanza en el modelo de simulación.

La estructura jerárquica de ARENA, se presenta como una herramienta de alto nivel (asistido gráficamente) pero con una capacidad de alcanzar un alto grado de flexibilidad al permitir modificar directamente el código de programación.

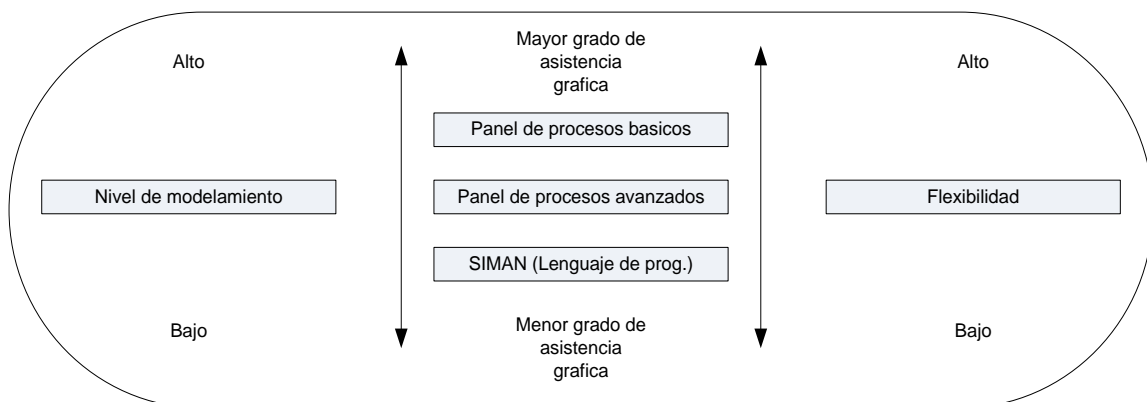


Figura 8: Estructura jerárquica de ARENA



## 2.5. Disponibilidad y Utilización efectiva (Lagos, 2007)

Uno de los resultados que se espera de la simulación es estimar la disponibilidad y utilización de los camiones, es por eso que para no generar confusiones acerca de la ambigüedad que estos términos representan para algunas empresas se utilizarán los siguientes significados basados en la norma Asarco. La descripción de tiempos y la distribución de estos se muestran en la tabla 2

Tabla 2: Distribución de tiempos para disponibilidad y utilización

Tiempo nominal						
Tiempo disponible				Fuera de servicio		
				Programadas	Imprevistos	
Tiempo operativo				Reserva		
Tiempo efectivo	Pérdidas operacionales	Demoras				
		Programadas	No programadas			

- ✓ Tiempo nominal (TN): Tiempo durante el cual el equipo se encuentra físicamente en faena.
- ✓ Fuera de servicio (TFS): En este ítem se encuentran los tiempos destinados para mantenencias programadas y algunos imprevistos de los equipos.
- ✓ Tiempo disponible (TD): Tiempo en el que el equipo es habilitado y en buenas condiciones para ser operado.
- ✓ Reserva (TR): Tiempo en donde el equipo estando en condiciones mecánicas no es utilizado en labores productivas, ya sea por falta de operador o sobrepoblación de equipos en ese momento.
- ✓ Tiempo operativo (TO): Corresponde al tiempo que el equipo se funcionando con normalidad en la faena.
- ✓ Tiempo efectivo (TE): Tiempo que el equipo se encuentra realizando solo labores de producción, es decir, no se encuentra en colas. Realiza la tarea para la cual fue adquirido.
- ✓ Pérdidas operacionales (TPO): Tiempo en donde el equipo se encuentra esperando en pala y/o chancado para camión, y espera por camión para palas.
- ✓ Demoras programadas (TDP): Tiempo de detención programada, cambios de turno, almuerzos, tiempos de descanso.
- ✓ Demoras no programadas (TDNP): Tiempo de detención no programada, principalmente petróleo y acomodos o limpiezas de caminos.

A partir de las descripciones de los tiempos se definen los siguientes índices operaciones para disponibilidad y utilización:

- ✓ Disponibilidad Mecánica (DM): Fracción porcentual del tiempo nominal en que el equipo se encuentra en condiciones mecánicas para operar.

$$DM = \left[ \frac{TN - TFS}{TN} \right] \times 100$$

- ✓ Utilización efectiva (UE): Fracción porcentual del tiempo disponible en donde el equipo se encuentra netamente en producción.

$$UE = \left[ \frac{TD - TPO - TDP - TDNP}{TD} \right] \times 100$$

# CAPITULO 3

## 3. Modelo de simulación

Como parte de la metodología de investigación, se desarrolló un modelo de simulación discreta para estudiar la operación de camiones autónomos y manuales en una determinada faena minera chilena. Esto, con el fin de comparar el desempeño de ciertos indicadores de rendimiento de los dos sistemas de transportes. El modelo se enfocara principalmente en 4 focos de modelación.

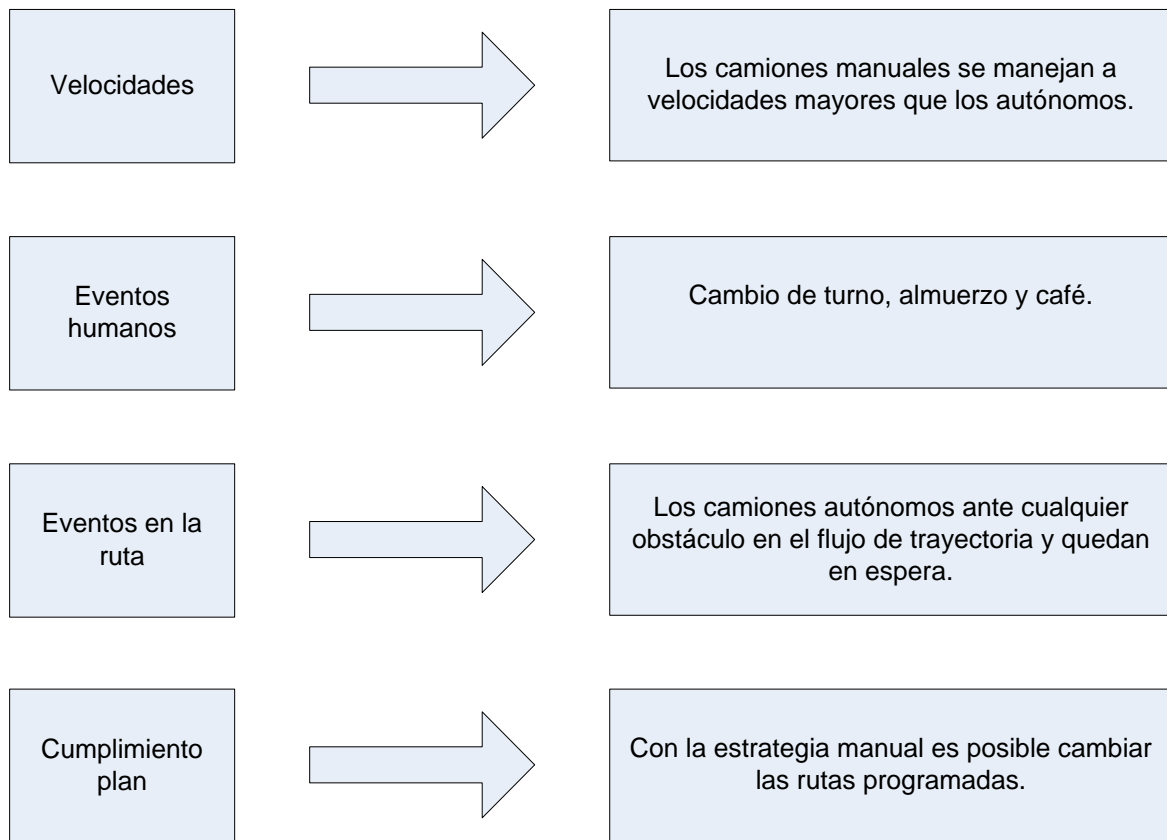


Figura 9: Elementos principales de modelación

Se enfocara en esos parámetros, ya que son los principales puntos en los cuales se pueden encontrar diferencias para poder realizar los estudios.

Las velocidades son distintas para cada tipo de camión, el manual transita a velocidades mayores debido a la variabilidad de un chofer a otro, el autónomo se guía por la seguridad del circuito, es decir trata de mantener una velocidad constante y con menor riesgo de accidentes. Por otra parte los eventos asociados a cada sistema pueden resultar significativos en los resultados de las simulaciones, los manuales presentan

mayores demoras programadas que los autónomos, en contra parte los autónomos se encuentran expuestos a mayores demoras no planificadas puesto que su sensibilidad hacia el entorno es mayor.

El ultimo tópico es un ejercicio netamente teórico, en donde de acuerdo al rendimiento de los camiones utilizados en el modelo, es posible construir un plan de producción teórico, y partir de ese plan, estimar el cumplimiento que cada sistema puede lograr con sus parámetros de entrada.

### 3.1. Descripción global del sistema a simular

Como ya se ha mencionado anteriormente esta investigación tiene como objetivo desarrollar un modelo del sistema de carguío y transporte para camiones autónomos y manuales de una operación minera a cielo abierto, todo esto con el fin de comparar los dos sistemas de transportes. El modelo será uno solo, en el cual se variara los parámetros de acuerdo al sistema de transporte a simular.

El modelo considera una operación minera en que se utilizan recursos y locaciones mostrados en la tabla 3.

*Tabla 3: Recursos y locaciones principales*

Recursos y locaciones
17 camiones (280 t)
2 palas
1 cargador frontal
1 chancador primario para la descarga del mineral
1 botadero para el material estéril
1 stockpile para el remanejo
1 parking de camiones para la mantención y otros servicios

El sistema de manejo de materiales consistirá en 10 camiones destinados a un frente de carguío para producción y 7 camiones para un frente de carguío a botadero, en el cual el registro de tiempo empieza desde el cambio de turno para manuales y abastecimiento de combustible para autónomos. Una vez que el camión se encuentra en el frente de carguío, el equipo de carguío puede estar cargando a otro camión, en caso de que esto ocurra, el camión que acaba de llegar deberá esperar un tiempo en cola para ser atendido.

Cuando el camión sea requerido por la pala, deberá realizar las maniobras de aculatamiento para poder colocarse en posición. Una vez posicionado, deberá esperar a que se realice el proceso de carguío, luego de esto el camión deberá retirarse del frente y dirigirse hacia un punto de permiso. En el punto de permiso, si el camión viene del frente de producción deberá entrar a un nodo de decisión en el cual si existen 5 camiones o más esperando en cola en el chancador primario se dirigirá al stockpile, en caso contrario ira al chancador primario.

Para el sistema hacia botadero los camiones se dirigirán directamente hasta descargar el estéril. Al llegar al destino, los camiones realizarán las respectivas maniobras de acuatamiento en la zona específica en la cual se disponga a descargar el material. Seguidamente los camiones inician el proceso de descarga, el cual consiste en levantar la tolva para el descenso del mineral o estéril por gravedad.

Finalmente luego de finalizar el proceso de descarga se retrae la tolva y se procede a retornar al frente de carguío establecido para realizar un nuevo ciclo. Este proceso se repite durante todo el día en 2 turnos de 12 horas para los camiones manuales.

La *Figura 10* muestra de manera esquemática los diagramas de flujo que se generan en la operación compuesta.

### **3.2. Identificación de entidades, recursos, atributos y variables de estado**

#### 3.2.1. Entidades

Las entidades del sistema serán los 17 camiones que transportan el mineral o estéril a sus destinos respectivos.

#### 3.2.2. Recursos

En el sistema se tendrán dos tipos de recursos:

- ✓ 3 equipos de carguío asignados para cargar los camiones según las siguientes asignaciones:
  - Pala 1 asignada para la frente de producción.
  - Pala 2 asignada para la frente de estéril.
  - Cargador frontal 1 para el remanejo localizado en el stockpile.
- ✓ 1 chancador primario para iniciar el procesamiento del mineral.

#### 3.2.3. Locaciones

El modelo tiene las siguientes locaciones:

- ✓ Punto de carguío producción (PC1).
- ✓ Punto de carguío estéril (PC2).
- ✓ Punto de descarga de remanejo de mineral (Stockpile).
- ✓ Punto descarga de mineral (Chancador primario).
- ✓ Punto de descarga de estéril (Botadero).

- ✓ Punto de mantención y servicios para los camiones (Parking).
- ✓ Punto de permiso en el cual los camiones eligen una ruta de acuerdo a una condición de colas.

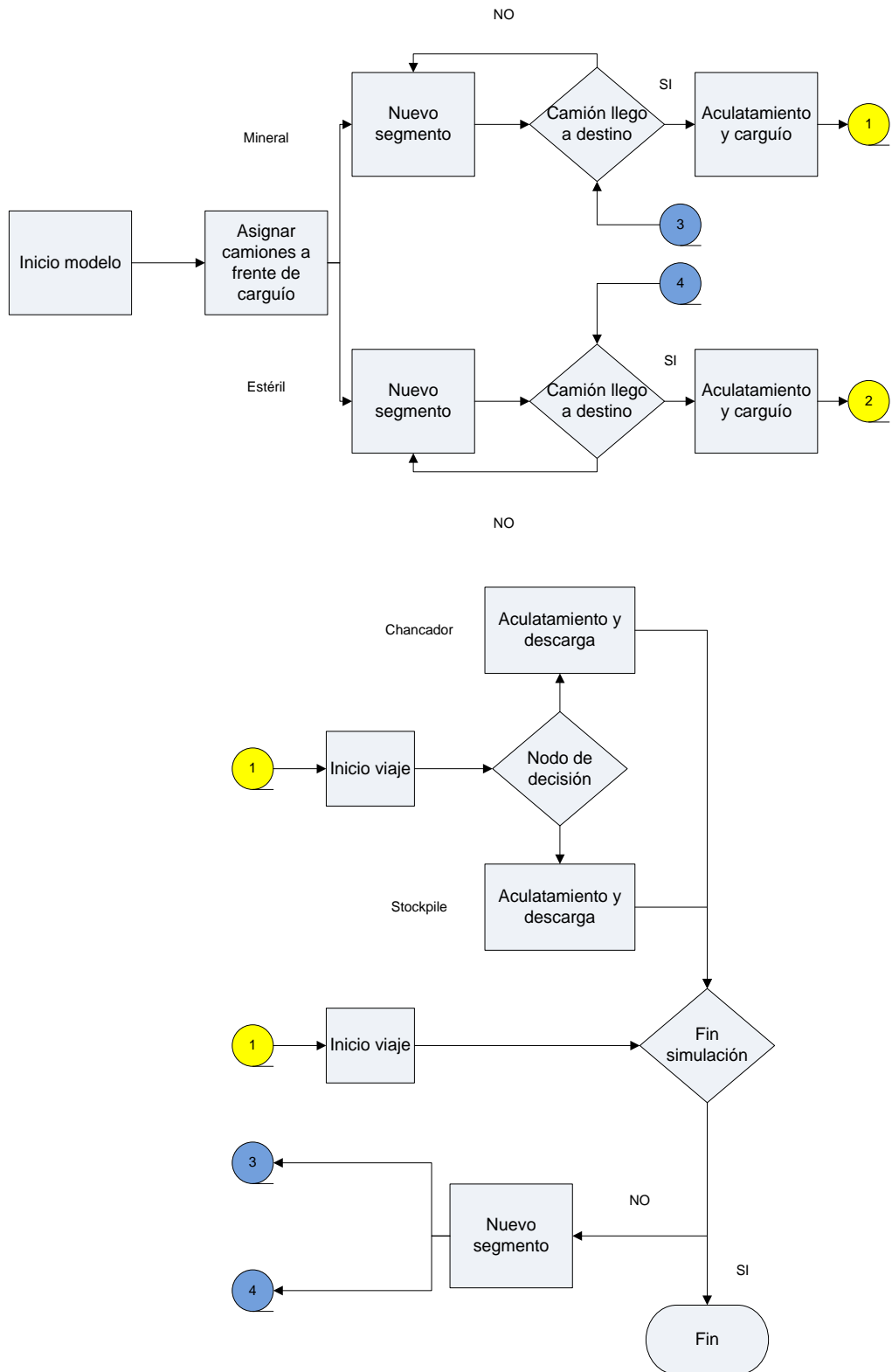


Figura 10: Diagrama de flujo modelo de simulación

### 3.2.4. Atributos

Los camiones, es decir, las entidades tienen como atributo un número de camión, a su vez este número de camión determinará la ruta programada.

Tabla 4: Atributo número de camión

Atributo	Valor	Destino
Tipo camión	1	PC1
Tipo camión	2	PC1
Tipo camión	3	PC1
Tipo camión	4	PC1
Tipo camión	5	PC1
Tipo camión	6	PC1
Tipo camión	7	PC1
Tipo camión	8	PC1
Tipo camión	9	PC1
Tipo camión	10	PC1
Tipo camión	11	PC2
Tipo camión	12	PC2
Tipo camión	13	PC2
Tipo camión	14	PC2
Tipo camión	15	PC2
Tipo camión	16	PC2
Tipo camión	17	PC2

Los camiones cuyo valor del atributo “Tipo camión” sea desde 1 hasta 10 estarán designados para ir al frente de producción, los restantes deberán realizar la ruta desde el frente de estéril a botadero.

La velocidad también fue asignada como un atributo para los camiones, la *Tabla 5* muestra las velocidades medias de los 2 tipos camiones cuando los camiones se encuentran transitando cargados, vacíos, y subiendo debido a las pendientes.

Tabla 5: Velocidades medias de los camiones (Parreira, 2013)

Nombre Atributo	Manual[km/hr]	Autónomo[km/hr]
Horizontal cargado[hc]	35	25
Horizontal vacío[hv]	25	16.6
Subiendo[vs]	25	16.6

Estas velocidades corresponden a valores encontrados en estudios de camiones autónomos y manuales con características similares a las utilizadas en esta memoria.

### 3.2.5. Demoras generadas por colas

- ✓ Espera por colas generadas en la pala 1 (FIFO).



- ✓ Espera por colas generadas en la pala 2 (FIFO).
- ✓ Esperas por colas generadas en la pala 3 (FIFO).
- ✓ Esperas por colas generadas en el chancador (FIFO).
- ✓ Esperas por colas generadas en los distintos segmentos (FIFO).

### 3.2.6. Eventos que modificaran la rutina de los camiones

Alguno de los eventos que modificaran la rutina de los camiones son el cambio de camiones de estéril hacia el stock pile, esto solo ocurrirá para el sistema manual y vendrá dado por un criterio de decisión que se explicara más adelante. También otro evento a considerar será el cambio de modalidad del sistema autónomo a manual, en los antecedentes se detalló que la cultura de uso en Chile con camiones autónomos es cambiar de modalidad a manual, esto por el no cumplimiento del plan de producción. Este evento también será causado por un criterio de decisión relacionado con el cumplimiento de un plan al igual que el evento anterior.

### 3.2.7. Variables sobre medidas de desempeño de la simulación

Las medidas de desempeño a estudiar se eligen en función de las variables que se pretenden comparar para los sistemas de camiones autónomos y manuales. De esta forma, el modelo de simulación entrega información suficiente para hacer un análisis de la productividad de la operación y la desviación de los resultados operacionales en comparación con los planes de producción. La información más relevante obtenida del modelo es la siguiente:

- ✓ Cantidad de camiones que cargan en cada una de las palas.
- ✓ Cantidad de camiones que descargan en cada una de las localizaciones respectivas.
- ✓ Tonelaje total de mineral transportado por los camiones.
- ✓ Tonelaje total de estéril transportado por los camiones.
- ✓ Distancia total recorrida por camiones cargados.
- ✓ Distancia total recorrida por camiones descargados.
- ✓ Déficit de tonelaje asociado a un plan de producción.
- ✓ Porcentaje de cumplimiento asociado un plan de producción.
- ✓ Tiempo de demoras programadas y no programadas por cola asociada a cada camión.

### 3.3. Layout del modelo

La construcción del modelo se diseñó para modelar una parte de una minera en Chile, la cual operara con camiones Komatsu 930E-4 tanto para el sistema autónomo como manual. Por otra parte se eligieron 5 rutas principales en las cuales circularan los camiones para los distintos eventos:

1. Carguío 1 producción – Chancador primario.
2. Carguío 1 producción – Stockpile.
3. Carguío 1 producción – Parking.
4. Carguío 2 Estéril – Botadero.
5. Carguío 2 Estéril – Parking.

Las rutas hacia el parking se utilizaran para la mantención de los camiones, reabastecimiento de combustible o también para cambios de turno, almuerzos y descansos (operación manual).

La *Figura 11*, muestra la ubicación de las áreas de carguío, chancador primario, botadero, parking y stockpile durante el periodo en el cual se realizaron los estudios. El mapa también muestra las intersecciones de los camiones, por ejemplo al salir del proceso de carguío, camiones de estéril y producción comparten la misma ruta hasta un punto de permiso para su respectivo destino. Existe otra intersección en el tramo entre los camiones en movimiento desde y hacia el chancador primario y los que se desplazan desde y hacia el parking.

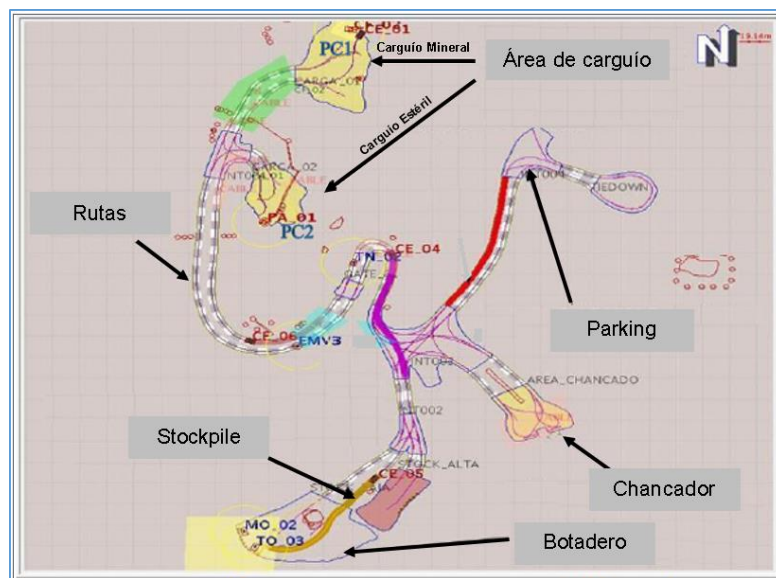


Figura 11: Layout del modelo (Navarrete, 2013)

Es importante mencionar que el *layout* de la mina utilizado corresponde a una versión modificada (Ubicación de parking) de una operación minera real en Chile. En el cual se consideró una zona específica de la mina para el desarrollo de las simulaciones.

La siguiente tabla muestra las longitudes de las rutas y la fracción de la ruta en la cual los camiones suben. Además cada una de estas rutas tiene asociado un número de segmentos en el cual el camión ya sea autónomo o manual variara su velocidad de acuerdo al tramo.

Tabla 6: Longitud de las rutas

Ruta	Distancia[km]	% de la ruta con inclinación
Parking - Punto de carguío 1	1.98	18
Parking - Punto de carguío 2	1.83	18
Chancador - Punto de carguío 1	1.49	15
Punto de carguío 1 - Chancador	1.35	13
Punto de carguío 1 - Stockpile	1.38	13
Stockpile - Punto de carguío 1	1.48	15
Punto de carguío 2 - Botadero	1.32	13
Botadero - Punto de carguío 2	1.46	15
Botadero - Parking	0.86	18
Stockpile - Parking	0.65	18
Chancador - Parking	0.64	18

### 3.4. Aspectos estocásticos del modelo

#### 3.4.1. Tiempos de carga y descarga de los camiones

La simulación considera los procesos de carga, transporte y descarga de los camiones, donde la duración de los procesos de carga y descarga se representa por medio de distribuciones de probabilidades triangular con parámetros según se muestran en la tabla 6.

Adicionalmente, para el caso de las palas, al tiempo de carga se le deben sumar 120 segundos en caso en que el camión entre directamente al sitio de carga sin pasar por espera de la pala. Se hace esta consideración debido al tiempo de aculatado de los camiones en el sitio de carga, en caso de estar en la fila el aculatado se realiza durante la carga del camión anterior.

Tabla 7: Distribución tiempos de carga y descarga de camiones.

Tiempo (segundos)	Mínimo	Promedio	Máximo
Carguío Pala	90	130	170
Descarga Chancador	100	140	170
Descarga Botadero y Stockpile	120	180	200

### 3.4.2. Mantenimiento de los camiones

Por otro lado, la mantención de los camiones también es considerada en el modelo como distribuciones basadas en los tiempos medios de fallas del estudio realizado por Parreira.

En el modelo, cuando ocurre una falla aleatoria, el camión se dirige al parking después de la descarga en el chancador, botadero o stockpile. En la *Tabla 8* muestra el tiempo medio entre fallos (distribución uniforme) y tiempo medio de la mantención (distribución triangular) asociada a cada falla utilizada en el modelo.

Tabla 8: Retrasos de mantención (Parreira, 2013)

Demoras	Tiempo entre eventos(horas)			Tiempo medio de demora(min),		
	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo
Mantención						
Menor	-	3	6	3	19	58
Mayor	-	126	252	360	840	1440

### 3.4.3. Demoras por almuerzo, cambio de turno y descansos

En el modelo manual, los retrasos humanos (cambio de turno, almuerzo y descanso) son considerados bajo los siguientes supuestos:

Cada conductor tiene:

- ✓ 2 paradas para baño o descanso de 15 minutos por turno
- ✓ Almuerzo/Cena de 1 hora por turno
- ✓ Cambio de turno de 1 hora cada 12 horas

Tabla 9: Retrasos debido a almuerzo, café y cambio de turno (Parreira, 2013)

Descanso	Hora programada en el turno	Duración(hora)
Almuerzo	6	1
Café o baño	3 y 9	0.25
Cambio de turno	12	1

Es necesario tener en cuenta que los descansos por café y almuerzo no son constantes. Por ejemplo si un camión se encuentra en mantención, el conductor tendrá tiempo libre para descansar, por lo que el modelo asume que el conductor ya ocupó ese tiempo para realizar su respectivo descanso. Lo mismo sucede con un fallo aleatorio cerca del horario de almuerzo, si la mantención es cercana o mayor a 1 hora, el modelo automáticamente descartará la opción de almuerzo para el camión en mantenimiento. Para el cambio de turno el sistema seguirá la misma lógica.

Finalmente cabe destacar que los conductores solo podrán ir al parking después de realizar los procesos de descarga, si el camión se encuentra en alguno de los procesos de carguío, deberá esperar hasta descargar el mineral o estéril en los puntos específicos, para poder dirigirse hacia el parking por cualquier evento.

#### 3.4.4. Reabastecimiento de combustible

Para el reabastecimiento de combustible se asumirá que cada camión inicia la simulación con el tanque lleno, además para el sistema manual el reabastecimiento se considerará dentro del cambio de turno, no así para los autónomos que utilizarán una distribución triangular con un tiempo promedio de 13 minutos para completar el evento.

Tabla 10: Retraso por reabastecimiento de combustible (Parreira, 2013)

Demora	Tiempo entre eventos(horas)	Tiempo medio de demora(min)		
		Mínimo	Promedio	Máximo
Reabastecimiento	24	5	13	27

La diferencia en el criterio radica en que para los camiones manuales, el reabastecimiento de combustible es posible realizarlo dentro del cambio de turno (1 hora), por lo que el tiempo de demora asociado al reabastecimiento se encuentra incluido dentro de esa hora programada. En cambio en los autónomos se debe tener un evento exclusivamente relacionado al reabastecimiento de combustible, puesto que el sistema no presenta el evento asociado a un cambio de turno.

### 3.4.5. Detención de los camiones en rutas

El modelo considera retrasos por condiciones del terreno en las rutas de transporte, de acuerdo a un porcentaje de probabilidad de que ocurra un evento que interrumpa el flujo normal. Este sub modelo de sistema de detención de obstáculos será diferente en cuanto al porcentaje de ocurrencia para camiones autónomos y manuales. Esto se debe a que los camiones autónomos poseen un sistema de sensores que les permite detectar cualquier condición anómala en el camino según el grado sensorial del sistema, esto provoca que la mayoría de los camiones autónomos se detengan con mayor frecuencia ante un obstáculo o desperfecto de ruta que los camiones manuales. En el sistema manual los camiones, si es posible, esquivarían el obstáculo debido a que pueden manejar distintas decisiones para una misma ruta.

Tabla 11: Demoras por eventos en la ruta

Demora	% de probabilidad de ocurrencia por segmento	Tiempo medio de demora(min)		
		Mínimo	Promedio	Máximo
Eventos en la ruta(Autónomo)	1.5	10	15	20
Eventos en la ruta(Manual)	0.5	10	15	20

### 3.4.6. Factor de carga y ley media

El factor de carga de los camiones también vendrá dado por una distribución de probabilidad triangular.

Tabla 12: Factor de carga

Parámetro	Mínimo	Promedio	Máximo
Factor de carga[Ton/camión]	260	280	290

## 3.5. Horizonte de simulación

El horizonte de simulación del modelo es de 31 días de operación, en el que no se consideran interrupciones de ningún tipo (huelgas, detenciones por mal tiempo, accidentes etc...). Esto, se debe a que el objetivo de la investigación es determinar las diferencias en productividad de los dos sistemas y su cumplimiento en relación al plan de producción diario debido al uso de diferentes estrategias para los camiones.

### 3.6. Principales criterios de decisión

#### 3.6.1. Sistema de permiso

La primera toma de decisiones que deberán realizar los camiones autónomos y manuales será en el punto de permiso, donde dependiendo del número de camiones en cola en el proceso de chancado, irán hacia el stockpile o chancador.

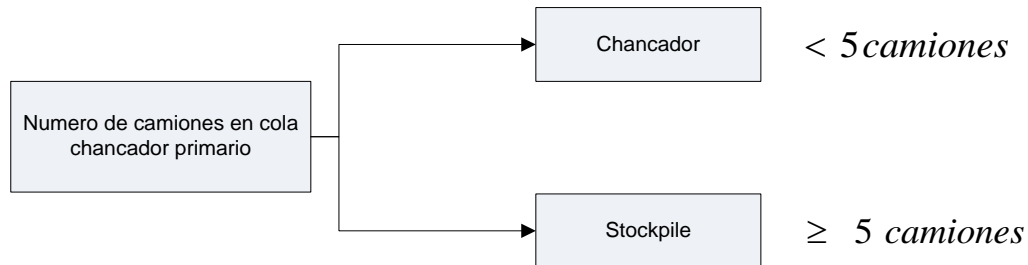


Figura 12: Criterio de decisión sistema de permiso

Cada camión de producción que llegue al sistema de permiso deberá entrar en esta toma de decisión.

#### 3.6.2. Decisión de ir hacia el parking

Los camiones cada cierto tiempo deberán ir hacia el parking por distintas razones. En el caso de los camiones manuales principalmente por mantención, reabastecimiento de combustible, almuerzos, cambio de turnos y descansos. Los camiones autónomos deberán trasladarse hacia el parking por reabastecimiento de combustible, mantención y cambio de modalidad a sistema manual.

Todos los camiones del sistema deberán pasar por este nodo de decisión, específicamente después de que cada camión realiza el proceso de descarga en stockpile, botadero o chancador primario.

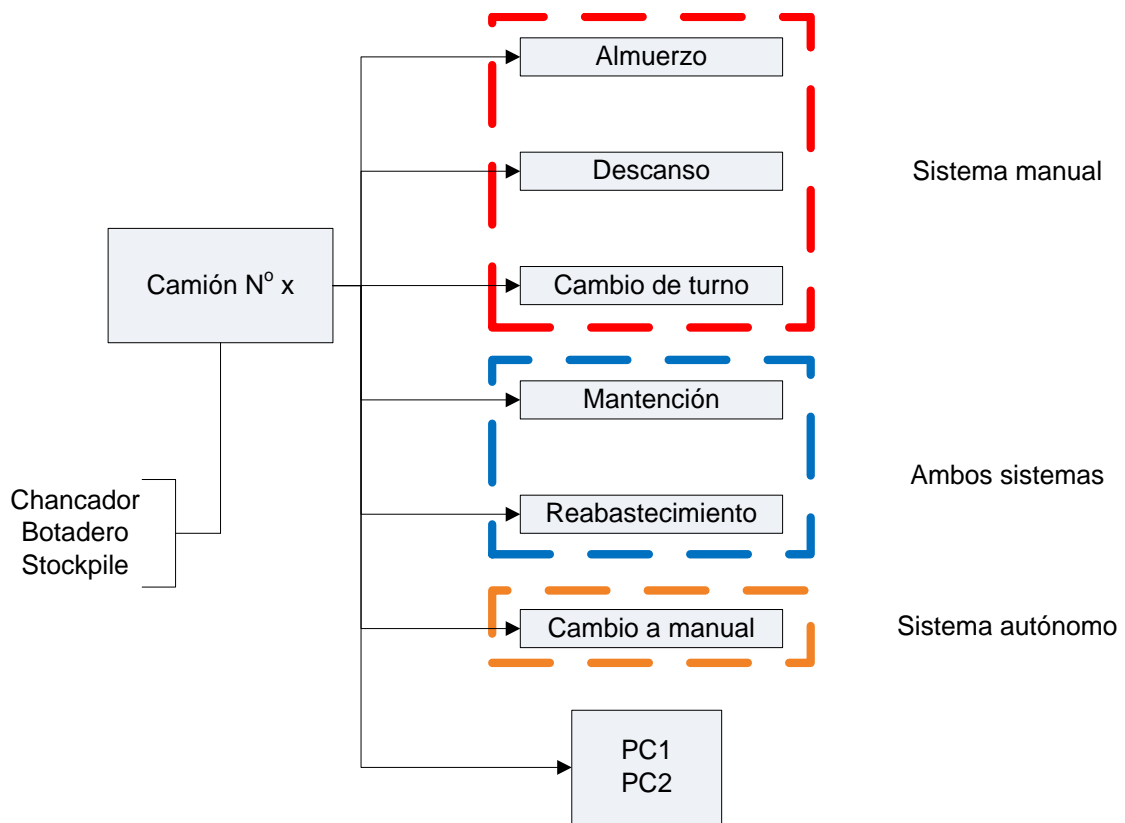


Figura 13: Criterio de decisión parking

Desde el punto de vista de la modelación, cada uno de estos eventos está asociado a la creación de entidades estática, cuando ocurre un evento que requiere la movilización de un camión al parking es por la creación de alguna otra entidad dentro de un submodelo de creación de entidades, esta entidad se crea y sale del sistema, haciendo que el proceso de creación sea cíclico.

### 3.6.3. Cambio en camiones de estéril por camiones de producción

Si el déficit acumulado para cada día no cumple con la condición descrita, los camiones de estéril señalados se dirigirán hacia el stockpile, cambiando su ruta programada a stockpile – chancador primario, este cambio en la programación se mantendrá hasta el final de la simulación.

Mientras la simulación se esté realizando, la variable de desempeño déficit de tonelaje se estarán calculando. Este déficit estará asociado a un plan mensual de producción objetivo propuesto en la presente memoria que se muestra en la *Tabla 13*.

A partir del día 20, 21, 22 y 23 del mes de simulación, un camión de estéril por día deberá pasar por un nodo de decisión de acuerdo al criterio que se muestra en la *Figura 14*



Tabla 13: Parámetros plan de producción

Plan de producción	
Toneladas por día	140,000
Toneladas mensuales	4,340,000

La razón principal de porque este cambio solo afecta al sistema manual, es que actualmente en la cultura de uso de los camiones autónomos se tienen mayores dificultades para realizar decisiones cortoplacistas. Mientras el operador manual busca las zonas con mejores leyes para cumplir el plan debido al déficit, el autónomo debe seguir la ruta programada del día, por otra parte en esta investigación no se encuentra considerado el tiempo requerido para cambiar la ruta programada para los camiones autónomos. Por lo que el criterio solamente se aplicara al sistema manual.

#### 3.6.4. Cambio en la modalidad de sistema autónomo a manual

A modo de ejemplo, la cultura de uso de los camiones autónomos en la división Gabriela Mistral era cambiar el sistema autónomo a manual debido a los problemas mostrados en los antecedentes, este cambio también estará condicionado en el modelo autónomo.

A diferencia del criterio sobre el cumplimiento de un plan, se realizara una simulación con camiones autónomos en los 31 días, y otra cambiando de modalidad autónoma a manual a partir del día 20 en el reloj de simulación.

A partir de ese cambio, los 17 camiones se dirigirán hacia el parking para realizar la transición de sistemas, esto será tomado en cuenta en el modelo como un cambio de turno, una vez realizado el cambio, los camiones deberán retornar a sus destinos según su atributo “número camión”, a excepción los camiones de estéril, que una vez realizado el primer ciclo de descarga deberán realizar el criterio explicado en el punto 3.6.3.

#### 3.6.5. Parámetros del simulador

En las simulaciones reportadas se definieron los siguientes parámetros en el simulador Arena:

- ✓ Replicas por escenario: 100.
- ✓ Duración de la simulación: 1,860 horas (31 días de producción).
- ✓ Unidad de tiempo base: Minutos.

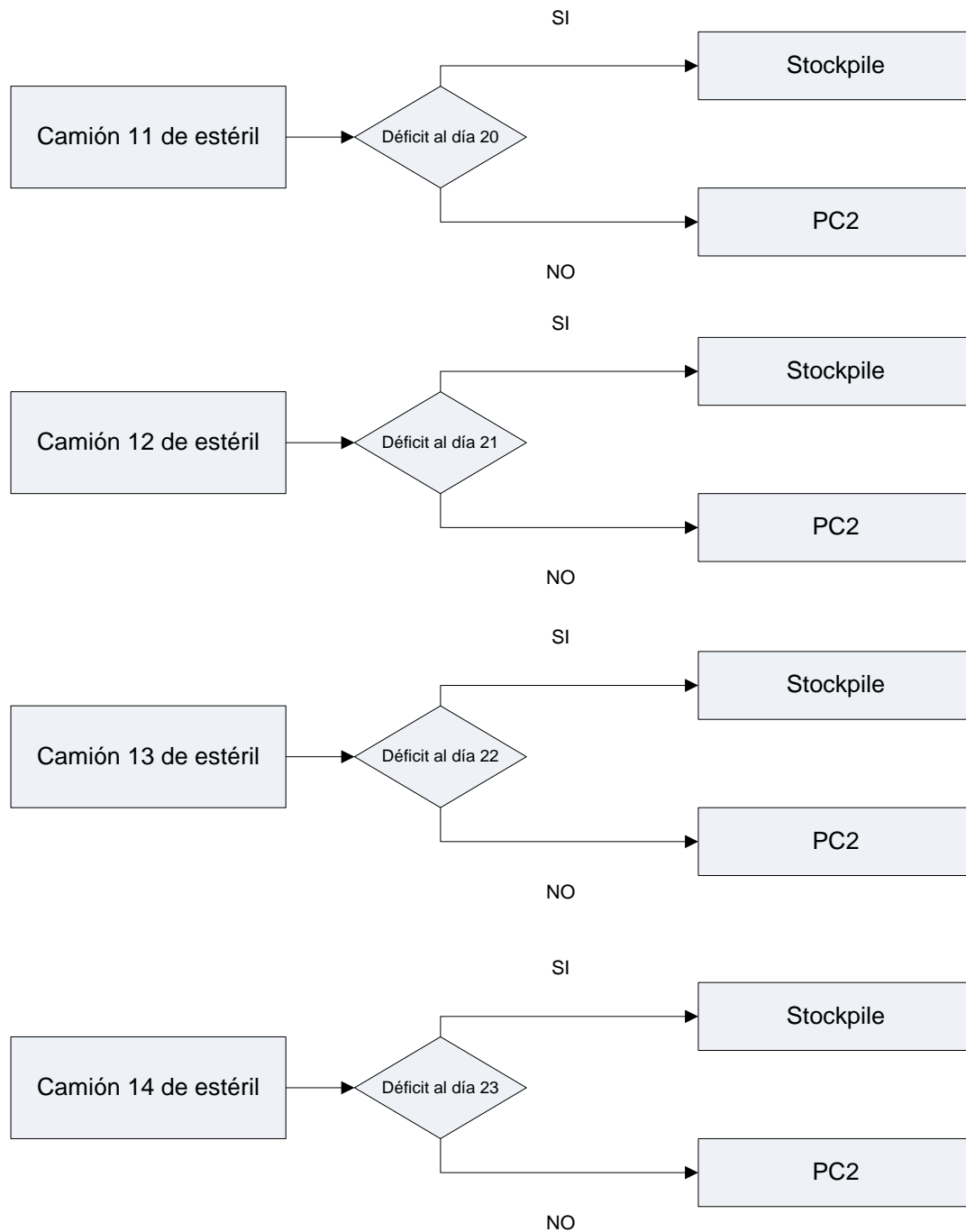


Figura 14: Criterio de decisión a stockpile

### 3.7. Verificación modelo de simulación

Debido a falta de datos para la validación y calibración del modelo con respecto a una faena en operación que contenga camiones autónomos, se verificara el modelo de la siguiente manera para comprobar su robustez y consistencia.

- ✓ Corroborar que el flujo de las entidades sea el mismo flujo que realizan los camiones en la realidad.
- ✓ Análisis de sensibilidad de algunos parámetros (velocidad, disminuir número de camiones) del modelo, de modo que sea consecuente al cambiar los parámetros.

# CAPITULO 4

## 4. Resultados

A continuación se presentan los resultados del sistema manual c/remanejo y camiones autónomos. Los parámetros de entrada en el modelo son las velocidades de los camiones y el porcentaje probabilidad de detención por segmentos.

Además de lo anterior se mostraran dos análisis de sensibilidad del sistema autónomo, específicamente con los parámetros de entrada señalados, y en los que se pretende analizar la influencia que ejercen estas variables sobre la producción y las demoras por cola de los camiones.

La comparación entre los demás escenarios de simulación (autónomos y manuales sin remanejo se muestran en el capítulo de anexos.

### 4.1. Comparación sistema manual c/remanejo y camiones autónomos.

#### 4.1.1. Producción

La producción y el porcentaje de cumplimiento del plan de los dos sistemas se presentan en el *Grafico 3*

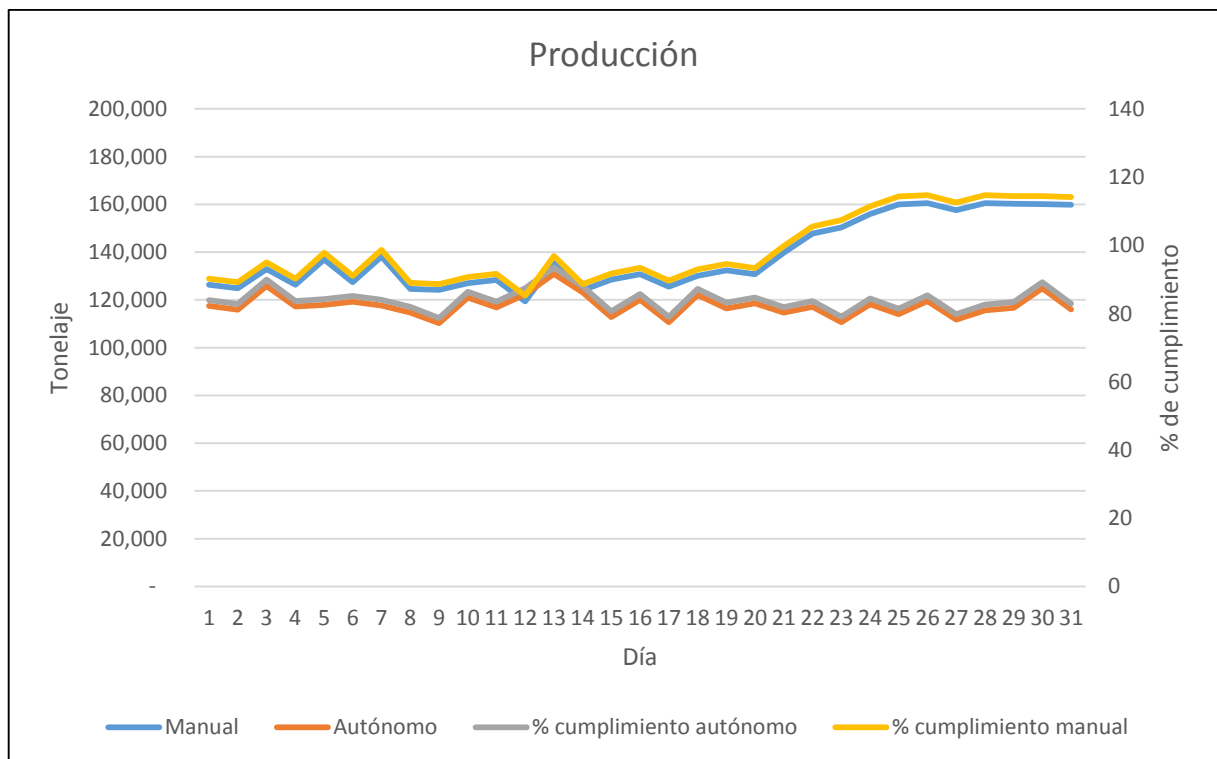
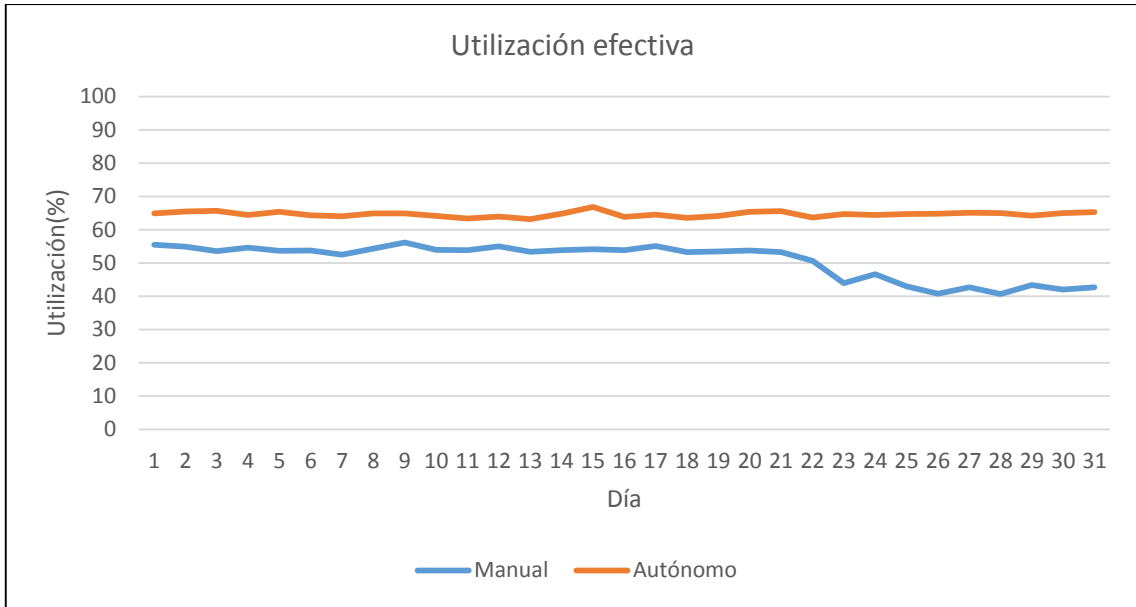


Grafico 3: Comparación producción de los dos sistemas

#### 4.1.2. Utilización efectiva

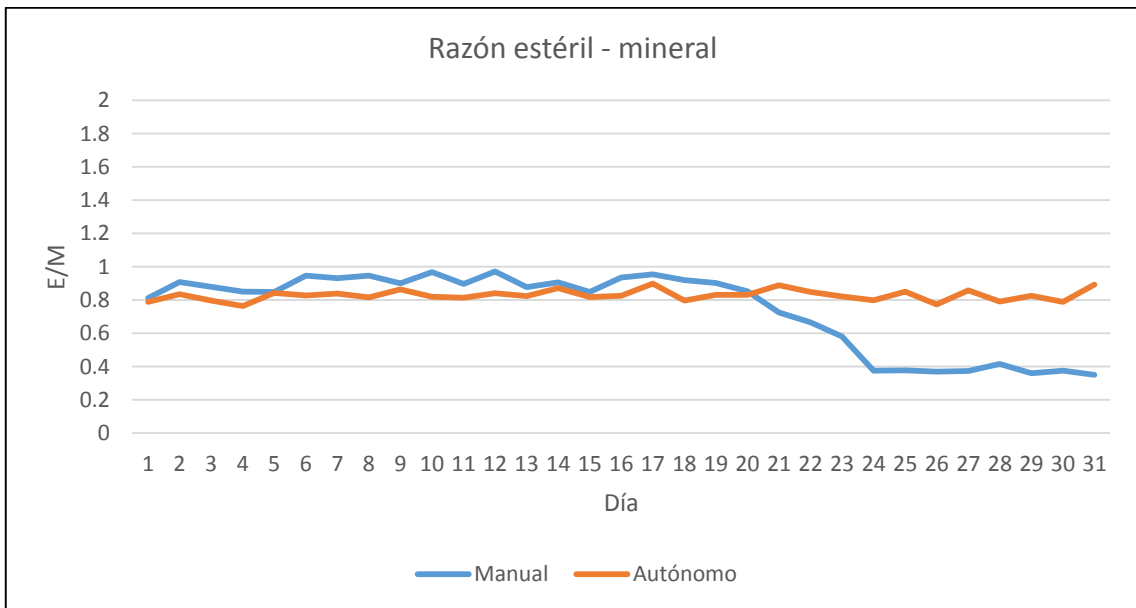
La utilización efectiva de los camiones se muestra en el *Gráfico 5*:



*Gráfico 4: Comparación utilización efectiva*

#### 4.1.3. Razón estéril – mineral (E/M)

La razón E/M fue otra de las variables de desempeño calculados por el modelo de simulación tal como se presenta en el *Gráfico 6*



*Gráfico 5: Comparación razón E/M*

#### 4.1.4. Demoras por cola

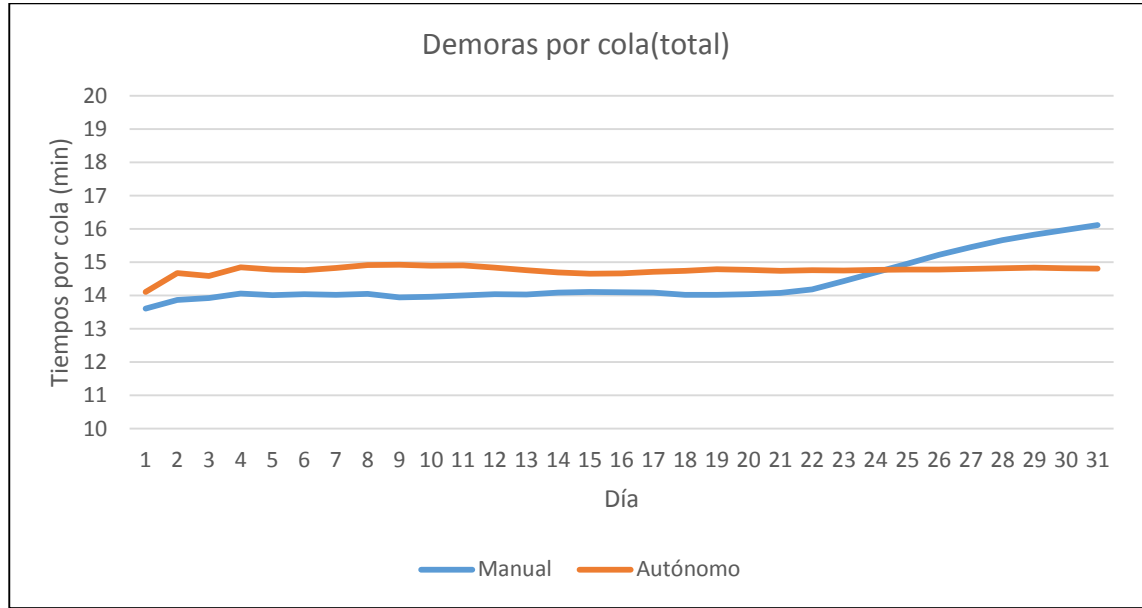


Figura 15: Comparación demoras por cola

Las demoras de los procesos que interactúan con los camiones se muestran en la *Tabla 13*

Tabla 14: Comparación demoras por cola

Cola	Parámetro	Manual	Autónomo
Pala 1	Tiempo de espera	5.81	5.63
	Flota en espera	1.89	1.74
Pala 2	Tiempo de espera	3.42	3.36
	Flota en espera	0.95	1.05
Pala 3	Tiempo de espera	0.18	-
	Flota en espera	0.01	-
Chancador	Tiempo de espera	5.17	4.76
	Flota en espera	1.71	1.41
Total	Tiempo de espera	14.59	13.75

#### 4.1.5. Resumen principales resultados

En la *Tabla 15* se muestran el resumen de los resultados obtenidos de la simulación de sistemas autónomos y manuales c/remanejo, donde también se muestra la diferencia porcentual de los camiones autónomos con respecto a los manuales.

Tabla 15: Resultados principales Manual c/remanejo - Autónomo

	Manual c/remanejo	Autónomo		Diferencia %
<b>Movimiento mina [ton]</b>				
Tonelaje chancador primario/día	138,291	117,752		-14.85
Tonelaje a botadero/día	100,421	97,485		-2.92
Movimiento total/día	238,712	215,237		-9.83
E/M	0.7	0.8		11.51
<b>Demoras por cola [min]</b>				
Pala 1	5.8	5.6		-3.13
Pala 2	3.4	4.3		25.67
Pala 3	0.2	-		
Chancador primario	5.2	4.8		-7.97
Total	14.6	14.7		0.69
<b>Utilización[%]</b>	50.7	64.66		27.43
Horas efectiva/día	12.18	15.52		27.43
<b>Kilómetros recorridos</b>				
Camión cargado	32,879	32,621		-0.79
Camión descargado	47,050	40,396		-14.14
Total				
<b>Tiempo de ciclo [min]</b>				
Chancador primario	16.95	16.36		-3.49
Botadero	9.24	9.19		-0.59
<b>Nro. de ciclos/día</b>				
Chancador primario	499.97	425.52		-14.89
Botadero	358.65	348.16		-2.92
<b>Cumplimiento</b>				
Tonelaje	98.78	84.11		-14.85
Déficit tonelaje	-52,978	-689,684		1201.83

Notar que los camiones autónomos muestran una mejora (+27.43%) en la utilización efectiva con respecto a los camiones manuales, esto se debe principalmente a la diferencia que existe entre las demoras programadas y en un menor grado los tiempos de cola para cada tipo de sistema.

Mientras en el sistema autónomo las demoras programadas son mínimas, básicamente mantención planificada y reabastecimiento de combustible, en el sistema

manual se tienen adicionalmente pérdidas por demoras programadas debido a requerimientos humanos.

Si bien los tiempos totales de demoras por cola aumentan en un 0.68 % en los autónomos, los tiempos por cola para la tura pala 1 – chancador disminuye en un 5.45% lo que favorece en algún porcentaje la utilización efectiva, pero sin duda el factor relevante para establecer la influencia en utilización son las demoras programadas.

Con respecto a la producción, los camiones autónomo muestran una disminución de un 14.85%, esto debido principalmente a las menores velocidades que estos presentan y también a los retrasos en los caminos.

La distancia total recorrida por los camiones se ve favorecida en el sistema autónomo en un 9.46 % más que los camiones manuales, esto por el hecho de que los camiones autónomos necesitan ir una menor cantidad de veces al parking.

## **4.2. Análisis de sensibilidad sistema autónomo**

A partir de la variación de los inputs del modelo, se mostrara la sensibilidad en las principales variables de desempeño descritas anteriormente.

### **4.2.1. Velocidades**

El *Grafico 6* indica la variación porcentual de la velocidad de los camiones, este cambio afectara de la misma forma a los tres tipos de velocidades que influyen en el sistema.

El caso base corresponde a:

- ✓ Horizontal cargado [hc] = 25 km/hr
- ✓ Horizontal vacio [hv] = 16.6 km/hr
- ✓ Subiendo [vs] = 16.6 km/hr

Donde el eje de las abscisas se muestra variación porcentual que experimentan los 3 tipos de velocidades con respecto al caso base descrito anteriormente. El eje de las ordenadas indica los deltas porcentuales asociados a esos cambios de velocidades para la producción y demoras por colas del caso base.

Se destaca en el grafico que se produce una saturación de producción del sistema a un 15% de variación con respecto a los casos bases de las velocidades anteriores. Eso se corrobora con el aumento casi lineal de las demoras por cola.



### Análisis de sensibilidad velocidad

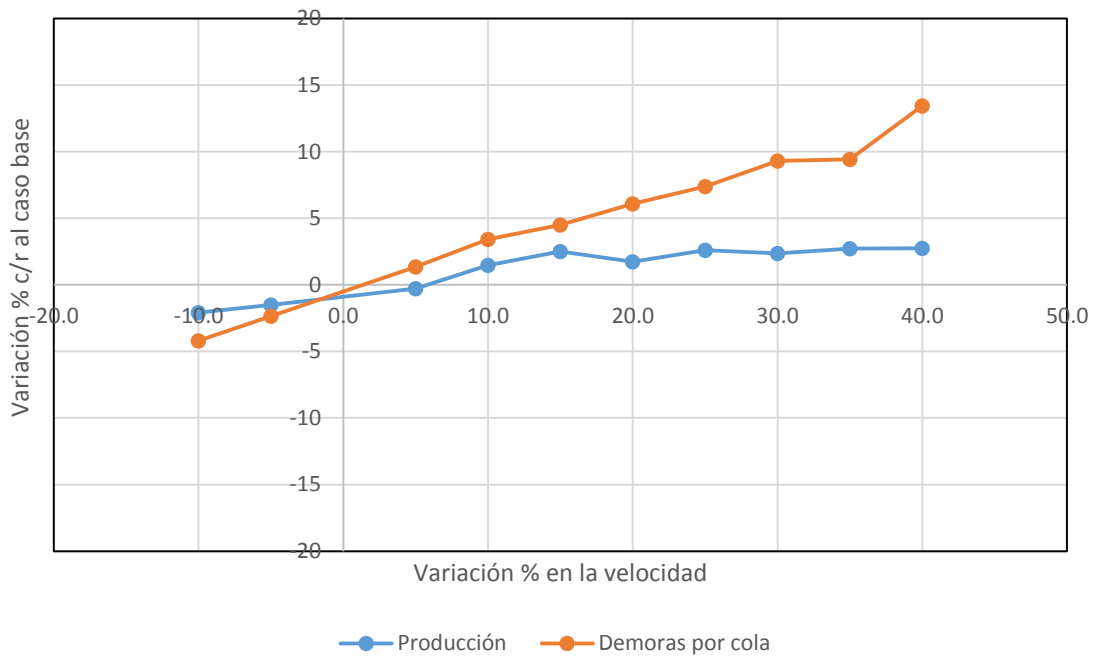


Gráfico 6: Análisis de sensibilidad de velocidad

Tabla 16: Resumen análisis de sensibilidad de detención por segmentos

Variación %	Velocidad	Velocidad simulada	Tpd	Demoras por cola	Variación producción	Variación colas
-10	hv	22.5	115,293	14.14	-2.09	-4.19
	hc	14.94				
	vs	14.94				
-5	hv	23.75	115,979	14.41	-1.51	-2.33
	hc	15.77				
	vs	15.77				
5	hv	26.25	117,419	14.96	-0.28	1.35
	hc	17.43				
	vs	17.43				
10	hv	27.5	119,489	15.26	1.47	3.42
	hc	18.26				
	vs	18.26				
15	hv	28.75	120,712	15.43	2.51	4.51
	hc	19.09				
	vs	19.09				
20	hv	30	119,813	15.66	1.75	6.09
	hc	19.92				
	vs	19.92				
25	hv	31.25	120,828	15.85	2.61	7.38
	hc	20.75				
	vs	20.75				
30	hv	32.5	120,550	16.13	2.38	9.31

Variación %	Velocidad	Velocidad simulada	Tpd	Demoras por cola	Variación producción	Variación colas
	hc	21.58				
	vs	21.58				
35	hv	33.75	120,970	16.15	2.73	9.42
	hc	22.41				
	vs	22.41				
40	hv	35	120,983	16.74	2.74	13.44
	hc	23.24				
	vs	23.24				

#### 4.2.2. Probabilidad de detención por segmento

Como se explicó en el punto 3.4.5, tanto el sistema autónomo como manual se encuentran asociado a un evento de detención por segmento debido a un imprevisto en la ruta. En el caso de los camiones autónomo este % porcentaje es mayor debido a la sensibilidad que tienen sobre su entorno.

El Grafico 7 muestra el análisis de sensibilidad de la detención por segmentos, el caso base corresponde una probabilidad de detención de 1.5 % por segmento.

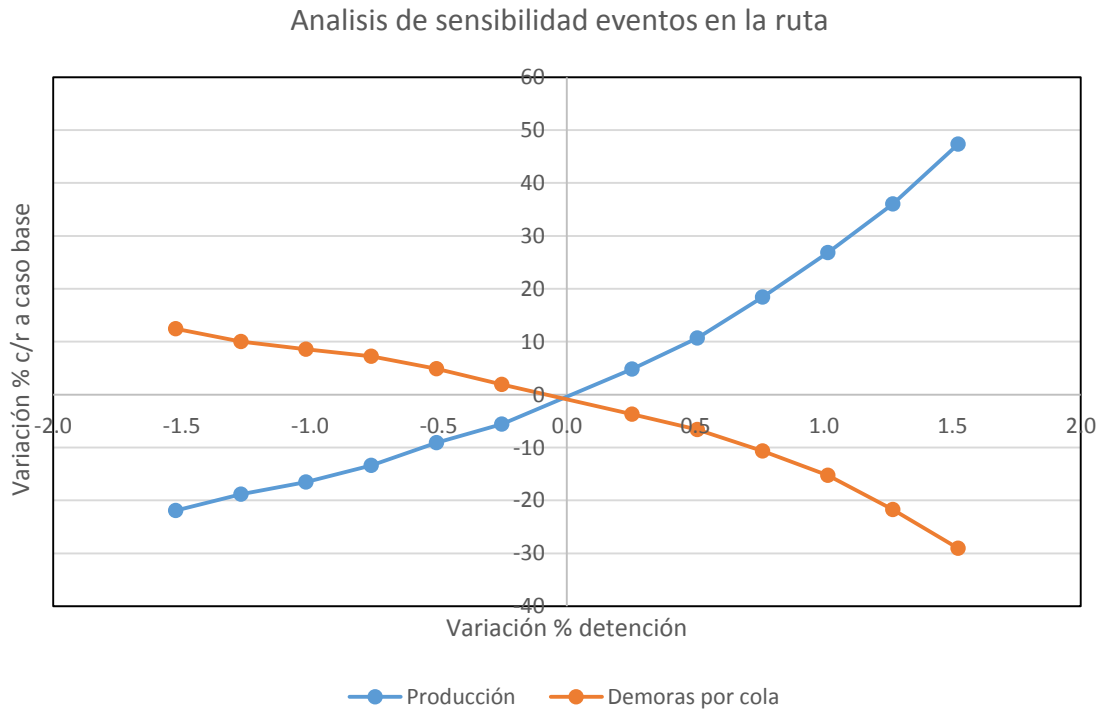


Grafico 7: Análisis de sensibilidad detención por segmentos

En el eje de las abscisas se muestra el cambio porcentual con respecto al caso base de los camiones autónomos. Por otra parte en el eje de las ordenadas se muestra el cambio porcentual obtenido para la producción y demoras por cola del caso base.

Las dos curvas mostradas en el grafico se encuentran correlacionadas debido a este cambio en la sensibilidad de los camiones. Esto puesto que mientras los camiones se detengan con menor frecuencias en los distintos segmentos y transiten a las mismas velocidades del caso base, las los tiempos de cola disminuirán, conllevando una mejor productividad en el sistema.

*Tabla 17: Resumen análisis de sensibilidad de detención por segmentos*

Probabilidad de detención	Variación porcentual detención	Tpd	Demoras por cola	Variación % producción	Variación % colas
3	-1.5	91,939	16.60	-21.92	12.46
2.75	-1.27	95,587	16.24	-18.82	10.00
2.5	-1.02	98,273	16.02	-16.54	8.56
2.25	-0.76	101,999	15.83	-13.38	7.22
2	-0.51	107,050	15.48	-9.09	4.91
1.75	-0.25	111,209	15.05	-5.56	1.94
1.25	0.25	123,439	14.21	4.83	-3.69
1	0.51	130,341	13.78	10.69	-6.61
0.75	0.76	139,462	13.19	18.44	-10.67
0.5	1.02	149,331	12.51	26.82	-15.27
0.25	1.27	160,152	11.55	36.01	-21.74
0	1.5	173,480	10.47	47.33	-29.03

# CAPITULO 5

## 5. Análisis de resultados

Con respecto a los resultados obtenidos, la gran diferencia que se establece entre los dos tipos de sistemas es la utilización efectiva de los camiones, la cual su diferencia llega casi a un 30 % favoreciendo a los autónomos, sin embargo, el rendimiento efectivo dentro de esas 15 horas que los camiones se encuentran operando es bajo con respecto a los manuales, cuyas horas efectivas bordean las 12 horas.

La diferencia radica en las detenciones reiteradas que sufren los camiones autónomos en los distintos segmentos presentes en las rutas, sumado a eso se incluye que los camiones autónomos transitan a velocidades menores. Por otra parte el sistema manual es capaz de realizar acciones cortoplacista que benefician el cumplimiento del plan de producción utilizado en la simulación.

La alta influencia por detención para los camiones autónomo resulta ser fundamental a la hora de producir, debido a las altas detenciones, se producen distintas colas por segmentos, haciendo que los camiones se vayan acumulando en zonas remotas. Se esperaría que el total de los tiempos de cola fuera menor por la velocidad de los camiones autónomos, sin embargo, este acumulamiento en zonas del circuito hace que en reiteradas ocasiones los camiones lleguen en hilera a los distintos recursos del sistema.

Los camiones manuales también sufren detenciones en los caminos, sin embargo estos imprevistos son menores en cantidad debido a que camiones manuales pueden cambiar rápidamente su trayectoria.

La distancia total recorrida en camiones autónomos es menor, debido a que los camiones no deben realizar reiterados ciclos al parking, la cual requiere mayores kilómetros recorridos. Si bien, los camiones manuales pasan mayor tiempo en el parking, la velocidad de ciclo de los camiones y el menor grado de detención hace que recorran mayores kilómetros.

Con respecto al cumplimiento del plan, la diferencia es significativa, principalmente por el hecho de que los camiones manuales tienen una ruta alternativa al stockpile para cumplir el plan, esto sin duda genera la ventaja de cumplir el plan de producción pero también genera mayores costos de transporte y carguío por realizar remanejo, otro punto desfavorable es que al realizar este cambio en la secuencia de extracción, se está manipulando la relación estéril – mineral, lo cual implica un cambio en la planificación a corto plazo, debido a que se dejó de extraer estéril en el punto de carguío 2 por realizar remanejo para cumplir la meta. Este problema puede conllevar a discrepancias entre los

planes anuales y mensuales de producción para los camiones, haciendo que se retrase la expansión del rajo y el cumplimiento del plan en el largo plazo.

Con respecto a los análisis de sensibilidad los resultados indican que el parámetro más influyente dentro del sistema autónomo son las detenciones, donde se muestra que al variar favorablemente la probabilidad de eventos, ocurre un crecimiento y disminución exponencial de la producción y tiempos de cola respectivamente. Debido a esta dependencia, la probabilidad de detención controla la mayoría de las variables de desempeño de los camiones autónomos en el modelo.

La velocidad como parámetro, resulta tener un comportamiento más lineal en las variables de desempeño citadas, esto debido a que al mantener la misma probabilidad de detención, se originan los mismos problemas de colas en zonas externas como los caminos. De acuerdo a lo anterior, por más rápido que circule un camión autónomo, este tendrá que detenerse de todas formas ante cualquier evento en la ruta.

# CAPITULO 6

## 6. Conclusiones y comentarios finales.

### 6.1. Conclusiones

- ✓ Los principales resultados del escenario elegido indican que los camiones autónomos aumentaron un 27.43 % la utilización efectiva con respecto a los manuales, principalmente por ausencia de demoras programadas. Por el contrario los resultados arrojan una disminución de un 14.85 % en la producción diaria, esto como consecuencia de la sensibilidad que tienen los camiones al detenerse por cualquier evento en la ruta, la velocidad también resulta ser influyente pero en menor grado.
- ✓ El cumplimiento del plan minero corresponde a un 84.11% y un 98.78% para el sistema autónomo y manual respectivamente, esta diferencia de cumplimiento radica en el criterio de decisión que existe para cambiar de camiones de botadero a stockpile en el sistema manual, donde los camiones manuales logran la mayor diferencia.
- ✓ Destacar que este trabajo no pretende concluir que sistema es más efectivo o mejor, ya que más allá de los resultados entregados, la visión de este estudio fue construir un modelo que sea estructuralmente coherente con la forma de operar de una mina, el cual pueda ser perfeccionado en futuros estudios.
- ✓ A pesar de no poseer datos históricos para calibrar el modelo, este permite ajustar los principales parámetros y procesos que afectan al sistema global. Este ajuste debe ser iterativo, dinámico y debe retroalimentarse periódicamente debido a la variación de las condiciones como: distancias de transporte, criterios, disponibilidad mecánica, etc.
- ✓ . Este estudio desarrolla un modelo del sistema de carguío y transporte de mineral/estéril de una operación minera, el cual puede tomarse como un modelo para aplicarlo en otras operaciones específicas, teniendo en cuenta las diferencias de cada mina cómo: nivel de producción, equipos de carguío y de acarreo, distancias, etc.
- ✓ Dentro de los análisis, la probabilidad de detención fue el parámetro más influyente dentro del modelo, haciendo que tuviera un grado de sensibilidad mayor con respecto a la velocidad de los camiones.

## 6.2. Comentarios finales

### Camiones autónomos

- ✓ La principal mejora de los camiones autónomos es la eliminación de incidentes y accidentes manuales que vienen de la distracción, la fatiga y cansancio. Es un hecho de que al verse disminuido la cantidad de operadores los accidentes disminuyen.
- ✓ No todas las minas están preparadas para operar con camiones autónomos, existen una serie de factores a considerar como el diseño minero, la capacitación de los trabajadores especializados y una nueva visión de negocio por esta tecnología.
- ✓ Los resultados en Chile no han sido muy alentadores, debido a que los diseños de los caminos mineros no son los más adecuados para camiones autónomos, también existe falta de cultura y educación del personal al respecto al querer cumplir las metas de producción, ya que cualquier déficit que se presenta implica en un cambio a sistema manual debido a una cierta resistencia al cambio tecnológico y perfeccionamiento del sistema autónomo.

Con respecto a los objetivos específicos

*¿Son los números de los camiones autónomos más productivos?*

Los resultados indican que los camiones manuales son más productivos, según los supuestos utilizados en el modelo de simulación, es necesario considerar que los camiones autónomos son nuevas tecnologías que han sido empleados en pocas faenas mineras a nivel global, por lo que su cultura de uso todavía se asemeja bastante a la de los camiones manuales. Por otra parte estos sistemas son bastante sensibles a su entorno espacial, resultando en rendimientos efectivos bajos, a pesar de que disponen de mayores horas efectivas que los camiones manuales. Sin embargo, las conductas de los operadores sobre estas tecnologías continuamente van retroalimentando y mejorando la programación de estos nuevos camiones, esencial es la retroalimentación entre los proveedores y usuarios para implementar mejoras a esta tecnología.

*¿Cuáles son los aspectos importantes a tener en cuenta al momento de cambiar una mina antes de usar camiones autónomos?*

Un aspecto fundamental de la automatización es la sustitución de operadores, sin embargo, este cambio de estructura en la dotación es compleja para el caso de minas que se encuentran operando, debido a razones sociales y legales que rodean el ambiente minero.

Otro aspecto a considerar es el diseño de la mina, el ancho de las rampas, altura de bancos, bermas de seguridad son solo algunos de los parámetros a evaluar antes de realizar un cambio de sistema. Por ejemplo, los problemas ocurridos en Gabriela Mistral, donde se tuvieron que realizar cambios en los diseño de rampas por las detenciones frecuentes de los camiones, esto debido a lo poca tolerancia en la precisión del GPS entre camiones.



# CAPITULO 7

## 7. Recomendaciones

Las recomendaciones que se plantean a raíz de esta investigación son en base a los supuestos y resultados hechos por esta investigación:

- ✓ Debido a la experiencia que se tiene con los camiones autónomo en la actualidad, si una mina quisiera invertir en este tipo de tecnología es muy probable que en el corto plazo necesite modificar su sistema de transporte a manual para cumplir con el plan mensual de producción, ya que los camiones autónomos es una tecnología compleja de manipular, por lo que requiere tiempo, experiencia y capacitación por parte de los operadores.
- ✓ Si en la mina diseñada o por diseñar, las condiciones del terreno son competentes y estables desde el punto de vista geomecánico, de tal forma que la probabilidad de ocurrencia de algún evento en ruta por desprendimiento o por detenciones por terrenos en mal estado sea baja, la opción de escoger camiones autónomos es razonable. El tener una confiabilidad alta en extender los taludes del rajo, aumento del ancho de las bermas y evitar el uso de bancos dobles me implican menores eventos por colapsos o rutas. Dado que como se indican en parte de los análisis del estudio, el tener ocurrencias de detención por rutas influyen significativamente en el rendimiento efectivo de los camiones autónomos.
- ✓ Si se posee una mina donde se necesite un flujo de minerales rápido y continuo debido a la capacidad de la planta, los camiones manuales son más factibles, los camiones autónomo transitan a velocidades menores (sobre todo en caminos con pendientes con alto grado de inclinación), por lo que si se necesita agilizar el ciclo del proceso en el corto plazo, la operación con camiones manuales es más óptima.
- ✓ Si las reservas mineras fueron estimadas con poca información geológica, la incertidumbre de las leyes planificadas será mayor. Por lo tanto es muy probable que a medida que se vaya explotando el rajo, aparezcan zonas inesperadas ya sea de mineral o estéril, esto implicara que el sistema de transporte debe ser flexible a la hora de tomar decisiones en el corto plazo. En este caso los camiones manuales resultan ser más efectivos que los camiones autónomos, puesto este sistema necesita todo un procedimiento de reprogramación para cambiar las rutas, en cambio los camiones manuales poseen una mayor aleatoriedad en la toma de decisiones en el día a día. Por el contrario si la estimación de reservas es de alta

confiabilidad, la planificación del plan estaría correctamente secuenciado y programada, y por ende los camiones autónomos serían una mejor opción y debería considerarse en los diseños el uso de esta tecnología.

- ✓ Si se desea recuperar una inversión en el mediano plazo, la razón estéril-mineral (REM) será discontinua, por lo que continuamente se estarán escogiendo las zonas de con mejores leyes, haciendo que la secuencia de extracción sea lo más dinámica posible, en ese caso los camiones manuales cumplen con las condiciones de variabilidad de la REM, sin embargo, este desbalance hará que los costos sean mayores debido al remanaje que se generará. Si por el contrario tengo fases en donde se desea tener la misma REM, ley media y capacidad de planta, los camiones autónomos resultan ser el transporte adecuado.
- ✓ Continuar enriqueciendo el modelo, en la misma plataforma usada, lo que permita con el tiempo asignar una mayor cantidad de recursos para incluir a una asignación dinámica de los camiones.

## CAPITULO 8

### 8. Bibliografía

Alarie, S., & Gamache, M. (2002). Overview of solution strategies used in truck dispatching systems for open pit mines. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 16(1), 59-76.

Bartos, Paul. (2007). Is mining a high-tech industry: Investigations into innovation and productivity advance. *Resource. Policy* 32, 149-158.

Bellamy, Drew, Pravica, Luka. (2010). Assessing the impact of driverless haul trucks in Australian surface mining. *Resource. Policy* 36, 1-4.

García, Eduardo, García, Heriberto, Leopoldo, E. Cárdenas. (2006). *Simulación y análisis de sistema con ProModel* (1 ed). Mexico:Pearson Prentice Hall.

Jara, Joaquin. (2010) Good deposits are not enough: Mining labor productivity analysis in the copper industry in Chile and Peru 1992–2009. *Resource Policy*, 35(4), 247-256

Konyukh, Vladimir. (2002). Robotics for mining. *Min. Res. Eng.* 11(1), 73

Kelton, David, Sadowski, Randall, Sadowski, Deborah. (2002). *Simulation with Arena* (2 ed) Internacional. New York: Mc Graw Hill, 631

Lagos, Andrés. (2006). *Gestión operativa del Sistema de despacho: Estudio técnico y económico* (Memoria para optar al título de ingeniero civil de minas). Universidad de Chile. Santiago.

Lever, Paul. (2011). Automation and Robotics. *SME Mining Engineering Handbook* (3 ed). Chapter 9.8, 805-809

Meech, John. (2012). An autonomous haulage trucks - the future is now! Presentation. Automining, 3rd International Congress on Automation in the Mining Industry. Viña del mar. Gecamin, The University of British Columbia (UBC) and UBC's Department Of Mining Engineering

Meech, John. (2013). Autonomous haulage trucks. Engineering case studies. Automation in Mining Presentation. The University of British Columbia. Vancouver.

Meech, J., Parreira, J. (2011). An interactive simulation model of human drivers to study autonomous haulage trucks. Complex Adaptive System Conference. *Procedia Computer Science*, 6, 118-123.

Navarrete, Marcelo. (2013) .Mine planning for autonomous haulage system. Presentation Mine Planning, 3rd International Congress on Mining Planning. The University of Alberta, Gecamin. Santiago, Chile, Jul 24.

Parreira, J., Meech, J. (2010). Autonomous vs. manual haulage trucks - how mine simulation contributes to future haulage system developments. Canadian Institute of Mining (CIM) Conference and Exhibition, Vancouver, Canada, May 09.

Parreira, J., Meech, J. (2012) Simulation of autonomous mine haulage trucks, 7th Intern. Conf. on Intell. Proc. and Manuf. of Materials, Iguassu Falls, Brazil, September 2-3.

Parreira, Juliana. (2013). An Interactive Simulation Model to Compare an Autonomous Haulage Truck System with a Manually-Operated System (Mining Engineering). The University of British Columbia. Vancouver

SONAMI. (2013). Seminario de innovación tecnológica en minería, Presentación. Universidad de Chile, Santiago, Abril.

Walker, Simon. (2014). Autonomous gradually gains momentum. Engineering & Mining Journal, June, 32-37.

# CAPITULO 9

## 9. Anexos

### 9.1. Anexo A: Resultados simulación

#### 9.1.1. Camiones manuales

##### 9.1.1.1 Producción

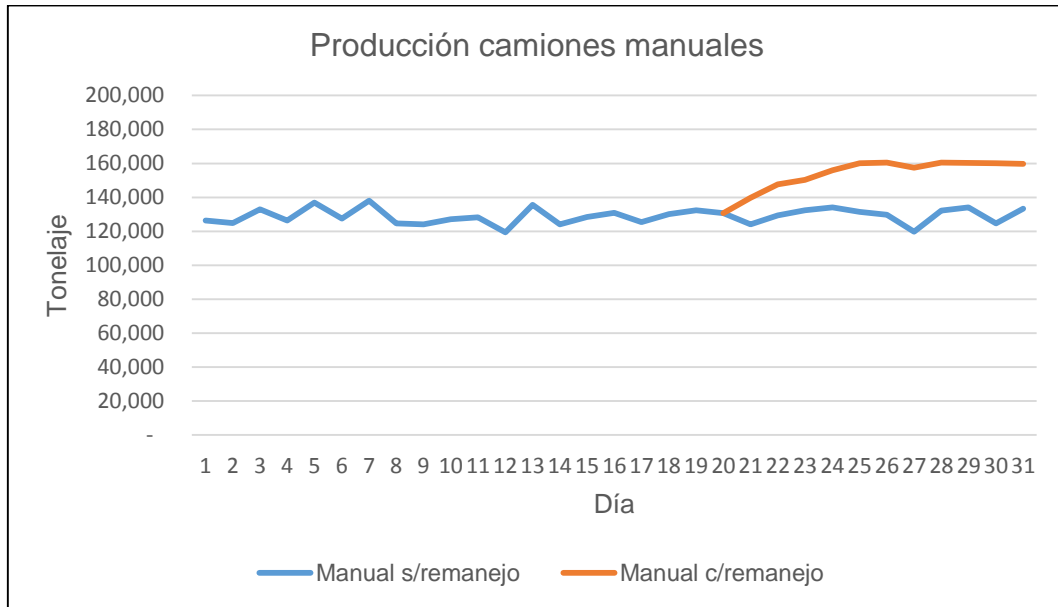


Grafico 8: Producción camiones manuales

Tabla 18: Estadísticas producción camiones manuales

Estadísticas principales		
	Sin remanejo	Con remanejo
Promedio	129,016	138,291
Desviación estándar	4,711	14,232
Mínimo	119,319	119,319
Máximo	138,137	160,567
Mediana	129,299	132,422
Error estándar	846	2,556
Suma	3,999,511	4,287,022
Cuenta	31	31

### 9.1.1.2 Utilización efectiva

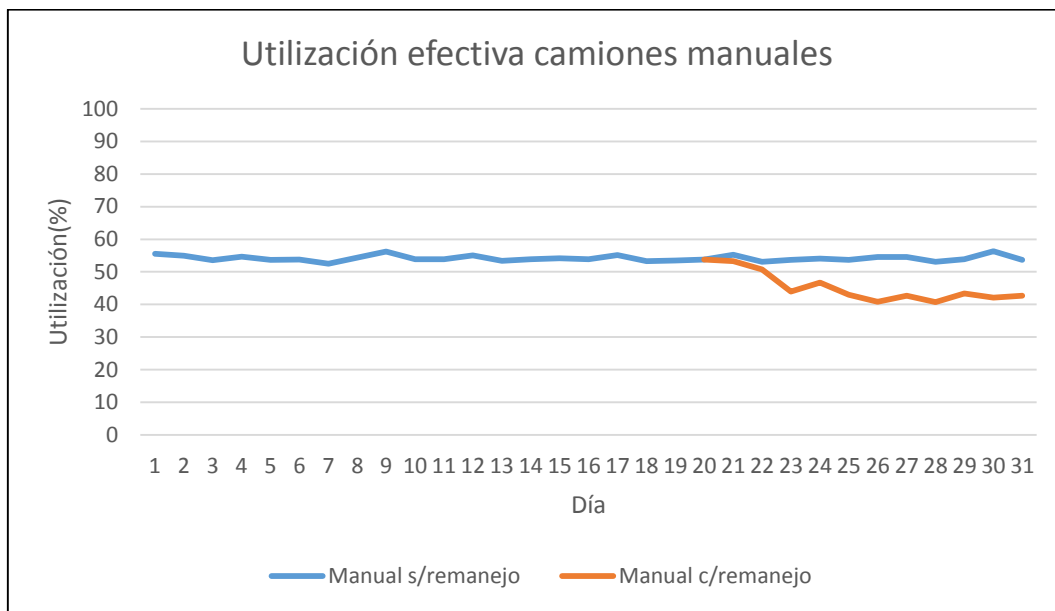


Grafico 9: Utilización efectiva sistema manual

Tabla 19: Estadísticas utilización efectiva camiones manuales

Estadísticas principales		
	Sin remanejo	Con remanejo
Promedio	54.16	50.74
Desviación estándar	0.88	5.27
Mínimo	52.51	40.69
Máximo	56.35	56.18
Mediana	53.90	53.57
Error estándar	0.16	0.95
Cuenta	31	31

### 9.1.1.3 Razón Estéril - Mineral

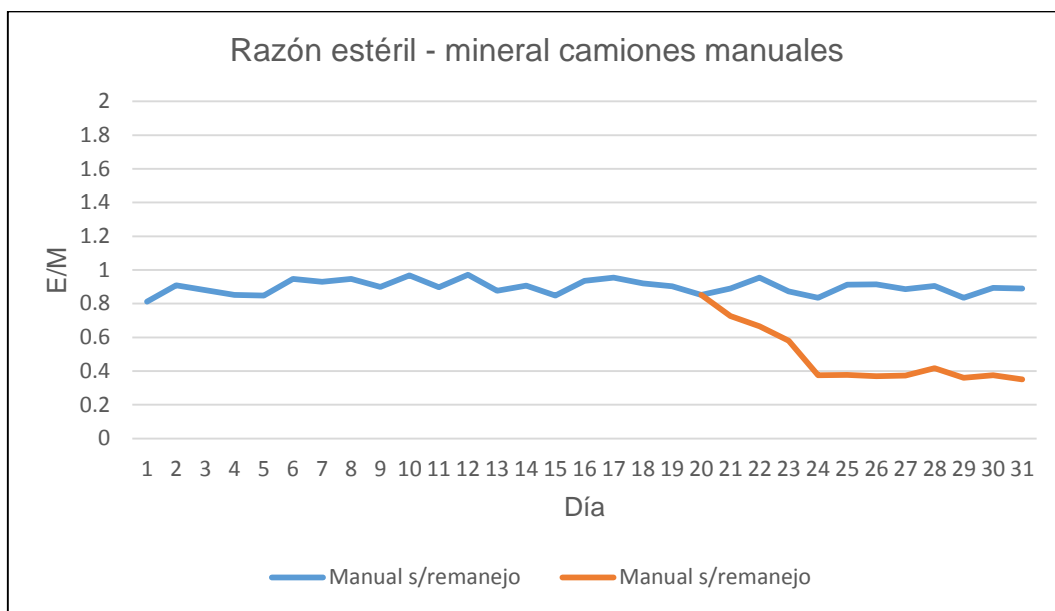


Grafico 10: Razón estéril - mineral camiones manuales

Tabla 20: Estadísticas Razón estéril - mineral camiones manuales

Estadísticas principales		
	Sin remanejo	Con remanejo
Promedio	0.90	0.74
Desviación estándar	0.04	0.24
Mínimo	0.81	0.35
Máximo	0.97	0.97
Mediana	0.90	0.85
Error estándar	0.01	0.04
Cuenta	31	31

### 9.1.1.4 Tiempos en cola

Tabla 21: Demoras por cola camiones manuales

Cola	Parámetro	Sin remanejo	Con remanejo
Pala 1	Tiempo de espera	6.04	5.81
	Flota en espera	2.00	1.89
Pala 2	Tiempo de espera	3.56	3.42
	Flota en espera	1.02	0.95
Pala 3	Tiempo de espera	-	0.18
	Flota en espera	-	0.01
Chancador	Tiempo de espera	4.40	5.17
	Flota en espera	1.42	1.71

Cola	Parámetro	Sin remanejo	Con remanejo
Total	Tiempo de espera	14.01	14.59

### 9.1.1.5 Tiempos de ciclo y resultados simulación

Tabla 22: Tiempos de ciclo camiones manuales

Tiempo de ciclo[min]	Sin remanejo	Con remanejo
Chancador	16.41	16.95
Botadero	9.38	9.24

Tabla 23: Resumen simulación camiones manuales (con ir a stockpile)

Sistema Manual (Con ir a stockpile)						
Día	Demoras			Producción	Botadero	Utilización
	Chancado	Pala 1	Pala 2			
1	4.24	6.42	2.95	126,306	102,480	55.54
2	4.00	6.58	3.29	124,892	113,400	54.96
3	4.18	6.32	3.43	132,980	117,040	53.57
4	4.42	6.10	3.54	126,333	107,520	54.61
5	4.54	5.88	3.59	136,974	116,200	53.63
6	4.61	5.87	3.56	127,466	120,680	53.73
7	4.60	5.91	3.51	138,137	128,520	52.51
8	4.73	5.79	3.53	124,607	117,880	54.36
9	4.77	5.65	3.53	124,147	111,720	56.18
10	4.69	5.72	3.55	127,034	122,920	53.92
11	4.62	5.82	3.56	128,331	115,080	53.90
12	4.62	5.85	3.57	119,319	115,920	55.01
13	4.51	5.93	3.58	135,625	119,000	53.40
14	4.50	5.98	3.61	124,128	112,560	53.84
15	4.43	6.05	3.63	128,463	108,920	54.13
16	4.42	6.06	3.62	130,829	122,360	53.86
17	4.37	6.10	3.62	125,485	119,840	55.13
18	4.32	6.08	3.62	130,162	119,840	53.31
19	4.32	6.08	3.61	132,422	119,560	53.47
20	4.31	6.10	3.63	130,717	111,440	53.81
21	4.53	5.98	3.57	139,685	101,360	53.31
22	4.83	5.87	3.48	147,737	98,280	50.73
23	5.33	5.72	3.39	150,366	87,360	43.95
24	5.75	5.61	3.33	155,970	58,520	46.67
25	6.17	5.51	3.27	160,021	60,480	43.01
26	6.61	5.40	3.21	160,567	59,360	40.81
27	6.95	5.33	3.16	157,554	58,800	42.70
28	7.32	5.24	3.10	160,541	66,920	40.69
29	7.62	5.16	3.05	160,268	57,680	43.35
30	7.89	5.08	3.01	160,169	60,200	42.07



Sistema Manual (Con ir a stockpile)						
Día	Demoras			Producción	Botadero	Utilización
	Chancado	Pala 1	Pala 2			
31	8.15	5.01	2.96	159,788	56,000	42.67
Promedio	5.17	5.81	3.42	138,291.03	99607.74	50.74

Tabla 24: Resumen simulación camiones manuales (sin ir a stockpile)

Sistema Manual (Sin ir a stockpile)						
Día	Demoras			Producción	Botadero	Utilización
	Chancado	Pala 1	Pala 2			
1	4.24	6.42	2.95	126,306	102,480	55.54
2	4.00	6.58	3.29	124,892	113,400	54.96
3	4.18	6.32	3.43	132,980	117,040	53.57
4	4.42	6.10	3.54	126,333	107,520	54.61
5	4.54	5.88	3.59	136,974	116,200	53.63
6	4.61	5.87	3.56	127,466	120,680	53.73
7	4.60	5.91	3.51	138,137	128,520	52.51
8	4.73	5.79	3.53	124,607	117,880	54.36
9	4.77	5.65	3.53	124,147	111,720	56.18
10	4.69	5.72	3.55	127,034	122,920	53.92
11	4.62	5.82	3.56	128,331	115,080	53.90
12	4.62	5.85	3.57	119,319	115,920	55.01
13	4.51	5.93	3.58	135,625	119,000	53.40
14	4.50	5.98	3.61	124,128	112,560	53.84
15	4.43	6.05	3.63	128,463	108,920	54.13
16	4.42	6.06	3.62	130,829	122,360	53.86
17	4.37	6.10	3.62	125,485	119,840	55.13
18	4.32	6.08	3.62	130,162	119,840	53.31
19	4.32	6.08	3.61	132,422	119,560	53.47
20	4.31	6.10	3.63	130,717	111,440	53.81
21	4.29	6.11	3.63	124,040	110,320	55.21
22	4.30	6.11	3.64	129,299	123,480	53.12
23	4.29	6.12	3.64	132,420	115,640	53.72
24	4.26	6.16	3.61	134,115	112,000	54.07
25	4.33	6.08	3.61	131,442	119,840	53.71
26	4.31	6.09	3.61	129,732	118,720	54.59
27	4.36	6.06	3.63	119,817	106,120	54.51
28	4.35	6.07	3.64	132,168	119,560	53.13
29	4.29	6.11	3.65	134,177	112,000	53.90
30	4.30	6.09	3.65	124,581	111,440	56.35
31	4.27	6.09	3.64	133,363	118,720	53.72
Promedio	4.40	6.04	3.56	129,016	115,830	54.16

## 9.1.2. Camiones autónomos

### 9.1.2.1 Producción

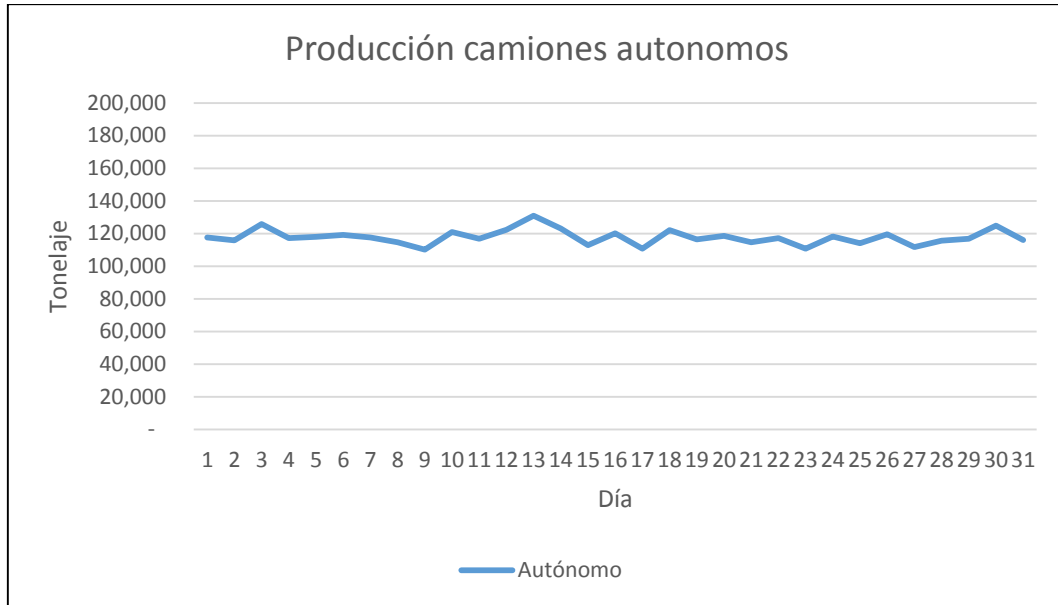


Grafico 11: Producción camiones autónomos

Tabla 25: Estadísticas producción camiones autónomos

Estadísticas principales	
Promedio	117,752.14
Desviación estándar	4,636.77
Mínimo	110,227.93
Máximo	130,924.27
Mediana	117,179.71
Error estándar	832.79
Suma	3,650,316.45
Cuenta	31

### 9.1.2.2 Utilización efectiva

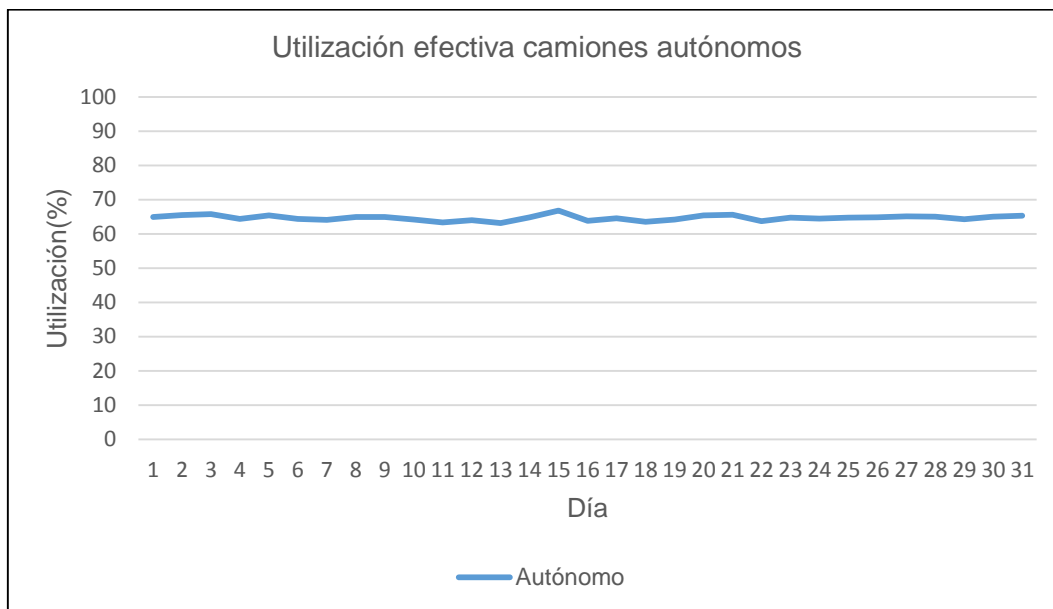


Grafico 12: Utilización efectiva camiones autónomos

Tabla 26: Estadísticas utilización efectiva camiones autónomos

Estadísticas principales	
Promedio	64.66
Desviación estándar	0.77
Mínimo	63.18
Máximo	66.82
Mediana	64.78
Error estándar	0.14
Cuenta	31

### 9.1.2.3 Razón Estéril - Mineral

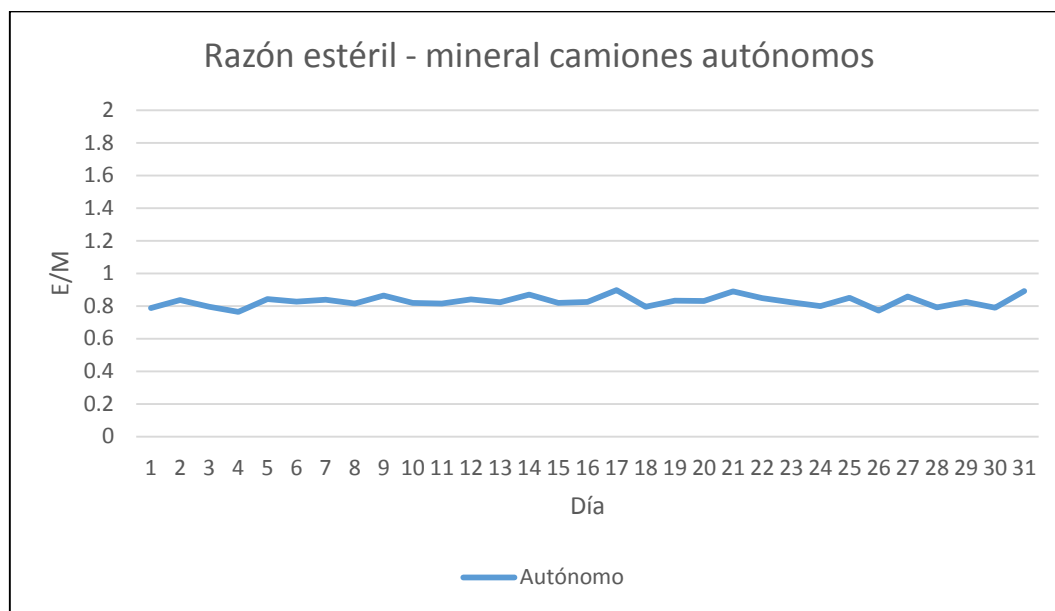


Grafico 13: Razón estéril - mineral camiones autónomos

Tabla 27: Estadísticas razón estéril - mineral camiones autónomos

Estadísticas principales	
Promedio	0.83
Desviación estándar	0.03
Mínimo	0.76
Máximo	0.90
Mediana	0.83
Error estándar	0.01
Cuenta	31

### 9.1.2.4 Tiempos en cola

Tabla 28: Demoras por cola camiones autónomos

Cola	Parámetro	Valor
Pala 1	Tiempo de espera	5.63
	Flota en espera	1.74
Pala 2	Tiempo de espera	3.36
	Flota en espera	1.05
Chancador	Tiempo de espera	4.76
	Flota en espera	1.41
Total	Tiempo de espera	13.75

### 9.1.2.5 Tiempos de ciclo y resultados simulación

Tabla 29: Tiempos de ciclo camiones autónomos

Tiempo de ciclo[ <i>min</i> ]	Autónomo
Chancador	16.36
Botadero	9.19

Tabla 30: Resultados simulación camiones autónomos

Sistema Autónomo						
Día	Demoras			Producción	Botadero	Utilización
	Chancado	Pala 1	Pala 2			
1	5.31	5.00	3.80	117,542	92,680	64.89
2	5.02	5.38	4.28	115,887	96,880	65.46
3	4.77	5.55	4.27	125,866	100,240	65.73
4	4.65	5.79	4.41	117,180	89,600	64.40
5	4.74	5.67	4.37	117,904	99,400	65.37
6	4.80	5.61	4.35	119,202	98,560	64.38
7	4.77	5.72	4.34	117,601	98,560	64.07
8	4.79	5.71	4.41	114,703	93,520	64.88
9	4.69	5.78	4.46	110,228	95,200	64.89
10	4.70	5.76	4.44	120,923	99,120	64.17
11	4.68	5.79	4.44	116,887	95,200	63.34
12	4.69	5.73	4.41	122,319	102,760	64.00
13	4.74	5.63	4.39	130,924	107,800	63.18
14	4.72	5.63	4.35	123,130	107,240	64.83
15	4.72	5.58	4.35	112,857	92,400	66.82
16	4.77	5.52	4.37	120,070	99,120	63.82
17	4.82	5.52	4.38	110,701	99,400	64.55
18	4.77	5.57	4.40	122,097	97,160	63.54
19	4.73	5.63	4.43	116,423	96,880	64.14
20	4.73	5.63	4.42	118,612	98,560	65.40
21	4.69	5.65	4.40	114,634	101,920	65.61
22	4.68	5.67	4.41	117,137	99,400	63.69
23	4.69	5.65	4.41	110,683	91,000	64.78
24	4.70	5.68	4.39	118,153	94,360	64.43
25	4.72	5.67	4.39	114,026	96,880	64.70
26	4.73	5.66	4.39	119,551	92,400	64.84
27	4.76	5.66	4.38	111,691	95,760	65.09
28	4.76	5.67	4.39	115,691	91,560	64.99
29	4.77	5.67	4.39	116,739	96,320	64.28
30	4.74	5.68	4.39	124,865	98,560	64.98
31	4.74	5.68	4.38	116,088	103,600	65.27
Promedio	4.76	5.63	4.37	117,752.14	97,485.16	64.66

### 9.1.3. Cambio de sistema (Autónomo → Manual)

#### 9.1.3.1 Producción

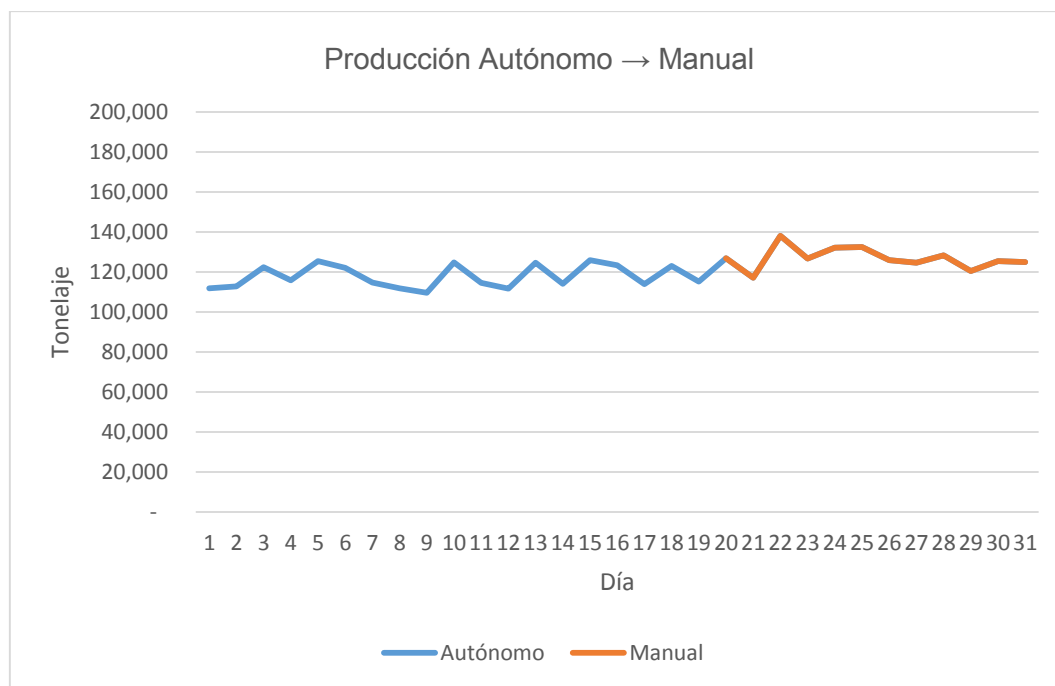


Grafico 14: Producción Autónoma/Manual

Tabla 31: Estadísticas producción Autónoma/Manual

Estadísticas principales	
Promedio	121,315.63
Desviación estándar	7,147.18
Mínimo	109,639.72
Máximo	138,143.07
Mediana	123,070.73
Error estándar	1,283.67
Suma	3,760,784.49
Cuenta	31

### 9.1.3.2 Utilización efectiva

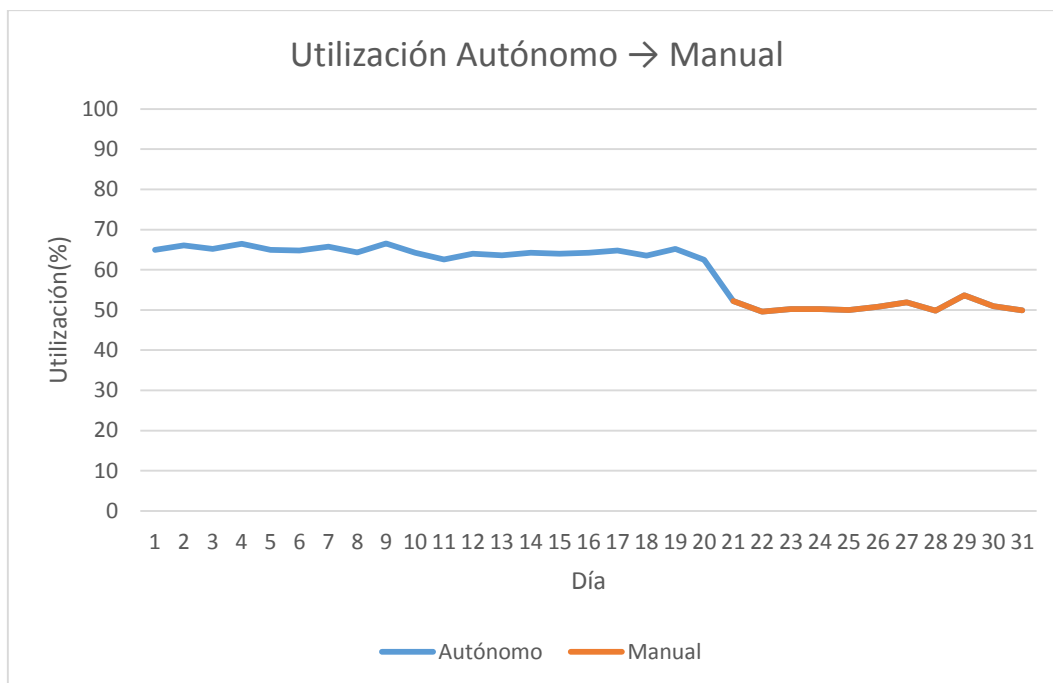


Grafico 15: Utilización efectiva Autónomo/Manual

Tabla 32: Estadísticas utilización efectiva Autónomo/Manual

Autónomo/Manual	
Promedio	59.72
Desviación estándar	6.80
Mínimo	49.59
Máximo	66.51
Mediana	64.01
Error estándar	1.22
Cuenta	31

### 9.1.3.3 Razón Estéril – Mineral

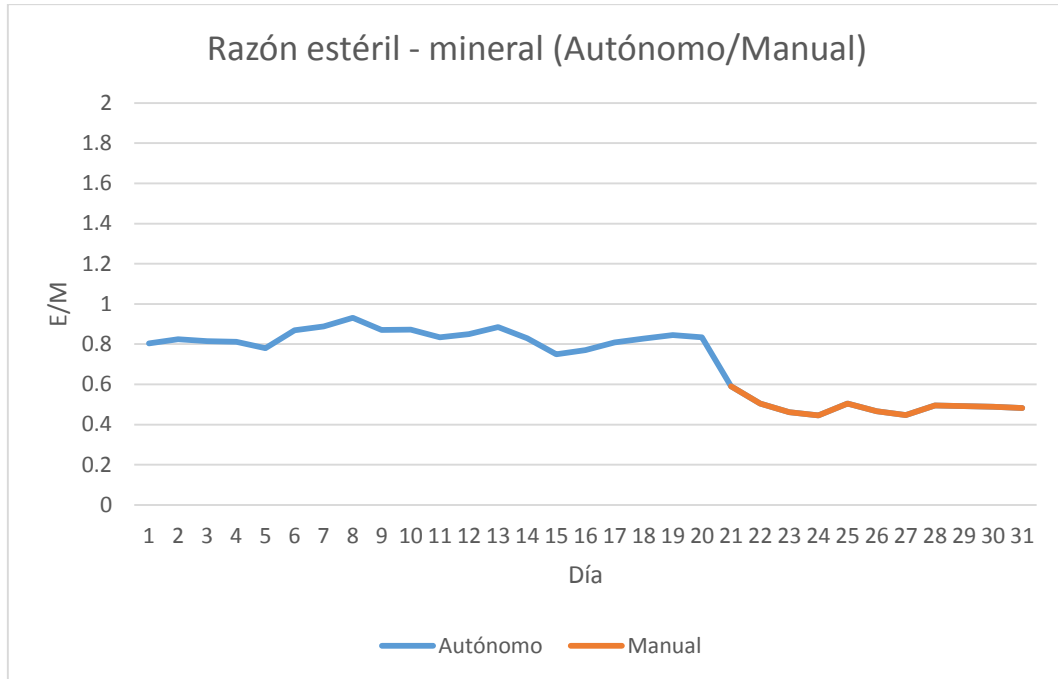


Grafico 16: Razón estéril - mineral Autónomo/Manual

Tabla 33: Estadísticas razón estéril - mineral Autónomo/Manual

Estadísticas principales	
Promedio	0.71
Desviación estándar	0.17
Mínimo	0.44
Máximo	0.93
Mediana	0.81
Error estándar	0.03
Cuenta	31

### 9.1.3.4 Tiempos en cola

Tabla 34: Demoras por cola Autónomo/Manual

Cola	Parámetro	Autónomo/Manual
Pala 1	Tiempo de espera	5.51
	Flota en espera	1.66
Pala 2	Tiempo de espera	4.18
	Flota en espera	0.98
Pala 3	Tiempo de espera	0.17
	Flota en espera	0
Chancador	Tiempo de espera	5.03
	Flota en espera	1.49
Total	Tiempo de espera	14.89



### 9.1.3.5 Tiempos de ciclo y resultados simulación

Tabla 35: Tiempos de ciclo Autónomo/Manual

Tiempo de ciclo[min]	Autónomo
Chancador	16.51
Botadero	9.99

Tabla 36: Resultados simulación camiones autónomos /manual

Autónomo / Manual (Con ir a stockpile)						
Día	Demoras			Producción	Botadero	Utilización
	Chancado	Pala 1	Pala 2			
1	5.47	5.24	3.91	111,912	89,880	64.97
2	5.22	5.50	4.22	112,800	92,960	66.09
3	5.16	5.54	4.21	122,339	99,680	65.19
4	4.89	5.65	4.28	115,786	94,080	66.48
5	4.67	5.76	4.32	125,359	97,720	64.99
6	4.42	5.91	4.27	122,074	106,120	64.80
7	4.59	5.73	4.24	114,662	101,920	65.78
8	4.66	5.70	4.27	111,824	104,160	64.34
9	4.67	5.56	4.28	109,640	95,480	66.51
10	4.80	5.39	4.25	124,769	108,920	64.23
11	4.84	5.44	4.27	114,502	95,480	62.59
12	4.93	5.39	4.29	111,729	94,920	64.02
13	4.95	5.38	4.23	124,595	110,320	63.61
14	4.94	5.44	4.23	114,020	94,640	64.27
15	4.95	5.43	4.25	125,897	94,360	64.01
16	4.89	5.46	4.26	123,300	94,920	64.24
17	4.88	5.50	4.28	113,845	92,120	64.82
18	4.83	5.57	4.28	123,071	101,920	63.51
19	4.82	5.61	4.27	115,230	97,440	65.16
20	4.85	5.58	4.24	126,953	105,840	62.49
21	4.88	5.59	4.23	117,091	69,160	52.18
22	5.01	5.54	4.17	138,143	69,720	49.59
23	5.12	5.50	4.15	126,778	58,520	50.20
24	5.21	5.47	4.12	132,158	58,800	50.21
25	5.30	5.45	4.07	132,507	66,920	49.98
26	5.38	5.43	4.04	125,940	58,800	50.75
27	5.41	5.43	4.02	124,637	55,720	51.93
28	5.49	5.41	3.99	128,292	63,560	49.81
29	5.53	5.40	3.95	120,558	59,360	53.63
30	5.59	5.39	3.93	125,463	61,320	50.92
31	5.69	5.35	3.90	124,910	60,200	49.91
Promedio	5.03	5.51	4.18	121315.63	85,643.87	59.72

## 9.2. Anexo B: Modelo realizado en ARENA

### 9.2.1. Modelo general

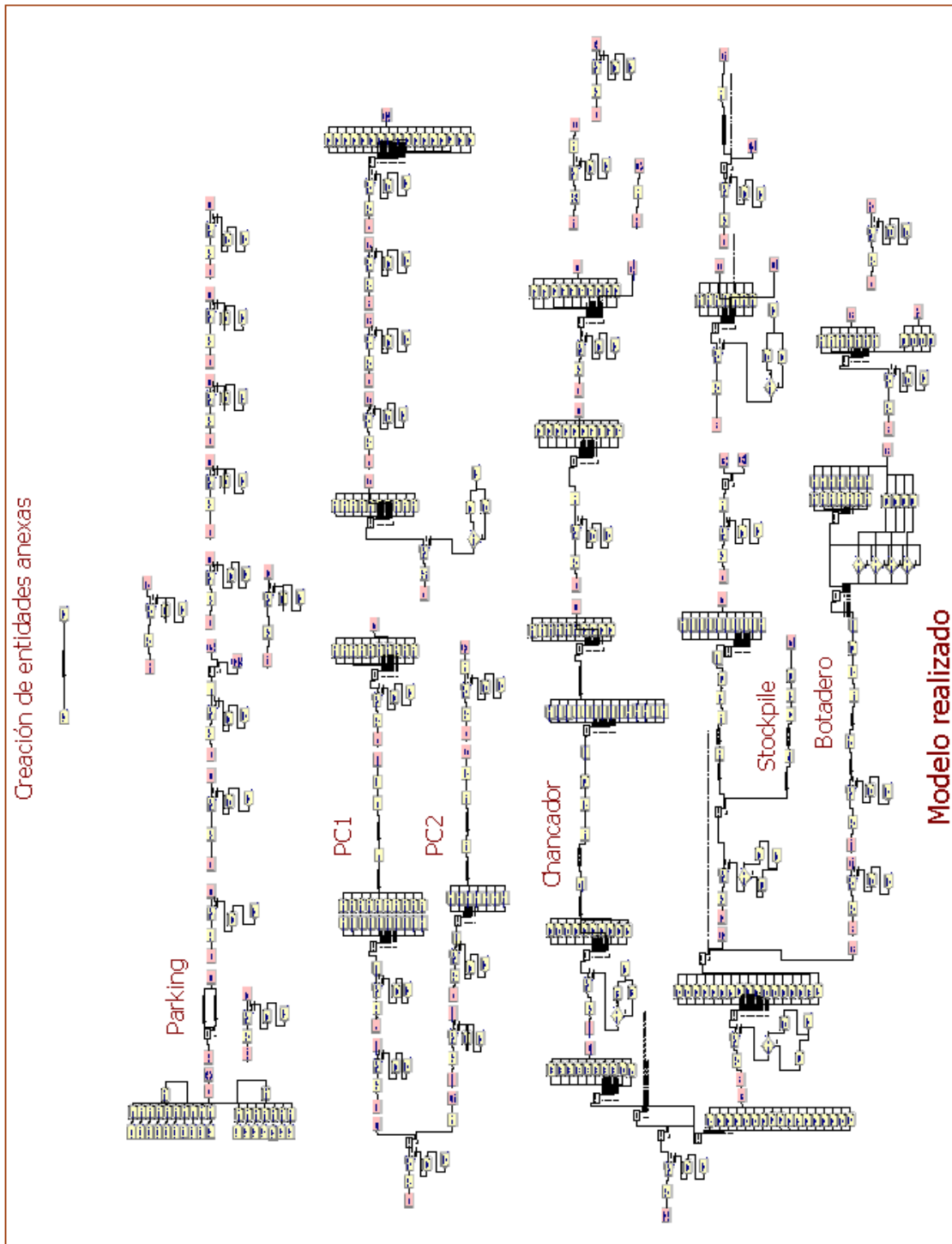


Figura 16: Modelo realizado en ARENA

## 9.2.2. Sub modelo creación de entidades secundarias

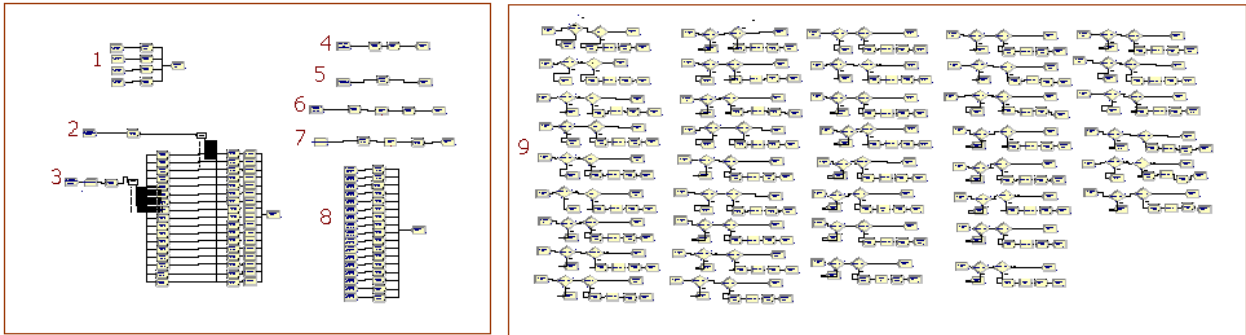


Figura 17: Sub modelo creación de entidades secundarias

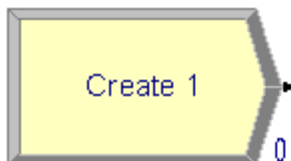
1. Creación de condición para ir a stockpile
2. Creación de entidades mantenimiento menor
3. Creación de entidades mantenimiento mayor
4. Entrada distancias de segmentos
5. Creación de entidad para cambio a sistema manual
6. Creación entidad de comida y cambio de turno para camiones manuales
7. Creación entidad de reabastecimiento
8. Creación entidades de descanso para camiones manuales

## 9.2.3. Módulos utilizados en ARENA

Con el afán de explicar el modelo desde el punto de vista de la programación en ARENA, se explicaran los módulos de bloque utilizados para su construcción.

Los módulos son

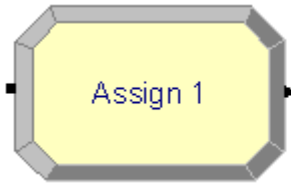
- ✓ Modulo "Create"



Modulo utilizado para la creación de entidades principales (camiones) y entidades secundarias (cambio modo manual, mantenimiento, almuerzo, etc...)

Figura 18: Modulo Create

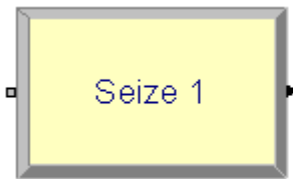
✓ Módulo "Assign"



Modulo utilizado para asignar valores a variables (tonelaje, distancia recorrida, etc...) o atributos (número canción, distancias, etc...) utilizados en el modelo

Figura 19: Modulo Assign

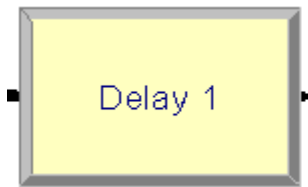
✓ Módulo "Seize"



Modulo utilizado para iniciar los procesos (chancado, carguío, descarga) que deben realizar los camiones para realizar un ciclo. En este módulo se generan las colas de los procesos.

Figura 20: Modulo Seize

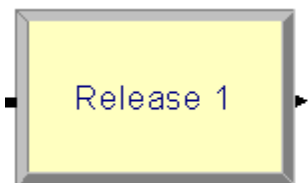
✓ Módulo "Delay"



Modulo utilizado para realizar el tiempo requerido por los procesos (distribución de chancado, distribución de carguío, distribución descarga botadero). Es un modelo que sigue la continuación del módulo seize.

Figura 21: Modulo Delay

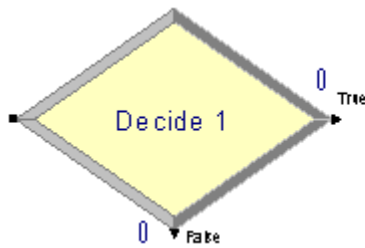
✓ Módulo "Release"



Modulo encargado de finalizar la cadena del proceso iniciado por el módulo seize, en donde se libera a la entidad (camión) después de haber transcurrido el tiempo de proceso programado en el módulo delay.

Figura 22: Modulo Release

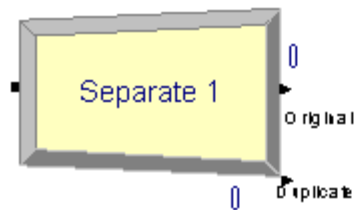
✓ Módulo “Decide”



Modulo utilizado para programar los criterio de decisión señalados (punto de permiso, camiones de estéril a stockpile, parking etc...). También se utilizado para programar la probabilidad de detección.

Figura 23: Modulo Decide

✓ Módulo “Separate”



Modulo utilizado para replicar las entidades de camiones, su uso principalmente fue para recolectar estadísticas como la distancia total cargada y descargada, tiempos de mantenciones, etc...

Figura 24: Modulo Separate

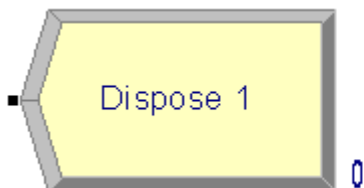
✓ Módulo “Record”



Modulo que también fue utilizado para recolectar estadísticas (contadores de camiones en los distintos eventos y procesos)

Figura 25: Modulo Record

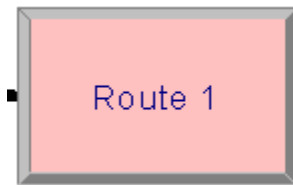
✓ Módulo “Dispose”



Este módulo representa el punto final de entidades secundarias (los camiones en el modelo son entidades cíclicas sin punto final)

Figura 26: Modulo Dispose

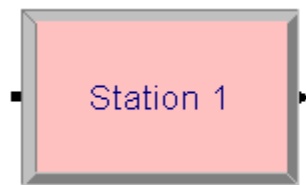
✓ Módulo "Route"



Este módulo representa los tiempos necesarios entre segmentos a realizar por las entidades, estos tiempos fueron calculados deterministamente en función de la velocidad de los camiones.

Figura 27: Modulo Route

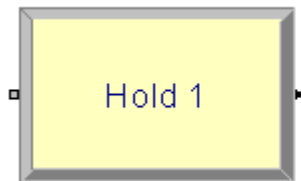
✓ Módulo "Station"



Módulo que continúa al bloque Route, donde las entidades fluyen a través de estaciones de acuerdo a las rutas programadas.

Figura 28: Modulo Station

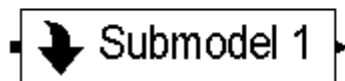
✓ Módulo "Hold"



Este módulo se utilizó para contener entidades de acuerdo a diferentes condiciones, principalmente se utilizó para evitar las intersecciones entre camiones y para generar esperas por detenciones.

Figura 29: Modulo Hold

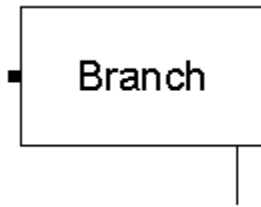
✓ Módulo "Submodel"



Bloque utilizado para crear sub modelos dentro del modelo general, sub modelos de creación de entidades, parking y demoras fueron creados a partir de este vínculo.

Figura 30: Modulo Submodel

✓ Módulo "Branch"



Bloque utilizado para crear condiciones "if", "while" y "for" en el modelo, su uso fue muy similar al bloque decide

Figura 31: Modulo Branch

### 9.3. Anexo C: Misceláneo

#### 9.3.1. Distancias de segmentos

seg	km	seg	km	seg	km	seg	km	seg	km	seg	km
1	0.134	9	0.198	17	0.083	25	0.204	33	0.14	41	0.299
2	0.204	10	0.236	18	0.191	26	0.16	34	0.15	42	0.287
3	0.376	11	0.102	19	0.255	27	0.07	35	0.078	43	0.287
4	0.147	12	0.089	20	0.102	28	0.078	36	0.01		
5	0.115	13	0.096	21	0.078	29	0.216	37	0.287		
6	0.057	14	0.249	22	0.108	30	0.216	38	0.166		
7	0.096	15	0.082	23	0.287	31	0.064	39	0.064		
8	0.313	16	0.064	24	0.151	32	0.064	40	0.096		

Tabla 37: Distancias de segmentos utilizados en el modelo

#### 9.3.2. Dimensiones camión autónomo 930E-4

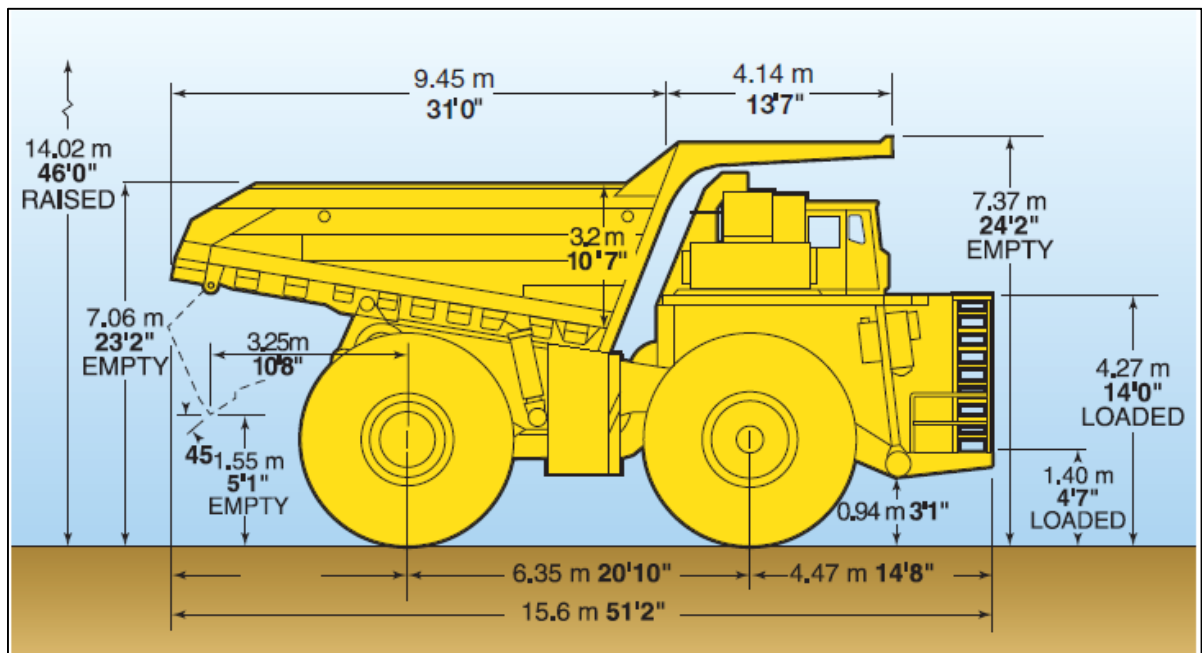


Figura 32: Vista lateral camión autónomo 930E-4

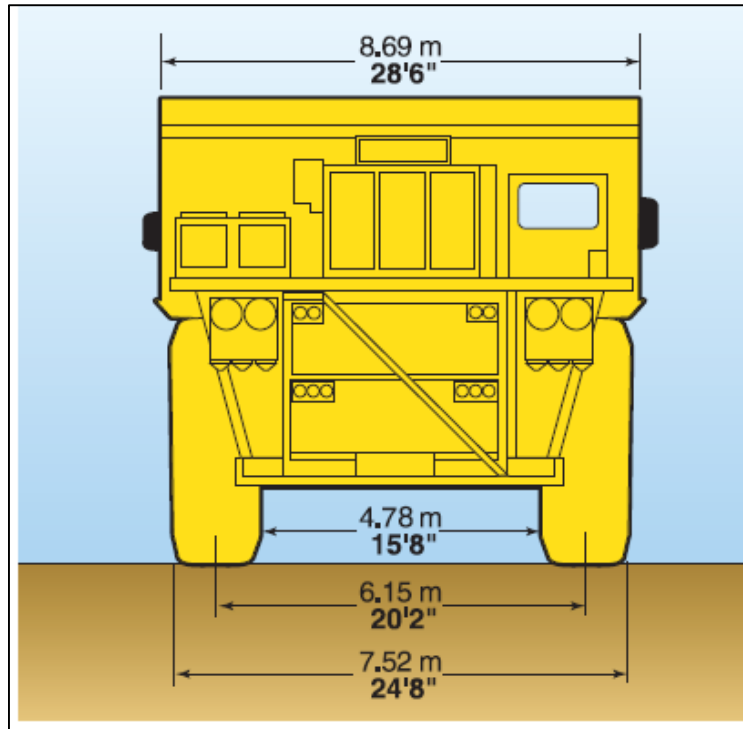


Figura 33: Vista delantera camión 930E-4

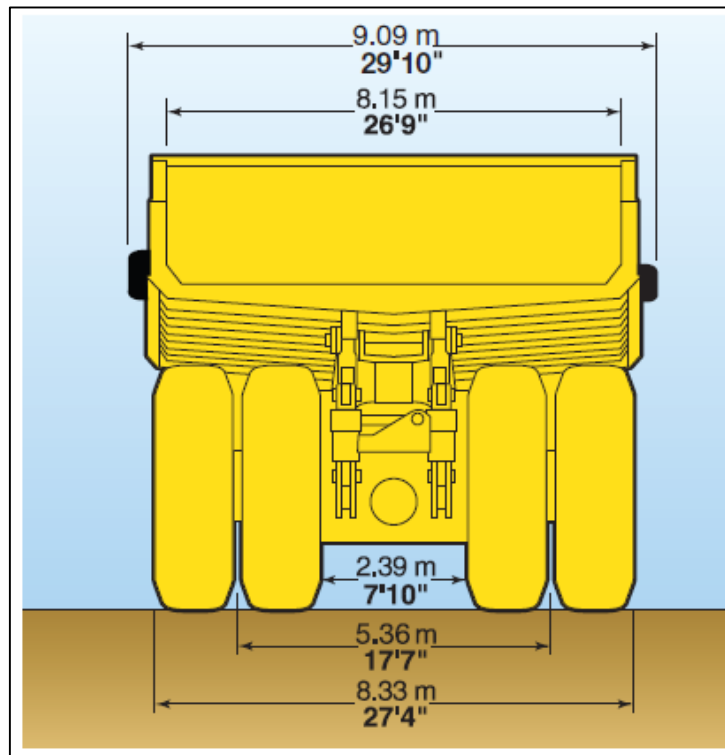


Figura 34: Vista trasera camión autónomo 930E-4



### 9.3.3. Resumen parámetros del modelo

Tabla 38: Resumen 1, parámetros modelo:

Recursos		
Camiones	17	330[ton]
Palas	2	73 [yd3]
FC (factor de carga)	TRIA(260,280,290)	-
Velocidades[Km/hr]		
	Manual	Autónomo
Horizontal cargado	35	25
Horizontal vacío	25	16.6
Subiendo	25	16.6
Distribuciones procesos		
	Manual	Autónomo
Carguío Pala	TRIA( 90 , 130 , 170 )	TRIA( 90 , 130 , 170 )
Descarga chancador	TRIA( 100 , 140 , 170 )	TRIA( 100 , 140 , 170 )
Descarga botadero	TRIA( 120 , 180 , 200 )	TRIA( 120 , 180 , 200 )
Descarga stock pile	TRIA( 120 , 180 , 200 )	TRIA( 120 , 180 , 200 )

Tabla 39: Resumen 2, parámetros modelo:

Demora	Tiempo entre eventos(horas)			Tiempo ejecución(min)		
Mantenión	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo
Menor	-	3	6	3	19	58
Mayor	-	126	252	360	840	1440
Demora	Tiempo entre eventos(horas)	Tiempo de ejecución(min)				
		Mínimo	Promedio	Máximo		
Reabastecimiento	24	5	13	27		
Descanso	Hora programada en el turno	Duración(hora)				
Almuerzo	6	1				
Café	3 y 9	0.25				
Cambio de turno	12	1				