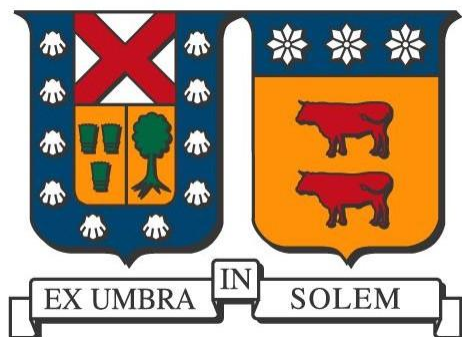


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES



**APLICACIÓN DE SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS EN UNA
CANTERA**

JAVIER EMILIO MORENO VÉLIZ

Memoria de Título para optar al título profesional de Ingeniero Civil de Minas

Profesor Guía
Tatiane Marin

2025
Santiago, Chile

Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia, que ha sido mi pilar fundamental durante todos estos años. Gracias por su apoyo incondicional, amor inquebrantable, por aguantarme y también por darme todas las herramientas necesarias para la vida.

A mi madre, Margarita Véliz, le dedico un agradecimiento especial. Mamá, no hay palabras que puedan hacer justicia a todo lo que has hecho por mí. Tu amor incondicional, tus consejos y el esfuerzo que has realizado para sacarme adelante son el motor que me ha impulsado a seguir luchando cada día. Este logro es tanto mío como tuyo.

A mis hermanos, Mario y Margarita, quiero agradecerles profundamente por su apoyo constante, por estar siempre a mi lado, especialmente en los momentos más difíciles. Gracias por todo su esfuerzo y dedicación para ayudarme a salir adelante, por ser mi fuente de fortaleza y por brindarme su cariño incondicional en todo momento.

A mi padre, Mario Moreno, aunque ya no estes con nosotros, me dejaste una familia llena de amor y valores que me han guiado en mi camino. Tu ejemplo sigue vivo en mí, y te llevo siempre en mi corazón.

También quiero agradecer a mis amigos, que son como una segunda familia para mí: Felipe Muñoz, Ivan Lagos, Omar Paniagua, Bastián Carreño, Wilson Villega, Diego Barrientos, Natalia Albornoz, Benjamín Morales, Savka Flores y Tomás Laferte. Gracias por estar ahí en cada momento, por sus consejos, por todas las risas que hicieron más llevaderos mis días y por ser un apoyo constante durante este proceso.

Finalmente, agradezco a la profesora Tatiane Marin por su buena disposición, paciencia y por brindarme todas las herramientas necesarias para el desarrollo de este trabajo.

A todos ustedes, gracias por ser parte de mi vida y por ayudarme a alcanzar este importante logro.

Resumen

La minería de pequeña escala afronta retos considerables, principalmente por la escasez de recursos financieros y tecnológicos, lo que da lugar a soluciones poco convencionales y una dependencia del trabajo manual. Esta situación se traduce en una falta de eficiencia operativa, impactando adversamente tanto la producción como los tiempos de operación. Las operaciones esenciales, como la carga y el transporte, se ven particularmente comprometidas, lo que provoca incrementos notables en los tiempos de ejecución y una disminución en los niveles de producción.

Por esta razón, este estudio busca abordar esta problemática mediante la implementación de modelos de simulación de eventos discretos. Para ello se construye un modelo de simulación en el software Arena empleando datos de ciclos de carguío y transporte hacia un punto de conminución de una cantera ubicada en Sao Paulo, Brasil, lo cual permitió analizar distintos escenarios de operación en donde se considera el caso de la ampliación de la rampa, evaluando el desempeño de configuraciones en el número de palas y camiones.

Las simulaciones muestran que el chancador limita el flujo de mineral al crear largas colas de camiones en espera. Esto lleva al sistema a alcanzar su capacidad máxima con tan solo tres camiones en operación. La ampliación de la rampa no genera cambios significativos, ya que el cuello de botella sigue siendo el chancador. De igual manera, añadir una segunda pala resulta ineficaz, ya que el flujo está estancado y no se logra una utilización al 100% de las palas debido a la capacidad limitada del chancador. Estos resultados sugieren que las modificaciones propuestas no mejoran sustancialmente la eficiencia operativa del sistema bajo las condiciones actuales.

En conclusión, el estudio demuestra que la simulación de eventos discretos es una herramienta eficaz para mejorar la toma de decisiones en la minería de pequeña escala, proporcionando un enfoque accesible y de bajo costo para la planificación estratégica y la mejora de la competitividad del sector.

Abstract

Small-scale mining faces considerable challenges, primarily due to the lack of financial and technological resources, leading to unconventional solutions and a reliance on manual labor. This situation results in a lack of operational efficiency, adversely impacting both production and operation times. Essential operations, such as loading and transportation, are particularly compromised, causing significant increases in execution times and a decrease in production levels.

For this reason, this study aims to address this issue by implementing discrete event simulation models. A simulation model was developed using Arena software, incorporating data from loading and transportation cycles to a comminution point at a quarry located in São Paulo, Brazil. This approach enabled the analysis of various operational scenarios, including the potential ramp expansion and the evaluation of configurations involving different numbers of shovels and trucks.

The simulations show that the crusher acts as a bottleneck, limiting the mineral flow, creating long queues of waiting trucks, and reaching the system's maximum capacity with three trucks in operation. Ramp expansion does not produce significant changes, as the bottleneck remains the crusher. Similarly, adding a second shovel proves ineffective since the flow is constrained, preventing 100% utilization of the shovels due to the crusher's limited capacity. These findings suggest that the proposed modifications do not substantially improve the system's operational efficiency under current conditions.

In conclusion, the study demonstrates that discrete event simulation is an effective tool for enhancing decision-making in small-scale mining. It provides an accessible and low-cost approach to strategic planning and improving the sector's competitiveness.

Índice

1	Introducción	11
1.1	Hipótesis.....	11
1.2	Objetivos	12
1.2.1	Objetivo general	12
1.2.2	Objetivos específicos	12
1.3	Alcances	12
2	Antecedentes	13
2.1	Descripción de la faena	13
2.2	Sistema de carga y transporte de mineral.....	14
2.3	Tiempos del ciclo	15
2.4	Norma ASARCO e indicadores operacionales	16
2.4.1	Definición de tiempos	16
2.5	Modelación de eventos.....	18
2.5.1	Modelos de simulación	18
2.6	Simulación de eventos discretos	18
2.7	Conceptos en la simulación.....	19
2.8	Pasos para la simulación de eventos discretos	20
2.9	Programas de simulación de eventos discretos	20
2.10	Aplicación de simulación en minería.....	21
3	Metodología	23
3.1	Gestión y limpieza de datos	23
3.2	Construcción e implementación del modelo en un programa de simulación	23
3.3	Simulación de casos	23
3.4	Análisis de resultados y viabilidad.....	24
4	Desarrollo.....	24
4.1	Gestión y limpieza de datos	24
4.2	Distribución de tiempos	25
4.3	Modelado y simulación.....	26
4.3.1	Modelo del sistema	26
4.3.2	Parámetros de entrada y salida.....	28
5	Resultados	29

5.1	Producción	29
5.2	Utilización de la pala.....	32
5.3	Número de camiones en cola en el banco	35
5.4	Tiempo de espera en el banco	36
5.5	Utilización del chancador.....	38
5.6	Número de camiones en cola en el chancador	41
5.7	Tiempo de espera en el chancador	42
5.8	Caso complementario.....	45
6	Análisis de resultados.....	49
7	Conclusiones	51
8	Referencias.....	53
9	Anexo	54
9.1	Distribuciones de tiempo.	54
9.1.1	Carguío.....	54
9.1.2	Descarga.....	55
9.1.3	Transporte banco – chancador	56
9.1.4	Transporte chancador – banco	57
9.1.5	Procesamiento	58
9.1.6	Maniobra en banco.....	59
9.1.7	Maniobra en chancador.....	60
9.1.8	Salida del chancador	61
9.2	Modelo implementado en el programa Arena.....	62
9.3	Modelo lógico	63

Índice de figuras

Figura 2.1 Vista aérea de la cantera	13
Figura 2.2 Fotografía de la cantera y el equipo operativo.....	14
Figura 2.3 Esquema de ciclo de camión (Chaowasakoo, 2017)	15
Figura 4.1 Flujo del sistema	27
Figura 4.2 Modelo lógico	28
Figura 5.1 Producción semanal para caso base	30
Figura 5.2 Producción semanal para caso ampliación de la rampa.....	31
Figura 5.3 Producción semanal para caso rampa sin restricción	32
Figura 5.4 Utilización de la pala para caso base	33
Figura 5.5 Utilización de la pala para caso ampliación rampa	34
Figura 5.6 Utilización de la pala para caso rampa sin restricción.....	34
Figura 5.7 Número de camiones en cola en el banco para caso base.....	35
Figura 5.8 Número de camiones en cola en el banco para caso rampa ampliada	36
Figura 5.9 Número de camiones en cola en el banco para caso rampa sin restricción	36
Figura 5.10 Tiempo de espera en el banco para caso base.....	37
Figura 5.11 Tiempo de espera en el banco para caso rampa ampliada	38
Figura 5.12 Tiempo de espera en el banco para caso rampa sin restricciones	38
Figura 5.13 Utilización del chancador para caso base	39
Figura 5.14 Utilización del chancador para caso ampliación rampa.....	40
Figura 5.15 Utilización del chancador para caso rampa sin restricción.....	40
Figura 5.16 Número de camiones en cola en chancador para caso base.....	41
Figura 5.17 Número de camiones en cola en chancador para caso rampa ampliada	42
Figura 5.18 Número de camiones en cola en chancador para caso rampa sin restricción	42
Figura 5.19 Tiempo de espera en cola del chancador para caso base	43
Figura 5.20 Tiempo de espera en cola del chancador para caso rampa ampliada	44
Figura 5.21 Tiempo de espera en cola del chancador para caso rampa sin restricciones	44
Figura 5.22 Producción semanal para caso complementario	45
Figura 5.23 Utilización del chancador para caso complementario	46
Figura 5.24 Utilización de la pala para caso complementario	46

Figura 5.25 Tiempo de espera en cola del chancador para caso complementario	47
Figura 5.26 Tiempo de espera en cola en el banco para caso complementario	48
Figura 5.27 Número de camiones en cola en chancador para caso complementario	48
Figura 5.28 Número de camiones en cola en el banco para caso complementario.....	49

Índice de tablas

Tabla 2.1 Distribución de tiempos de norma ASARCO	16
Tabla 4.1 Estadística básica de los tiempos.	24
Tabla 4.2 Datos estadísticos posterior a la limpieza de los tiempos	25
Tabla 4.3 Distribución de tiempos	25
Tabla 4.4 Parámetros de entrada	29
Tabla 4.5 Parámetros de salida.....	29

Anexos

Anexo 1 Resumen de distribución de tiempo de carguío mediante el software Input Analyzer.	54
Anexo 2 Distribución de tiempo de carguío	54
Anexo 3 Resumen de distribución de tiempo de descarga mediante el software Input Analyzer.	55
Anexo 4 Distribución de tiempo de descarga	55
Anexo 5 Resumen de distribución de tiempo de transporte banco - chancador mediante el software Input Analyzer.	56
Anexo 6 Distribución tiempo transporte banco – chancador	56
Anexo 7 Resumen de distribución de tiempo de transporte chancador - banco mediante el software Input Analyzer.	57
Anexo 8 Distribución tiempo transporte chancador – banco	57
Anexo 9 Resumen de distribución de tiempo de procesamiento mediante el software Input Analyzer.	58
Anexo 10 Distribución de tiempo procesamiento	58
Anexo 11 Resumen de distribución de tiempo de maniobra en banco mediante el software Input Analyzer.	59
Anexo 12 Distribución de tiempo maniobra en banco.....	59
Anexo 13 Resumen de distribución de tiempo de maniobra en chancador mediante el software Input Analyzer.	60
Anexo 14 Distribución de tiempo maniobra en chancador	60
Anexo 15 Resumen de distribución de tiempo de salida del chancador mediante el software Input Analyzer.	61
Anexo 16 Distribución de tiempo salida del chancador.....	61
Anexo 17 Modelo implementado en el programa Arena	62
Anexo 18 Modelo lógico.....	63

1 Introducción

En la industria minera, los sistemas camión-pala son los principales sistemas de carga y transporte utilizados en minería superficial estos requieren una considerable inversión de capital (Liu y Kozan, 2016). Motivando la búsqueda de estrategias para mejorar la productividad y reducir los gastos asociados.

En este contexto, uno de los principales enfoques donde se han centrado los esfuerzos es en la aplicación de técnicas avanzadas de investigación operativa para la toma de decisiones, mejorando la eficiencia y reduciendo costos en el transporte en minería superficial (Moradi Afrapoli y Askari-Nasab, 2017).

La optimización en la industria minera, particularmente en la gestión del transporte y la planificación de la producción en minas a cielo abierto, es un campo de estudio crucial debido a sus implicaciones directas en la eficiencia operativa y la rentabilidad de las operaciones mineras. En este contexto, la optimización basada en simulación emerge como una herramienta fundamental para abordar los desafíos inherentes a la complejidad de la logística minera.

La escasa implementación de estos avances tecnológicos en la minería de menor escala conduce a soluciones improvisadas y menos eficientes, lo que puede incrementar los tiempos operativos y disminuir la producción, resultando en un aumento de los costos del proceso por el elevado gasto en equipos, combustible y mantenimiento.

En este trabajo se propone la aplicación de modelos de simulación de eventos discretos para el estudio de la ampliación de una rampa que permitirá incrementar la circulación de camiones en una operación a cielo abierto. La simulación permitirá identificar los puntos críticos de la operación y el número óptimo de equipos, incrementando la eficiencia y competitividad del sector sin incurrir en los costos y riesgos de una operación real.

1.1 Hipótesis

La simulación de eventos discretos permite evaluar escenarios para identificar las condiciones óptimas de operación en el ciclo de carguío y transporte de una mina, maximizando la eficiencia y minimizando los efectos de las restricciones del sistema.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Simular y analizar el proceso de carguío y transporte en una cantera.

1.2.2 Objetivos específicos

- Diseñar y desarrollar un modelo de simulación de eventos discretos del sistema de carguío y transporte.
- Ejecutar simulaciones utilizando diferentes escenarios operativos.
- Identificar puntos críticos y cuellos de botella en el proceso de carguío y transporte.
- Proponer mejoras basadas en los resultados de la simulación y análisis de escenarios.

1.3 Alcances

En este trabajo se modela y simula un sistema de carguío y transporte en minería a cielo abierto, enfocado en una cantera en Brasil. Se utilizan datos proporcionados por la mina, obtenidos mediante mediciones en terreno de los tiempos en distintas etapas del proceso.

El estudio se enfoca en el corto plazo, simulando y analizando una semana productiva con turnos de 8 horas.

No se consideran tiempos de mantenciones de los equipos.

Dado que no se dispone de información detallada sobre el espacio físico de la mina, este aspecto no se considera en el diseño de la simulación.

Se estudian solo las operaciones de carguío y transporte, por lo tanto, los equipos considerados son las palas y los camiones.

No se consideran operaciones anteriores ni paralelas como la perforación y tronadura que afectan la continuidad y el tiempo disponible del carguío/transporte, tampoco las interrupciones en ruta de los equipos involucrados en ellas.

Además, al ser un estudio de ingeniería de comparación el estudio no considera efectuar pruebas en terreno.

2 Antecedentes

2.1 Descripción de la faena

La mina está ubicada en el norte del estado de Sao Paulo, Brasil. El depósito explotado está compuesto por mármol dolomítico metamorfizado, que económicamente se considera como piedra caliza industrial.



Figura 2.1 Vista aérea de la cantera

La mina emplea un sistema de carga y transporte convencional, es decir, camión – pala, la carga se realiza con excavadoras Caterpillar Modelo 320DL con una pala de 1 m³. El transporte a la planta lo realizan camiones Volkswagen Constellation con una tolva adaptada con capacidad de 12 m³. El ciclo de carga debe repetirse frecuentemente en la mina debido a la capacidad limitada de la pala elegida. La razón detrás de esta decisión es que una pala más pequeña ofrece una mejor selectividad, permitiendo evitar cargar materiales excesivamente grandes. Esto es crucial porque el proceso de voladura actual produce un tamaño de fragmento superior a la capacidad de alimentación de la trituradora primaria. Por lo tanto, la mina justifica el uso de una pala más pequeño para garantizar la eficiencia y evitar paradas en la trituradora. Además, la descarga de

material en la trituradora está condicionada a que haya finalizado el procesamiento del material descargado por el camión anterior.



Figura 2.2 Fotografía de la cantera y el equipo operativo.

2.2 Sistema de carga y transporte de mineral

La minería a cielo abierto es un método de extracción que se lleva a cabo de forma descendente, permitiendo la obtención del mineral desde la superficie. Este sistema está compuesto por diversas operaciones unitarias, las cuales ocurren de manera secuencial, estas son principalmente la carga del material, el transporte del material y la descarga del material.

La carga del material ocurre directamente en el punto de extracción del material, es la primera etapa del ciclo y corresponde a cuando este es extraído de la tierra, mediante equipos de carguío que cuentan con una pala la cual transfiere el material a la tolva de camiones.

La etapa de transporte consta de dos fases. La primera fase es el transporte cargado, en la que el camión, una vez cargado, se dirige a un punto de destino para realizar la descarga del material. La segunda fase ocurre después de la descarga, cuando el camión regresa vacío al punto de carga para repetir el ciclo.

Finalmente, la descarga del material implica depositar el material en un punto previamente definido según la composición del material extraído. Los puntos de descarga pueden ser:

- Planta de procesamiento: Lugar donde el mineral extraído se somete a procesos físicos y químicos para separar los minerales valiosos del material que no posee valor económico, generalmente el mineral es depositado en los chancadores.
- Botadero: Es una ubicación designada donde se deposita material estéril o residuo de la minería que no tiene valor económico.
- Almacenamiento: Se refiere a los lugares donde se guarda el material extraído, que puede ser utilizado posteriormente o enviado a procesamiento según se requiera.

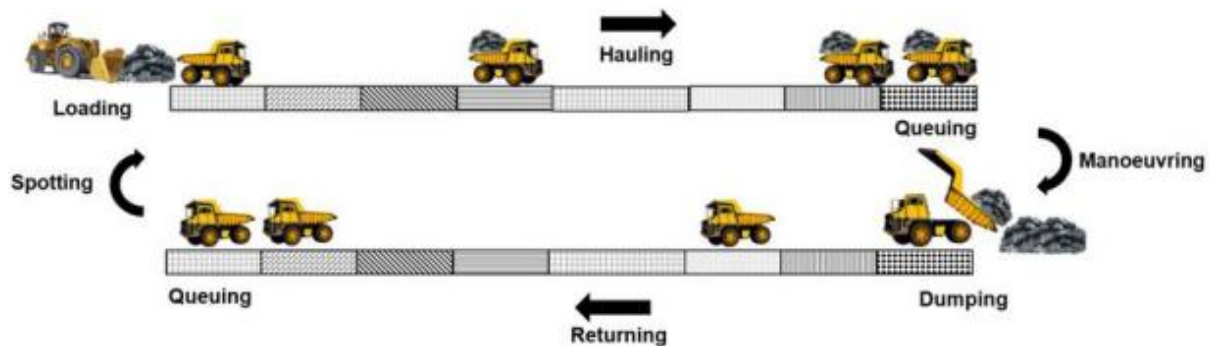


Figura 2.3 Esquema de ciclo de camión (Chaowasakoo, 2017)

2.3 Tiempos del ciclo

El tiempo de ciclo operativo de un camión se define como la duración total necesaria para completar todas las etapas de su operación. Esto incluye la suma de los tiempos dedicados a diferentes actividades, tales como el acuatamiento para ser cargados, la carga, el viaje cargado hacia el sitio de descarga, el acuatamiento para descargar y la descarga en el botadero, así como el retorno vacío al equipo de carguío. Además, este tiempo considera tanto las demoras programadas como las no programadas, así como los tiempos de espera asociados.

En la Ecuación 1, se entregan las variables que componen el ciclo de carguío en una mina a cielo abierto:

$$T_{CT} = T_{AC} + T_C + T_{VC} + T_{AD} + T_D + T_{VV} + T_{CO} \quad (1)$$

Donde:

T_{CT} : Tiempo de ciclo unidad de transporte, [min].

T_{AC} : Tiempo de acuatamiento en la unidad de carguío, [min].

T_C : Tiempo de carguío, [min].

T_{VC} : Tiempo de viaje cargado, [min].

T_{AD} : Tiempo de acuatamiento en lugar de descarga, [min].

T_D : Tiempo de descarga, [min].

T_{VV} : Tiempo de viaje vacío, [min].

T_{CO} : Tiempo en cola, [min].

2.4 Norma ASARCO e indicadores operacionales

La norma ASARCO (American Smelting & Refining Co.) es el marco de referencia utilizado para la definición de conceptos y distribución de los tiempos que un equipo, máquina o instalación incurre durante un periodo de tiempo (CODELCO, 2005). Esta norma, adaptada a las condiciones operativas específicas de la faena, considera diversas variables y genera indicadores que permiten evaluar el comportamiento y rendimiento de los equipos utilizados en los procesos de extracción, procesamiento y tratamiento de minerales. La gráfica de tiempos según esta norma se presenta en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Distribución de tiempos de norma ASARCO

Tiempo nominal				
Tiempo disponible				Fuera de servicio
				Programado Imprevisto
Tiempo operativo			Reservas	
Tiempo efectivo	Pérdidas operacionales	Demoras		
		Programado	No programado	

2.4.1 Definición de tiempos

- Tiempo nominal: Período durante el cual el equipo se encuentra físicamente en faena.
- Tiempo disponible: Período en que el equipo está habilitado electromecánicamente para operar.
- Fuera de servicio: Período en que el equipo no está disponible, ya sea por mantenimiento programado o por fallas mecánicas o eléctricas imprevistas.
- Tiempo operativo: Período en que el equipo está siendo operado en la faena (con un operador a cargo).
- Reserva: Período en que el equipo, aunque está en condiciones electromecánicas para operar, no se utiliza en labores productivas, ya sea por falta de operador o exceso de equipos disponibles.

- Tiempo efectivo: Período en que el equipo está realizando las tareas específicas para las que fue adquirido y diseñado.
- Pérdidas operacionales: Período en que el equipo no puede operar debido a la espera de un equipo complementario.
- Demoras programadas: Período en que el equipo no opera debido a actividades normadas por ley, como la hora de colación o el cambio de turno.
- Demoras no programadas: Período en que el equipo no opera debido a condiciones propias de la operación o ineficiencias, como la carga de combustible, la limpieza o acondicionamiento de áreas de la faena, entre otras.

De la norma ASARCO se derivan los indicadores operacionales, estos son:

- Disponibilidad: Este indicador mide el porcentaje de tiempo que el equipo estuvo apto para operar, considerando que no presentó fallas o problemas técnicos.

$$\text{Disponibilidad (\%)} = \frac{\text{Tiempo disponible}}{\text{Tiempo nominal}} * 100 \quad (2)$$

- Utilización (base nominal): Define el porcentaje del tiempo programado en el cual el equipo estuvo en uso activo y realizando su función.

$$\text{Utilización (\%)} = \frac{\text{Tiempo efectivo}}{\text{Tiempo nominal}} * 100 \quad (3)$$

- Utilización operativa: Representa la proporción del tiempo en que el equipo estuvo operativo durante el tiempo disponible, excluyendo el tiempo en que estuvo en reserva o en mantenimiento programado

$$\text{Utilización operativa (\%)} = \frac{\text{Tiempo operativo}}{\text{Tiempo disponible}} * 100 \quad (4)$$

- Factor de utilización: Es el porcentaje sobre las horas operativas en que el equipo realiza tareas efectivas, mostrando cuán eficientemente se aprovechó su tiempo de funcionamiento.

$$\text{Factor de utilización(\%)} = \frac{\text{Tiempo efectivo}}{\text{Tiempo disponible}} * 100 \quad (5)$$

2.5 Modelación de eventos

Los modelos de simulación permiten representar situaciones reales de diferentes tipos. En el contexto de sistemas cada vez más complejos, surge la necesidad de desarrollar modelos que representen estos fenómenos de manera efectiva para la toma de decisiones. El modelado se convierte así en una herramienta clave, ya que permite simplificar sistemas y fenómenos mediante modelos matemáticos que predicen y analizan su comportamiento.

2.5.1 Modelos de simulación

Existen distintos modelos de simulación, pero estos se pueden clasificar principalmente en:

- Estáticos: El tiempo no se define como variable; importa solo el resultado, como en el método Montecarlo.
- Dinámicos: El tiempo es importante para plasmar la evolución del sistema. Los modelos dinámicos pueden dividirse a su vez en:
 - a) Modelos discretos: Analizan el sistema en momentos específicos, evaluando su comportamiento en puntos determinados.
 - b) Modelos continuos: Utilizan ecuaciones diferenciales para representar relaciones entre las variables del sistema, permitiendo estudiar su comportamiento de manera continua a lo largo del tiempo.

Además, los modelos pueden clasificarse como determinísticos o probabilísticos (estocásticos). Los modelos determinísticos utilizan relaciones constantes entre las variables. Los modelos probabilísticos, en cambio, incorporan variabilidad e incertidumbre, ajustándose a situaciones donde los cambios en el sistema siguen distribuciones de probabilidad.

2.6 Simulación de eventos discretos

La simulación es una técnica numérica que emplea relaciones matemáticas y lógicas para describir la estructura y el comportamiento de sistemas del mundo real en un ordenador (Banks, 1999). En particular, la simulación de eventos discretos permite modelar la evolución de un sistema a lo largo del tiempo, capturando los cambios en variables clave que ocurren de manera puntual y específica en momentos discretos.

La simulación de eventos discretos presenta tanto ventajas como desventajas, las cuales se presentan a continuación:

Ventajas:

- Es una herramienta efectiva para evaluar el impacto de cambios en el sistema sin realizar modificaciones en el mundo real, resultando en un método más económico y seguro.
- Permite observar el comportamiento del sistema bajo condiciones hipotéticas, diferentes a las que se presentan en la realidad.
- Facilita la toma de decisiones informadas al visualizar las posibles consecuencias de las decisiones antes de ejecutarlas.
- Ofrece una visión integral del impacto de diferentes variables operativas sobre una variable de interés, ayudando a identificar factores críticos.
- Su implementación es más accesible gracias a la disponibilidad de software avanzado, lo que facilita su uso sin necesidad de conocimientos técnicos profundos.
- Las interfaces gráficas de los programas de simulación proporcionan una visualización clara y accesible de los procesos simulados, mejorando la comprensión y análisis de los resultados.

Desventajas:

- El software de simulación puede ser costoso y requerir recursos computacionales significativos para procesar simulaciones a gran escala.
- Puede requerir una gran cantidad de tiempo y recursos para desarrollar modelos precisos y detallados, especialmente en sistemas complejos.
- La validez de los resultados depende de la calidad y precisión de los datos de entrada y de los supuestos del modelo; si estos son inadecuados, los resultados pueden ser poco realistas o inexactos.
- Requiere que el usuario posea conocimientos especializados en estadística y un buen dominio del software para una implementación efectiva.

2.7 Conceptos en la simulación

- Sistema: Conjunto de elementos que se interrelacionan para funcionar como un todo.
- Entidad: Objetos que se mueven por el proceso, pueden crearse o desaparecer según condiciones del modelo.

- **Recurso:** Es un elemento estacionario que puede ser ocupado por una entidad. Los recursos se utilizan para representar actividades clave del proceso, las cuales restringen el flujo de entidades.
- **Atributo:** Es una característica propia de cada entidad y se pueden definir tantos atributos como lo requiera el usuario para el modelamiento del proceso en estudio.
- **Variable:** Son condiciones cuyos valores se crean y modifican por medio de ecuaciones matemáticas y relaciones lógicas
- **Proceso:** Es un conjunto de componentes interrelacionadas que, en una forma organizada, recibe entradas y las procesa y emite salidas para obtener una meta común.
- **Evento:** Es la ocurrencia que cambia el estado del proceso.

2.8 Pasos para la simulación de eventos discretos

- **Investigación del sistema:** Comprender la estructura y procedimientos del sistema.
- **Descripción y definición del sistema:** Identificar problemas a resolver y objetivos a alcanzar.
- **Adquisición y análisis de datos:** Recopilar datos necesarios para la simulación, ajustar distribuciones y estimar parámetros.
- **Creación del modelo del sistema:** Utilizar diagramas de flujo, narrativas escritas, expresiones matemáticas, gráficos, etc.
- **Programación e implementación del modelo:** Programar e implementar el modelo de simulación en el programa seleccionado.
- **Ejecución del modelo de simulación:** Ejecutar el modelo bajo diferentes condiciones y estrategias operativas.
- **Salida y análisis de resultados:** Realizar inferencias estadísticas basadas en las muestras de salida de la simulación.

2.9 Programas de simulación de eventos discretos

La simulación de eventos discretos es ampliamente utilizada en diversas industrias, como manufactura, logística, salud y servicios, para modelar y optimizar procesos complejos. Herramientas de *software* como Simio, AnyLogic, SimEvents y FlexSim son destacadas en este ámbito, debido a su versatilidad y capacidad de adaptación a distintos tipos de operaciones. Estos programas permiten analizar y mejorar procesos en distintos contextos, pero también pueden aplicarse a la industria minera, como en el ciclo de carguío y transporte.

Por otro lado, existen herramientas especializadas en la simulación de carguío y transporte en minería, como HaulSim y Delphos Simulator, que están diseñadas específicamente para optimizar el flujo de materiales en operaciones a cielo abierto y subterráneas.

Un programa ampliamente utilizado en varias industrias y adaptable a operaciones mineras es Arena, que permite modelar cualquier tipo de proceso bajo la metodología de eventos discretos. Aunque es una herramienta generalista, Arena también es eficaz para simular los ciclos de carguío y transporte en minería.

Arena es un programa de simulación de eventos discretos, basado en el lenguaje de programación SIMAN, opera con un paquete de simulación de eventos discretos. Es altamente eficiente al trabajar con sistemas de una sola configuración y puede recrear el comportamiento de una operación real a cielo abierto, aplicando los procesos de extracción y transporte de mineral, todo en un entorno estocástico. Esto también permite simular entornos deterministas y/o aleatorios en eventos como el mantenimiento preventivo y correctivo, así como paradas operativas. Por estas razones, el *software* es capaz de recrear comportamientos reales complejos con una lógica de decisión intrincada (Mena *et al.*, 2013).

2.10 Aplicación de simulación en minería

El reciente estudio de Huayanca *et al.* (2023), se centró en calcular el tamaño necesario de la flota de camiones para cumplir con la producción anual de cobre de una mina mediante simulación de eventos discretos. Se comparó esta metodología con el enfoque determinista para evaluar su impacto en el tamaño de la flota. La metodología involucró el desarrollo de un modelo de operación de un día para recrear las condiciones existentes en la mina y luego extenderlo al plan anual.

Para lograr esto, se siguieron los siguientes pasos: recopilación de información y generación de funciones de distribución probabilística para variables como toneladas cargadas, tiempos fijos de ciclo, topografías y retrasos operativos. Se utilizó el programa Arena para generar distribuciones que se ajustaran a los datos recopilados y se realizaron pruebas de ajuste como Chi-cuadrado y Kolmogorov-Smirnov. Además, se empleó el algoritmo de Dijkstra para calcular distancias más cortas entre puntos.

El modelo resultante se calibró y validó mediante comparación con datos reales de la operación minera. Se comparan dos modelos, deterministas y estocásticos para el plan anual, manteniendo las distribuciones de probabilidad para los modelos estocásticos y utilizando valores medios para

los deterministas. Se modificaron tonelajes objetivo según los requerimientos del plan anual y se calculó el tiempo variable y fijo en base a nuevos caminos de acarreo. Los resultados se evaluaron mediante indicadores como productividad de camiones, horas trabajadas, tiempo de ciclo y distancia total de acarreo. En base a estos indicadores, el autor concluye lo siguiente respecto a cada modelo. El modelo estocástico genera colas más largas en los puntos de carga debido a la variabilidad de los tiempos, lo que incrementa el número de camiones necesarios casi todos los meses. Este modelo refleja de manera más realista la variabilidad de los parámetros en la operación minera, permitiendo ajustes más precisos y ahorrando tiempo. Por otro lado, el modelo determinístico proporciona una planificación más estable con menos fluctuaciones mensuales, pero no captura la variabilidad real de la operación tan efectivamente como el modelo estocástico.

En el trabajo de Ghaziani *et al.* (2021), se utilizó la simulación de eventos discretos para modelar el sistema de transporte de la mina de cobre y los escenarios propuestos, utilizando el programa Arena y el algoritmo metaheurístico de luciérnagas para optimizar el número, capacidad, producción y costo de la flota. El proceso de simulación incluye la definición de un objetivo, recopilación de datos, desarrollo y validación del modelo, uso del modelo y análisis de resultados. En la modelación con Arena, se utilizan los términos "módulo" y "plantilla" para representar componentes del sistema, y se emplea un analizador de entradas para ajustar y seleccionar distribuciones apropiadas para los datos de entrada.

El algoritmo de luciérnagas es un método de inteligencia de enjambre inspirado en el comportamiento de las luciérnagas. Se basa en la intensidad de la luz que disminuye con la distancia y la absorción de la luz. Las luciérnagas se atraen entre sí en función de su brillo, determinado por una función objetivo. Este algoritmo se utiliza para buscar soluciones optimizadas de manera aleatoria.

En cuanto a los resultados, se validó el modelo comparando salidas del modelo con diferentes entradas y preparando una animación del modelo. La simulación reveló que la asignación flexible de la flota aumentó la productividad en un 25% y la producción en un 20%, además de reducir el tiempo de espera en un 20%. En escenarios con diferentes combinaciones de camiones, muestra que la producción y el costo varían significativamente según la configuración de la flota.

El estudio de Medina (2019), se enfoca en determinar el número óptimo de volquetes mineros y excavadoras que deben ser asignados a cada frente de explotación de una cantera. Para ello, se

emplea la simulación por eventos discretos como herramienta para evaluar todos los escenarios posibles y seleccionar los más eficientes.

Para llevar a cabo la simulación, se utilizaron distribuciones probabilísticas utilizando Arena Input Analyzer, basadas en datos recolectados en campo, los cuales fueron implementados en el *software* Arena. Adicionalmente, se realizó un análisis de las vías internas de la mina con el fin de simular el movimiento de los volquetes en el ciclo de acarreo, incorporando la variabilidad del tiempo de proceso en cada ciclo. Los resultados de la simulación indicaron que, de los 140 escenarios evaluados, 14 fueron identificados como óptimos, para obtener el tonelaje de producción en base a un programa anual de extracción.

3 Metodología

A partir de una base de datos correspondiente a pequeña minería, la cual contiene los tiempos de las operaciones de carguío y transporte de mineral, se definen las siguientes etapas a seguir:

Con la finalidad de cumplir con los objetivos del estudio, el estudio se subdivide en distintas etapas.

3.1 Gestión y limpieza de datos

Se realiza un análisis de los datos recopilados con el objetivo de entender el comportamiento general de las operaciones y descartar datos atípicos que puedan sesgar los resultados. Posteriormente los datos son procesados y ajustados a una distribución probabilística teórica.

3.2 Construcción e implementación del modelo en un programa de simulación

Se construye un modelo que represente el sistema en que opera la mina, considerando los aspectos más importantes de las operaciones que están implicadas. El modelo es implementado en un programa de simulación especializado, lo que permite replicar el funcionamiento del sistema de manera computacional.

3.3 Simulación de casos

Se lleva a cabo la simulación de múltiples escenarios para evaluar el rendimiento del sistema en diversas condiciones operativas.

3.4 Análisis de resultados y viabilidad

Se recopilan y analizan los resultados más relevantes de las simulaciones realizadas con la finalidad de encontrar el caso optimo que maximice la producción en la mina y evaluar la viabilidad de su implementación.

4 Desarrollo

4.1 Gestión y limpieza de datos

Para el presente estudio se utilizan los datos proporcionados por la empresa Dolomia, donde se tiene un total de 1.368 registros correspondientes a todas las etapas del proceso involucradas. En el análisis de datos, se ha identificado una heterogeneidad en la distribución de datos por proceso, lo que indica una variación en el volumen de datos recopilados en cada fase. La metodología indicada en la toma de datos consiste en utilizar un cronómetro para registrar eventos de manera individualizada por equipo, presupone una uniformidad en la frecuencia de datos que, en la práctica, no se observa. Sin embargo, dado que el análisis se realiza de forma discreta, la interdependencia entre los conjuntos de datos es inexistente, lo cual justifica la decisión de no descartar datos aparentemente discordantes. Esta aproximación no solo preserva la integridad del conjunto de datos, sino que también incrementa su robustez, contribuyendo así a la minimización de errores potenciales en siguientes etapas.

Respecto al análisis estadístico de los datos se presenta la siguiente tabla:

Tabla 4.1 Estadística básica de los tiempos.

	T. Maniobra en Banco [s]	T. Carguío [s]	T.Transp. Banco-Chancador [s]	T. Maniobra Chancador [s]	T. Descarga Chancador [s]	T. Salida Chancador [s]	T.Transp. Chancador-Banco [s]	Tiempo Procesamiento [s]
Media	66,9	290,2	218,1	38,0	119,7	29,6	127,0	348,7
Mediana	52,0	275,0	218,0	34,0	48,0	28,0	112,0	305,0
Moda	30,0	314,0	238,0	30,0	42,0	40,0	95,0	288,0
Rango	406,0	601,0	500,0	343,0	1325,0	78,0	1477,0	1770,0
Mínimo	3,0	133,0	32,0	10,0	0,0	5,0	43,0	148,0
Máximo	409,0	734,0	532,0	353,0	1325,0	83,0	1520,0	1918,0
Cuenta	196,0	217,0	165,0	163,0	158,0	137,0	146,0	186,0

Con el objetivo de filtrar los datos atípicos que no reflejan la realidad de la operación, se realiza un análisis estadístico utilizando *boxplots*, complementado con una revisión para verificar si los valores tienen coherencia con la operación. A partir de este proceso, se definen nuevos valores máximos y mínimos, estos se presentan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Datos estadísticos posterior a la limpieza de los tiempos

	T. Maniobra en Banco [s]	T. Carguío [s]	T.Transp. Banco-Chancador [s]	T. Maniobra Chancador [s]	T. Descarga Chancador [s]	T. Salida Chancador [s]	T.Transp. Chancador-Banco [s]	Tiempo Procesamiento [s]
Media	54,9	288,2	217,3	36,0	95,0	29,6	114,76	316,4
Mediana	50,0	275,0	218,5	33,5	47,0	28,0	112,0	302,5
Moda	30,0	314,0	238,0	30,0	42,0	40,0	95,0	288,0
Rango	123,0	442,0	235,0	95,0	411,0	78,0	199,0	441,0
Mínimo	12,0	133,0	129,0	10,0	8,0	5,0	43,0	148,0
Máximo	135,0	575,0	364,0	105,0	419,0	83,0	242,0	589,0
Cuenta	184,0	216,0	163,0	162,0	151,0	137,0	143,0	180,0

4.2 Distribución de tiempos

Los datos limpios se ingresan en la herramienta "*Input Analyzer*", cuya función principal es ajustar los datos a una amplia variedad de distribuciones empíricas. Esto se realiza minimizando el error a través de los análisis de Chi-cuadrado y Kolmogorov-Smirnov. Los detalles de las distribuciones y sus ajustes específicos se presentan en el Anexo 9.1.

A continuación, se presentan las distribuciones de tiempos obtenidas para cada etapa:

Tabla 4.3 Distribución de tiempos

Tiempos	Unidad	Distribución	Expresión
Maniobra en banco	Segundos	Erlang	3 + ERLA(17,3 ; 3)
Carguío	Segundos	Weibull	133 + WEIB(117 ; 2,05)
Transp. banco-chancador	Segundos	Normal	NORM(219 ; 35,9)
Maniobra chancador	Segundos	Erlang	9.5 + ERLA(6,64 ; 4)
Descarga	Segundos	Lognormal	8 + LOGN(118 , 253)
Salida chancador	Segundos	Beta	4.5 + BETA(1,56 ; 2,28)
Transp. chancador-banco	Segundos	Erlang	43 + ERLA(23,9 ; 3)
Chancado	Segundos	Weibull	148 + WEIB(187 ; 1,92)

4.3 Modelado y simulación

El modelo conceptual describe el sistema de carga y transporte de material desde el banco hasta la trituradora y viceversa. El objetivo es analizar tres escenarios diferentes en función de la capacidad de la rampa de transporte, además, se incluirá un escenario complementario que elimina la restricción en la descarga del chancador. Los escenarios que se evaluarán son los siguientes:

1. Caso base: Rampa con capacidad para un solo camión, donde solo un camión puede transitar a la vez.
2. Rampa ampliada: Rampa que permite el paso simultáneo de un camión en cada dirección, optimizando el flujo de vehículos.
3. Rampa sin restricción: Rampa con capacidad para varios camiones simultáneamente, permitiendo un flujo de transporte sin limitaciones.
4. Escenario complementario: Los camiones pueden descargar de manera continua en la trituradora, sin necesidad de esperar a que esta haya terminado de procesar el material previamente descargado.

4.3.1 Modelo del sistema

Se construye el modelo conceptual para representar el caso en estudio, este actúa como un diagrama de los procesos a modelar. Este modelo debe definir claramente el objetivo buscado y las limitaciones de interpretación que puedan existir.

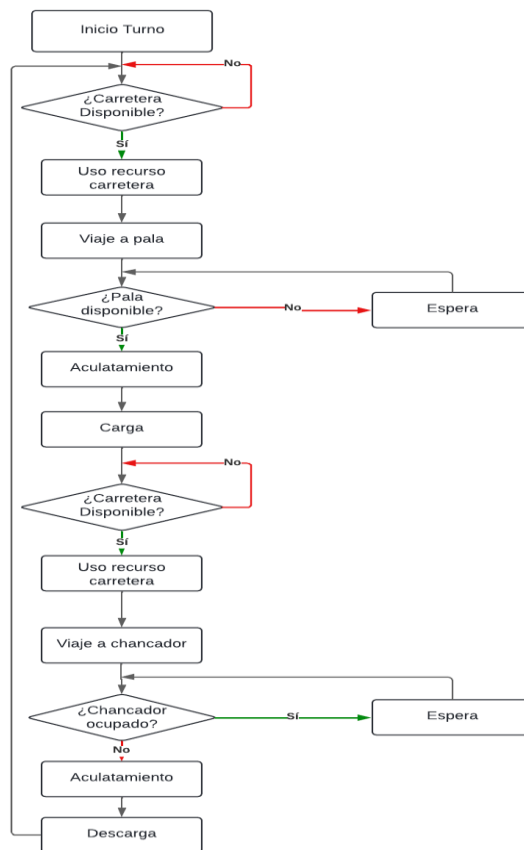


Figura 4.1 Flujo del sistema

La implementación del modelo en el programa Arena utiliza herramientas específicas para representar cada etapa del proceso. Para ello, se identifican las entidades y recursos involucrados en cada caso:

- Entidades: Los camiones encargados de transportar material desde el banco hacia la trituradora.
- Recursos:
 - a) Rampa: Vía por la cual transitan los camiones.
 - b) Pala: Recurso utilizado para cargar los camiones. Si la pala está ocupada, los camiones deben esperar.
 - c) Chancador: Procesa el material descargado.

Para generar las entidades, se emplea el módulo “*Create*”, y para representar los procesos que ocurren en cada etapa, se utiliza el módulo “*Process*”, al que se le asignan las distribuciones correspondientes y el recurso requerido en cada fase. Este recurso será utilizado por las entidades (camiones) y se configura mediante la secuencia de restricciones “*Seize, Delay, Release*” que

permite que el recurso pueda ser usado por un número determinado de entidades “n”, mientras que el resto de los camiones debe esperar hasta que el recurso esté disponible nuevamente.

El Anexo 9.2 muestra el modelo implementado en el programa Arena para representar el caso base. Este modelo fue simulado por un período de siete días para evaluar el rendimiento de distintas combinaciones de flotas de camiones y palas en el proceso de carguío.

El diagrama presentado en la Figura 4.2 ilustra en detalle el modelo lógico, mostrando el flujo de trabajo en cada etapa del proceso de carga y transporte de material. Este diagrama refleja la interacción entre las entidades y los recursos, así como las condiciones y restricciones de cada etapa. Además, para mayor claridad, el mismo diagrama se incluye en el Anexo 9.3 en un formato ampliado.

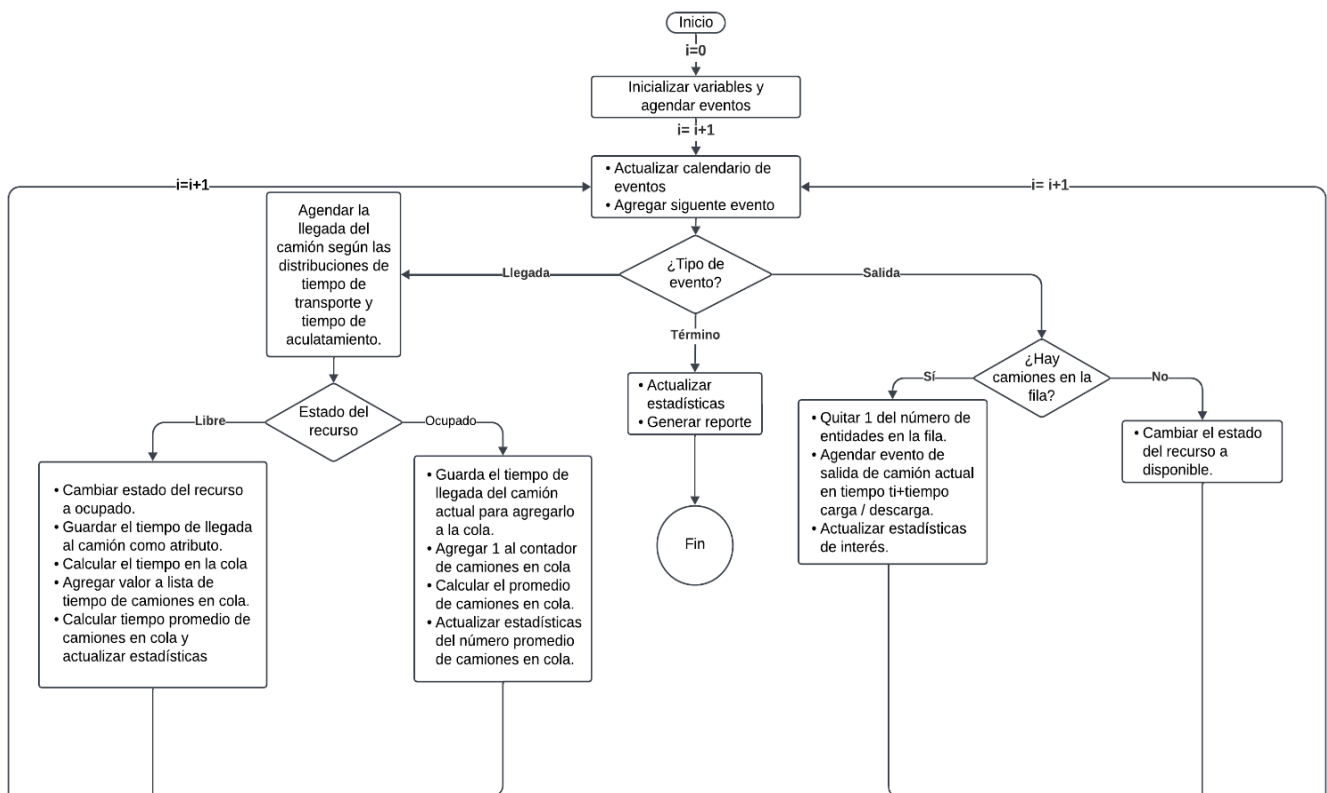


Figura 4.2 Modelo lógico

4.3.2 Parámetros de entrada y salida

Para realizar la simulación, es necesario definir una serie de parámetros iniciales que configurarán cada caso de estudio. En la Tabla 4.4 se presentan las configuraciones de entidades y recursos empleadas en cada escenario:

Tabla 4.4 Parámetros de entrada

	Entidades	Recursos			
Casos	N° Camiones	N° Palas	Chancador	Capacidad rampa	Replicaciones
Base	[1;5]	[1;2]	1	1	100
Ampliación	[1;5]	[1;2]	1	2	100
Sin restricción	[1;5]	[1;2]	1	n	100
Complementario	[1;5]	[1;2]	1	1, 2, n	100

Para representar el tiempo que toma cada actividad en el proceso, se ingresaron al programa las distribuciones de tiempo correspondientes a cada etapa. Estas distribuciones se detallan en la Tabla 4.3.

Cada caso simulado registra sus resultados en un archivo de Excel, donde la Tabla 4.5 presenta los parámetros más relevantes.

Tabla 4.5 Parámetros de salida

Parámetro	Unidad
Tonelaje total	Toneladas
Utilización del chancador	%
Utilización de la pala	%
Número de camiones en cola en el chancador	#
Numero de camiones en cola en el banco	#
Tiempo de espera en el chancador	Segundos
Tiempo de espera en el banco	Segundos

5 Resultados

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones, utilizando diagramas de cajas y bigotes para visualizar las cien replicaciones para cada caso. En todas las figuras presentadas a continuación, los gráficos a la izquierda corresponden a las simulaciones con una pala, identificadas con la letra (a), mientras que los de la derecha representan las simulaciones con dos palas, identificadas con la letra (b).

5.1 Producción

Se presentan los resultados de la producción obtenida en el periodo de una semana para cada caso de estudio.

Para el caso base, en la Figura 5.1, se aprecia un comportamiento general de un aumento en la producción a medida que se incrementa el número de camiones hasta alcanzar los tres camiones; a partir de ahí, la producción se mantiene relativamente constante. En cuanto al escenario con una pala adicional, el gráfico de la derecha muestra un leve incremento en la producción, de no más del 1,2%. Esto sugiere que existe una limitación en el flujo que impide que varios camiones lleguen al banco simultáneamente, lo que reduce la necesidad de contar con una pala adicional.

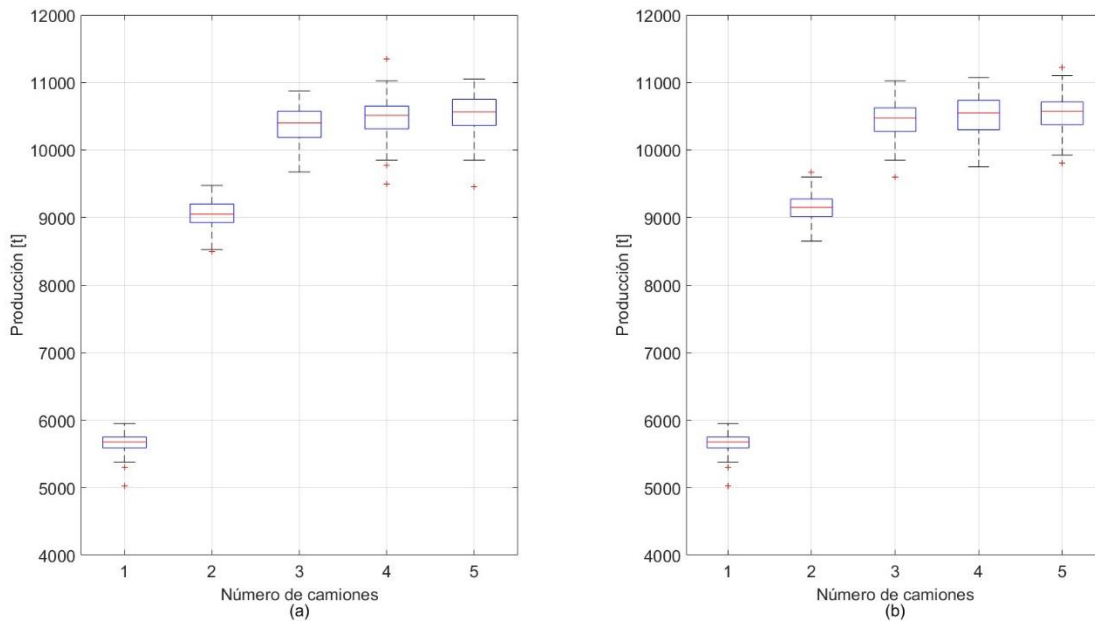


Figura 5.1 Producción semanal para caso base

En el caso de la ampliación de la rampa, se observa en la Figura 5.2 un comportamiento similar al del caso base, la producción aumenta hasta el uso del tercer camión, tras lo cual se estabiliza y se mantiene constante. Como se aprecia en la Figura (b), la adición de una pala extra tampoco genera un aumento significativo en la producción, lo que indica la posible influencia de otro factor limitante en el rendimiento del sistema. Además, la ampliación de la rampa no se traduce en un incremento notable en la producción, ya que esta se estanca en valores similares a los del caso base, sugiriendo que la capacidad de la rampa no es el único factor que limita la producción en este contexto.

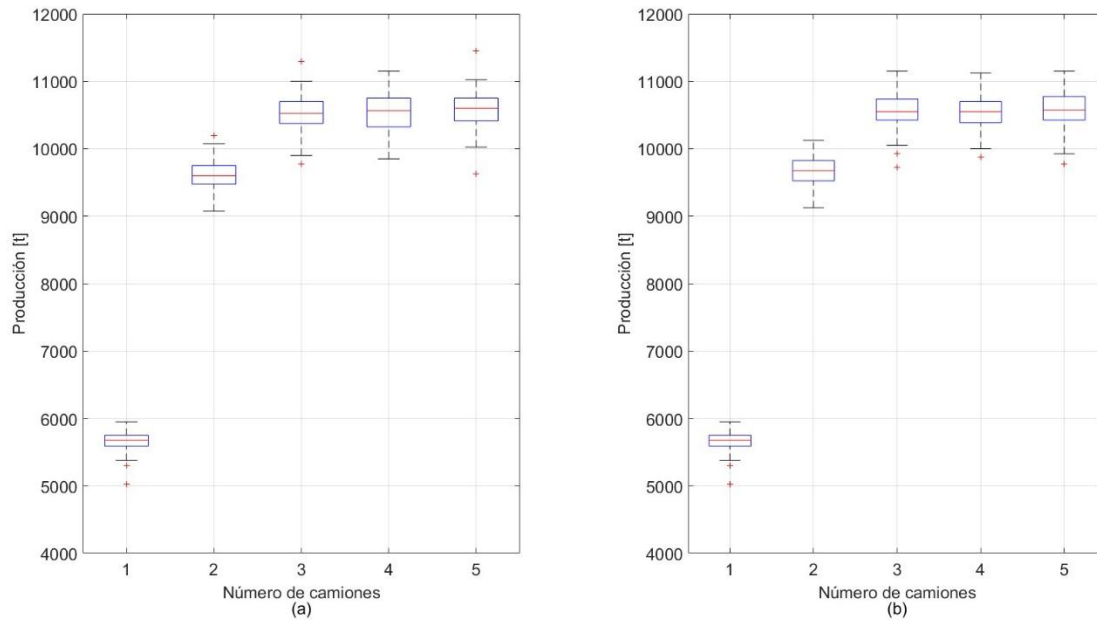


Figura 5.2 Producción semanal para caso ampliación de la rampa

En el escenario de la rampa sin restricciones, donde es posible el tránsito simultáneo de varios camiones, se observa un comportamiento que sigue la misma tendencia que en los casos anteriores. A pesar de la eliminación de las limitaciones en la circulación, la producción se mantiene en niveles similares a los observados en los casos base y de la ampliación de la rampa. Asimismo, la incorporación de una pala adicional no genera una mejora sustancial en el rendimiento del sistema. Esta situación indica que, incluso con una mayor capacidad de circulación, la producción no se ve beneficiada, lo que podría implicar la existencia de cuellos de botella en otras etapas del proceso.

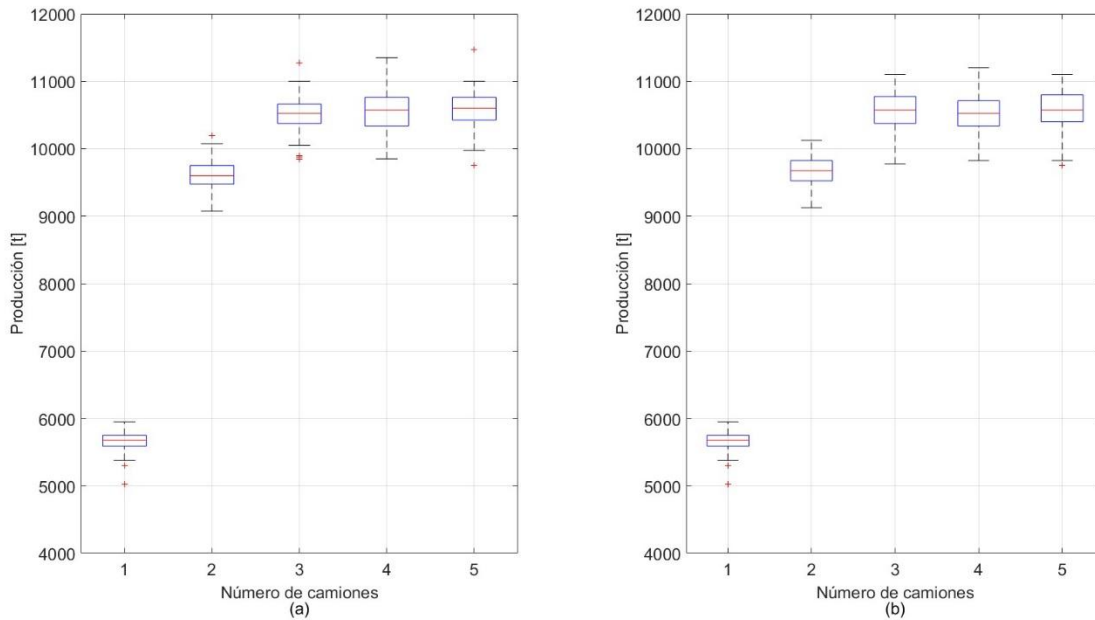


Figura 5.3 Producción semanal para caso rampa sin restricción

5.2 Utilización de la pala

Para identificar los elementos que limitan el rendimiento del sistema, se procede a analizar la utilización de las palas en el ciclo de carguío y transporte. Este análisis permite determinar si las palas representan un factor crítico en las restricciones observadas en la producción o si su desempeño es adecuado en relación con el flujo de camiones. Respecto a la utilización de la pala en el caso base, en la Figura 5.4, el *boxplot* de la izquierda muestra que la utilización de las palas aumenta a medida que se incrementa el número de camiones hasta llegar a tres camiones. Sin embargo, al añadir más camiones, la utilización se estanca en valores entre el 70 – 80 %. Esto resulta inesperado, ya que, lógicamente, al aumentar el número de camiones, se esperaría que las palas trabajaran a su máxima capacidad. En este escenario, nunca se alcanza el ideal en el que las palas operen de manera continua. Por otro lado, en el gráfico de la derecha se observa que, al incorporar una pala adicional al sistema, la utilización de cada pala disminuye significativamente. Esto resulta ineficiente, ya que se cuenta con dos equipos que no están trabajando a plena capacidad, lo que lleva a una sobreestimación en el número de palas necesarias para este caso.

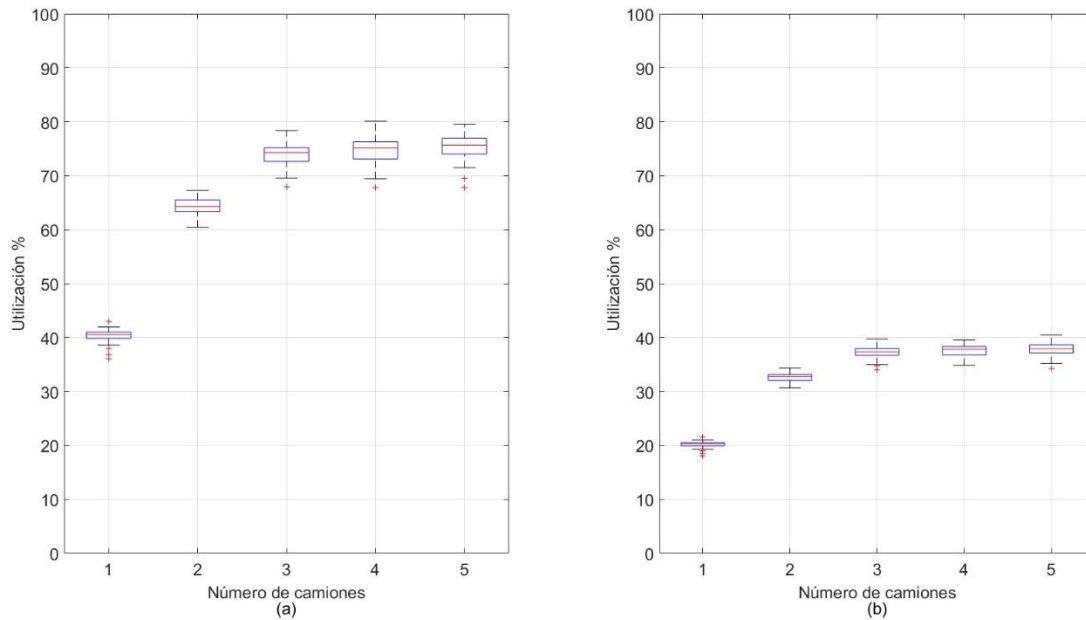


Figura 5.4 Utilización de la pala para caso base

En el caso de la ampliación de la rampa, se observa un comportamiento similar al del caso anterior, con un leve aumento en la utilización respecto a este último. Esto indica que, aunque se permite un mayor flujo de vehículos, no se logra incrementar significativamente la utilización de las palas. Esto se debe a que los vehículos no están llegando de manera constante al banco, sino que quedan retenidos en otra fase del ciclo, lo que impide que las palas operen a su máxima capacidad.

Al añadir una pala adicional al sistema, en la Figura 5.5 (b) se observa nuevamente una disminución en la utilización de estas. Aunque contar con una pala más debería, en teoría, mejorar la eficiencia del proceso, la utilización de ambas palas sigue sin alcanzar su máximo potencial. Al igual que en los casos anteriores, los vehículos continúan experimentando demoras en otras etapas del ciclo de transporte, lo que provoca tiempos de inactividad en las palas y un desaprovechamiento de los equipos.

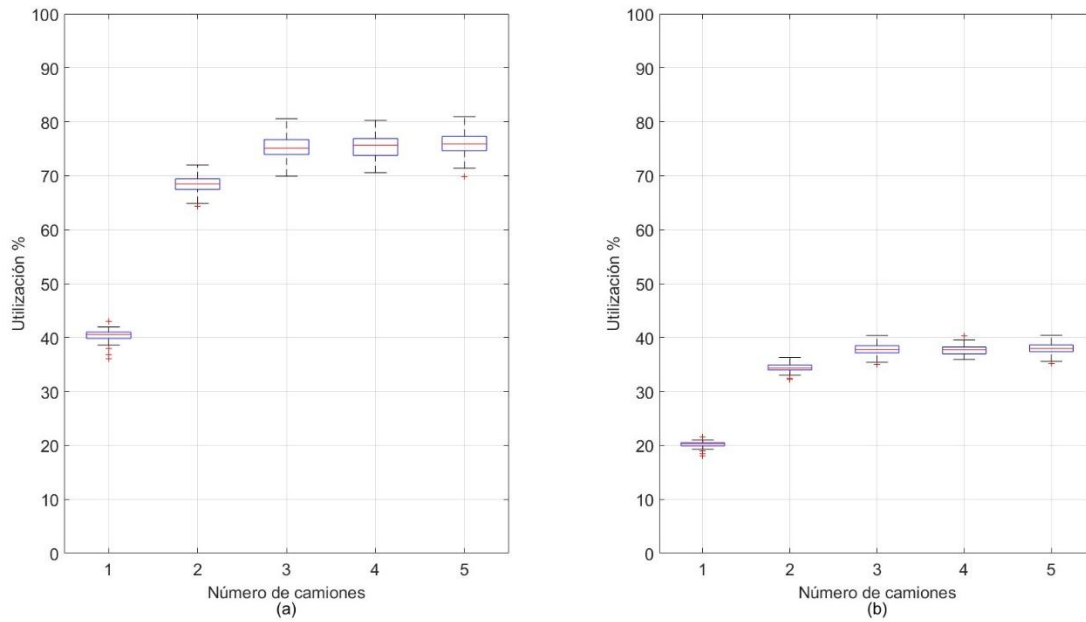


Figura 5.5 Utilización de la pala para caso ampliación rampa

La Figura 5.6 muestra que, aun eliminando las restricciones de la rampa y permitiendo el libre flujo de las entidades, la utilización de las palas sigue sin aumentar más allá del tercer camión. Esto confirma que el cuello de botella no se debe a las limitaciones de la carretera.

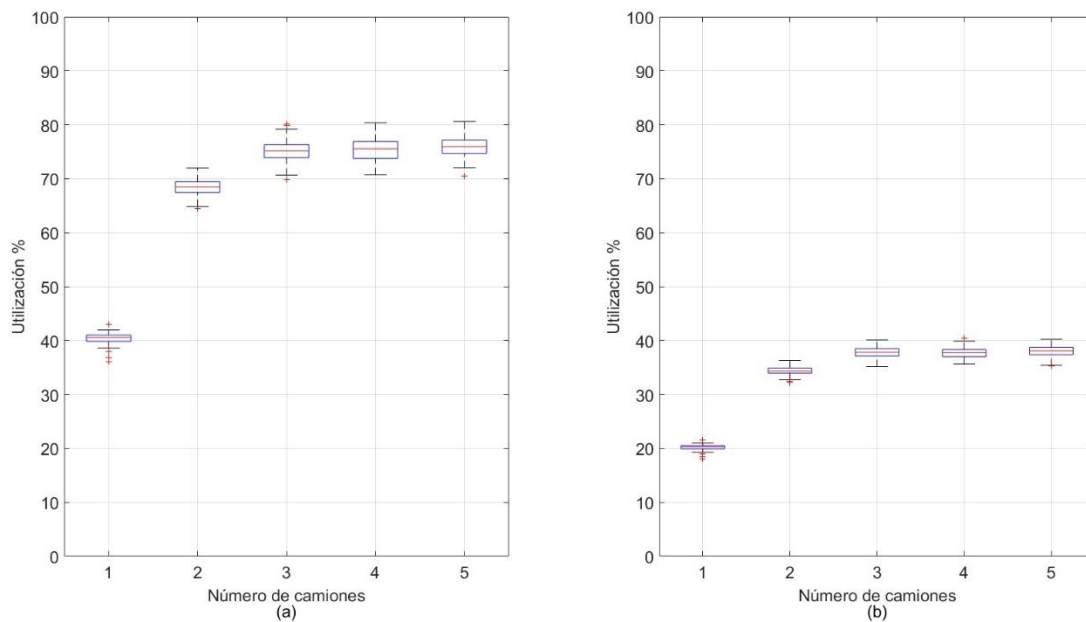


Figura 5.6 Utilización de la pala para caso rampa sin restricción

5.3 Número de camiones en cola en el banco

En la Figura 5.7 muestra el promedio de camiones en cola esperando a ser cargados por la pala. Se observa que estos valores son bajos, lo cual indica que las palas están operando eficientemente y que no se está generando un flujo significativo de camiones que cause acumulación en esa área.

Por otro lado, al aumentar el número de palas, el número de camiones en cola se reduce a cero en todos los casos estudiados, lo que sugiere que añadir una pala adicional resulta innecesario para el flujo de camiones con el que se está trabajando.

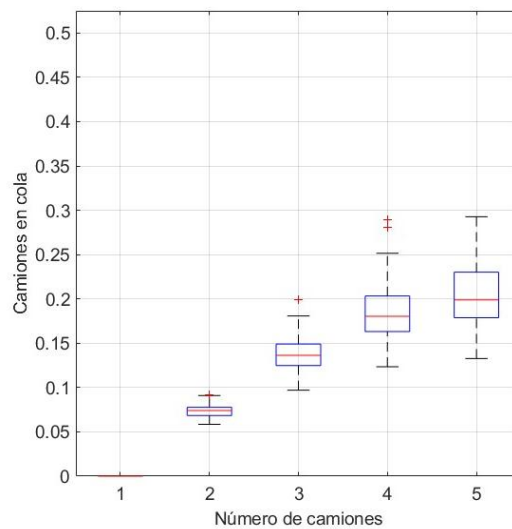


Figura 5.7 Número de camiones en cola en el banco para caso base

Al observar la Figura 5.8 es posible notar que el aumento en el flujo de camiones debido a la ampliación de la rampa genera una leve disminución en el número de camiones en la cola. Esto se debe a que la ampliación reduce los tiempos de viaje entre el banco y el chancador, permitiendo que los camiones completen sus ciclos con mayor rapidez y regresen al área de carga de manera más escalonada y menos simultánea. Este cambio en el flujo de los camiones genera una reducción leve de camiones en espera de ser cargados y reduce la presión sobre las palas.

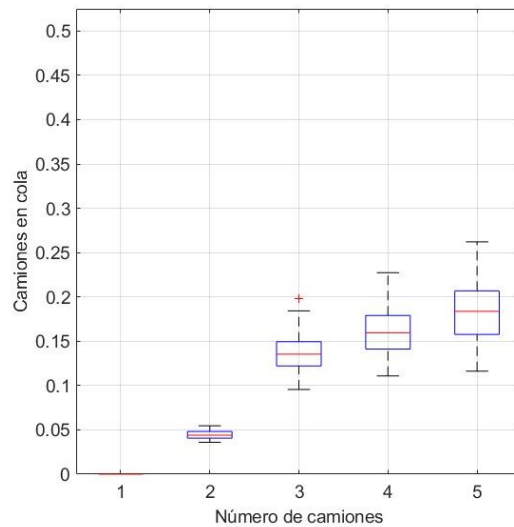


Figura 5.8 Número de camiones en cola en el banco para caso rampa ampliada

En el *boxplot* de la Figura 5.9, no se observa una variación en la cantidad de camiones en la cola. Esto indica que el sistema ya está tan saturado que permitir un mayor flujo en la carretera no genera ningún impacto adicional.

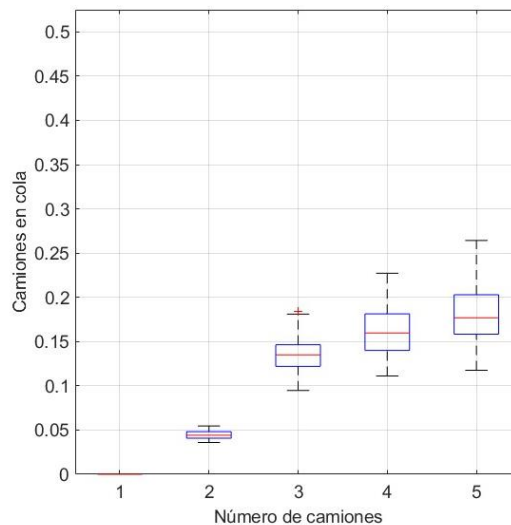


Figura 5.9 Número de camiones en cola en el banco para caso rampa sin restricción

5.4 Tiempo de espera en el banco

Respecto a el tiempo de espera de un camión en la cola para ser cargado por la pala, la Figura 5.10 muestra un aumento gradual a medida que se incrementa el tamaño de la flota, alcanzando valores que no superan los 150 segundos. Aunque este resultado podría parecer contradictorio con el promedio de camiones en espera en el banco, que sugiere una casi nula espera, se entiende que, al

considerar que el valor es un promedio de toda la semana de simulación, esto implica que, durante gran parte del tiempo, las palas están libres, lo que hace que el promedio general tienda a valores bajos. Esto sugiere que los camiones tienden a llegar simultáneamente debido a las limitaciones de flujo en el caso base.

Por otra parte, los resultados arrojan que, al agregar una pala adicional, todos los camiones son atendidos rápidamente y no experimentan tiempos de espera, lo cual se mantiene en todas las configuraciones simuladas con dos palas.

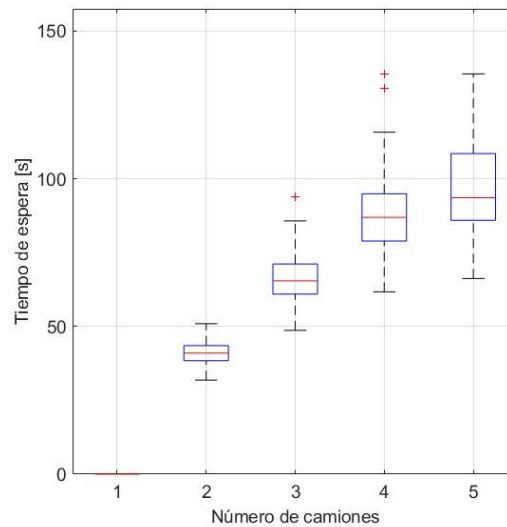


Figura 5.10 Tiempo de espera en el banco para caso base

Complementando los resultados anteriores, al ampliar la carretera, el flujo de camiones se vuelve más escalonado en lugar de simultáneo, lo que reduce los tiempos de espera, como se ilustra en la Figura 5.11.

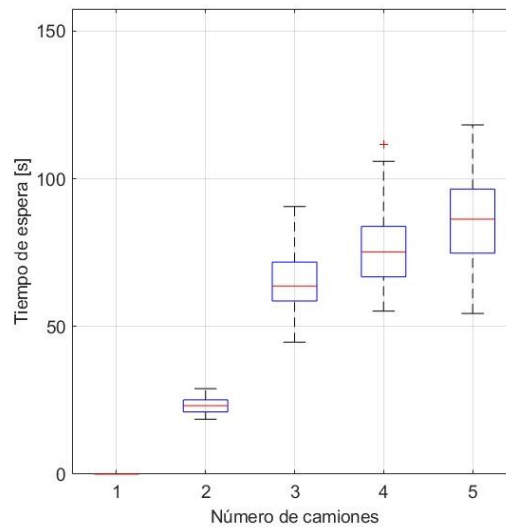


Figura 5.11 Tiempo de espera en el banco para caso rampa ampliada

Al eliminar las restricciones, la Figura 5.12, no muestran cambios significativos respecto al caso anterior, lo cual indica que los camiones llegan al banco con la misma regularidad, a pesar de poder circular varios a la vez en la rampa.

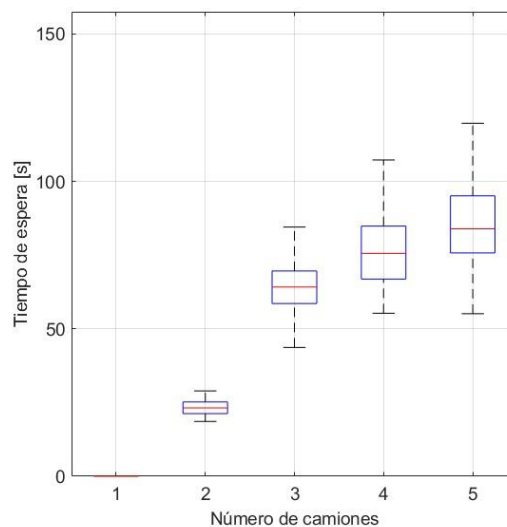


Figura 5.12 Tiempo de espera en el banco para caso rampa sin restricciones

5.5 Utilización del chancador

Descartando las palas como el factor limitante del ciclo, se procede a analizar el desempeño del chancador. Para ello, se examinan los resultados de su utilización a fin de determinar su impacto en el flujo. Para los resultados del caso base se aprecia un comportamiento similar en los 2 gráficos la Figura 5.13, en el cual a medida que se aumenta el número de camiones de uno a tres, se observa

un incremento en el porcentaje de utilización. A partir del tercer camión, el porcentaje de utilización alcanza su máximo con valores cercanos al 100%, esto sugiere que, más allá del segundo camión, el equipo alcanza su capacidad máxima operativa.

Igualmente, la incorporación de una segunda pala produce un leve aumento en la utilización cuando se opera con dos camiones, ya que agiliza el proceso de carga, reduciendo el tiempo de ciclo de los camiones hacia el chancador. Posteriormente, a partir del tercer camión, el chancador vuelve a operar al máximo de su capacidad.

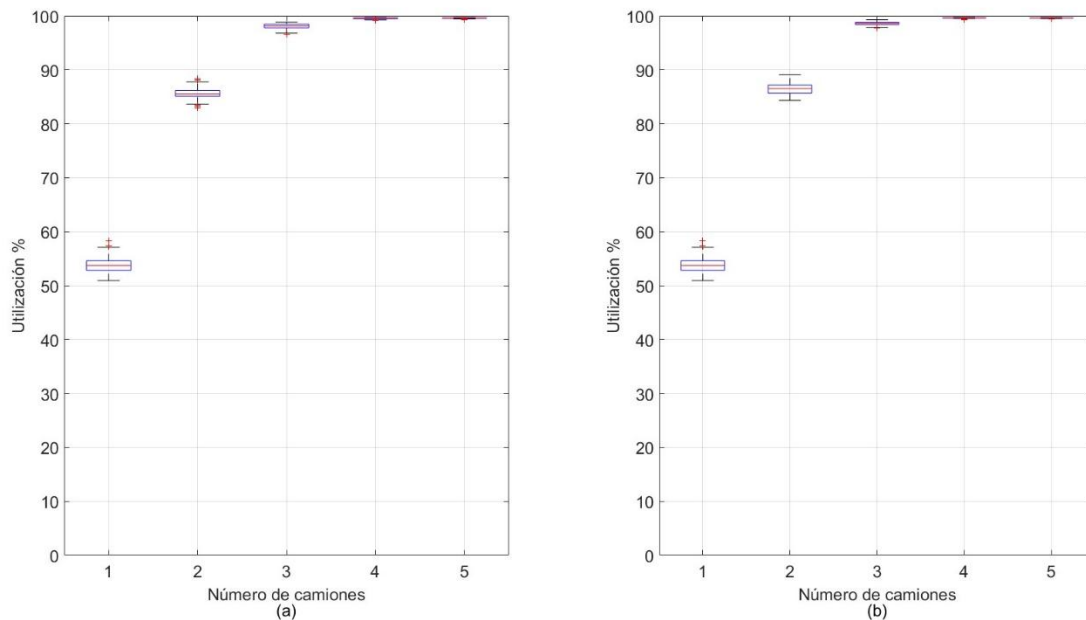


Figura 5.13 Utilización del chancador para caso base

Como se aprecia en la Figura 5.14, la ampliación de la rampa trabajando, al permitir una mayor flexibilidad en el transporte, genera un leve aumento en la utilización del chancador en la simulación con dos camiones; sin embargo, al operar con tres camiones, se alcanza la máxima utilización. Este comportamiento es similar al del caso base, donde el sistema llega a su capacidad operativa máxima con tres camiones, lo que sugiere la posible presencia de un cuello de botella en el chancador que limita la eficiencia de todo el sistema.

Además, al agregar una pala adicional, se observa el mismo patrón. Aunque la utilización del chancador presenta un ligero incremento al operar con dos camiones, alcanza nuevamente su límite de capacidad con tres camiones. Por lo que la incorporación de una pala adicional genera una mayor sobrecarga al equipo de chancado.

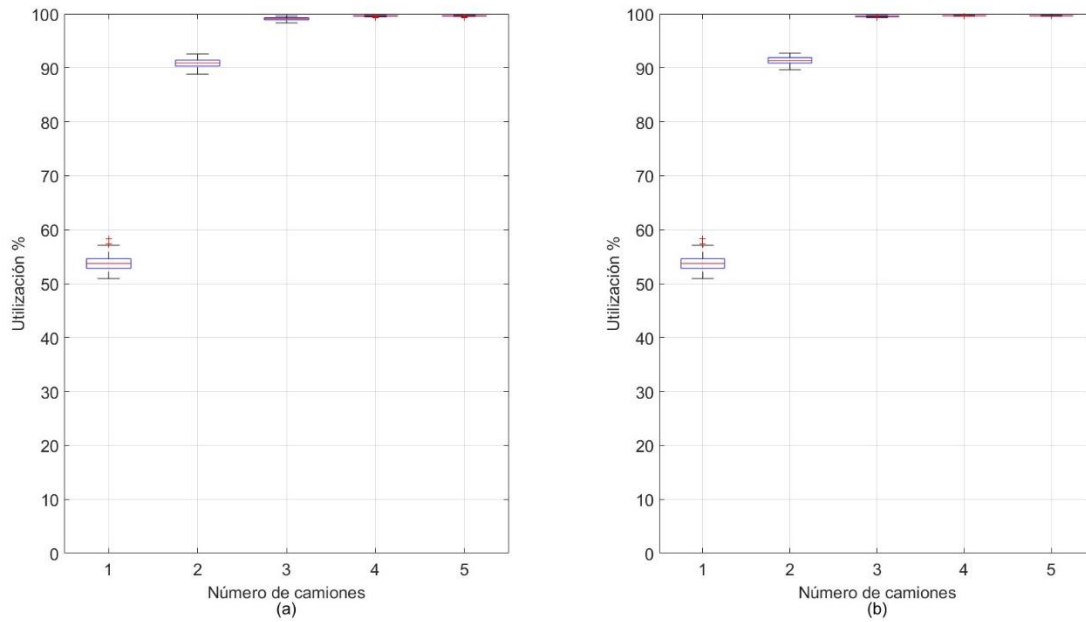


Figura 5.14 Utilización del chancador para caso ampliación rampa

En el caso de la rampa sin restricciones, como muestra la Figura 5.15, se observa un patrón de comportamiento similar a los escenarios previos. Esta tendencia refuerza la idea de que, independientemente de las variaciones en la configuración de la rampa o de las mejoras en flexibilidad y capacidad de transporte, el chancador limita el desempeño global del sistema una vez que alcanza su punto de máxima utilización.

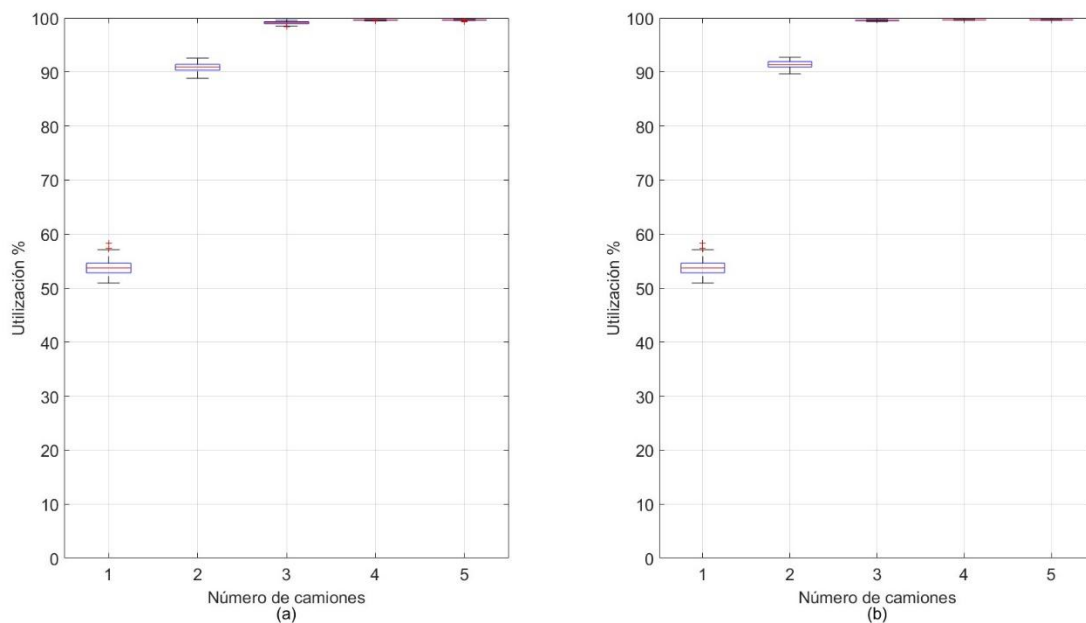


Figura 5.15 Utilización del chancador para caso rampa sin restricción

5.6 Número de camiones en cola en el chancador

Para analizar en mayor detalle la causa de los resultados observados, a continuación, se presenta el número promedio de camiones en espera para descargar en el chancador. Estos resultados permitirán ver cómo el funcionamiento del chancador está impactando el rendimiento del sistema.

Al ver los resultados del caso base, la Figura 5.16 muestra que a medida que se incrementa el número de camiones en operación, también crece el número de camiones en la cola, llegando a situarse en algunos casos en más de la mitad de la flota en espera, lo que evidencia un atasco en esa área que limita el correcto funcionamiento de los camiones.

Además, la Figura 5.16 (b) muestra que, la incorporación de una pala adicional al sistema agiliza levemente el proceso de carga, lo cual incrementa el flujo de camiones hacia el chancador. Esto, a su vez, provoca un ligero aumento en la cola de espera, indicando que la etapa de descarga sigue siendo una restricción clave para el rendimiento general del sistema.

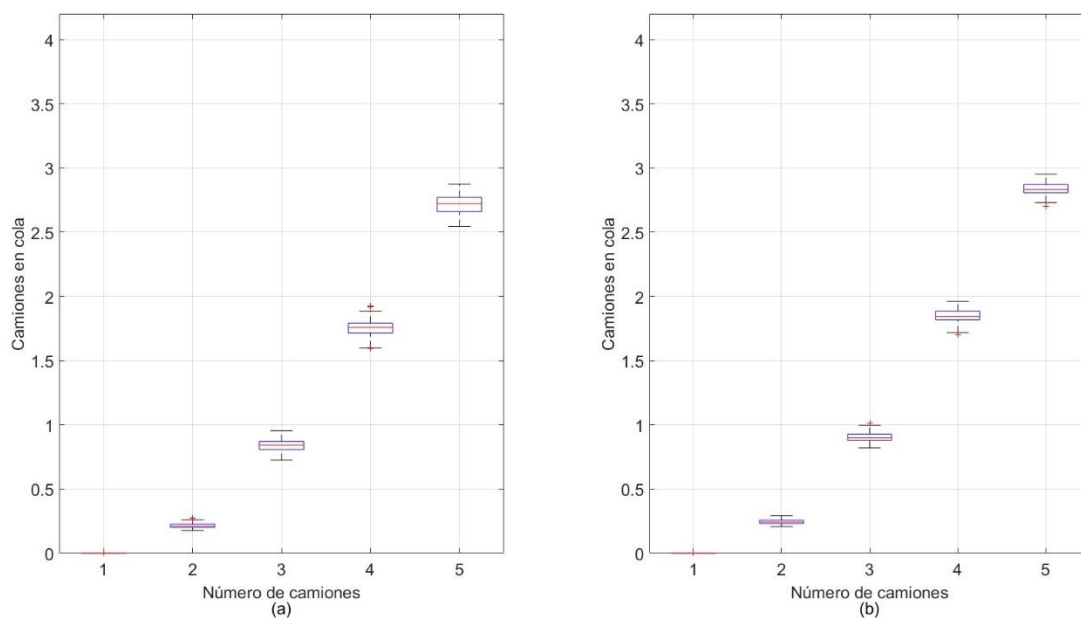


Figura 5.16 Número de camiones en cola en chancador para caso base

La ampliación de la rampa produce un efecto similar al de añadir más palas, ya que acelera los tiempos de carga y transporte, reduciendo el tiempo total del ciclo hasta la llegada al chancador. Esto aumenta el flujo de vehículos hacia el chancador, lo que convierte su capacidad en un factor limitante y genera colas que mantienen a una parte considerable de la flota de camiones en espera.

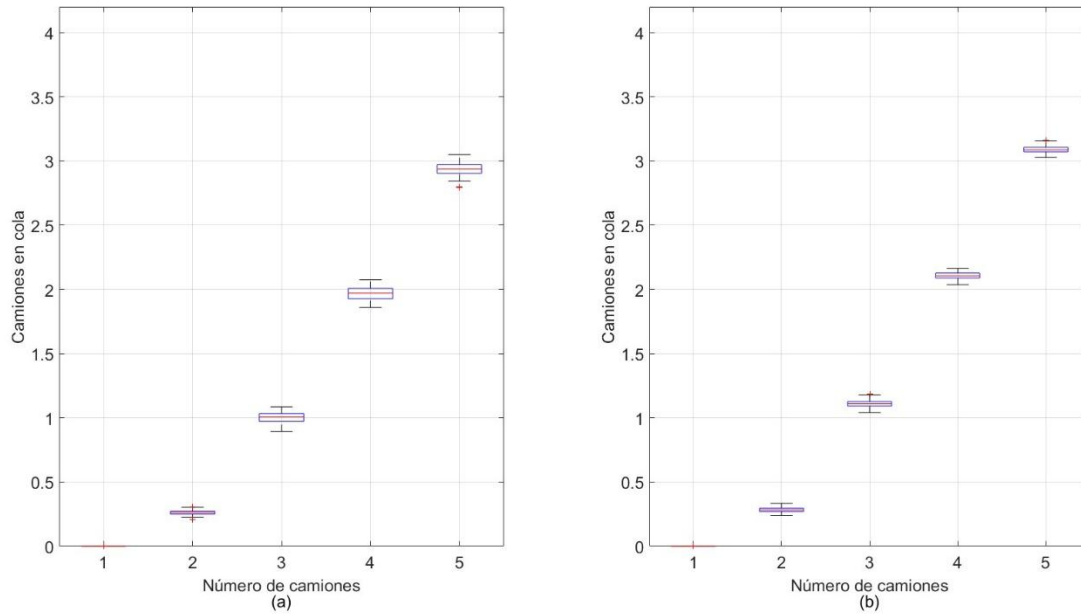


Figura 5.17 Número de camiones en cola en chancador para caso rampa ampliada

Al observar la Figura 5.18, se evidencia que el promedio de camiones no presenta cambios significativos en comparación con el caso anterior. Esto sugiere que el sistema ya había alcanzado su límite operativo, impidiendo un mayor flujo de vehículos.

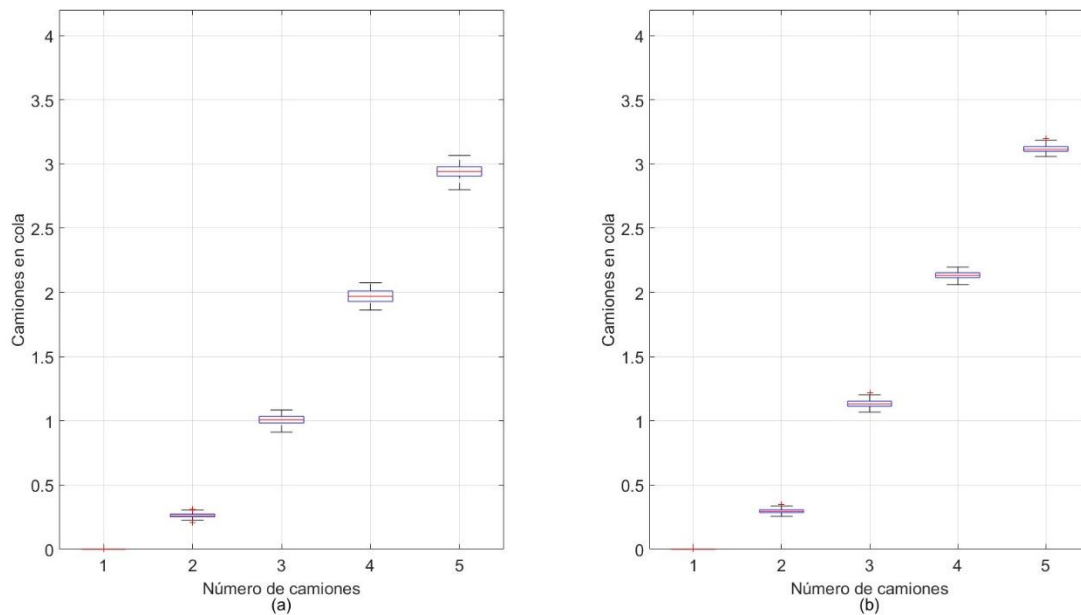


Figura 5.18 Número de camiones en cola en chancador para caso rampa sin restricción

5.7 Tiempo de espera en el chancador

Se presentan los tiempos de espera de un camión desde su llegada al punto de descarga hasta el momento en que comienza a descargar, mostrando los distintos casos para cada configuración de

flota. Se observa un aumento significativo en estos tiempos, consistente con los resultados anteriores sobre el número de camiones en espera. Además, estos valores explican otros resultados, ya que, a partir del tercer camión, el tiempo de espera se aproxima al tiempo total de un ciclo completo, lo que provoca la formación de colas en el sistema.

Por otro lado, al incrementar el número de palas, se observa un leve aumento en los tiempos de espera en cola, debido a que los camiones pueden llegar más rápido al chancador, generando un flujo más constante hacia esta etapa.

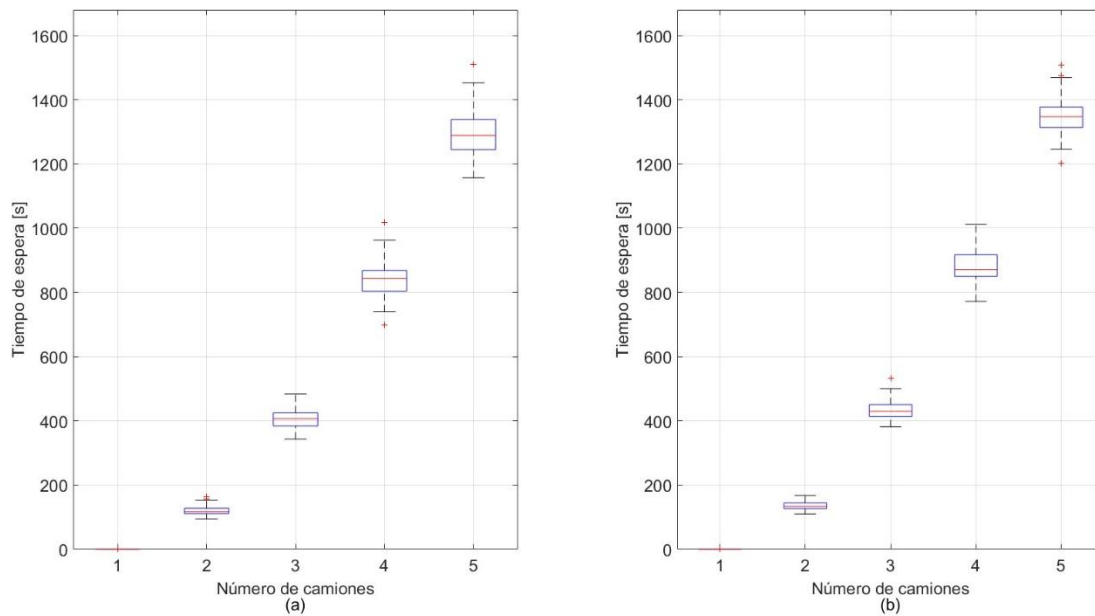


Figura 5.19 Tiempo de espera en cola del chancador para caso base

Un comportamiento similar se aprecia en las Figuras 5.20 y 5.21, tanto en el aumento del tamaño de la rampa como la eliminación de restricciones de tránsito hacia el chancador provocan un ligero incremento en los tiempos de espera en cola, aunque no de manera tan significativa.

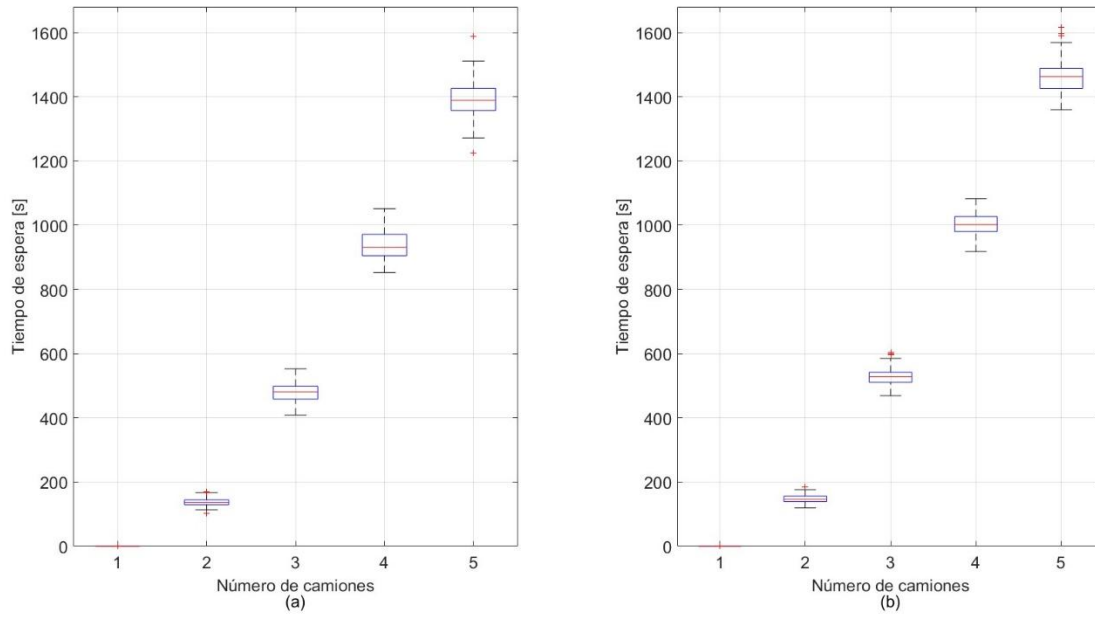


Figura 5.20 Tiempo de espera en cola del chancador para caso rampa ampliada

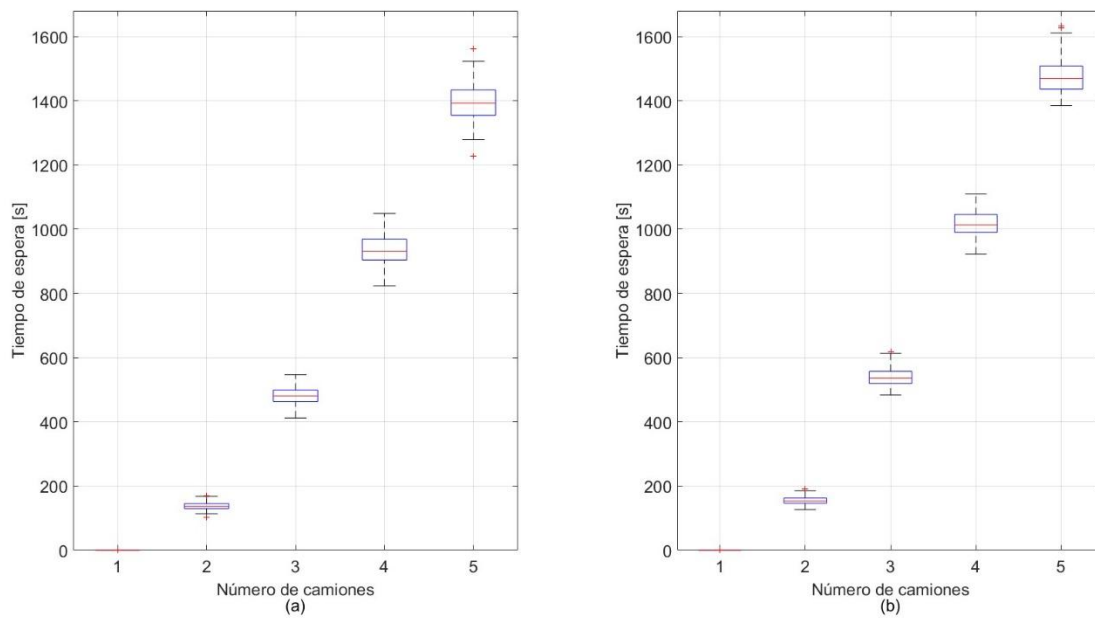


Figura 5.21 Tiempo de espera en cola del chancador para caso rampa sin restricciones

5.8 Caso complementario

A continuación, se presentan los resultados correspondientes al caso complementario. En esta instancia, se analizan los escenarios previos eliminando la condición limitante asociada a la descarga del chancador. Los resultados se muestran mediante gráficos lineales, donde cada línea representa una configuración distinta, identificada en la leyenda.

En cuanto a la producción, se observa un incremento en comparación con los escenarios con la condición limitante del chancador. Destaca un aumento significativo en los casos “Sin restricción” y “Rampa ampliada”, ambos considerando la operación con dos palas, mientras que el resto de los escenarios presenta un comportamiento similar entre sí.

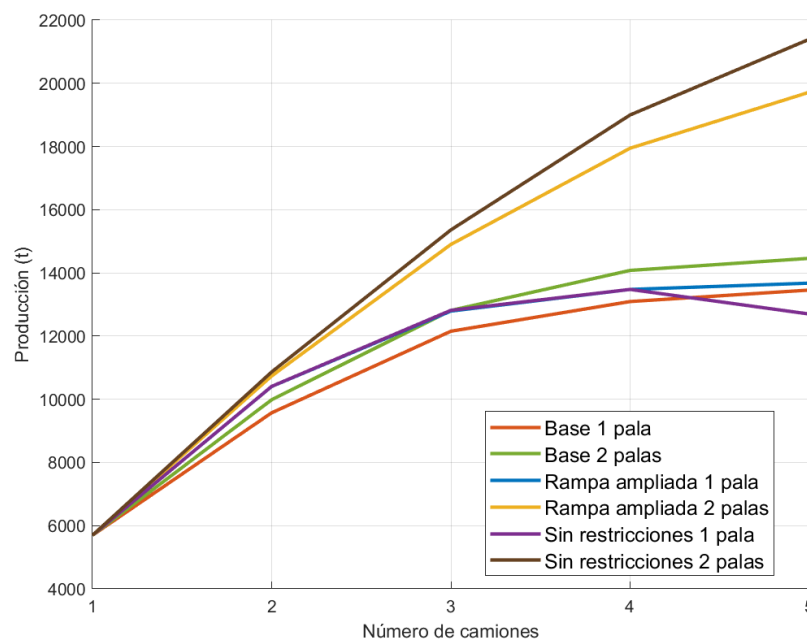


Figura 5.22 Producción semanal para caso complementario

Al observar la utilización del chancador, se observa un comportamiento similar al de la producción. Los mayores niveles de utilización se presentan en los escenarios “Sin restricción” y “Rampa ampliada”, ambos con la incorporación de dos palas. Este resultado indica que la operación con dos equipos de carguío incrementa considerablemente el flujo de camiones hacia el chancador.

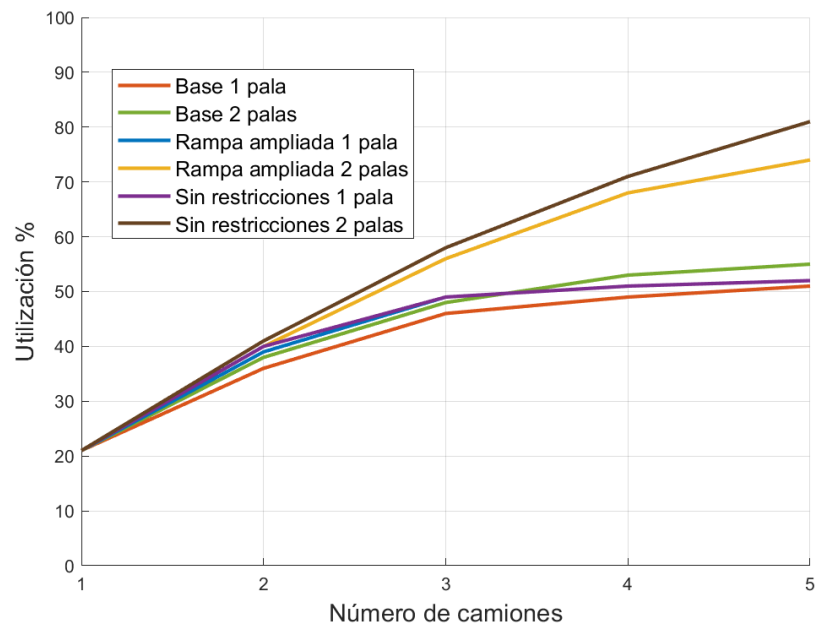


Figura 5.23 Utilización del chancador para caso complementario

En lo que respecta a la utilización de las palas, se observa un aumento considerable en los escenarios que operan con un solo equipo de carguío. Esto sugiere que, al eliminar la limitante del chancador, el flujo de equipos hacia el frente de carguío se agiliza, lo que provoca una mayor demanda sobre la pala. Como consecuencia, el equipo tiende a operar cerca de su capacidad máxima, lo que puede generar un nuevo cuello de botella en esta etapa del proceso.

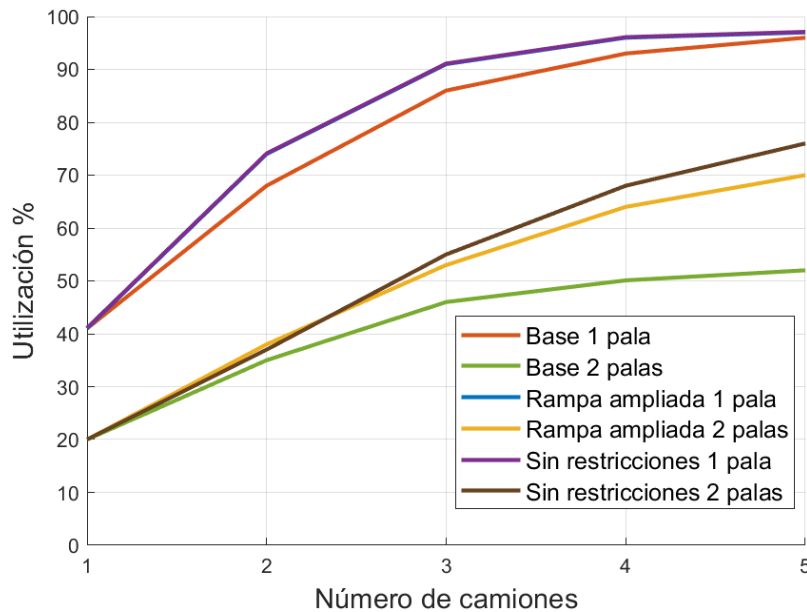


Figura 5.24 Utilización de la pala para caso complementario

Respecto al tiempo en cola en la descarga del chancador, se observa una reducción en comparación con los demás casos de estudio. Esta disminución se debe principalmente a que los equipos ya no deben esperar a que el chancador finalice el procesamiento del material para realizar la descarga, lo que agiliza el proceso y reduce significativamente los tiempos de espera. No obstante, como se muestra en la Figura 5.25, los escenarios con dos palas presentan un aumento en los tiempos de cola, ya que la mayor velocidad en las operaciones de carguío genera un flujo más intenso de equipos hacia la zona de descarga.

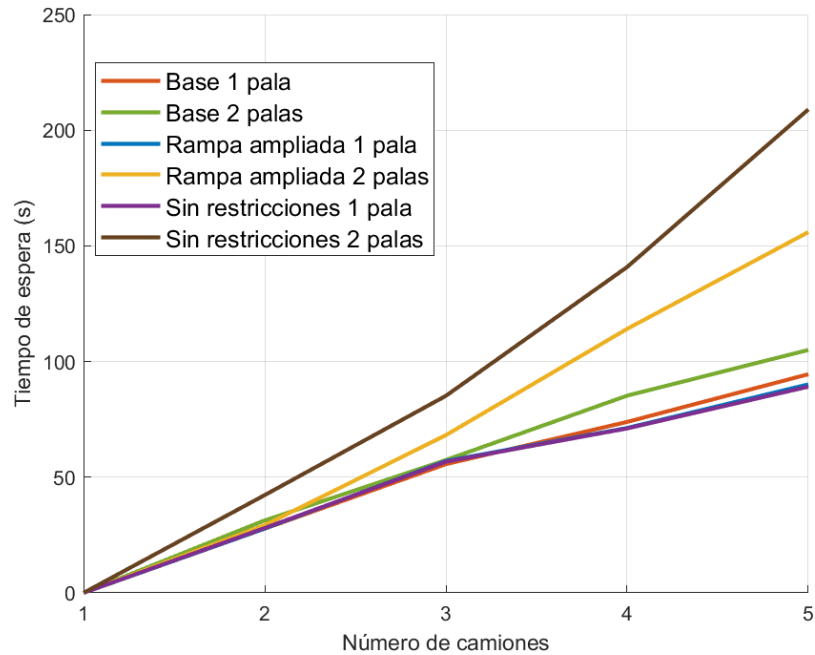


Figura 5.25 Tiempo de espera en cola del chancador para caso complementario

Por otra parte, los tiempos de espera en la zona de carguío presentan un aumento considerable en los escenarios que operan con una sola pala. Esta situación se debe a que, al facilitar el proceso de descarga del material, el flujo de camiones hacia el frente de carguío se intensifica. Como consecuencia, la pala alcanza su capacidad operativa máxima al intentar responder a una mayor demanda, lo que provoca acumulación de camiones en espera y evidencia un nuevo cuello de botella en esta etapa del proceso.

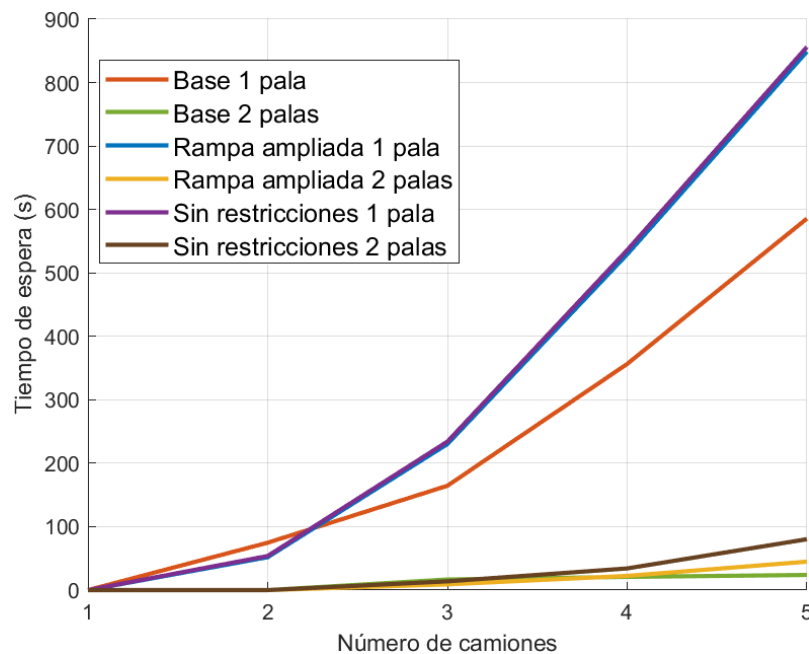


Figura 5.26 Tiempo de espera en cola en el banco para caso complementario

Finalmente, el comportamiento de los camiones en espera en la zona del chancador refleja de manera directa los resultados observados en los tiempos de cola. En los escenarios con dos palas, tanto en el caso “Sin restricciones” como en el de “Rampa ampliada”, se evidencia un aumento considerable en el número de camiones en espera. En contraste, en los casos con una sola pala, la cantidad de camiones en cola es significativamente menor, ya que el ritmo hacia el chancador se ve naturalmente regulado por la menor capacidad de carguío.

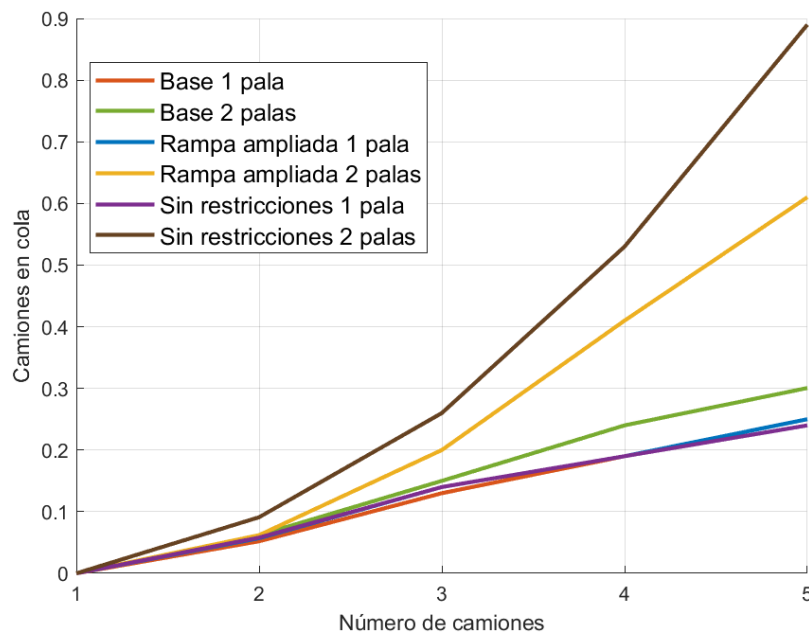


Figura 5.27 Número de camiones en cola en chancador para caso complementario

En cuanto a los camiones en espera en la zona de carguío, se observa un aumento notable en los escenarios que operan con una sola pala. Esta condición se explica por la mayor disponibilidad de camiones circulando en el sistema debido a la mayor fluidez en la descarga, lo que genera una mayor presión sobre el equipo de carguío. Al operar al máximo de su capacidad, la pala no logra atender de forma inmediata la alta demanda, provocando la acumulación de camiones en espera. Por el contrario, en los escenarios con dos palas, la cantidad de camiones en cola disminuye considerablemente, ya que la mayor capacidad de carguío permite responder de manera más eficiente al flujo de vehículos, evitando así la formación de colas prolongadas.

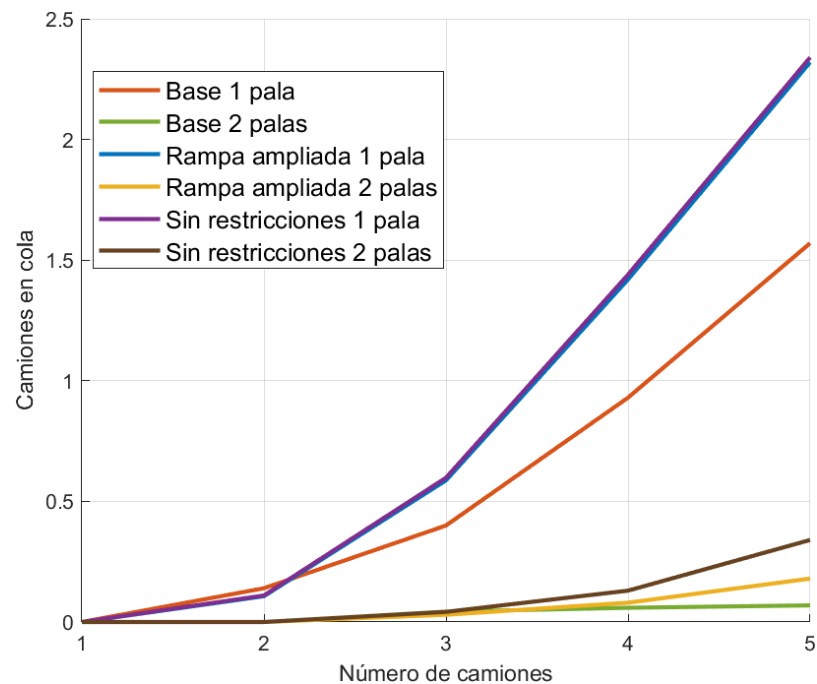


Figura 5.28 Número de camiones en cola en el banco para caso complementario

6 Análisis de resultados

En los tres escenarios principales evaluados, el incremento en el número de camiones genera un aumento en la producción hasta un límite que se alcanza a partir del tercer camión. Este límite marca la capacidad máxima del sistema de transporte y chancado, reflejando que el sistema opera en su máxima capacidad sin posibilidad de incrementos adicionales en el rendimiento a medida que se agregan más camiones. Este comportamiento indica que, bajo condiciones normales, incrementar la flota más allá de tres unidades no ofrece un beneficio significativo en la producción, ya que el sistema está limitado por otra etapa del proceso.

Al analizar el resto de los resultados es posible notar que la utilización del chancador alcanza su máxima capacidad productiva, lo cual genera grandes colas en la zona de descarga, alcanzado un promedio de equipos en cola cercano a la mitad de la flota, por lo tanto, genera tiempos de espera prolongados en la cola del chancador, ya que su capacidad de procesamiento es insuficiente para mantener un flujo continuo sin acumulaciones. En otras palabras, el chancador restringe el flujo y afecta la eficiencia general del sistema, al no poder procesar material adicional con mayor rapidez. Un factor que demuestra esto es la restricción que se incluyó en el modelo en el cual los camiones no pueden descargar hasta que el chancador termine de procesar el material que ya tiene previamente.

Por otra parte, la ampliación de la rampa reduce los tiempos de transporte de los camiones, disminuyendo el tiempo que estos emplean para desplazarse entre el banco y el chancador. Esta reducción en los tiempos de viaje permite que los camiones completen sus ciclos de carga y descarga con mayor rapidez. Este cambio en la dinámica del sistema permite que los camiones lleguen de manera más distribuida a la pala, evitando una acumulación excesiva en esta etapa y disminuyendo la formación de colas en el área de carguío. Sin embargo, a pesar de este efecto positivo en los tiempos, la ampliación de la rampa no se traduce en una mayor producción ni mejora significativamente otros parámetros operativos. Esto se debe a que el chancador continúa siendo el principal cuello de botella. Por lo tanto, el alto costo de implementación de la ampliación de la rampa resulta desproporcionado frente a los beneficios limitados que aporta en términos de productividad y rendimiento general del sistema.

En cuanto a la implementación de una nueva pala, los resultados muestran que su incorporación presenta una mejora en la rapidez de carguío de los camiones, lo que permite reducir el tiempo de espera de los camiones en el banco, pero su impacto en la producción general es limitado. Esto se debe a que el sistema no genera un flujo de camiones lo suficientemente alto como para que ambas palas trabajen a su máxima capacidad. Por lo tanto, la adición de una pala se traduce en una sobreestimación de la necesidad de equipos, ya que, en condiciones normales, el flujo de camiones no exige la intervención simultánea de dos palas.

El análisis complementario, que elimina limitante en la descarga del chancador, muestra mejoras significativas en el rendimiento del sistema, destacando un aumento importante en la producción y una reducción de los tiempos de espera en la cola de descarga. La eliminación de esta restricción optimiza el flujo de camiones. Sin embargo, si el sistema opera con una sola pala, el rendimiento

se ve nuevamente afectado por la capacidad de carguío, lo que reduce los beneficios obtenidos en la descarga. Este análisis adicional sirve para complementar el estudio, permitiendo contrastar el efecto de esta lógica sin restar importancia a los tres escenarios principales.

7 Conclusiones

La simulación de eventos discretos demostró ser una herramienta eficaz para analizar los procesos de carguío y transporte en minería, ya que permite evaluar diversos escenarios operativos a un bajo costo y sin los riesgos asociados con la implementación física de cambios en el sistema. En este trabajo, la simulación aplicada al proceso de carguío y transporte en una cantera permitió diseñar y desarrollar un modelo que representa fielmente el sistema, facilitando la evaluación de diferentes configuraciones y su impacto en el desempeño general.

Al analizar los resultados de las simulaciones, se identificaron puntos críticos y cuellos de botella en el proceso. En particular, se constató que el chancador actúa como el principal cuello de botella debido a su limitada capacidad de procesamiento, lo cual genera grandes colas y prolongados tiempos de espera en la zona de descarga. Este hallazgo es clave para la toma de decisiones, ya que revela que, a pesar de la posibilidad de mejorar el flujo de transporte mediante la ampliación de la rampa, el impacto en la producción no es significativo mientras el chancador permanezca limitado.

En el caso de la incorporación de una pala extra, los resultados mostraron que, aunque esta mejora el tiempo de carguío de los camiones en el banco, su impacto es limitado debido a la falta de un flujo de camiones suficientemente elevado para aprovechar su capacidad adicional. Esto genera una sobreestimación del rendimiento de la pala, lo que cuestiona la rentabilidad de una inversión en este equipo bajo las condiciones actuales del sistema. La limitación de flujo, influenciada por las colas generadas en el chancador, sugiere que una inversión en una pala adicional no se justificaría sin una corrección previa a la etapa de chancado.

Como recomendación, la configuración óptima identificada es operar con dos camiones y una pala, ya que esta disposición permite un flujo más eficiente de los equipos, evitando congestiones y alcanzando una producción similar a la obtenida con tres camiones. La incorporación de un tercer camión solo incrementa la producción en aproximadamente un 10%, un aumento que probablemente no compensa los costos adicionales de operación y mantenimiento del equipo. Por lo tanto, salvo que exista un objetivo específico de producción que lo justifique, no se recomienda añadir un tercer camión. En este sentido, cualquier mejora futura debería priorizar la ampliación

de la capacidad del chancador, ya que este representa la principal limitación del sistema. Los resultados evidencian que la mejora en la eficiencia del chancador trae consigo un incremento significativo en la producción, mejorando el flujo de camiones y reduciendo los tiempos de espera en la cola de descarga.

En conclusión, la simulación permitió identificar que la mejor condición de operación debe abordar. Los resultados de este estudio sirven como base para decisiones estratégicas, optimizando el ciclo de carguío y transporte de manera efectiva y evitando inversiones en proyectos y recursos que no representen una mejora directa en el rendimiento del sistema.

8 Referencias

- Abolghasemian, M., Kanafi, A., Daneshmandmehr, M. (2020). A two-phase simulation-based optimization of hauling system in open-pit mine. *Iran. J. Manag. Stud.* 13(4), 705-732. 10.22059/ijms.2020.294809.673898
- Banks, J. (1999). Discrete event system simulation. *Winter Simulation Conference*, 7–13.
- CODELCO. (2005). Norma ASARCO. Documento Interno, División Codelco Norte.
- Chaowasakoo, P. (2017). Digitalization of mine operations: Scenarios to benefit in real-time truck dispatching. *International Journal of Mining Science and Technology*. 10.1016/j.ijmst.2017.01.007
- Ghaziani, H. H.; Monjezi, M.; Mousavi, A.; Dehghani, H.; Bakhtavar, E. (2021). Design of loading and transportation fleet in open-pit mines using simulation approach and metaheuristic algorithms. *J. Min. Environ.* 10.22044/jme.2022.11450.2131
- Huayanca, D., Bujaico, G., Delgado, A. (2023). Application of discrete-event simulation for truck fleet estimation at an open-pit copper mine in Peru. *Appl. Sci.* 2023; 13(7), 4093.
- Liu, S. Q., Kozan, E. (2016). New graph-based algorithms to efficiently solve large scale open pit mining optimisation problems. *Expert Systems with Applications*, 43, 59-65. 10.1016/j.eswa.2015.08.044
- Mena, R., Zio, E., Kristjanpoller, F., Arata, A. (2013). Availability-based simulation and optimization modeling framework for open-pit mine truck allocation under dynamic constraints. *Int. J. Min. Sci. Technol.* 10.1016/j.ijmst.2013.01.017
- Mirzaei-Nasirabad, H., Mohtasham, M., Askari-Nasab, H. (2023). An optimization model for the real-time truck dispatching problem in open-pit mining operations. *Optim Eng* 24, 2449–2473. 10.1007/s11081-022-09780-x
- Moradi Afrapoli, A., Askari-Nasab, H. (2017). Mining fleet management systems: a review of models and algorithms. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 1–19. 10.1080/17480930.2017.1336607
- Sun, X., Wu C-C., Chen, L-R. (2018). An automated warehouse sorting system for small manufacturing enterprise applying discrete event simulation, 2nd IEEE Advanced Information Management,Communicates,Electronic and Automation Control Conference (IMCEC), 1597-1601. 10.1109/IMCEC.2018.8469264.

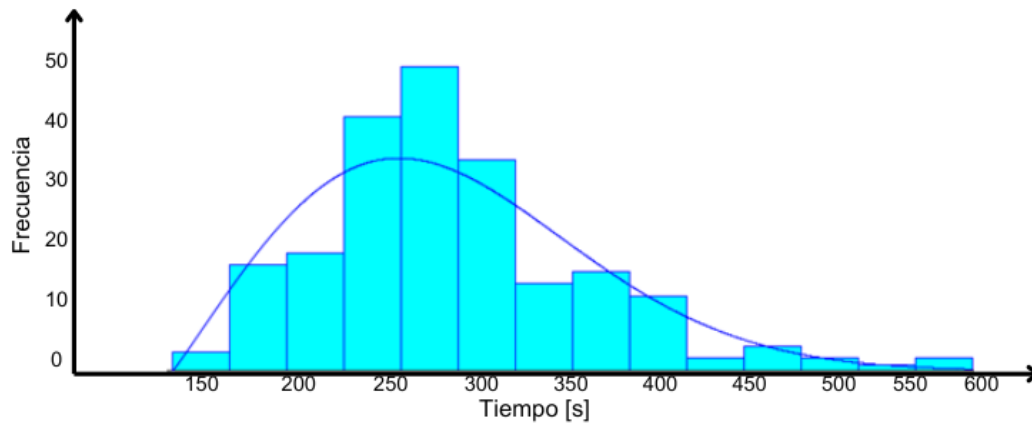
9 Anexo

9.1 Distribuciones de tiempo.

9.1.1 Carguío

Distribution Summary		Function	Sq Error
Distribution: Weibull			
Expression: 133 + WEIB(173, 2.05)			
Square Error: 0.011662			
Chi Square Test		Weibull	0.0117
Number of intervals = 9		Beta	0.0127
Degrees of freedom = 6		Normal	0.0129
Test Statistic = 20.4		Gamma	0.0145
Corresponding p-value < 0.005		Erlang	0.0146
Kolmogorov-Smirnov Test		Triangular	0.0255
Test Statistic = 0.0774		Lognormal	0.0455
Corresponding p-value = 0.144		Uniform	0.0684
Data Summary		Exponential	0.0748
Number of Data Points = 216			
Min Data Value = 133			
Max Data Value = 575			
Sample Mean = 288			
Sample Std Dev = 75.7			
Histogram Summary			
Histogram Range = 133 to 575			
Number of Intervals = 14			

Anexo 1 Resumen de distribución de tiempo de carguío mediante el software Input Analyzer.

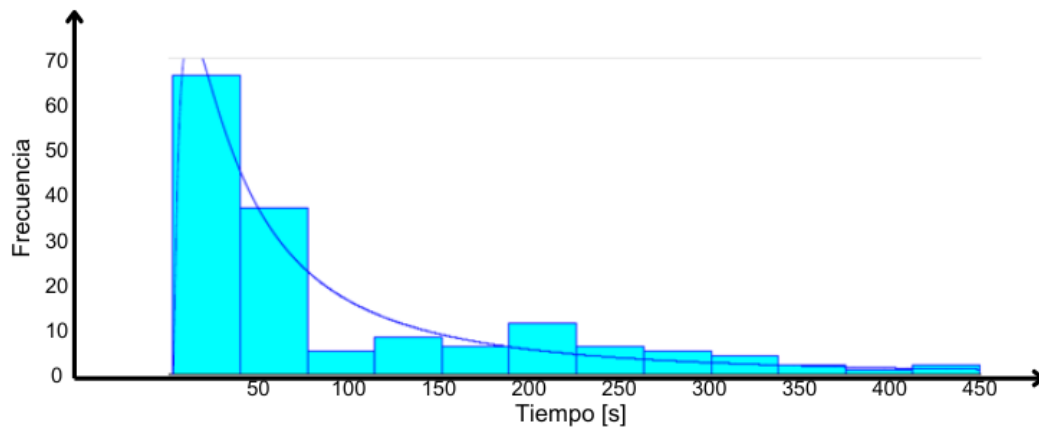


Anexo 2 Distribución de tiempo de carguío

9.1.2 Descarga

Distribution Summary		Function	Sq Error
Distribution: Lognormal		-----	
Expression: 8 + LOGN(118, 253)			
Square Error: 0.011886			
Chi Square Test		Lognormal	0.0119
Number of intervals = 6		Beta	0.016
Degrees of freedom = 3		Weibull	0.0278
Test Statistic = 20.3		Erlang	0.0288
Corresponding p-value < 0.005		Exponential	0.0288
Kolmogorov-Smirnov Test		Gamma	0.0334
Test Statistic = 0.144		Triangular	0.127
Corresponding p-value < 0.01		Normal	0.139
Data Summary		Uniform	0.173
Number of Data Points = 151			
Min Data Value = 8			
Max Data Value = 419			
Sample Mean = 95			
Sample Std Dev = 92.6			
Histogram Summary			
Histogram Range = 8 to 419			
Number of Intervals = 12			

Anexo 3 Resumen de distribución de tiempo de descarga mediante el software Input Analyzer.

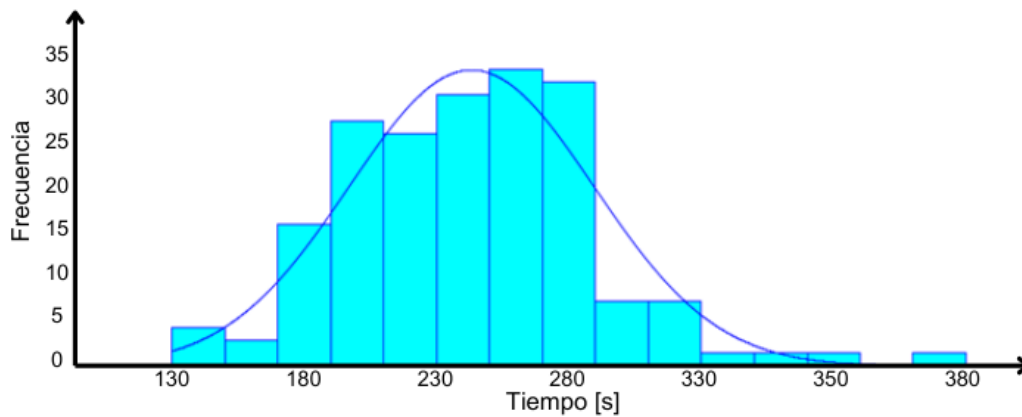


Anexo 4 Distribución de tiempo de descarga

9.1.3 Transporte banco – chancador

Distribution Summary		Function	Sq Error
Distribution:	Normal		
Expression:	NORM(219, 35.9)		
Square Error:	0.010841		
Chi Square Test		Normal	0.0108
Number of intervals	= 6	Beta	0.0116
Degrees of freedom	= 3	Weibull	0.0142
Test Statistic	= 10.3	Gamma	0.0271
Corresponding p-value	= 0.0176	Erlang	0.028
Kolmogorov-Smirnov Test		Triangular	0.0508
Test Statistic	= 0.0655	Lognormal	0.0807
Corresponding p-value	> 0.15	Uniform	0.0869
Data Summary		Exponential	0.105
Number of Data Points	= 133		
Min Data Value	= 131		
Max Data Value	= 364		
Sample Mean	= 219		
Sample Std Dev	= 36.1		
Histogram Summary			
Histogram Range	= 131 to 364		
Number of Intervals	= 11		

Anexo 5 Resumen de distribución de tiempo de transporte banco - chancador mediante el software Input Analyzer.

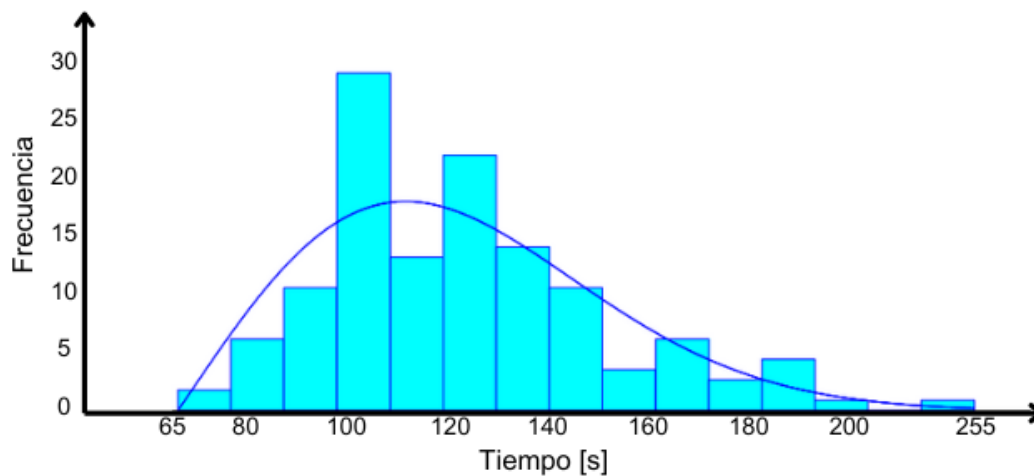


Anexo 6 Distribución tiempo transporte banco – chancador

9.1.4 Transporte chancador – banco

Distribution Summary		Function	Sq Error
Distribution:	Erlang		
Expression:	64 + ERLA(27.2, 2)		
Square Error:	0.002600		
Chi Square Test			
Number of intervals	= 6	Erlang	0.0112
Degrees of freedom	= 3	Weibull	0.0117
Test Statistic	= 1.66	Beta	0.013
Corresponding p-value	= 0.652	Gamma	0.013
Kolmogorov-Smirnov Test		Normal	0.018
Test Statistic	= 0.0437	Triangular	0.0182
Corresponding p-value	> 0.15	Lognormal	0.0559
Data Summary		Uniform	0.0769
Number of Data Points	= 143	Exponential	0.0865
Min Data Value	= 64		
Max Data Value	= 311		
Sample Mean	= 118		
Sample Std Dev	= 40.6		
Histogram Summary			
Histogram Range	= 64 to 311		
Number of Intervals	= 11		

Anexo 7 Resumen de distribución de tiempo de transporte chancador - banco mediante el software Input Analyzer.

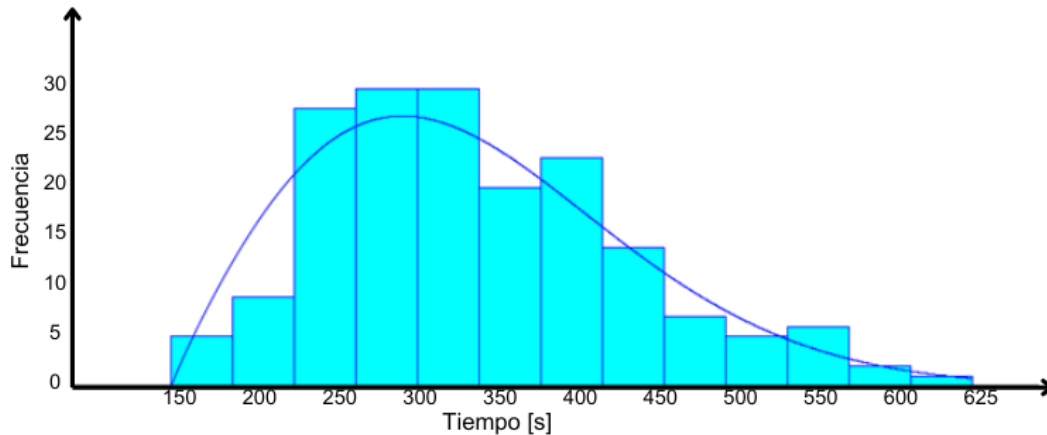


Anexo 8 Distribución tiempo transporte chancador – banco

9.1.5 Procesamiento

Distribution Summary		Function	Sq Error
Distribution:	Weibull		
Expression:	148 + WEIB(187, 1.92)		
Square Error:	0.004707		
Chi Square Test		Weibull	0.00471
Number of intervals	= 8	Beta	0.00584
Degrees of freedom	= 5	Triangular	0.00659
Test Statistic	= 8.08	Normal	0.00772
Corresponding p-value	= 0.166	Gamma	0.00871
Kolmogorov-Smirnov Test		Erlang	0.0142
Test Statistic	= 0.0781	Lognormal	0.0405
Corresponding p-value	> 0.15	Uniform	0.0444
Data Summary		Exponential	0.0554
Number of Data Points	= 180		
Min Data Value	= 148		
Max Data Value	= 589		
Sample Mean	= 316		
Sample Std Dev	= 85.4		
Histogram Summary			
Histogram Range	= 148 to 589		
Number of Intervals	= 13		

Anexo 9 Resumen de distribución de tiempo de procesamiento mediante el software Input Analyzer.

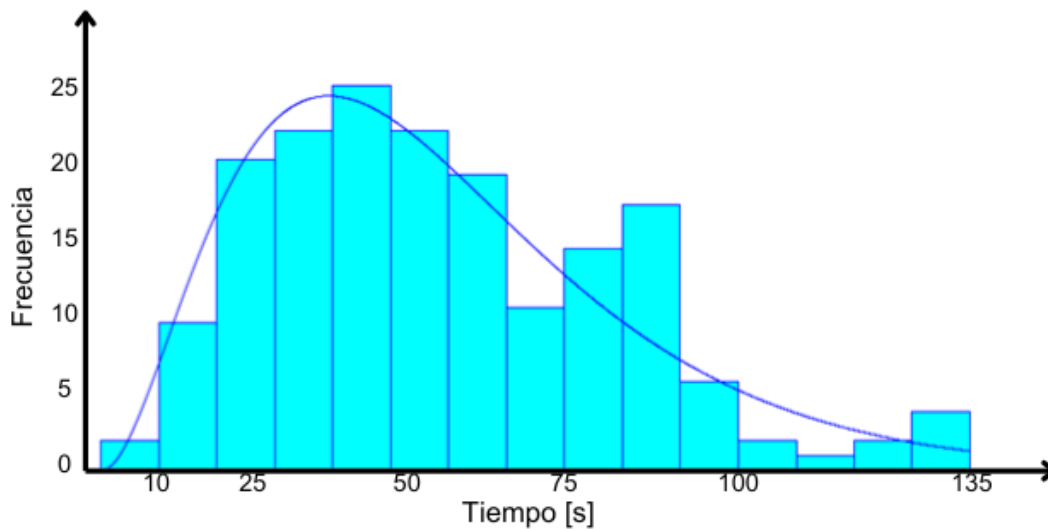


Anexo 10 Distribución de tiempo procesamiento

9.1.6 Maniobra en banco

Distribution Summary		Function	Sq Error
Distribution:	Erlang		
Expression:	3 + ERLA(17.3, 3)		
Square Error:	0.004750		
Chi Square Test		Erlang	0.00475
Number of intervals	= 8	Weibull	0.00515
Degrees of freedom	= 5	Triangular	0.0059
Test Statistic	= 5.96	Gamma	0.00626
Corresponding p-value	= 0.323	Beta	0.00699
Kolmogorov-Smirnov Test		Normal	0.00972
Test Statistic	= 0.0471	Lognormal	0.0267
Corresponding p-value	> 0.15	Uniform	0.0382
Data Summary		Exponential	0.0491
Number of Data Points	= 184		
Min Data Value	= 3		
Max Data Value	= 135		
Sample Mean	= 54.9		
Sample Std Dev	= 27.1		
Histogram Summary			
Histogram Range	= 3 to 135		
Number of Intervals	= 13		

Anexo 11 Resumen de distribución de tiempo de maniobra en banco mediante el software Input Analyzer.

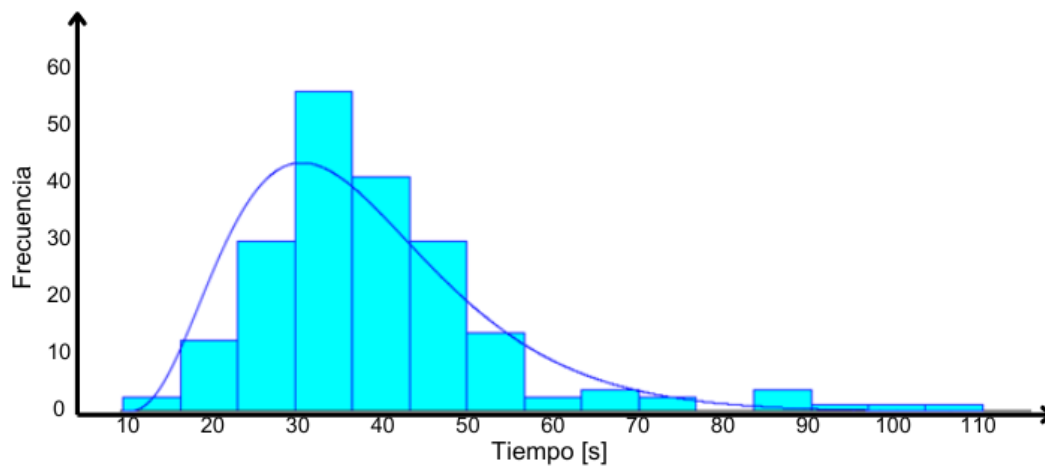


Anexo 12 Distribución de tiempo maniobra en banco

9.1.7 Maniobra en chancador

Distribution Summary		Function	Sq Error
Distribution:	Erlang		
Expression:	9.5 + ERLA(6.64, 4)		
Square Error:	0.012169		
Chi Square Test			
Number of intervals	= 7	Erlang	0.0071
Degrees of freedom	= 4	Gamma	0.00722
Test Statistic	= 17.9	Weibull	0.00874
Corresponding p-value	< 0.005	Lognormal	0.00893
Data Summary		Normal	0.00903
Number of Data Points	= 162	Beta	0.00907
Min Data Value	= 10	Poisson	0.0124
Max Data Value	= 105	Triangular	0.0144
Sample Mean	= 36.1	Exponential	0.0224
Sample Std Dev	= 13.7	Uniform	0.0239
Histogram Summary			
Histogram Range	= 9.5 to 106		
Number of Intervals	= 15		

Anexo 13 Resumen de distribución de tiempo de maniobra en chancador mediante el software Input Analyzer.

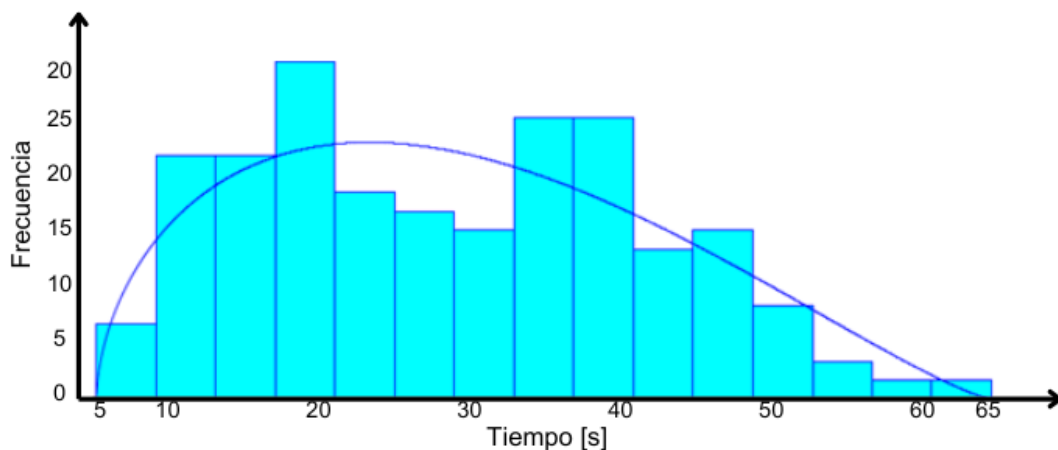


Anexo 14 Distribución de tiempo maniobra en chancador

9.1.8 Salida del chancador

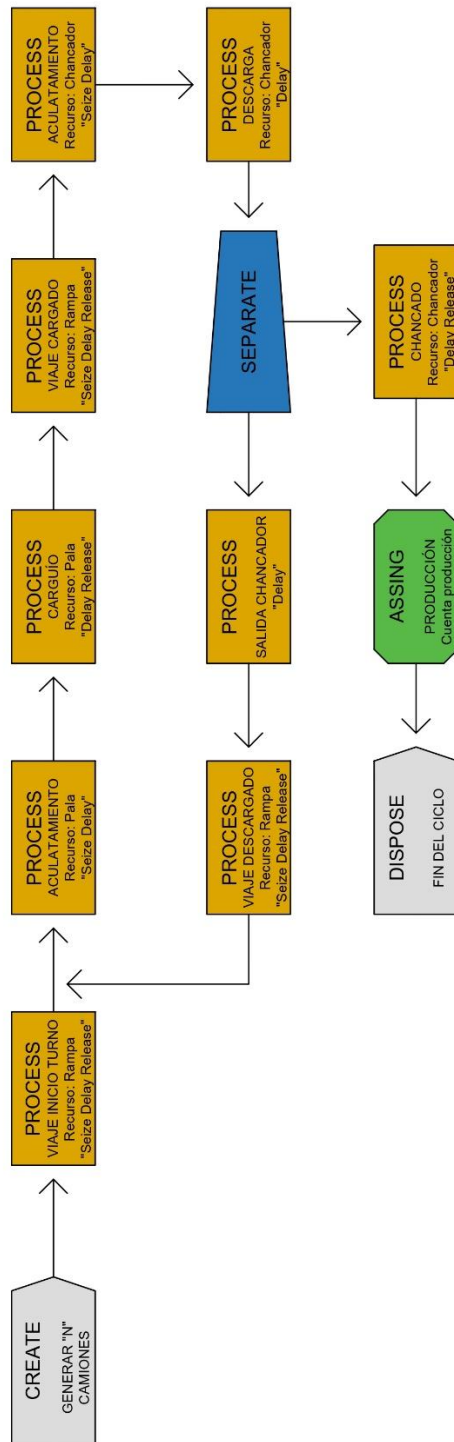
Distribution Summary		Function	Sq Error
Distribution:	Beta		
Expression:	$4.5 + 59 * \text{BETA}(1.56, 2.28)$		
Square Error:	0.005806		
Chi Square Test			
Number of intervals	= 10	Beta	0.00977
Degrees of freedom	= 7	Triangular	0.0103
Test Statistic	= 8.06	Weibull	0.0104
Corresponding p-value	= 0.341	Gamma	0.0108
Data Summary		Erlang	0.0108
Number of Data Points	= 134	Normal	0.011
Min Data Value	= 5	Lognormal	0.0121
Max Data Value	= 63	Uniform	0.0138
Sample Mean	= 28.5	Exponential	0.0161
Sample Std Dev	= 13.2	Poisson	0.0405
Histogram Summary			
Histogram Range	= 4.5 to 63.5		
Number of Intervals	= 15		

Anexo 15 Resumen de distribución de tiempo de salida del chancador mediante el software Input Analyzer.



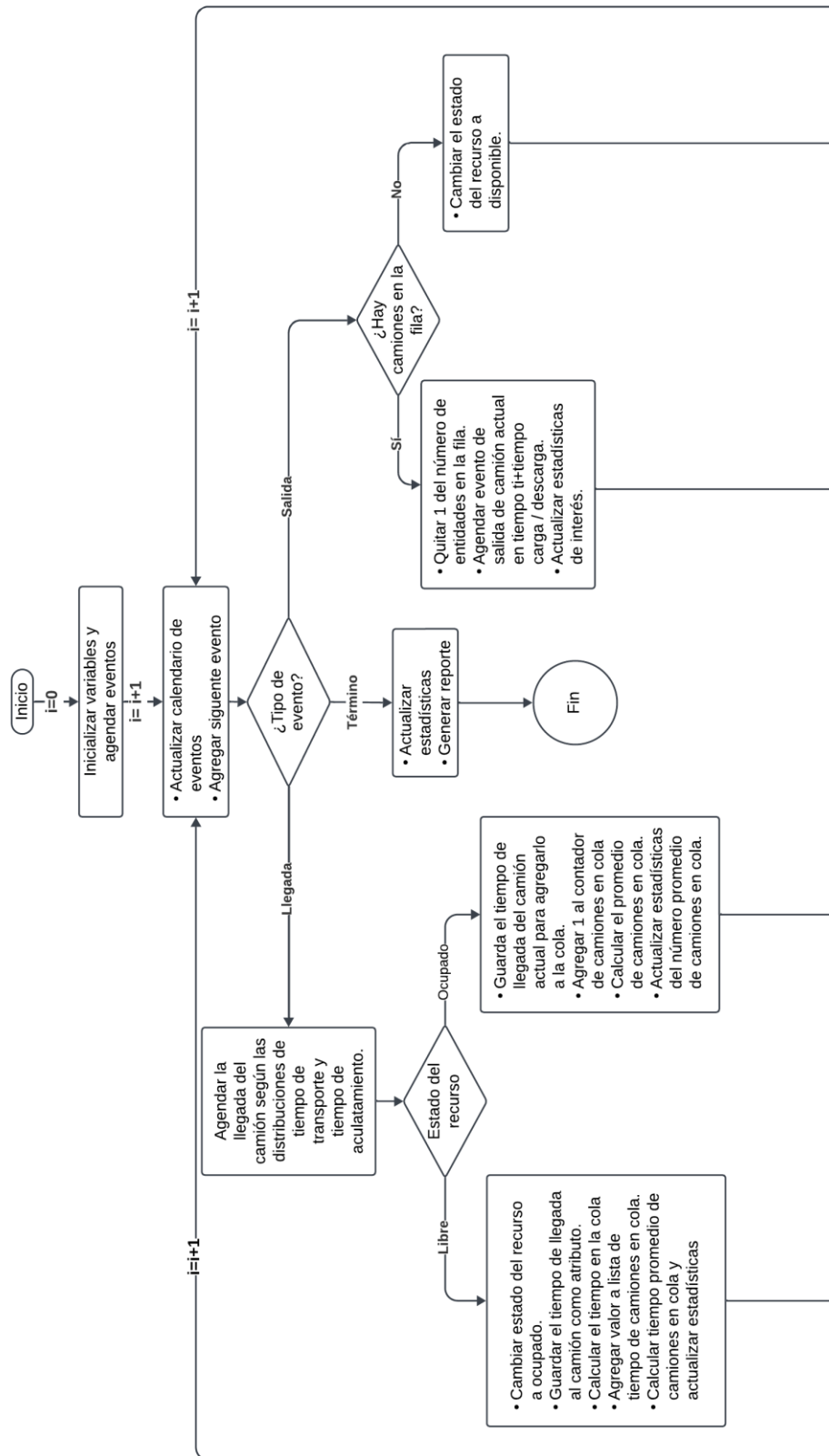
Anexo 16 Distribución de tiempo salida del chancador

9.2 Modelo implementado en el programa Arena



Anexo 17 Modelo implementado en el programa Arena

9.3 Modelo lógico



Anexo 18 Modelo lógico