



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería
Metalúrgica



Desarrollo de un simulador de eventos discretos para el análisis del sistema de
carguío y transporte en minería a cielo abierto

POR

Cristóbal Marcell Hernández Carrillo

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de
Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil de Minas

Profesor guía

Asieh Hekmat

Miembro de la Comisión

Roberto Fustos

Marzo 2026

© 2026 Cristóbal Marcell Hernández Carrillo

Resumen

En este trabajo se desarrolla e implementa un simulador de eventos discretos orientado al análisis del sistema de carguío y transporte en minería a cielo abierto, como primera versión funcional del modelo. El problema abordado corresponde a la dificultad de analizar el comportamiento dinámico de este sistema, en el cual la interacción entre camiones y puntos de servicio, la formación de colas y las restricciones de capacidad influyen directamente en la producción.

La herramienta se basa en una arquitectura *backend-frontend*, el *backend* implementa la lógica de simulación mediante Python y SimPy, mientras que el *frontend* proporciona una interfaz gráfica tridimensional interactiva. Esta separación desacopla el cálculo de la visualización, facilitando la construcción de escenarios y la interpretación de resultados.

El simulador permite realizar análisis del tipo "qué pasaría si", evaluando cómo variaciones en parámetros operacionales como velocidades de transporte, tiempos de carga y descarga, configuración de rutas y tamaño de flota afectan el tiempo de ciclo y la producción total. Como salida, entrega indicadores claves de desempeño: producción total, toneladas por hora, tiempos de ciclo y tiempos de espera, permitiendo identificar cuellos de botella operacionales. Adicionalmente, incorpora simulación Monte Carlo mediante distribuciones probabilísticas y múltiples réplicas independientes, lo que permite analizar tanto el comportamiento promedio del sistema como su dispersión frente a la incertidumbre operacional.

Finalmente, se verificó que los resultados presentan tendencias coherentes al compararlos con casos en Excel y el software ProModel, respaldando la consistencia del modelo. El trabajo sienta las bases para una herramienta con alto potencial de desarrollo futuro, orientada al apoyo a la toma de decisiones en sistemas de carguío y transporte minero.

ABSTRACT

This work develops and implements a discrete-event simulator aimed at analyzing the loading and hauling system in open-pit mining, as a first functional version of the model. The problem addressed is the difficulty of analyzing the dynamic behavior of this system, in which the interaction between trucks and service points, queue formation, and capacity constraints directly affect production.

The tool is based on a backend–frontend architecture: the backend implements the simulation logic using Python and SimPy, while the frontend provides an interactive three-dimensional graphical interface. This separation decouples computation from visualization, facilitating scenario building and result interpretation.

The simulator enables "what-if" analyses, evaluating how variations in operational parameters such as hauling speeds, loading and dumping times, route configuration, and fleet size affect cycle time and overall production. As output, it provides key performance indicators: total production, tons per hour, cycle times, and waiting times, allowing the identification of operational bottlenecks. Additionally, it incorporates Monte Carlo simulation through probabilistic distributions and multiple independent replications, enabling analysis of both the average system behavior and its variability under operational uncertainty.

Finally, the results were verified to exhibit consistent trends when compared against spreadsheet-based cases and the ProModel simulation software, supporting the model's consistency. This work lays the foundation for a tool with significant potential for future development, aimed at supporting decision-making in mining loading and hauling systems.

Tabla de contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Objetivo general.....	2
1.2	Objetivos específicos.....	2
1.3	Alcances y Limitaciones	2
1.4	Metodología	4
2	Marco teórico.....	6
2.1	Carguío y transporte	6
2.2	Influencia de la pendiente en las rutas.....	7
2.3	Norma ASARCO.....	7
2.4	Simulación	8
2.4.1	Ventajas y desventajas de la simulación.....	11
2.5	Softwares de simulación aplicados en minería	12
2.5.1	ProModel.....	12
2.5.2	Arena	13
2.5.3	FlexSim	13
2.5.4	HaulSim	13
2.5.5	DSim	14
2.5.6	AnyLogic	14
2.6	Trabajos previos de aplicación de DES en sistemas de carguío y transporte.....	14
2.7	Monte Carlo	16
2.8	SimPy	17
2.8.1	Ejemplo de uso de SimPy:	18
3	Desarrollo.....	19
3.1	Arquitectura del simulador.....	19
3.2	Backend	20
3.3	Frontend	24
3.4	Entidades y recursos.....	26
3.5	Rutas	32
3.6	Topografía e imágenes de referencia.....	34
3.7	Lógica de descanso y cambio de turno	36

4	Resultados	39
4.1	Visualización de resultados en ProductionBadge	39
4.2	Validación del modelo	42
4.2.1	Validación contra Excel	43
4.2.2	Validación contra ProModel	45
5	Discusiones	49
5.1	Escenarios evaluados	49
5.2	Resultados y análisis	49
6	Conclusión.....	51
6.1	Recomendaciones y trabajo futuro.....	52
7	Referencias.....	53

Lista de figuras

Figura 1	Arquitectura general del simulador de minería y flujo de información entre frontend y backend	20
Figura 2	Diagrama de flujo del ciclo operativo de un camión en un sistema de carguío y transporte.....	22
Figura 3	Cálculo del tiempo de ciclo dentro del backend	23
Figura 4	Interfaz gráfica del simulador	25
Figura 5	Modelo tridimensional de la pala	27
Figura 6	Ventana de configuración de parámetros de la pala	27
Figura 7	Representación de camiones estacionados.....	28
Figura 8	Representación del estacionamiento y datos del destino	28
Figura 9	Modelo tridimensional del camión	29
Figura 10	Ventana de configuración de parámetros del camión.....	29
Figura 11	Ventana de configuración de plan de producción	30
Figura 12	Visualización de los camiones en la escena de simulación.....	31
Figura 13	Panel de monitoreo del estado de la flota.....	32
Figura 14	Ventana de edición de ruta.....	33
Figura 15	Ruta directa entre pala y destino con nodos intermedios.....	33
Figura 16	Ruta con nodos intermedios modificados manualmente	34

Figura 17	Ejemplo de ruta con curva utilizando nodos intermedios.....	34
Figura 18	Visualización de la topografía.....	35
Figura 19	Vista lateral de la topografía de referencia.....	36
Figura 20	Circulación de camiones sobre la ruta de transporte definida en la topografía de referencia.....	36
Figura 21	Diagrama de lógica para almorzar.....	37
Figura 22	Ventana de producción del componente ProductionBadge.....	40
Figura 23	Ventana de seguimiento de camiones del componente ProductionBadge.....	41
Figura 24	Ventana de visualización de gráficos de resultados del componente ProductionBadge.....	42
Figura 25	Comparación de producción total: Excel vs Simulador desarrollado.....	45
Figura 26	Comparación de producción total: ProModel vs simulador desarrollado.....	48

Lista de tablas

Tabla 1	Comparación de enfoques de análisis y simulación.....	11
Tabla 2	Parámetros de entrada ejemplo Excel.....	43
Tabla 3	Producción total y diferencia porcentual entre Excel y el Simulador desarrollado	44
Tabla 4	Parámetros de entrada ejemplo ProModel.....	46
Tabla 5	Producción total y diferencia porcentual entre ProModel y el simulador desarrollado.....	46

1 Introducción

La minería a cielo abierto no consiste únicamente en remover roca, sino en gestionar un sistema productivo de gran escala, donde camiones, palas, rutas y destinos deben operar de forma sincronizada para mover millones de toneladas de material cada día. Cada camión detenido, cada pala en espera y cada cola que se forma representan tiempo, energía y dinero que se pierden. En un contexto donde el sistema de carguío y transporte puede concentrar más de la mitad de los costos operacionales de una mina, mejorar su desempeño no es una opción, sino una necesidad estratégica.

Aunque a simple vista el proceso parece directo, en la práctica se trata de un sistema dinámico, estocástico y fuertemente interconectado. Pequeñas variaciones en los tiempos de carga, en la distancia de transporte, en la pendiente de las rutas o en el número de equipos disponibles pueden generar efectos significativos en la productividad, en la formación de colas y en el costo por tonelada producida. Sin embargo, evaluar estos cambios directamente en terreno implica altos costos, riesgos operacionales y una gran incertidumbre.

Existen distintos enfoques para analizar este tipo de sistemas, como los modelos deterministas, la optimización matemática o la simulación continua. No obstante, estos métodos suelen requerir simplificaciones importantes, basadas en valores promedio o relaciones estáticas, que dificultan representar adecuadamente la variabilidad, la formación de colas y la competencia por recursos propia de la operación minera real.

En este escenario, la simulación de eventos discretos surge como una herramienta fundamental, ya que permite construir un entorno virtual donde el sistema completo puede ser reproducido, observado y analizado sin intervenir la operación real. A través de la simulación es posible representar la secuencia de eventos, la interacción entre equipos, la formación de colas y la evolución temporal del sistema, permitiendo evaluar distintos escenarios operacionales de forma controlada y realista.

Bajo este enfoque, el valor principal del simulador no está solo en generar resultados numéricos, sino en transformarse en un laboratorio virtual de operación minera: un espacio donde se pueden probar decisiones, comparar alternativas y comprender cómo responde el sistema ante cambios en sus parámetros antes de aplicarlos en terreno. Esto lo convierte en

una herramienta poderosa de apoyo a la toma de decisiones, capaz de reducir riesgos, optimizar recursos y mejorar el desempeño global de la operación.

Así, se propone el desarrollo de un simulador de eventos discretos aplicado al sistema de carguío y transporte en minería a cielo abierto, que permita analizar, evaluar y comparar distintos escenarios operacionales mediante indicadores clave como la producción, los tiempos de ciclo y la formación de colas. El objetivo es contar con una herramienta que ayude a comprender el sistema en su totalidad y a diseñar operaciones más eficientes, seguras y económicamente sostenibles.

1.1 Objetivo general

Desarrollar e implementar una herramienta de simulación de eventos discretos que permita modelar y comprender el funcionamiento del sistema de carguío y transporte en minería a cielo abierto y evaluar su desempeño operacional bajo distintas configuraciones.

1.2 Objetivos específicos

- Demostrar la viabilidad de la simulación de eventos discretos para representar el sistema de carguío y transporte, incluyendo colas y tiempos de espera.
- Analizar cómo parámetros operacionales como velocidad, tiempos de servicio y tamaño de flota afectan la producción y los tiempos de ciclo.
- Verificar la consistencia del modelo comparando sus resultados con cálculos en Excel y con el simulador ProModel.

1.3 Alcances y Limitaciones

El simulador desarrollado permite representar el funcionamiento básico del sistema de carguío y transporte, entregando los principales indicadores de desempeño, tales como la producción, los tiempos de ciclo y la formación de colas. Asimismo, incorpora una visualización tridimensional interactiva que facilita la comprensión del comportamiento dinámico del sistema y la identificación preliminar de cuellos de botella, lo que constituye uno de sus principales aportes.

No obstante, el alcance actual del simulador corresponde a una versión inicial del modelo, con un nivel de detalle acotado. En su estado actual, el sistema trabaja con una configuración simplificada, considerando un número limitado de puntos de carga, y recibe información geométrica principalmente a través de archivos en formato .dxf, .jpg y .png. Adicionalmente, si bien se comenzó a implementar la lógica asociada al consumo y recarga de combustible de los camiones, esta funcionalidad no fue completada debido a la falta de información operacional suficiente y de datos confiables para su correcta parametrización.

En relación con el manejo de datos operacionales, el plan de producción es ingresado manualmente y su aplicación se encuentra limitada a un horizonte de un día de simulación. Si bien es posible definir planes con una duración mayor, el modelo actualmente considera únicamente el primer día para el cálculo de los resultados, lo que constituye una restricción relevante para el análisis de planificación de mediano y largo plazo. De igual forma, el simulador no cuenta aún con mecanismos directos para la importación de planes de producción desde planillas Excel, ni para la exportación automática de los resultados a este tipo de formatos, funcionalidades que serían especialmente útiles para su integración con herramientas de análisis tradicionales.

En este contexto, el simulador debe entenderse como una base extensible sobre la cual es posible continuar desarrollando nuevas capacidades. Entre los principales elementos a incorporar en trabajos futuros se encuentran la importación y exportación de datos mediante planillas Excel, la extensión del plan de producción a múltiples días, la inclusión de múltiples palas y destinos, la finalización del módulo de combustible, la implementación de algoritmos de despacho más avanzados, una mayor variedad de parámetros operacionales y mejoras en la representación del terreno y de las rutas. Estas limitaciones no invalidan el modelo, sino que reflejan su carácter de prototipo simple pero funcional, cuyo objetivo principal es demostrar la viabilidad de la aproximación y sentar las bases para el desarrollo de una herramienta de simulación más completa.

1.4 Metodología

En primer lugar, se definió el alcance del sistema a modelar, correspondiente al proceso de carguío y transporte en minería a rajo abierto, identificando sus principales componentes: camiones, puntos de carguío, destinos, rutas de transporte y colas asociadas. Este alcance se estableció considerando el desarrollo de un modelo simple, orientado a representar el comportamiento general del sistema y permitir su análisis, más que a reproducir en detalle una operación minera específica.

Posteriormente, se seleccionó la simulación de eventos discretos como metodología de modelación, debido a su capacidad para representar sistemas dinámicos caracterizados por interacciones entre recursos, tiempos de espera y variabilidad operacional. Este enfoque es ampliamente utilizado tanto en la industria como en el ámbito académico para el análisis de sistemas de transporte y producción. A partir de este marco, se definieron los elementos fundamentales del modelo, tales como eventos, estados del sistema, reglas de operación y métricas de desempeño.

Una vez definido el modelo conceptual, se procedió al desarrollo del simulador computacional, estructurado bajo una arquitectura *backend–frontend*. En el *backend* se implementó el motor de simulación de eventos discretos utilizando la librería SimPy, encargada de la gestión del tiempo simulado y de la lógica estocástica del sistema. El modelo fue ejecutado mediante múltiples corridas independientes, siguiendo un enfoque Monte Carlo, con el objetivo de capturar la variabilidad inherente a los tiempos operacionales y obtener resultados representativos del comportamiento del sistema. En el *frontend* se desarrolló una interfaz gráfica interactiva que permite la configuración de escenarios y la visualización del desplazamiento de los camiones a lo largo de las rutas definidas. Esta estructura permitió desacoplar la lógica de simulación del proceso de visualización, asegurando la correcta interpretación de los resultados cuantitativos.

Con el modelo implementado, se construyó un escenario base y se ejecutaron simulaciones sucesivas, registrando los principales indicadores operacionales, tales como toneladas totales transportadas, productividad en toneladas por hora (TPH), tiempos de ciclo y tiempos de espera en cola. El análisis de estos indicadores permitió evaluar el desempeño del sistema e identificar la presencia de cuellos de botella operacionales.

Finalmente, se definieron distintos escenarios de simulación, principalmente mediante la variación del número de camiones y la configuración de rutas, con el objetivo de analizar situaciones del tipo “qué pasaría si”. Los resultados obtenidos fueron comparados con un modelo simplificado desarrollado en Excel y con el software comercial ProModel, utilizando casos de aplicación controlados. Esta comparación permitió verificar la coherencia del modelo y evaluar su desempeño como una primera versión simple pero funcional del simulador, sentando las bases para futuros desarrollos y mejoras.

2 Marco teórico

2.1 Carguío y transporte

El sistema de carguío y transporte constituye el núcleo operativo de una mina a cielo abierto, ya que es el responsable de movilizar tanto el mineral como el material estéril desde los frentes de explotación hacia sus respectivos destinos, tales como plantas de procesamiento, botaderos o stockpiles. Esta etapa conecta directamente la extracción con el resto de la cadena productiva, por lo que su desempeño condiciona la capacidad real de la operación para cumplir con sus metas de producción [1].

Desde el punto de vista económico, el carguío y transporte concentra una fracción mayoritaria de los costos operacionales. En muchas minas esta participación puede superar el 50 % del costo total, debido principalmente al alto consumo de combustible, al elevado valor de adquisición y mantención de los equipos, y a la gran cantidad de personal requerido para su operación. Por esta razón, incluso mejoras marginales en la eficiencia de este sistema pueden traducirse en reducciones significativas del costo por tonelada producida [1].

En términos productivos, el desempeño del sistema depende del equilibrio entre la flota de camiones, la capacidad de servicio de las palas y destinos, y la geometría de las rutas de transporte. Un desbalance en cualquiera de estos componentes genera inevitablemente la formación de colas, tiempos muertos y pérdidas de productividad. Por ejemplo, una flota sobredimensionada provoca congestión en los puntos de carguío y descarga, mientras que una flota insuficiente genera subutilización de los equipos de carguío, reduciendo la producción efectiva del sistema [2].

En consecuencia, optimizar el sistema de carguío y transporte no solo mejora la eficiencia operacional, sino que representa una de las principales oportunidades de reducción de costos y aumento de productividad en minería a cielo abierto. Este hecho explica por qué gran parte de la investigación en planificación y operación minera se ha centrado históricamente en el análisis, modelamiento y optimización de esta etapa del proceso productivo mediante herramientas de simulación de eventos discretos y técnicas de investigación de operaciones [2], [3], [4].

2.2 Influencia de la pendiente en las rutas

La pendiente de las rutas de transporte es un factor geométrico que influye directamente en la velocidad efectiva de los camiones y, por ende, en los tiempos de desplazamiento. En rutas con pendiente positiva, la velocidad disminuye debido al mayor esfuerzo requerido por el equipo, mientras que en rutas con pendiente negativa la velocidad tiende a aumentar, dentro de los límites operacionales y de seguridad [1], [5].

Este efecto sobre la velocidad modifica de forma directa la duración del transporte cargado y del retorno en vacío, impactando el tiempo de ciclo completo. En consecuencia, pequeñas variaciones en la pendiente pueden generar cambios relevantes en la productividad del sistema, especialmente en operaciones donde las distancias de transporte son grandes y el movimiento de material domina el tiempo total del ciclo [1], [2], [5].

La consideración explícita de la pendiente en el análisis del sistema de carguío y transporte es fundamental para lograr una representación realista de la operación. En términos de cálculo, el tiempo de viaje se obtiene como el cociente entre la distancia recorrida y la velocidad efectiva del equipo, la cual varía en función de la pendiente efectiva de la ruta, definida como la suma entre la pendiente de la ruta y la resistencia de rodado en tramos de subida, y la diferencia entre ambas en tramos de bajada. A partir de esta pendiente efectiva, la velocidad del camión se determina mediante las curvas de desempeño del equipo. Por ello, la pendiente constituye una variable clave en la modelación y simulación de sistemas de transporte en minería a cielo abierto, ya que su correcta representación incide directamente en la estimación de producción, la formación de colas y la identificación de cuellos de botella [2], [5].

2.3 Norma ASARCO

La norma ASARCO (American Smelting & Refining CO.) es el marco de referencia utilizado para la definición de conceptos y distribución de los tiempos en el que el equipo, máquina o instalación incurren durante la operación [6].

Estándar de clasificación de tiempos equipos móviles:

- **Tiempo nominal:** Tiempo de año calendario equivalente a 365 días (o 366 para año bisiesto).
- **Tiempo disponible:** Tiempo durante el cual el equipo se encuentra disponible para operar. Se obtiene descontando del tiempo nominal, el tiempo de ejecución de las actividades de tiempo fuera de servicio.
- **Tiempo efectivo:** Tiempo en que el equipo se encuentra desarrollando las actividades para los cuales ha sido adquirido por la organización.
- **Fuera de servicio programado:** Tiempo en que el equipo, máquina o instalación, no se encuentra en condiciones de operar debido a que está en una intervención de mantenimiento programada.
- **Fuera de servicio no programadas:** Tiempo en el que el equipo, máquina o instalación, no se encuentra en condiciones de operar debido a un evento de mantenimiento no programada que requiere de una intervención.
- **Pérdidas Operacionales:** Tiempo que no agrega valor al proceso producto de una espera por equipo complementario o esperas en locaciones (origen o destino).
- **Demoras programadas:** Espacio de tiempo en que el equipo se encuentra disponible para ser utilizado en la operación, pero está detenido por interrupción programada debido a actividades incidentales e inherentes del proceso.
- **Demoras no programadas:** Espacio de tiempo en que el equipo se encuentra disponible para ser utilizado en la operación, pero está detenido por interrupción no programada [7].

2.4 Simulación

En operaciones mineras reales, cualquier cambio operacional implica costos elevados y riesgos significativos. Modificar el número de camiones, cambiar la asignación de rutas, alterar pendientes, rediseñar botaderos o ajustar tiempos de operación no es simplemente “probar y ver qué pasa”, sino que involucra reprogramaciones, detenciones, consumo adicional de combustible, desgaste de equipos y posibles pérdidas de producción. Por esta razón, en la práctica muchas veces se mantiene una forma de operar conocida, aun cuando no sea óptima, porque el costo de experimentar directamente en terreno es demasiado alto. En este contexto, la simulación se transforma en una herramienta estratégica, ya que permite

analizar sistemas complejos y evaluar alternativas sin intervenir la operación real, reduciendo costos y riesgos asociados a la toma de decisiones [8].

La simulación de eventos discretos es una metodología que permite representar el comportamiento de un sistema mediante relaciones lógicas, matemáticas y probabilísticas, considerando que su estado solo cambia cuando ocurre un evento relevante. El objetivo del modelo de simulación no es únicamente describir el sistema, sino comprender su funcionamiento, analizar su desempeño y evaluar cómo responde frente a distintos cambios operacionales antes de implementarlos en la realidad [8].

Un sistema de eventos discretos se caracteriza porque su reloj de simulación avanza de un evento a otro, y no de manera continua. Esto permite modelar de forma natural procesos donde predominan las colas, la competencia por recursos y la secuencia ordenada de operaciones, como ocurre en sistemas productivos complejos tales como el carguío y transporte en minería a cielo abierto [8]. A través de este enfoque, la simulación reproduce el comportamiento dinámico del sistema bajo condiciones realistas, incorporando variabilidad, interacción entre equipos y restricciones de capacidad.

Para la construcción de un modelo de simulación de eventos discretos es necesario definir una serie de elementos fundamentales [8], [9]:

- **Entidad:** elemento que fluye por el sistema y cuya presencia provoca cambios en su estado.
- **Estado del sistema:** condición que guarda el sistema en un instante determinado, equivalente a una “fotografía” de su situación operacional.
- **Evento:** cambio en el estado del sistema, como la llegada o salida de una entidad, el inicio o término de una operación, o la liberación de un recurso.
- **Localizaciones:** lugares del sistema donde una entidad puede ser procesada o permanecer en espera.
- **Recursos:** dispositivos necesarios para realizar una operación, con capacidad limitada.
- **Atributos:** características propias de una entidad.

- **Variables:** condiciones cuyos valores se crean y modifican mediante relaciones lógicas y ecuaciones matemáticas.
- **Reloj de simulación:** contador del tiempo simulado que controla la evolución temporal del modelo.

El reloj de simulación puede considerarse de dos formas:

1. **Absoluto**, cuando parte desde cero y avanza hasta un tiempo de simulación definido.
2. **Relativo**, cuando solo mide el tiempo transcurrido entre dos eventos consecutivos.

Mediante un modelo de simulación es posible responder preguntas como:

- ¿Qué ocurre si se agrega o se quita un camión?
- ¿Cómo cambia la producción si aumenta la pendiente de una ruta?
- ¿Cuál es el impacto de reducir el tiempo de carga en una pala?
- ¿Dónde se forma realmente el cuello de botella del sistema?

Además, la simulación permite trabajar con sistemas complejos donde los modelos analíticos tradicionales se vuelven impracticables. En muchos sistemas reales, la presencia de interacciones no lineales, colas, múltiples recursos en competencia y la naturaleza estocástica de los procesos hacen que la formulación matemática exacta sea imposible o requiera simplificaciones tan fuertes que el modelo pierda realismo. En este contexto, la simulación de eventos discretos (DES, del inglés *Discrete Event Simulation*) surge como la alternativa más adecuada para representar de manera fiel el comportamiento del sistema y analizar su desempeño bajo distintas condiciones operacionales [8].

La tabla 1 muestra la comparación entre métodos más comunes aplicados en resolver problemas en minería.

Tabla 1 Comparación de enfoques de análisis y simulación.

Método	Enfoque	Ventaja principal	Limitación
Determinista	Ecuaciones cerradas	Simplicidad y rapidez de cálculo	Dificultad para representar variabilidad y colas.
Optimización	Búsqueda de soluciones óptimas bajo restricciones	Permite identificar configuraciones eficientes	Requiere simplificaciones fuertes del sistema.
DES	Representación temporal de eventos y recursos	Permite representar interacción dinámica y variabilidad.	Mayor complejidad computacional
Pruebas en terreno	Operación real	Máximo realismo	Alto costo y riesgo operacional

Esta comparación muestra que la simulación de eventos discretos ocupa un punto de equilibrio ideal entre realismo, costo y capacidad de análisis, siendo especialmente adecuada para sistemas que presentan colas, competencia por recursos y alta variabilidad, características propias de procesos productivos complejos como el carguío y transporte en minería a cielo abierto [8], [9].

En el presente trabajo se adopta el enfoque de simulación de eventos discretos debido a su capacidad para representar de manera realista el sistema de carguío y transporte en minería a cielo abierto, incorporando colas, competencia por recursos, variabilidad en los tiempos de operación y reglas de asignación dinámicas. Este enfoque permite evaluar distintos escenarios operacionales sin intervenir la operación real, justificando su elección como base metodológica del simulador desarrollado.

2.4.1 Ventajas y desventajas de la simulación

Ventajas:

- Permite evaluar cambios operacionales sin riesgo para la producción real.
- Reduce costos al evitar pruebas directas en terreno.

- Facilita el análisis de sistemas complejos con colas, interacciones y variabilidad.
- Ayuda a identificar cuellos de botella y pérdidas de eficiencia.
- Permite comparar múltiples escenarios bajo condiciones controladas.
- Funciona como herramienta de apoyo para la toma de decisiones estratégicas.

Desventajas:

- La simulación no es, por sí sola, una herramienta de optimización; permite evaluar escenarios, pero no garantiza encontrar la solución óptima global [8].
- Requiere un tiempo considerable para la construcción, calibración y validación del modelo.
- Su precisión depende directamente de la calidad y confiabilidad de los datos de entrada.
- En modelos muy complejos puede ser necesario simplificar ciertos aspectos para mantener tiempos de ejecución razonables.

2.5 Softwares de simulación aplicados en minería

En la actualidad existe una amplia variedad de herramientas computacionales orientadas a la simulación de eventos discretos, que abarcan desde plataformas de propósito general hasta softwares especializados para industrias específicas. Estas herramientas difieren en su interfaz, capacidades de visualización, facilidad de uso y aplicabilidad según el tipo de sistema a modelar, lo que hace relevante conocer las opciones disponibles al momento de seleccionar una para un proyecto determinado [10]. En el contexto minero, destacan tanto plataformas de uso generalizado como herramientas diseñadas específicamente para el análisis de sistemas de carguío y transporte. A continuación, se describen cinco de los más utilizados en este ámbito.

2.5.1 ProModel

ProModel es uno de los softwares de simulación de eventos discretos más consolidados en el mercado, fundado en 1988 por el Dr. Charles Harrell en Orem, Utah. Permite modelar

sistemas complejos de manufactura, logística y transporte mediante una interfaz gráfica basada en entidades, locaciones y recursos. Su amplio uso tanto en la industria como en el ámbito académico lo ha posicionado como una de las herramientas de referencia en simulación de procesos. En minería, se utiliza principalmente para analizar sistemas de carguío y transporte, evaluar configuraciones de flota y estudiar la formación de colas bajo distintos escenarios operacionales [11].

2.5.2 Arena

Arena, de propiedad de Rockwell Automation, es uno de los softwares de simulación de eventos discretos más utilizados, con más de treinta años de presencia en el mercado académico e industrial. Utiliza una interfaz basada en bloques lógicos conectados, y tiene como motor interno el lenguaje de simulación SIMAN. Se integra con herramientas como Excel para la gestión de datos y cuenta con amplia documentación académica. En minería, ha sido utilizado para modelar sistemas de carguío y transporte, analizar el movimiento de flotas de camiones y evaluar el desempeño operacional bajo distintas condiciones [12].

2.5.3 FlexSim

FlexSim es un software de simulación de eventos discretos, desarrollado por FlexSim Software Products, empresa fundada en 1993 en Orem, Utah, y adquirida por Autodesk en 2023. Su principal fortaleza es la visualización 3D integrada, que permite construir y animar modelos directamente en el entorno de trabajo sin necesidad de separar la lógica de simulación de la representación visual. En minería, se aplica al modelamiento de procesos de extracción, sistemas de transporte y análisis de flujo de materiales, permitiendo evaluar configuraciones operacionales y detectar cuellos de botella en un entorno visual tridimensional [13].

2.5.4 HaulSim

HaulSim, desarrollado por RPM Global en colaboración con FlexSim Software Products y lanzado en 2014, es un software de simulación de eventos discretos diseñado específicamente para el análisis de sistemas de acarreo en minería. A diferencia de las plataformas de propósito general, incorpora una interfaz tridimensional construida sobre tecnología de videojuegos y un motor de cálculo de tiempos de viaje respaldado por más de cuarenta años de experiencia de RPM Global en simulación minera. Permite modelar redes de acarreo

completas, incluyendo múltiples fuentes, destinos, palas y flotas heterogéneas, y es utilizado para validar programas de producción, comparar equipos y analizar estrategias de despacho en operaciones tanto subterráneas como a cielo abierto [14].

2.5.5 DSim

DSim, desarrollado por el Laboratorio de Planificación Minera DELPHOS de la Universidad de Chile, es una plataforma de simulación de eventos discretos orientada específicamente al análisis de operaciones mineras. A diferencia de los softwares de simulación de propósito general mencionados anteriormente, DSim fue concebido desde su origen para el modelamiento de sistemas de carguío y transporte en minería a cielo abierto, lo que lo hace especialmente adecuado para representar la dinámica operacional de estos procesos. Incorpora funcionalidades especializadas para la configuración de flotas, puntos de carga y descarga, rutas de transporte y restricciones operacionales propias del entorno minero, y cuenta con documentación orientada al uso académico y profesional [15].

2.5.6 AnyLogic

AnyLogic, desarrollado por The AnyLogic Company y lanzado en 2000, es una plataforma de simulación moderna que fue pionera en soportar simultáneamente tres metodologías: simulación de eventos discretos, dinámica de sistemas y simulación basada en agentes. Esta flexibilidad lo distingue del resto de los softwares mencionados y lo hace especialmente adecuado para modelos de mayor complejidad donde distintos enfoques deben combinarse. En minería, incorpora librerías especializadas para el modelamiento de flujo de materiales y transporte, y cuenta con versiones gratuitas para uso académico [16].

2.6 Trabajos previos de aplicación de DES en sistemas de carguío y transporte

La simulación de eventos discretos ha sido ampliamente aplicada en el análisis de sistemas de carguío y transporte en minería a cielo abierto, constituyendo una de las líneas de investigación más activas en el área. Los trabajos desarrollados en este campo abarcan desde la estimación del tamaño óptimo de flota hasta la evaluación de estrategias de despacho y la identificación de cuellos de botella operacionales.

En [2] desarrollaron un modelo de simulación tridimensional en FlexSim para analizar distintas configuraciones de flota en una mina a cielo abierto, combinando un modelo matemático con simulación de eventos discretos. Los resultados mostraron que la configuración óptima identificada mediante simulación permitió aumentar la producción diaria en un 3,75% y la rentabilidad en un 3,85% respecto al esquema operacional original de la mina, evidenciando el potencial de la simulación como herramienta de apoyo a decisiones de configuración de flota.

Por su parte, en [3] abordaron el problema de asignación de palas en operaciones con flotas heterogéneas, utilizando simulación para evaluar distintas estrategias de asignación orientadas a minimizar el consumo de combustible. Su trabajo demostró que la incorporación de variabilidad operacional en el modelo permite identificar estrategias de asignación más eficientes que las obtenidas mediante métodos deterministas tradicionales.

En una línea complementaria, en [4] aplicaron un enfoque basado en teoría de colas y simulación para analizar el sistema pala-camión en una mina a cielo abierto, evaluando los tiempos de espera e identificando los principales factores que limitan la producción del sistema. Sus resultados confirmaron que la formación de colas en los puntos de carguío constituye uno de los principales cuellos de botella del sistema y que su análisis mediante simulación permite cuantificar su impacto sobre la productividad global.

En [17] propusieron un simulador de eventos discretos orientado a la eficiencia computacional para una mina a cielo abierto de zinc, plomo y plata, enfocándose en la optimización de técnicas de despacho de camiones. Su modelo incorporó modos de falla de equipos e interacciones de tráfico entre camiones, demostrando que simulaciones computacionalmente eficientes permiten explorar un mayor espacio de soluciones de despacho en tiempos razonables.

En [18], desarrollaron un marco basado en simulación de eventos discretos y datos operacionales para evaluar el rendimiento de equipos en minería subterránea de carbón. Aunque aplicado a un contexto de longwall, su trabajo es relevante por el enfoque metodológico de integrar datos reales con DES para identificar los factores más influyentes en la producción, proporcionando un marco transferible a otros contextos mineros.

Más recientemente, en [19] aplicaron simulación de eventos discretos para estimar la flota de camiones necesaria en una mina de cobre a cielo abierto en Perú, que expandía su operación de 100.000 a 140.000 toneladas por día. Su modelo estocástico, calibrado con variables aleatorias de tiempos operacionales y tonelajes de carga, permitió replicar el plan de producción anual y evaluar distintos escenarios de dimensionamiento de flota, ofreciendo una alternativa robusta frente a los enfoques deterministas empleados previamente por la compañía minera.

Finalmente, en [20] presentaron un modelo de simulación de eventos discretos en AnyLogic para determinar la asignación óptima de retroexcavadoras y camiones en una operación de minería de cantera en Corea del Sur. Su modelo abarcó tanto la minería a cielo abierto como el transporte subterráneo por túnel, considerando variaciones en la eficiencia de los equipos según el tipo de roca. Los resultados mostraron que la optimización basada en simulación logró reducciones en costos operacionales de hasta un 77% respecto a configuraciones no optimizadas.

En conjunto, estos trabajos evidencian que la simulación de eventos discretos es una herramienta consolidada para el análisis de sistemas de carguío y transporte, capaz de capturar la complejidad dinámica del sistema y apoyar la toma de decisiones operacionales en distintos contextos mineros, desde minas de cobre y zinc a cielo abierto hasta canteras y operaciones subterráneas.

2.7 Monte Carlo

La simulación Monte Carlo es una técnica que permite incorporar de manera explícita la variabilidad e incertidumbre propias de los sistemas reales. En el contexto del carguío y transporte en minería, variables como los tiempos de carga, descarga, maniobra y desplazamiento no son constantes, sino que presentan fluctuaciones producto de las condiciones operacionales, el estado mecánico de los equipos, la experiencia de los operadores y diversos factores externos. Mediante el enfoque Monte Carlo, estos parámetros se representan como variables aleatorias que siguen distribuciones de probabilidad previamente definidas, permitiendo que cada ejecución de la simulación constituya un escenario operativo distinto y más cercano al comportamiento real del sistema.

Al ejecutar un mismo modelo en múltiples réplicas independientes, cada una utilizando diferentes valores generados a partir de dichas distribuciones, se obtiene un conjunto de resultados en lugar de un único valor determinista. Esto permite construir distribuciones estadísticas para indicadores clave como la producción total, las toneladas por hora, el tiempo de ciclo de los camiones y los tiempos de espera en cola en palas y destinos. A partir de estas distribuciones es posible calcular medidas estadísticas tales como promedios, desviaciones estándar, percentiles e intervalos de variación, proporcionando una visión más completa y realista del desempeño esperado del sistema bajo condiciones de operación variables.

De esta manera, la simulación Monte Carlo no solo permite estimar el valor promedio de los indicadores de desempeño, es decir, el comportamiento más probable del sistema, sino que también posibilita cuantificar el nivel de incertidumbre y riesgo asociado a cada escenario operacional. Esto resulta especialmente relevante en minería, donde las decisiones de planificación y operación se toman bajo condiciones de alta variabilidad y donde los costos asociados a errores de estimación pueden ser significativos. En este sentido, el uso de Monte Carlo transforma el simulador en una herramienta de análisis probabilístico, capaz de apoyar la toma de decisiones no solo en términos de eficiencia promedio, sino también considerando la confiabilidad y la robustez de los resultados frente a la variabilidad inherente del sistema productivo [8], [9], [21], [22].

2.8 SimPy

La simulación de eventos discretos se basa en la representación de sistemas dinámicos mediante procesos, eventos y recursos, donde el estado del sistema solo cambia cuando ocurre un evento relevante. Este enfoque permite modelar de forma natural sistemas en los que existen colas, competencia por recursos y secuencias discretas de operaciones, utilizando un reloj de tiempo simulado que avanza de evento en evento. Asimismo, resulta especialmente adecuado para describir sistemas complejos en los que múltiples procesos interactúan bajo restricciones de capacidad y sincronización temporal, lo que permite capturar con alto realismo el comportamiento operativo de sistemas productivos [23], [24].

Bajo este marco conceptual, el uso de herramientas computacionales para la simulación de eventos discretos facilita la implementación práctica de estos principios teóricos, proporcionando estructuras para modelar recursos con capacidad limitada, gestionar colas de

espera y coordinar procesos que compiten por dichos recursos. Esto resulta particularmente adecuado para sistemas como el carguío y transporte en minería, donde los camiones, palas y destinos interactúan continuamente, generando colas, tiempos de servicio y secuencias ordenadas de eventos operacionales. La posibilidad de representar explícitamente la espera de camiones en una pala o en un destino, la asignación de turnos de atención y la liberación de recursos una vez finalizada cada operación permite construir modelos que mantienen una alta correspondencia con la lógica real de funcionamiento del sistema, logrando simulaciones claras, controlables y coherentes con la operación de una mina a cielo abierto [23].

2.8.1 Ejemplo de uso de SimPy:

En este estudio se utilizó SimPy para evaluar de forma virtual el diseño de un hospital antes de su implementación real. La idea fue construir un modelo que representara cómo se moverían los pacientes dentro del hospital, cuánto tiempo esperarían para ser atendidos y cómo se utilizarían los distintos recursos, como salas y personal médico. De esta manera, se pudo analizar si la distribución de espacios y la capacidad definida eran suficientes o si el diseño propuesto generaría congestión y largos tiempos de espera.

La simulación permitió probar distintas configuraciones sin necesidad de realizar cambios físicos, identificar posibles cuellos de botella y ajustar el diseño en función de resultados cuantitativos. Así, el modelo funcionó como una herramienta para validar el proyecto del hospital antes de su construcción, reduciendo la incertidumbre y el riesgo de errores costosos.

Este ejemplo muestra que SimPy permite crear modelos virtuales de sistemas reales para evaluar su funcionamiento antes de llevarlos a la práctica. La misma lógica se aplica al sistema de carguío y transporte en minería a cielo abierto, donde la simulación permite analizar la interacción entre camiones, palas y destinos, y tomar decisiones informadas sin intervenir directamente la operación real [25].

3 Desarrollo

3.1 Arquitectura del simulador

El simulador se estructura bajo una arquitectura basada en la separación entre *backend* y *frontend*. El *backend* constituye el núcleo computacional del sistema, encargado de recibir los parámetros de entrada definidos por el usuario, ejecutar la simulación de eventos discretos, realizar los cálculos asociados al ciclo operativo de los camiones y generar los indicadores clave de desempeño (KPIs). Por su parte, el *frontend* corresponde a la interfaz gráfica orientada al usuario, desde donde se ingresan los parámetros iniciales, se construyen y configuran los escenarios operacionales y se visualiza la simulación y los resultados.

Esta separación permitió distinguir claramente entre la lógica de cálculo del modelo y la visualización del sistema, facilitando el desarrollo, la mantención y la extensibilidad del simulador. En este enfoque, el modelo operacional es definido en el *frontend* y enviado al *backend* como configuración de entrada, mientras que el *backend* ejecuta la simulación y genera una secuencia de eventos que el *frontend* interpreta y anima, sin afectar la lógica de decisión simulada.

La Figura 1 muestra la arquitectura general del simulador y el flujo de información entre sus componentes, ilustrando cómo el *frontend* envía la configuración al *backend*, este ejecuta la simulación y devuelve los resultados como indicadores finales y eventos en tiempo real que el *frontend* utiliza para animar la operación en la escena tridimensional.

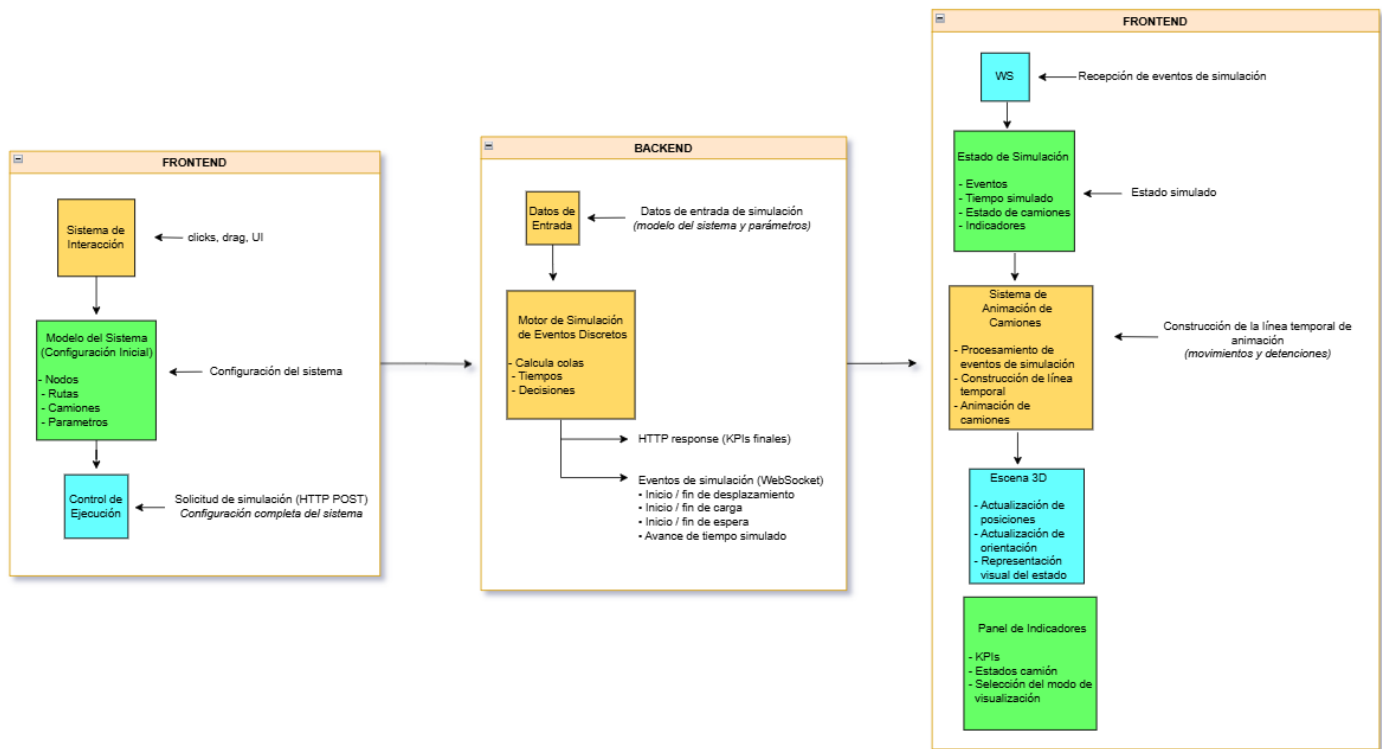


Figura 1 Arquitectura general del simulador de minería y flujo de información entre frontend y backend

3.2 Backend

El *backend* corresponde al núcleo del simulador, ya que es en este módulo donde se implementa toda la lógica de la simulación de eventos discretos. Fue desarrollado en Python, utilizando la librería SimPy como motor de simulación y FastAPI como servidor que permite la comunicación con el *frontend*. Mientras el *frontend* cumple el rol de interfaz gráfica y de construcción del modelo, el backend es el encargado de ejecutar la simulación propiamente tal, resolver las colas, avanzar el tiempo simulado y calcular todos los indicadores de desempeño del sistema.

El funcionamiento del *backend* se basa en la recepción de todos los parámetros definidos por el usuario en el *frontend*, tales como velocidad del camión cargado y vacío, capacidad del camión, distancia y pendiente de las rutas, tiempos de maniobra, tiempos de carga y descarga, además de la duración del turno, planificación de producción y estrategias de despacho. A

partir de estos datos, el sistema es capaz de calcular los tiempos de viaje tanto en condición cargada como vacía, considerando explícitamente el efecto de la pendiente sobre la velocidad efectiva del camión. En el modelo, una pendiente positiva reduce la velocidad de desplazamiento, mientras que una pendiente negativa la incrementa, lo que se traduce directamente en modificaciones en el tiempo total de transporte.

La Figura 2 presenta el diagrama de flujo correspondiente al ciclo operativo de un camión en un sistema de carguío y transporte minero. El camión se desplaza inicialmente hacia el área de carguío, donde verifica la disponibilidad del recurso de carga (pala). En caso de no existir disponibilidad, el camión ingresa a una cola de espera. Una vez finalizado el proceso de carga, el camión abandona el área de carguío y se dirige al área de descarga, donde se repite un proceso análogo de verificación de disponibilidad, espera en cola y descarga. Finalizada la descarga, el camión abandona el área correspondiente y retorna en vacío hacia la pala, reiniciando así su ciclo operativo.

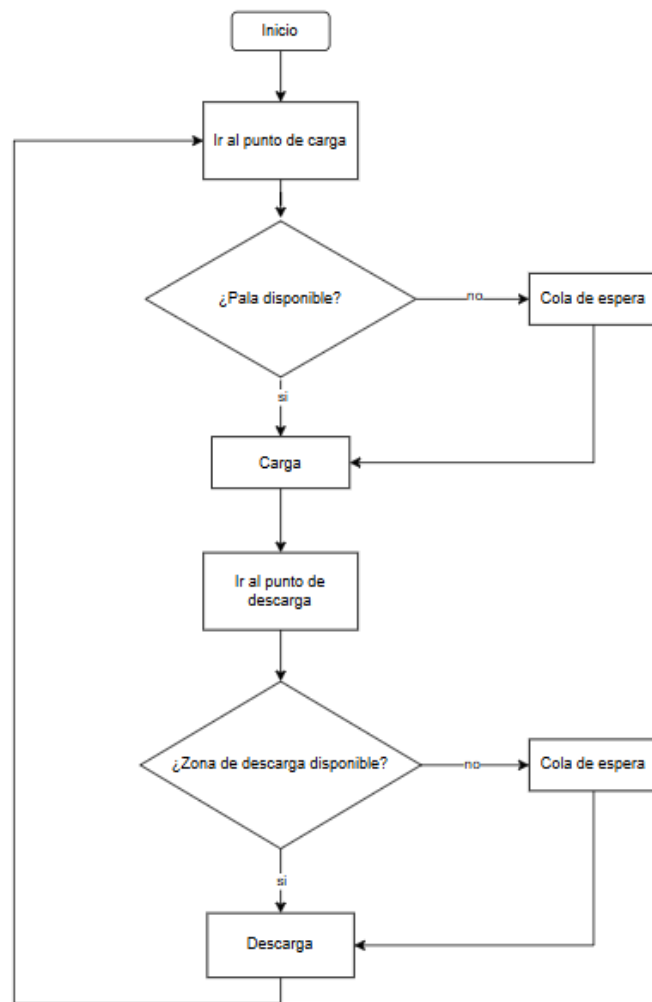


Figura 2 Diagrama de flujo del ciclo operativo de un camión en un sistema de carguío y transporte

Con estos tiempos se construye el tiempo de ciclo del camión, el cual se define como la suma de todas las etapas que componen una vuelta completa: espera en cola en la pala, carga, maniobra de salida, viaje cargado, espera en cola en el destino, descarga, maniobra de salida y retorno vacío hacia la pala. Este cálculo constituye uno de los elementos fundamentales del simulador, ya que el tiempo de ciclo determina cuántos viajes puede completar un camión durante el turno y, por lo tanto, la producción total del sistema.

En la figura 3 se ilustra el cálculo del tiempo de ciclo.

```
cycle_work_min = (  
    (t_load_sec / 60.0)  
    + (t_manobra_sec_out_pala / 60.0)  
    + haul_time_min  
    + (t_dump_sec / 60.0)  
    + (t_manobra_sec_out_dest / 60.0)  
    + return_time_min  
)
```

Figura 3 Cálculo del tiempo de ciclo dentro del backend

Adicionalmente, el *backend* incorpora distintas estrategias de despacho de rutas que controlan la toma de decisiones de los camiones, estos pueden ser “Equitativo”, “Por tiempo de ciclo” o “Por plan de producción”. En el modo “Equitativo”, utilizado principalmente como método de prueba y validación, los camiones recorren secuencialmente todas las rutas disponibles, una tras otra, repitiendo el ciclo indefinidamente. En el modo “Por tiempo de ciclo”, cada camión estima el tiempo de ciclo asociado a cada ruta disponible, considerando no solo las distancias y velocidades, sino también las colas existentes en palas y destinos, y selecciona aquella ruta que minimiza dicho tiempo. Por su parte, la estrategia “Por plan de producción” prioriza el destino que presenta el mayor déficit de tonelaje respecto al plan de producción, dirigiendo los camiones hacia el destino donde más producción falta por cumplir. Estas estrategias permiten analizar cómo distintas políticas de despacho influyen en la formación de colas, la utilización de los equipos y la productividad global.

El *backend* también incorpora simulación Monte Carlo para representar la naturaleza estocástica del sistema. Los tiempos de carga, descarga, maniobra y desplazamiento pueden definirse mediante distribuciones probabilísticas, como distribuciones normales o triangulares, en lugar de valores fijos. Esto permite que cada ejecución de la simulación utilice valores ligeramente distintos, generando variabilidad en los resultados. A partir de un número de réplicas definido por el usuario, el *backend* ejecuta la simulación múltiples veces y entrega resultados estadísticos, permitiendo analizar promedios, dispersión y sensibilidad de los indicadores frente a la incertidumbre operacional.

Como salida, el *backend* entrega al *frontend* un conjunto completo de indicadores de desempeño, entre los que se incluyen el tiempo de ciclo promedio, número de ciclos por camión, el tiempo promedio en cola, tiempo total en cola, la producción total, las toneladas por hora, el cumplimiento del plan de producción, la identificación de cuellos de botella (nodo que tuvo más cola) y la mejor y peor hora de producción.

Además de los resultados finales, el *backend* emite todos los eventos que ocurren durante la simulación, tales como llegada de un camión a una pala o destino, inicio y término de carga, inicio y término de descarga, inicio y término de espera en cola, movimientos de los camiones y avance del tiempo simulado. Gracias al uso de SimPy, el tiempo de la simulación avanza únicamente cuando ocurre un evento relevante, lo que constituye la esencia de la simulación de eventos discretos. El *frontend* recibe esta secuencia de eventos y la utiliza para animar la operación, transformando los cálculos del *backend* en una representación visual continua del comportamiento real del sistema de carguío y transporte.

3.3 Frontend

El *frontend* corresponde a la interfaz gráfica mediante la cual el usuario interactúa directamente con el simulador, en la Figura 4 se puede apreciar la interfaz del simulador, su función principal es permitir la construcción, configuración y visualización del modelo de forma intuitiva, transformando la simulación en una herramienta accesible y operativa. Este módulo está compuesto por una escena tridimensional interactiva, una barra lateral de edición y una barra superior de control, las cuales trabajan de manera integrada y una barra lateral de visualización de resultados y estado de la simulación.

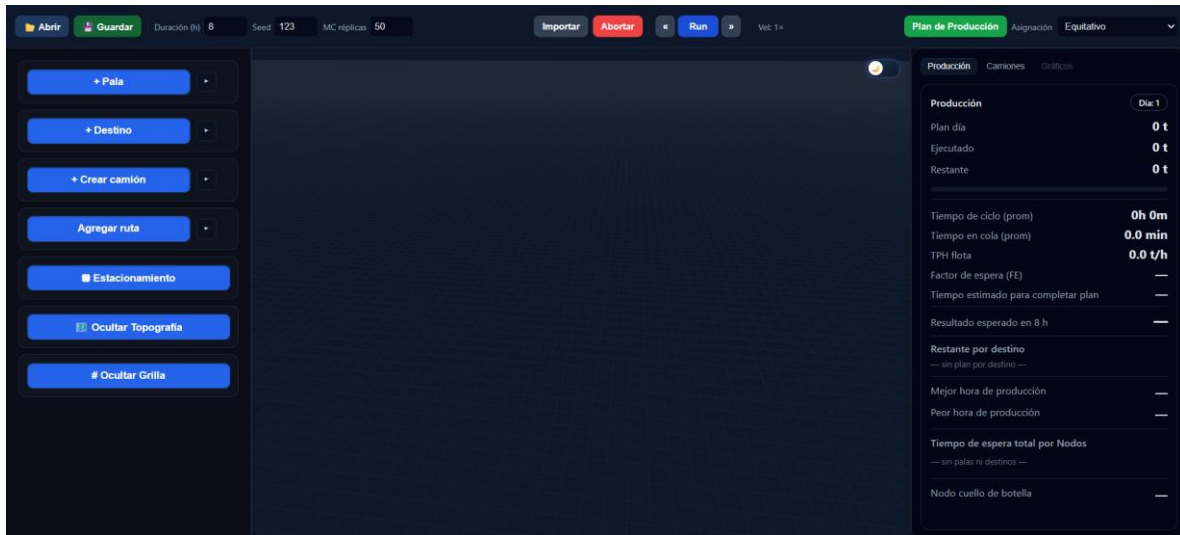


Figura 4 Interfaz gráfica del simulador

La escena 3D permite rotar la cámara, aplicar zoom, recorrer el entorno y cuenta con un botón de control de alternancia entre modo de visualización claro y oscuro, facilitando la observación espacial de la operación minera. En ella se visualizan todos los elementos del sistema, tales como camiones, palas, destinos, estacionamientos, rutas y topografía, permitiendo al usuario comprender de forma directa la geometría de la operación y el comportamiento dinámico de los equipos durante la simulación.

La barra lateral actúa como el espacio de creación y configuración del modelo. Desde ella es posible arrastrar los objetos que representan las entidades y recursos del sistema: modelos realistas *.gltf* de camiones y palas, y cubos azules para los destinos. En esta sección se ingresan todos los parámetros operacionales necesarios, tales como tiempos de carga y descarga, capacidades, velocidades, pendientes de las rutas y tonelajes del plan de producción. Estos datos corresponden a los parámetros de entrada del modelo, los cuales son enviados al *backend* para la ejecución de la simulación.

La barra superior concentra los controles de la simulación. Desde ella el usuario puede iniciar, pausar, abortar, acelerar o desacelerar la ejecución, definir la duración del turno, seleccionar el número de réplicas para simulación Monte Carlo, establecer la estrategia de asignación de rutas y configurar el plan de producción. Además, incorpora la funcionalidad de importar

imágenes y archivos *.dxf* para la topografía, lo que permite utilizar referencias reales del terreno y apoyar la construcción de un modelo espacialmente más representativo. Finalmente, dispone de botones para guardar y cargar sesiones de trabajo, permitiendo al usuario conservar el escenario creado del modelo y retomar simulaciones previamente definidas sin necesidad de reingresar los parámetros.

En conjunto, el *frontend* cumple el rol de puente entre el usuario y el motor de simulación, permitiendo no solo visualizar los resultados, sino también definir completamente el escenario operativo a analizar. De esta manera, se transforma en una herramienta clave para la creación de escenarios, la experimentación y la interpretación de los resultados del sistema de carguío y transporte.

3.4 Entidades y recursos

En el simulador se adopta la distinción clásica de la simulación de eventos discretos entre entidades y recursos. Las entidades corresponden a los elementos que se desplazan por el sistema y generan la dinámica de la operación, mientras que los recursos representan puntos de servicio con capacidad limitada. En este modelo, la entidad principal está constituida por los camiones, y los recursos fundamentales son las palas, los destinos y el estacionamiento, todos con una capacidad de atención de un camión a la vez. Esta restricción es lo que da pie de forma natural a la formación de colas y la utilización de los distintos puntos de servicio.

La pala representa el punto de carguío del sistema y controla el tiempo de carga del material hacia los camiones. Su capacidad y tiempo de servicio influyen directamente en la productividad, ya que determinan cuántos camiones pueden ser atendidos por unidad de tiempo.

La figura 5 muestra la representación de una pala mediante un modelo tridimensional y la figura 6 muestra la ventana de configuración de la pala, donde se ingresa el tiempo de carga, con su distribución.



Figura 5 Modelo tridimensional de la pala

Nueva Pala

×

Nombre

pala

Tiempo de carga

Distribución

Triangular

▼

Min (s)

90

Moda (s)

120

Max (s)

180

Cancelar

Crear

Figura 6 Ventana de configuración de parámetros de la pala

El estacionamiento cumple un rol dual dentro del modelo. Por una parte, corresponde al punto de inicio de todos los camiones al comenzar la simulación, desde donde se dirigen hacia la pala para iniciar su ciclo productivo. Por otra, actúa como punto de descanso, permitiendo modelar pausas operacionales, como la colación o el término anticipado de actividades cuando no es posible completar un nuevo ciclo antes de terminar el turno.

La figura 7 muestra la representación de camiones agrupados en el estacionamiento.

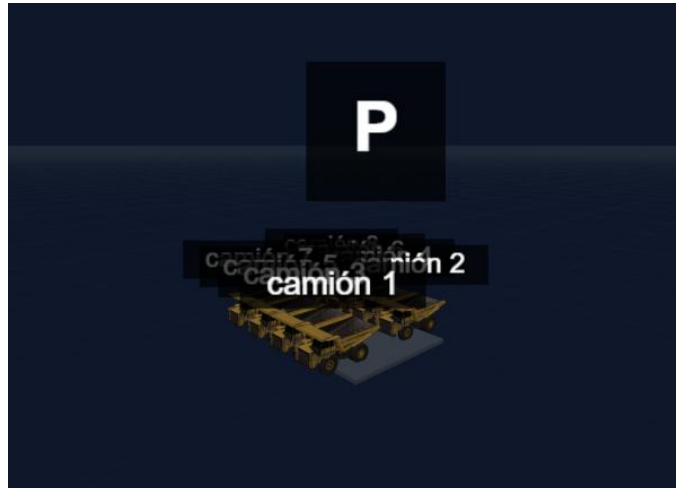


Figura 7 Representación de camiones estacionados

El destino representa el punto de descarga y controla el tiempo de descarga del material transportado. Al igual que la pala, puede transformarse en un cuello de botella si su capacidad resulta insuficiente frente al flujo de camiones.

La figura 8 muestra la ventana de configuración del destino, donde se ingresa el tiempo de descarga con su distribución.

Nuevo Destino	
Nombre	destino
Tiempo de descarga	
Distribución	Triangular
Min (s)	40
Moda (s)	60
Max (s)	90
Cancelar Crear	

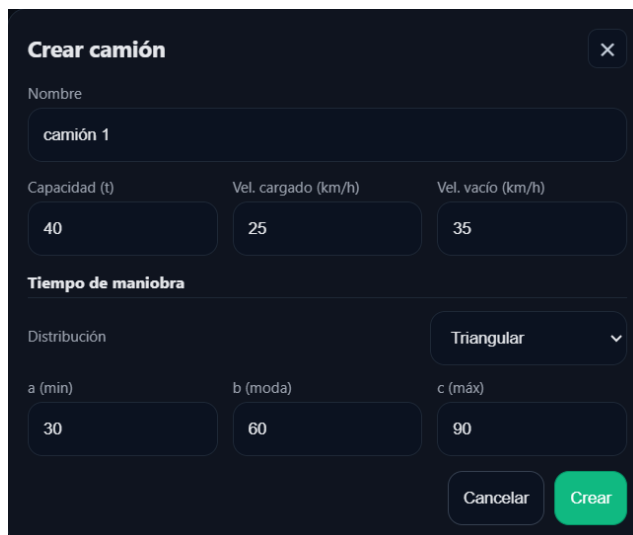
Figura 8 Representación del estacionamiento y datos del destino

Los camiones son la entidad principal del sistema. Cada camión posee atributos propios como capacidad de carga, velocidad en condición cargada y vacía, y tiempo de maniobra, los cuales determinan su comportamiento dinámico y su contribución directa a la producción total del sistema, los camiones parten desde el estacionamiento al inicio del turno y se dirigen hacia la pala para iniciar su ciclo productivo. Una vez cargados, se desplazan hacia uno de los destinos definidos por el plan de producción, donde descargan el material, y posteriormente retornan en vacío hacia la pala para repetir el ciclo.

La figura 9 muestra la representación de un camión mediante un modelo tridimensional y la figura 10 muestra la ventana de configuración, donde se ingresan los parámetros del camión.



Figura 9 Modelo tridimensional del camión



Crear camión [X]

Nombre
camión 1

Capacidad (t) Vel. cargado (km/h) Vel. vacío (km/h)

40 25 35

Tiempo de maniobra

Distribución Triangular [v]

a (min) b (moda) c (máx)

30 60 90

[Cancelar] [Crear]

Figura 10 Ventana de configuración de parámetros del camión

En la figura 11 se puede ver la ventana de configuración del plan de producción, el plan de producción permite asignar un objetivo de toneladas a transportar para cada destino y por cada día de operación. De esta forma, la estrategia de despacho utiliza este plan como referencia para dirigir los camiones por las rutas hacia los distintos destinos.

The screenshot shows a window titled "Plan de Producción" with a close button (X) in the top right corner. Inside the window, there is a section for "Día" (Day) with a text input field containing "1", a "Total día: 0 t" label, and a red "Eliminar día" button. Below this, there are two rows for "Destino" (Destination) and "Toneladas" (Tonnes). The first row has a dropdown menu showing "destino 1", a text input field with "0", and a close button (X). The second row has a dropdown menu showing "destino 2", a text input field with "0", and a close button (X). Below these rows is a "+ Añadir destino" button. At the bottom left, there is a "+ Añadir día" button and a "Total plan: 0 t" label. At the bottom right, there are "Cancelar" and "Guardar" buttons.

Figura 11 Ventana de configuración de plan de producción

Adicionalmente, los camiones pueden representarse en el entorno de distintas formas. Por una parte, se dispone de un modelo tridimensional realista de un camión Komatsu, orientado a una representación visual detallada de la operación. Por otra parte, los camiones pueden visualizarse mediante representaciones geométricas simplificadas, tales como rectángulos, los cuales cambian de color en función de su estado operacional con el objetivo de facilitar la interpretación visual del estado.

Esta clasificación permite identificar de manera inmediata la fase del ciclo operativo en la que se encuentra cada camión:

- **Viaje cargado:** color **naranja**, correspondiente al desplazamiento del camión desde la pala hacia el destino con material cargado.

- **Viaje vacío:** color **verde**, correspondiente al retorno del camión desde el destino hacia la pala sin carga.
- **Espera en cola:** color **rojo**, asociado a los períodos en que el camión permanece detenido esperando acceso a un punto de servicio.
- **Carga, Descarga, Maniobra:** color **azul**, que corresponde a las operaciones en los puntos de servicio.

En las figuras 12 y 13 podemos ver cómo se representan estos diferentes colores en los camiones tanto en la escena como en el panel de monitoreo de los camiones.



Figura 12 Visualización de los camiones en la escena de simulación



Figura 13 Panel de monitoreo del estado de la flota

3.5 Rutas

Las rutas constituyen uno de los componentes más importantes del simulador, ya que conectan todos los nodos del sistema: estacionamiento, pala y destinos. Son el soporte físico por donde se desplazan los camiones y, sin ellas, el movimiento dentro del sistema no sería posible. En consecuencia, las rutas definen la estructura geométrica básica sobre la cual se desarrolla la operación de carguío y transporte.

En el simulador, las rutas son completamente editables. La figura 14 muestra la ventana de edición de rutas, es posible modificar su distancia, agregar nodos intermedios para cambiar su forma y así representar curvas, y asignarles una pendiente positiva o negativa, lo que puede afectar directamente la velocidad de los camiones, alterando el tiempo de ciclo y por consecuencia la producción.

Editar ruta
pala → destino

Nombre

r

Origen → Destino

pala → destino

Distancia (km)

1

Pendiente A → B (%)

0

Tramos de la ruta

Nodo 1	Nodo 2	Pendiente (%)
pala	destino	0.00 %

Agregar nodos

Cancelar

Guardar

Figura 14 Ventana de edición de ruta

Estas características permiten construir configuraciones geométricas más cercanas a una operación real, donde los caminos no son rectos ni homogéneos.

Las figuras 15 a 17 muestran ejemplos de las distintas formas que pueden adoptar las rutas.

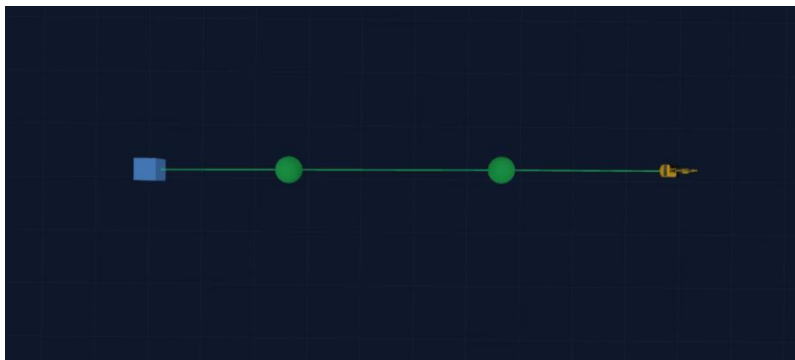


Figura 15 Ruta directa entre pala y destino con nodos intermedios



Figura 16 Ruta con nodos intermedios modificados manualmente

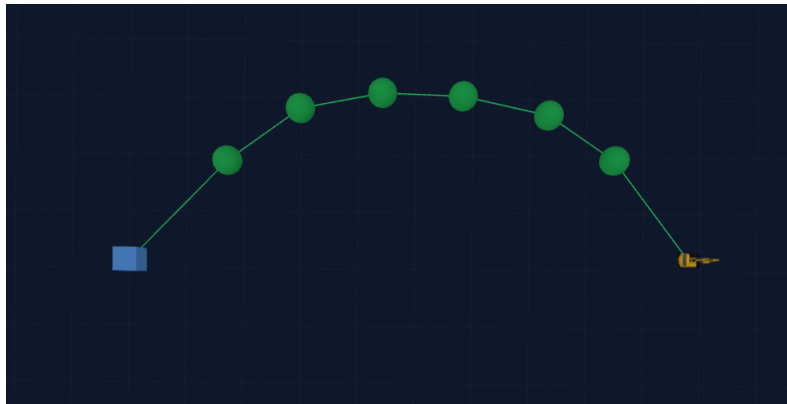


Figura 17 Ejemplo de ruta con curva utilizando nodos intermedios

La pendiente de la ruta influye directamente en la velocidad efectiva de los camiones. Una pendiente positiva reduce la velocidad de desplazamiento, mientras que una pendiente negativa la incrementa, modificando así los tiempos de transporte. Este efecto se traduce directamente en cambios en el tiempo de ciclo y, por ende, en la productividad global del sistema. De esta manera, las rutas no solo cumplen un rol de conexión entre nodos, sino que se transforman en un factor determinante en el desempeño operacional de la simulación.

3.6 Topografía e imágenes de referencia

Como complemento a la representación visual del sistema, el simulador incorpora la posibilidad de utilizar topografía e imágenes de referencia con el fin de mejorar la interpretación espacial del entorno simulado. La topografía, se representa como una superficie tridimensional sobre la cual es posible definir rutas de transporte. Al crear un nodo

sobre ella, este se adhiere automáticamente a la superficie, permitiendo construir rutas que siguen la forma real del terreno e incorporan directamente las variaciones de pendiente de cada segmento. Por su parte, las imágenes de referencia se proyectan como fondo bidimensional y sirven únicamente como apoyo visual para contextualizar el modelo, sin influir en la definición de rutas ni en los cálculos de simulación.

Las Figuras 18 y 19 muestran la topografía tridimensional cargada en el simulador desde distintas perspectivas, evidenciando cómo la superficie del terreno queda representada en el entorno de simulación. La figura 20 incorpora además camiones circulando sobre una ruta definida directamente sobre la topografía, ilustrando la funcionalidad completa del sistema: la posibilidad de trazar rutas que siguen la geometría real del terreno y visualizar el desplazamiento de los equipos sobre ellas.

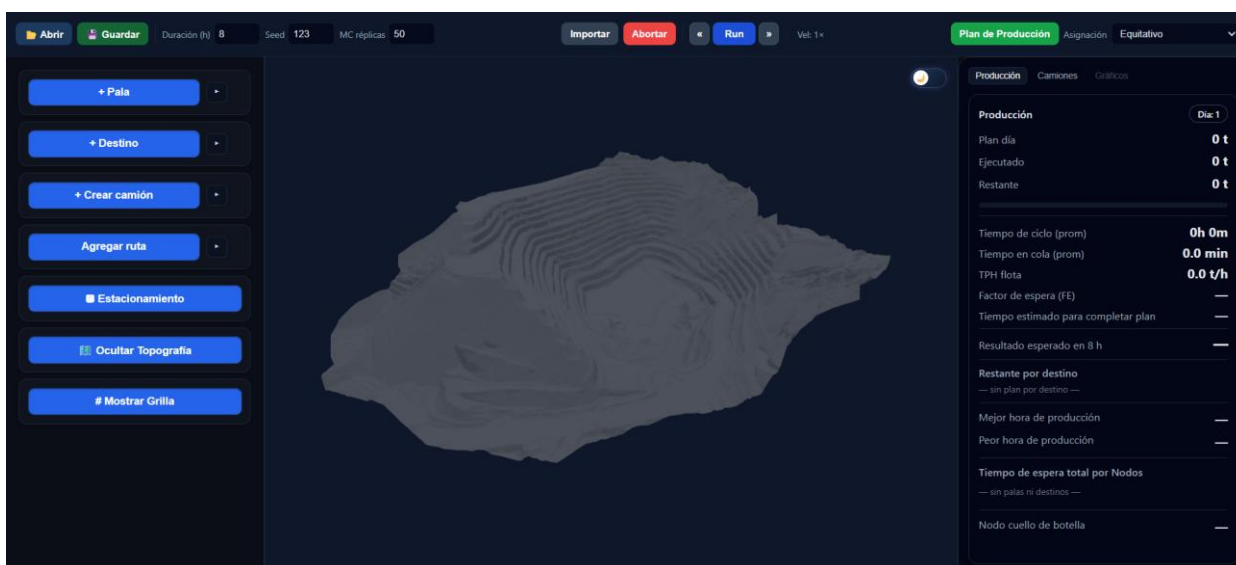


Figura 18 Visualización de la topografía

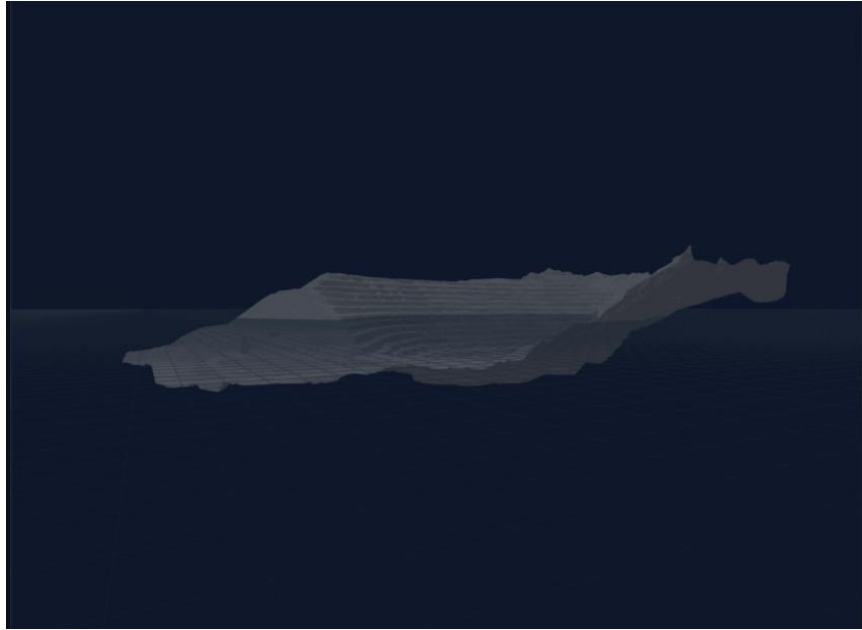


Figura 19 Vista lateral de la topografía de referencia



Figura 20 Circulación de camiones sobre la ruta de transporte definida en la topografía de referencia

3.7 Lógica de descanso y cambio de turno

Además de la lógica propia del ciclo de carguío y transporte, el simulador incorpora una regla de descanso que se evalúa de manera individual para cada camión. No se trata de una

detención simultánea de toda la flota, sino de una decisión que cada camión toma en función de su propio estado dentro del turno.

La figura 21 ilustra cómo funciona la lógica de descanso, en particular, una vez que el tiempo simulado supera la mitad del turno, cada camión verifica si ya ha realizado su pausa de descanso. Si aún no lo ha hecho, al finalizar su ciclo actual decide interrumpir su operación y retornar al estacionamiento para efectuar su descanso asociado al horario de colación.

Esta pausa tiene una duración de una hora, tras la cual el camión vuelve a integrarse al sistema y retoma normalmente su operación. De esta forma, el descanso se distribuye de manera natural a lo largo del tiempo y no todos los camiones abandonan el sistema al mismo instante, lo que representa de forma más realista el comportamiento observado en una operación real.

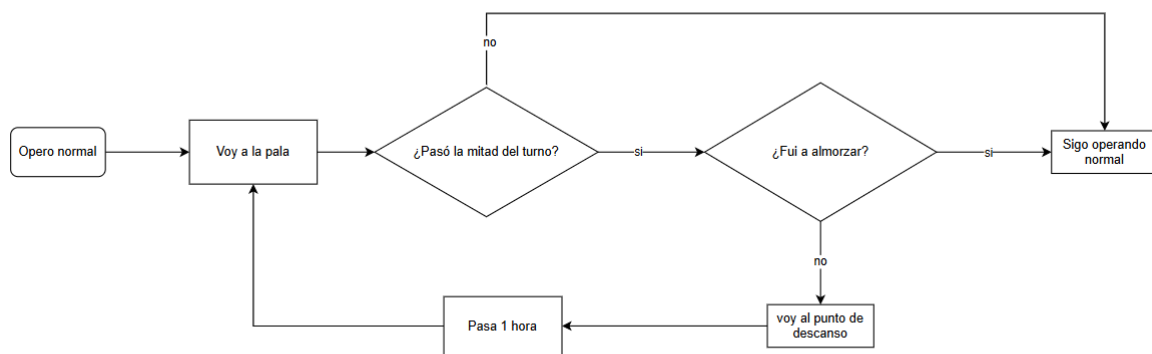


Figura 21 Diagrama de lógica para almorzar

De manera complementaria, el simulador considera una lógica de cierre de turno. Cuando faltan treinta minutos para el término del turno, cada camión evalúa si dispone de tiempo suficiente para completar un nuevo ciclo completo de carguío y transporte. Si el tiempo restante es mayor al tiempo estimado del ciclo, el camión inicia una nueva asignación; en caso contrario, decide no comenzar un nuevo ciclo productivo y retorna directamente al estacionamiento, donde queda a la espera del cambio de turno. Esta regla permite evitar la existencia de ciclos incompletos al final de la jornada y representa el comportamiento

operativo habitual, donde los equipos deben quedar disponibles para el relevo de operadores y la preparación del turno siguiente.

La incorporación de estas dos lógicas introduce de manera explícita los tiempos no productivos asociados al descanso y al cambio de turno, los cuales influyen directamente en la producción efectiva del sistema. Así, el simulador no solo modela la dinámica técnica del carguío y transporte, sino que también considera restricciones propias de la gestión operativa, contribuyendo a una representación más realista del comportamiento global de la flota.

4 Resultados

4.1 Visualización de resultados en ProductionBadge

Con el objetivo de facilitar la interpretación de los resultados de la simulación, el sistema incorpora un componente de visualización denominado ProductionBadge, el cual es una barra lateral que permite mostrar los principales indicadores de desempeño del sistema directamente sobre la interfaz gráfica. Este componente actúa como un panel de resumen que consolida la información calculada por el *backend* y la presenta de forma clara y accesible al usuario.

El ProductionBadge se organiza en tres ventanas principales, cada una orientada a un tipo específico de información.

La Figura 22 muestra la ventana de producción, donde se presentan los indicadores globales más relevantes del sistema, tales como las toneladas por hora de la flota, el tiempo de ciclo promedio, el tiempo promedio de espera en cola, el factor de espera de la flota (FE) y el tiempo estimado para completar el plan de producción. El FE se calcula como el cociente entre el tiempo total acumulado en cola por toda la flota y el tiempo disponible total de la flota, definido como el producto entre la duración del turno y el número de camiones, expresado en porcentaje. Este indicador incorpora una codificación visual por colores: se muestra en verde cuando el FE es igual o inferior al 15%, indicando un nivel de espera bajo; en amarillo cuando se encuentra entre el 15% y el 30%, señalando una congestión moderada; y en rojo cuando supera el 30%, indicando un nivel crítico con impacto significativo en la producción. Estos umbrales fueron estimados como referencia orientativa para esta versión del simulador y podrían cambiar en el futuro. Por su parte, el tiempo estimado para completar el plan de producción, se calcula como el cociente entre las toneladas restantes del plan y la tasa de producción actual expresada en toneladas por hora, y se muestra en verde cuando el sistema proyecta que el plan se completará dentro del turno, y en rojo cuando proyecta que no se cumplirá dentro del turno y en este caso muestra un estimado de cuánto tardaría en completarse el plan. Los indicadores de mejor y peor hora de producción corresponden respectivamente a la hora del turno con mayor y menor producción registrada en toneladas por hora. Se incluyen además el tiempo de espera acumulado por nodo y la identificación del nodo cuello de botella del sistema. Adicionalmente, cuenta con una barra de progreso que se

actualiza dinámicamente durante la simulación, donde el valor ejecutado se acumula sumando la capacidad de carga de cada camión cada vez que este completa una descarga en el destino, el restante corresponde a la diferencia entre el plan total y las toneladas ejecutadas, y el desglose por destino indica cuántas toneladas quedan pendientes en cada destino del plan.



Figura 22 Ventana de producción del componente ProductionBadge

La Figura 23 corresponde a la ventana de seguimiento de camiones, la cual permite visualizar el estado operativo individual de cada equipo. En esta vista es posible identificar en vivo el estado actual de los camiones (carguío, descarga, desplazamiento o espera en cola), el número de ciclos completados y la ruta por la cual se están desplazando. Esta ventana facilita el análisis del comportamiento de la flota y la detección de posibles congestiones o desbalances operacionales durante la simulación.



Figura 23 Ventana de seguimiento de camiones del componente ProductionBadge

Finalmente, la Figura 24 muestra la ventana de visualización gráfica de resultados, donde se presentan tres gráficos. El primero corresponde a la producción en toneladas por hora (TPH), el cual resulta útil para identificar períodos de mayor y menor producción a lo largo del turno. El segundo representa el tiempo perdido en espera por cada nodo. El tercero utiliza Monte Carlo para analizar la producción total en cada una de las réplicas junto con su promedio general, permitiendo evaluar la variabilidad del sistema ante distintos escenarios estocásticos.

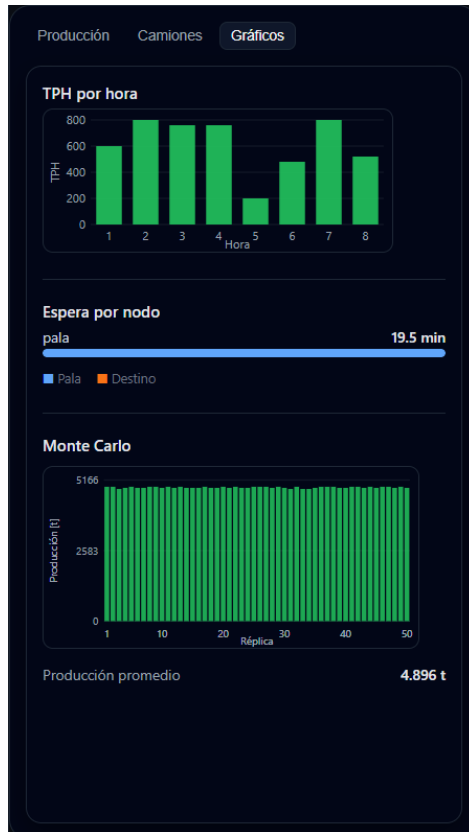


Figura 24 Ventana de visualización de gráficos de resultados del componente ProductionBadge

La utilización del ProductionBadge no influye en la lógica de cálculo ni en la ejecución de la simulación, ya que cumple exclusivamente un rol de visualización. Este permite complementar los resultados numéricos finales con una representación gráfica inmediata del comportamiento del sistema, facilitando el análisis exploratorio de escenarios y la comprensión del desempeño operacional durante la simulación.

4.2 Validación del modelo

Con el objetivo de verificar la consistencia y confiabilidad del simulador desarrollado, los resultados obtenidos fueron comparados con cálculos realizados mediante planillas Excel y con un modelo equivalente implementado en el software comercial **ProModel**. El proceso de validación se enfocó en la comparación de la **producción total de la flota**, considerando

distintos tamaños de flota y utilizando escenarios determinísticos, de modo de asegurar condiciones equivalentes entre las distintas herramientas.

4.2.1 Validación contra Excel

En primera instancia, se compararon los resultados del simulador con un modelo analítico determinístico en Excel partiendo por un caso de un único camión, un ejemplo sencillo para ver si los cálculos eran correctos y coherentes.

El modelo analítico fue construido a partir de cálculos realizados en la herramienta Excel, considerando un escenario compuesto por un camión, una pala y un destino, con un turno de 8 horas. Se adoptaron los mismos supuestos del simulador, los cuales se pueden observar en la tabla 2 el camión parte desde un estacionamiento al inicio del turno, realiza el viaje de estacionamiento a pala, opera en ciclos de pala a destino y retorno, y al momento de la colación regresa al estacionamiento por una hora. Adicionalmente, se considera que el turno finaliza 20 minutos antes de su término nominal, equivalente al fin de turno configurado en el simulador.

Tabla 2 Parámetros de entrada ejemplo Excel

Parámetro	Valor
Duración del turno (h)	8
Colación (min)	60
Buffer final de turno (min)	20
N° camiones	1
Capacidad por camión (ton)	100
Velocidad cargado (km/h)	25.0
Velocidad vacío (km/h)	35.0
Distancia pala → destino (km)	3.0
Distancia estacionamiento → pala (km)	1.0
Pendiente (%)	0.0
Tiempo de carga (seg, fixed)	45
Tiempo de descarga (seg, fixed)	20
Tiempo de maniobra (seg, fixed)	30

Con el fin de obtener resultados comparables, todos los tiempos operacionales fueron definidos con valores fijos e idénticos en ambas herramientas. El tiempo de ciclo (T_c) se calcula como la suma de los tiempos parciales de cada etapa operacional, y la producción total se obtiene sumando la capacidad del camión por cada descarga completada durante el turno. Bajo estas condiciones determinísticas y con un solo camión, la Tabla 3 presenta la comparación entre ambos modelos.

Tabla 3 Producción total y diferencia porcentual entre Excel y el Simulador desarrollado

Indicador	Modelo analítico (Excel)	Simulador	Error relativo [%]
Producción total [ton]	2.700	2.700	0,00%
TPH flota [t/h]	337,5	337,5	0,00%
Tiempo de ciclo [min]	14,42	14,43	+0,07%

Los resultados muestran una concordancia prácticamente exacta entre el modelo analítico y el simulador. La producción total y las toneladas por hora presentan un error relativo nulo, confirmando que el simulador contabiliza correctamente los ciclos de acarreo y acumula la producción de forma coherente con la lógica analítica. El tiempo de ciclo registra una diferencia de 0,01 minutos, valor considerado dentro del umbral aceptable.

Posteriormente, se realizó una segunda comparación con el modelo Excel, manteniendo fijos los mismos parámetros de antes para ambas herramientas, pero esta vez variando el número de camiones, con el fin de analizar cómo evoluciona la producción total del turno en función del tamaño de la flota. Los resultados de esta comparación se presentan en la Figura 25.

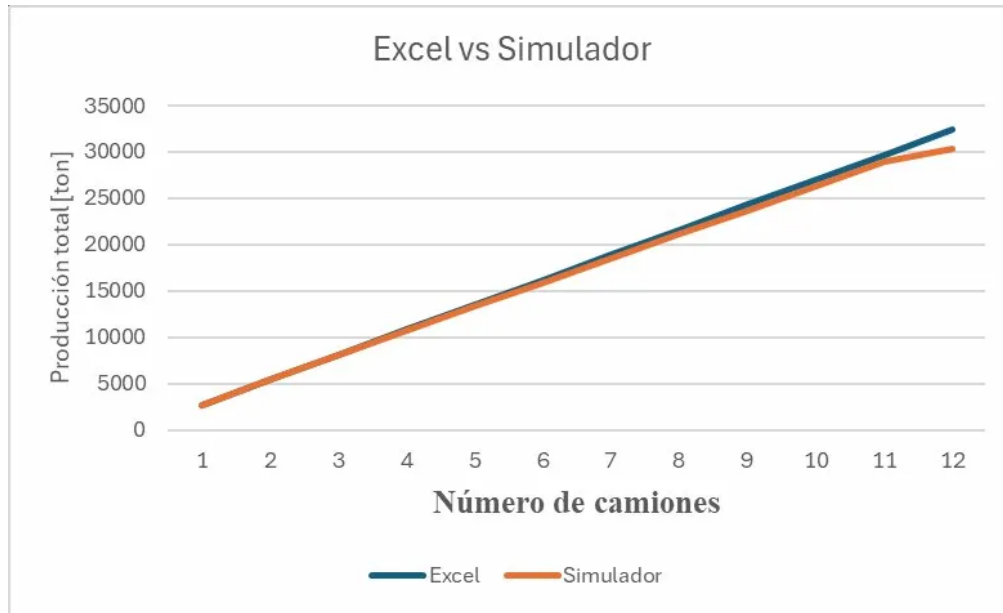


Figura 25 Comparación de producción total: Excel vs Simulador desarrollado

En el gráfico se puede observar que ambas herramientas entregan resultados similares para flotas pequeñas, pero comienzan a separarse a medida que aumenta el número de camiones. En particular, la curva del simulador muestra una curvatura hacia el final, mientras que la curva del modelo Excel se mantiene lineal y directamente proporcional al número de camiones. Esta diferencia se explica porque el modelo analítico en Excel no considera los tiempos de espera en cola, asumiendo que la pala siempre está disponible cuando el camión llega. El simulador, en cambio, modela explícitamente la formación de colas, lo que reduce la producción efectiva cuando la flota crece y el recurso de carguío comienza a saturarse.

4.2.2 Validación contra ProModel

Como segunda etapa de validación, se compararon los resultados del simulador con el software comercial ProModel, manteniendo nuevamente los mismos valores de entrada en ambas plataformas, estos valores se pueden observar en la tabla 4.

Tabla 4 Parámetros de entrada ejemplo ProModel

Parámetros	Valor
Duración del turno (h)	12
Colación (min)	60
Buffer final de turno (min)	20
Capacidad por camión (ton)	273
Velocidad cargado (km/h)	17.6
Velocidad vacío (km/h)	25.4
Distancia pala → destino (km)	1.42
Distancia estacionamiento → pala (km)	1.73
Pendiente (%)	0
Tiempo de carga (seg, fixed)	180
Tiempo de descarga (seg, fixed)	60
Tiempo de maniobra (seg, fixed)	120

El escenario considera una única pala como punto de carguío y varía exclusivamente el número de camiones, evaluando flotas de uno a cinco camiones. La Tabla 5 presenta la producción total obtenida por cada simulador junto con la diferencia porcentual correspondiente.

Tabla 5 Producción total y diferencia porcentual entre ProModel y el simulador desarrollado.

N.º camiones	ProModel [ton]	Simulador [ton]	Diferencia [%]
1	11.193	10.374	-7,32%
2	22.386	20.475	-8,54%
3	33.579	30.576	-8,94%
4	35.217	33.579	-4,65%
5	35.490	33.852	-4,62%

Los resultados evidencian una alta concordancia entre el simulador desarrollado y ProModel. Las diferencias porcentuales observadas, que oscilan entre un 4,62% y un 8,94%, pueden deberse a diferencias en los supuestos de modelamiento y en la forma en que cada plataforma gestiona la secuencia de eventos, los tiempos de servicio y la resolución de colas.

Se observa además que las diferencias son más pronunciadas para flotas pequeñas (1 a 3 camiones), donde el sistema opera sin saturación del recurso de carguío, y tienden a reducirse a medida que la flota crece y el sistema se aproxima al límite de capacidad de la pala.

La Figura 26 ilustra la evolución de la producción total en función del número de camiones para ambas herramientas. Al incrementar el tamaño de la flota se observa un aumento progresivo de la producción que se estabiliza al aproximarse al límite de capacidad de los recursos de carguío, comportamiento que se reproduce de forma consistente en ambas plataformas y que constituye un resultado esperado en sistemas de transporte y carguío con un único punto de servicio. Esta tendencia confirma que el simulador desarrollado es capaz de capturar adecuadamente los principales cuellos de botella del sistema y la relación no lineal entre tamaño de flota y producción.

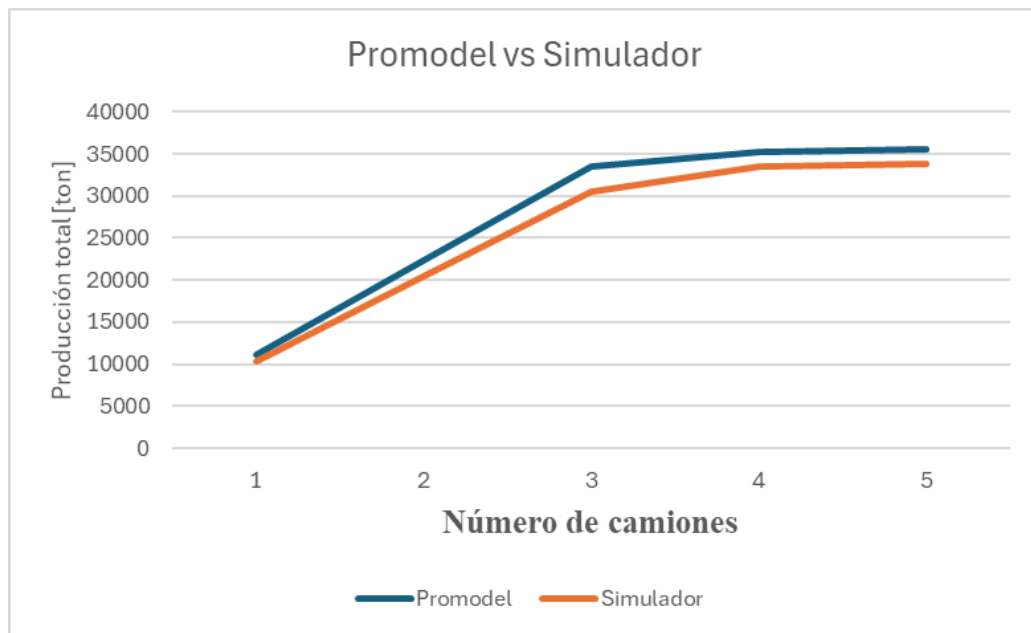


Figura 26 Comparación de producción total: ProModel vs simulador desarrollado

En conjunto, los resultados de ambas etapas de validación confirman que la lógica de simulación de eventos discretos, el modelamiento de colas y la ejecución temporal de los procesos han sido implementados de manera correcta y consistente. El simulador no solo demostró ser funcional desde el punto de vista computacional, sino que también se valida como una herramienta confiable de análisis operacional, adecuada para la evaluación de escenarios y el apoyo a la toma de decisiones en sistemas de carguío y transporte en minería a cielo abierto.

5 Discusiones

5.1 Escenarios evaluados

Para analizar el comportamiento del sistema de carguío y transporte, se realizaron simulaciones bajo condiciones equivalentes tanto en ProModel como en el simulador desarrollado. En este contexto, se definieron distintos escenarios en los que se varió el número de camiones en operación, manteniendo constantes el resto de los parámetros. De esta forma, fue posible observar de manera directa cómo el tamaño de la flota afecta la producción y el desempeño general del sistema.

Los valores utilizados para tiempos de carga, descarga, velocidades de transporte y configuración de rutas corresponden a valores representativos de una operación de minería a cielo abierto. Cada escenario fue simulado durante un mismo horizonte temporal, registrándose indicadores como la producción total, las toneladas por hora y el tiempo de ciclo promedio.

5.2 Resultados y análisis

Los resultados obtenidos muestran que la producción total aumenta a medida que se incrementa el número de camiones; sin embargo, a partir de cierto tamaño de flota la producción comienza a curvarse, evidenciando que el sistema alcanza un límite impuesto por la capacidad del punto de carguío. Este comportamiento es coherente con la teoría de sistemas de colas aplicada a operaciones mineras: cuando la tasa de llegada de camiones supera la capacidad de la pala, el recurso crítico se satura y el aporte de cada camión adicional se reduce progresivamente, evidenciando que el cuello de botella se encuentra en la pala.

Al comparar los resultados del simulador desarrollado con los obtenidos mediante planillas Excel y el software ProModel, se observa una tendencia muy similar en todos los casos. Si bien existen diferencias numéricas menores, la evolución de la producción en función del número de camiones es consistente entre las tres herramientas. En el caso de Excel, el análisis se basa en relaciones determinísticas cerradas que no representan la formación de colas, mientras que tanto ProModel como el simulador desarrollado permiten representar de forma

explicita la formación de colas y la interacción dinámica entre camiones y recursos, lo que permite observar cuándo la flota supera el punto de saturación.

El incremento progresivo de los tiempos de espera en el nodo de carguío, observado a medida que crece el tamaño de la flota, confirma la presencia de un cuello de botella en la pala. En este contexto, el simulador permite visualizar y cuantificar de manera clara cuándo el incremento de camiones deja de aportar mejoras significativas en la producción, entregando información útil para evaluar tamaños de flota adecuados y apoyar la toma de decisiones operacionales.

6 Conclusión

El trabajo desarrollado permitió implementar una primera versión simple pero funcional de un simulador de eventos discretos, orientado al análisis del sistema de carguío y transporte en minería a cielo abierto. El simulador modela explícitamente la interacción entre camiones y puntos de servicio, incorporando tiempos de carga, descarga, maniobra y desplazamiento, así como las restricciones de capacidad que gobiernan el comportamiento del sistema.

Uno de los principales aportes del simulador es la posibilidad de analizar la producción como resultado directo del tiempo de ciclo, el cual se ve afectado por variaciones en parámetros operacionales como velocidades de transporte, tiempos de servicio y configuración de rutas. A través de la modificación de estos parámetros, es posible observar cómo pequeños cambios en los tiempos individuales se propagan a lo largo del ciclo operativo, impactando finalmente en la producción total del sistema. De esta forma, el simulador permite estudiar de manera integrada la relación entre tiempos, utilización de recursos y desempeño productivo.

Asimismo, la simulación de distintos escenarios operacionales permitió identificar la aparición de cuellos de botella y evaluar cómo estos limitan la producción a partir de cierto tamaño de flota. Este enfoque convierte al simulador en una herramienta útil para el análisis de tipo “qué pasaría si”, permitiendo explorar alternativas operacionales, comparar configuraciones y apoyar decisiones relacionadas con el diseño y la operación del sistema de transporte.

Finalmente, la arquitectura *backend-frontend* y la visualización interactiva entregan una base clara y extensible para el desarrollo futuro del simulador. Si bien la versión actual corresponde a un simulador simple pero funcional, su estructura modular permite incorporar progresivamente nuevas capacidades, como un modelamiento más detallado del consumo de combustible, nuevas estrategias de despacho o análisis económicos. En conjunto, este trabajo sienta las bases para una herramienta con alto potencial de mejora, orientada al análisis operacional y a la comprensión del impacto que las decisiones de diseño tienen sobre la producción del sistema.

6.1 Recomendaciones y trabajo futuro

Como proyección del presente trabajo, se recomienda extender el simulador desarrollado con el fin de representar configuraciones operacionales de mayor complejidad. En particular, la incorporación de múltiples palas y puntos de carga permitiría modelar sistemas de transporte más cercanos a operaciones reales de gran escala, ampliando el alcance del análisis y la aplicabilidad del modelo.

Asimismo, resulta relevante implementar más estrategias de despacho dinámico de camiones, tales como reglas basadas en tiempos o en el balance de colas entre puntos de servicio. La inclusión de este tipo de lógicas permitiría evaluar su impacto sobre la producción del sistema y comparar distintos criterios de asignación de flota bajo un mismo marco de simulación.

En cuanto al manejo de datos operacionales, se recomienda implementar mecanismos de importación y exportación mediante planillas Excel, junto con la extensión del plan de producción a un horizonte de múltiples días. Estas mejoras permitirían integrar el simulador con las herramientas de planificación utilizadas habitualmente en la industria minera, ampliando su utilidad como apoyo a la toma de decisiones de mediano plazo.

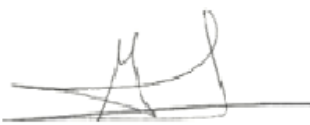
Otra línea de trabajo futuro corresponde a la integración de datos operacionales reales para la calibración y validación del modelo, lo que permitiría mejorar la precisión de los resultados obtenidos y fortalecer la aplicabilidad del simulador en contextos industriales. Finalmente, se propone ampliar el conjunto de indicadores de desempeño actualmente considerados, incorporando métricas asociadas al consumo de combustible, emisiones y costos operacionales, con el objetivo de extender el uso del simulador hacia análisis económicos y de sostenibilidad.

7 Referencias

- [1] P. Darling, *SME mining engineering handbook*, 3rd ed. Society for Mining, Metallurgy & Exploration, 2011.
- [2] Y. Zhang, Z. Zhao, L. Bi, L. Wang, and Q. Gu, "Determination of truck–shovel configuration of open-pit mine: A simulation method based on mathematical model," *Sustainability*, vol. 14, no. 19, p. 12338, 2022, Accessed: Feb. 06, 2026. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/19/12338>
- [3] D. M. Bajany, L. Zhang, and X. Xia, "An Optimization Approach for Shovel Allocation to Minimize Fuel Consumption in Open-pit Mines: Case of Heterogeneous Fleet of Shovels.," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 14, pp. 207–212, 2019, doi: 10.1016/j.ifacol.2019.09.196.
- [4] E. Kaungu, J. Githiria, S. Mutua, and D. Mauti, "Optimisation of shovel-truck haulage system in an open pit using queuing approach," *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 14, no. 11, p. 973, Jun. 2021, doi: 10.1007/s12517-021-07365-z.
- [5] R. J. Thompson and A. T. Visser, "The functional design of surface mine haul roads," *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 100, no. 3, pp. 169–180, 2000, Accessed: Feb. 06, 2026. [Online]. Available: https://hdl.handle.net/10520/AJA0038223X_2568
- [6] Codelco Norte, "Tiempos e indicadores claves," 2005.
- [7] Vicepresidencia de Gestión de Recursos Mineros y Desarrollo, "Manual: Modelo de clasificación de tiempos fase mina," 2022.
- [8] J. Banks, J. S. Carson II, B. L. Nelson, and D. M. Nicol, *Discrete-event system simulation*, 5th ed. Prentice Hall, 2010.
- [9] A. M. Law and W. David. Kelton, *Simulation modeling and analysis*, 3rd ed. McGraw-Hill, 2000.
- [10] L. M. S. Dias, A. A. C. Vieira, G. A. B. Pereira, and J. A. Oliveira, "Discrete simulation software ranking — A top list of the worldwide most popular and used tools," in *2016 Winter Simulation Conference (WSC)*, IEEE, Dec. 2016, pp. 1060–1071. doi: 10.1109/WSC.2016.7822165.
- [11] "ProModel Simulation Software," ProModel Corporation. Accessed: Mar. 14, 2026. [Online]. Available: <https://www.promodel.com>
- [12] "Arena Simulation Software," Rockwell Automation. Accessed: Mar. 14, 2026. [Online]. Available: <https://www.rockwellautomation.com/en-us/products/software/arena-simulation.html>

- [13] "FlexSim Simulation Software," FlexSim Software Products. Accessed: Mar. 14, 2026. [Online]. Available: <https://www.flexsim.com>
- [14] "HaulSim - Discrete Event Simulation Software," RPM Global. Accessed: Mar. 14, 2026. [Online]. Available: <https://rpmglobal.com/product/haulsim/>
- [15] Laboratorio DELPHOS, "DSim - Manual de usuario," Universidad de Chile. Accessed: Mar. 16, 2026. [Online]. Available: <https://delphoslab.cl/index.php/software-es/manuales/221-manual-dsim>
- [16] "AnyLogic Simulation Software," The AnyLogic Company. Accessed: Mar. 14, 2026. [Online]. Available: <https://www.anylogic.com>
- [17] N. Dendle, E. Isokangas, and P. Corry, "Efficient simulation for an open-pit mine," *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 117, p. 102473, May 2022, doi: 10.1016/j.simpat.2021.102473.
- [18] E. Yilmaz and M. Erkayaoglu, "A Discrete Event Simulation and Data-Based Framework for Equipment Performance Evaluation in Underground Coal Mining," *Min. Metall. Explor.*, vol. 38, no. 5, pp. 1877–1891, Oct. 2021, doi: 10.1007/s42461-021-00455-2.
- [19] D. Huayanca, G. Bujaico, and A. Delgado, "Application of Discrete-Event Simulation for Truck Fleet Estimation at an Open-Pit Copper Mine in Peru," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 7, p. 4093, Mar. 2023, doi: 10.3390/app13074093.
- [20] H. Lee and S. Kim, "Optimum Equipment Allocation Under Discrete Event Simulation for an Efficient Quarry Mining Process," *Processes*, vol. 13, no. 7, p. 2215, Jul. 2025, doi: 10.3390/pr13072215.
- [21] G. S. Fishman, *Monte Carlo : concepts, algorithms, and applications*. Springer, 2003.
- [22] R. Y. Rubinstein and D. P. Kroese, *Simulation and the Monte Carlo method*, 3rd ed. Wiley, 2017.
- [23] N. Matloff, "Introduction to discrete-event simulation and the SimPy language," University of California, Davis. Accessed: Feb. 06, 2026. [Online]. Available: <https://heather.cs.ucdavis.edu/~matloff/156/PLN/DESIntro.pdf>
- [24] Adelinde Uhrmacher and Danny Weyns, *Multi-agent systems : simulation and applications*. CRC Press/Taylor & Francis, 2009.
- [25] C. Cubukcuoglu, P. Nourian, I. S. Sariyildiz, and M. F. Tasgetiren, "A discrete event simulation procedure for validating programs of requirements: The case of hospital space planning," *SoftwareX*, vol. 12, p. 100539, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.softx.2020.100539.

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN - FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
Hoja Resumen Memoria de Título

Título: Desarrollo de un simulador de eventos discretos para el análisis del sistema de carguío y transporte en minería a cielo abierto		
Nombre Memorista: Cristóbal Marcell Hernández Carrillo		
Modalidad	Investigación	Profesor (es) Patrocinante (s)
Concepto	EXCELENTE	 Prof ^a . Asieh Hekmat
Calificación	6.8	
Fecha	01.04.2026	
 Prof. Ramón Díaz N.		Ingeniero Supervisor:
		Institución: Universidad de Concepción
Comisión (Nombre y Firma)		
 Prof. Roberto Fustos T.		
Resumen		
En este trabajo se desarrolla e implementa un simulador de eventos discretos orientado al análisis del sistema de carguío y transporte en minería a cielo abierto, como primera versión funcional del modelo. El problema abordado corresponde a la dificultad de analizar el comportamiento dinámico de este sistema, en el cual la interacción entre camiones y puntos de servicio, la formación de colas y las restricciones de capacidad influyen directamente en la producción. La herramienta se basa en una arquitectura <i>backend–frontend</i>, el <i>backend</i> implementa la lógica de simulación mediante Python y SimPy, mientras que el <i>frontend</i> proporciona una interfaz gráfica tridimensional interactiva. Esta separación desacopla el cálculo de la visualización, facilitando la construcción de escenarios y la interpretación de resultados. El simulador permite realizar análisis del tipo "qué pasaría si", evaluando cómo variaciones en parámetros operacionales como velocidades de transporte, tiempos de carga y descarga,		

configuración de rutas y tamaño de flota afectan el tiempo de ciclo y la producción total. Como salida, entrega indicadores claves de desempeño: producción total, toneladas por hora, tiempos de ciclo y tiempos de espera, permitiendo identificar cuellos de botella operacionales. Adicionalmente, incorpora simulación Monte Carlo mediante distribuciones probabilísticas y múltiples réplicas independientes, lo que permite analizar tanto el comportamiento promedio del sistema como su dispersión frente a la incertidumbre operacional.

Finalmente, se verificó que los resultados presentan tendencias coherentes al compararlos con casos en Excel y el software ProModel, respaldando la consistencia del modelo. El trabajo sienta las bases para una herramienta con alto potencial de desarrollo futuro, orientada al apoyo a la toma de decisiones en sistemas de carguío y transporte minero.